



28 de agosto de 2024

Sra. María Rojas Corradi
 Ministra del Medio Ambiente
 Ministerio del Medio Ambiente de Chile
 San Martín 73, Santiago, Chile

Estimada Ministra Rojas Corradi,

- 1 Por medio de la presente, respetuosamente, nos dirigimos a usted en nombre del Instituto para la Gobernanza & el Desarrollo Sostenible (Institute for Governance & Sustainable Development o IGSD por sus siglas en inglés) para expresar nuestro interés en contribuir al proceso de actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile. Conforme a lo dispuesto en el artículo 4° del Acuerdo de París, la NDC tiene por objeto comunicar los compromisos del país ante la comunidad internacional para mitigar internamente las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) con el objetivo de mantener la temperatura media mundial muy por debajo de los 2°C con respecto a los niveles preindustriales y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de temperatura a 1,5°C.
- 2 Conforme a lo dispuesto por la Resolución Exenta 2579 de 10 de julio de 2024 del Ministerio del Medio Ambiente, publicada con fecha 23 de julio de 2024 en el Diario Oficial, en su resuelvo tercero, se fija un plazo de 30 días hábiles contados desde la publicación de dicha resolución para la recepción de antecedentes sobre los contenidos de la NDC. Conforme a la citada resolución, cualquier persona o agrupación de personas podrá, dentro del plazo señalado, acompañar antecedentes técnicos, científicos, ambientales, sociales y/o económicos que estime relevantes para la adecuada actualización del instrumento.
- 3 En el marco de dicho procedimiento de participación pública, IGSD viene dentro del plazo indicado a acompañar los siguientes antecedentes.

ACERCA DE IGSD

- 4 El Instituto para la Gobernanza y el Desarrollo Sostenible fue fundado en 2003 en los Estados Unidos. IGSD es una organización no gubernamental sin fines de lucro cuya misión es aumentar la resiliencia acelerando las medidas de mitigación del cambio climático para frenar la tasa de calentamiento a corto plazo y ralentizar la activación de procesos de retroalimentación climática, evitar sobrepasar puntos críticos de inflexión catastróficos para el clima y la sociedad, y limitar la temperatura mundial a 1,5°C, o al menos mantener controlado este límite.
- 5 El enfoque del IGSD para una mitigación rápida abarca los ámbitos de la ciencia, el derecho, la política pública y la financiación climática. IGSD trabaja a escala mundial, regional,

Washington DC office: 5800 MacArthur Blvd NW • Washington DC • 20016 • Ph: +1.202.338.1300

Paris office: 51 Rue Saint-Louis en l'Île, Suite 22 • Paris • 75004 • Ph: +33.6.87.69.00.44

Email: info@igsd.org • Website: www.igsd.org

nacional y subnacional. En este sentido el Instituto colabora con líderes científicos e instituciones académicas para realizar investigaciones, diseñar y promover políticas destinadas a frenar el calentamiento global mediante estrategias para controlar los supercontaminantes climáticos de vida corta (CCVC), mejorar la eficiencia energética y proteger los sumideros de carbono. Por ejemplo, el equipo de IGSD, integrado por expertos en ciencias, políticas públicas y leyes, colabora activamente con la Organización de Naciones Unidas y especialmente con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), además de la Coalición por el Clima y el Aire Limpio para Reducir Contaminantes Climáticos de Vida Corta de PNUMA (CCAC) en la que Chile también forma parte. Adicionalmente, IGSD elabora regularmente informes científicos sobre metano y el resto de los CCVC para su diseminación científica y utilización en la elaboración de políticas públicas alrededor del mundo.

- 6 Como organización no gubernamental dedicada a la protección de los derechos humanos y el ambiente, promoviendo la toma de decisiones basadas en la mejor ciencia climática disponible, IGSD ha seguido de cerca los procesos legales de actualización de las NDC. En este sentido, IGSD tiene especial interés en participar y apoyar los procesos de actualización, pues representan una oportunidad única para asegurar la toma de acciones rápidas de mitigación del metano y otros CCVC, reduciendo el calentamiento global en el corto plazo, en beneficio de las generaciones presentes y futuras.
- 7 Conteste con el IPCC, las últimas investigaciones del IGSD muestran que la descarbonización por sí sola no basta para frenar el calentamiento a corto plazo y mantenernos por debajo de 1,5°C o incluso del límite más peligroso de 2°C. Asimismo, concluyen que la estrategia más rápida y eficaz es combinar los esfuerzos de reducir las emisiones de CO₂ mediante principalmente la descarbonización del sistema energético, con acciones para reducir rápidamente los supercontaminantes climáticos distintos del CO₂ y proteger los sumideros de carbono. Los supercontaminantes climáticos son cuatro: metano (CH₄), carbono (hollín) negro, ozono troposférico (O₃) e hidrofluorocarbonos (HFC)—así como el óxido nitroso (N₂O) de vida más larga.
- 8 Combinar el sprint de la mitigación rápida con los esfuerzos acelerados de la descarbonización ayudaría a abordar las cuestiones éticas de la equidad intra e intergeneracional, concediendo a las sociedades el tiempo que necesitan para adaptarse urgentemente a los cambios inevitables y crear resiliencia. Los últimos datos científicos sugieren que la ventana para superar el límite de seguridad de 1,5°C podría cerrarse tan pronto como a principios de la década de 2030, por lo que esta es la década decisiva para actuar con rapidez para frenar el calentamiento. En este contexto la acción del IGSD se basa en la urgencia de responder rápida y eficazmente para evitar daños irreversibles en el sistema climático con consecuencias catastróficas para todos.
- 9 La forma más rápida de reducir el calentamiento a corto plazo en la próxima década es reducir los CCVC. Dado que sólo permanecen en la atmósfera por un plazo que va de días a 15 años, su reducción evitará el 90% del calentamiento previsto en una década. Las estrategias dirigidas a reducir los CCVC pueden evitar cuatro veces más calentamiento en 2050 que las dirigidas únicamente al CO₂. Por ejemplo, la reducción de las emisiones de metano puede evitar casi 0,3°C en la década de 2040, con la posibilidad de evitar un

calentamiento significativo gracias a las tecnologías emergentes para eliminar el metano atmosférico más rápidamente que su ciclo natural. Resulta oportuno destacar que la reducción de CCVC es esencial y complementaria a las reducciones de CO₂. La primera es la única manera de frenar la tasa de calentamiento a corto plazo y con ello proteger a los más vulnerable. La segunda es esencial para estabilizar el clima a largo plazo. Es preciso actuar simultáneamente en ambos frentes CCVC y CO₂.

ANTECEDENTES ADJUNTOS

- 10 Valoramos profundamente las iniciativas que el Ministerio del Medio Ambiente ha emprendido para abordar la emergencia climática y reconocemos la urgencia de fortalecer las medidas de mitigación y adaptación para cumplir con las metas establecidas en el Acuerdo de París. Con el propósito de apoyar este proceso, nos permitimos adjuntar dos documentos clave que consideramos de gran relevancia para la actualización de la NDC de Chile. Es por ello que nos permitimos adjuntar a la presente argumentos científicos y jurídicos sobre el rol del metano, CCVCs y el CO₂ en la emergencia climática, acompañando dos de los últimos reportes elaborados por el IGSD, que resumen la mejor ciencia disponible en cambio climático que demuestra la importancia de de que el Ministerio del Medio Ambiente de Chile reconozca e incorpore compromisos asociados a la reducción del metano y el resto de los supercontaminantes climáticos de vida corta. Chile fue pionero en la incorporación de carbono negro, una vez más tiene la posibilidad de liderar la inclusión de los demás CCVCs de manera ambiciosa en la actualización de NDC.
- 11 **Claves Científicas sobre la Emergencia Climática:** Este documento proporciona un análisis exhaustivo de la ciencia climática actual, destacando los principales desafíos y oportunidades que enfrenta el mundo—y Chile—en el contexto de la crisis climática. Se hace especial énfasis en la necesidad de implementar medidas basadas en la mejor evidencia científica disponible para reducir las emisiones de GEI y aumentar la resiliencia climática. Entre las recomendaciones presentadas, se subraya la importancia de abordar de manera integral las emisiones de CCVC, como el metano, que representan una oportunidad crítica para lograr reducciones de emisiones rápidas y efectivas para ralentizar la tasa de calentamiento en el corto plazo.
- 12 **Manual sobre la Reducción del Metano:** Este manual ofrece una guía práctica y detallada sobre las estrategias más efectivas para la reducción de emisiones de metano, basadas en experiencias internacionales exitosas y adaptables al contexto chileno. El metano, como un potente gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 86 veces mayor que el del CO₂ a 20 años, presenta una oportunidad única para realizar avances significativos en la mitigación del cambio climático en el corto plazo. El documento abarca una variedad de sectores clave, incluyendo la agricultura, los residuos y la energía, proporcionando recomendaciones concretas para la implementación de políticas públicas y tecnologías innovadoras que pueden ser integradas en la NDC de Chile.

CONTRIBUCIÓN A LA ACTUALIZACIÓN DE LA NDC

- 13 Los documentos adjuntos pueden desempeñar un rol esencial en la actualización de la NDC de Chile al proporcionar:

DC office: 2300 Wisconsin Ave. NW • Suite 300-B • Washington DC • 20007 • Ph: +1.202.338.1300

Paris office: 51 Rue Saint-Louis en l'Île • Suite 22 • Paris • 75004 • Ph: +33.6.87.69.00.44

Email: info@igsd.org • Website: www.igsd.org

- **Evidencia científica actualizada** que respalde la necesidad de incluir objetivos más ambiciosos para la reducción de emisiones de metano y otros super contaminantes de corta vida.
 - **Recomendaciones específicas** sobre políticas y medidas tecnológicas que han demostrado ser eficaces en otros contextos y que pueden ser adaptadas al marco regulatorio y las circunstancias nacionales de Chile.
 - **Lineamientos para una implementación práctica**, destacando cómo la reducción del metano puede contribuir a un enfoque integrado de mitigación que maximice los beneficios climáticos, al mismo tiempo que promueve el desarrollo sostenible y la protección de la salud pública.
- 14 Consideramos que la incorporación de estas recomendaciones fortalecerá significativamente el marco de la NDC chilena, permitiendo no solo cumplir con las obligaciones internacionales, sino también posicionando a Chile como un líder en la acción climática a nivel global. Adicionalmente, recomendamos revisar publicaciones adicionales del IGSD sobre los últimos avances de la ciencia climática, que podrían resultar de utilidad en el proceso de actualización de la NDC, disponibles en el siguiente enlace: <https://www.igsd.org/publications-library/>. Asimismo, resulta oportuno destacar la serie de informes de la CCAC de PNUMA del cual Chile y IGSD forman parte, especialmente las guías para el proceso de actualización de los NDC, disponibles en el siguiente enlace: <https://www.ccacoalition.org/resources>.
- 15 Agradecemos de antemano su atención a nuestra presentación y quedamos a su disposición para colaborar en cualquier etapa de este proceso. Para ello, designamos como punto de contacto a Romina Picolotti (rpicolotti@gmail.com) y Sebastián Luengo (sluengo@igsd.org).
- 16 Estamos seguros de que, con un enfoque holístico, basado en la ciencia, y comprometiendo medidas para regular los supercontaminantes climáticos de vida corta podremos avanzar de manera efectiva hacia un futuro más seguro y sostenible.

Reciba un cordial saludo,



Durwood Zaelke

Presidente

Institute for Governance & Sustainable Development

Anexos:

- 1 Institute for Governance & Sustainable Development, *Claves Científicas sobre la Emergencia Climática* (2024)
- 2 Institute for Governance & Sustainable Development, *Manual sobre la Reducción del Metano: La Mejor Estrategia para Frenar el Calentamiento en la Década de 2030* (2023)
- 3 Institute for Governance & Sustainable Development, *Primer on Cutting Methane: The Best Strategy for Slowing Warming in the Decade to 2030* (2024) (Versión actualizada, únicamente disponible en inglés)

Claves Científicas sobre la Emergencia Climática

7 de Mayo 2024



Institute for Governance & Sustainable Development

Tabla de Contenidos

Glosario.....	i
I. Resumen	1
II. La Emergencia Climática Global.....	2
A. Temperatura, Puntos Críticos de Inflexión y Tiempo.....	2
B. El Presupuesto de Carbono	4
C. Amenaza Existencial de 1,5°C a 2°C en el Futuro	4
III. Abordar la Emergencia Climática.....	6
A. Maratón: La Descarbonización Es Crucial Pero No Puede Frenar El Calentamiento a Corto Plazo Ni Evitar Impactos Abruptos No Lineales.....	6
B. El Sprint: Reducir los Supercontaminantes Climáticos y Aplicar Soluciones Basadas en la Naturaleza Puede Frenar Rápidamente el Calentamiento a Corto Plazo	7
IV. Las Causas Humanas del Cambio Climático.....	8
A. Causas Globales del Cambio Climático.....	8
B. Causas del Cambio Climático en las Américas	9
C. Descripción General de los Supercontaminantes Climáticos por Sector.....	12
<i>i. Energía.....</i>	<i>12</i>
<i>ii. Transporte.....</i>	<i>12</i>
<i>iii. Agricultura.....</i>	<i>13</i>
<i>iv. Residuos.....</i>	<i>13</i>
<i>v. Refrigeración</i>	<i>14</i>
D. La Contribución de la Deforestación y del Uso de la Tierra al Cambio Climático	15
E. La Contribución de la Destrucción de los Sumideros Oceánicos al Cambio Climático....	16
V. Impactos Climáticos en las Américas	18
A. Resumen de Impactos en América Latina y el Caribe	20
B. Resumen de Impactos en EE.UU. y Canadá.....	21
C. Impactos del Cambio Climático en la Economía y la Salud.....	22
D. Las Implicancias de la Vulnerabilidad en LAC	24
VI. Soluciones en las Americas para Abordar la Emergencia Climática	27
A. Acciones Sectoriales Específicas para Mitigar Inmediata y Sustancialmente los Supercontaminantes Climáticos y Lograr la Descarbonización en LAC.....	27
B. Acciones Sectoriales Específicas para Mitigar Inmediata y Sustancialmente los Supercontaminantes Climáticos y Lograr la Descarbonización en Estados Unidos y Canadá.....	29
C. Proteger y Restaurar los Sumideros de Carbono en las Américas.....	32
D. La Mitigación Efectiva del CO ₂ y los Supercontaminantes Climáticos Es Fundamental para Dar Tiempo a LAC a Adaptarse, Crear Resiliencia y Proteger los Derechos	34

Anexo A: Impactos Detallados en las Americas.....	35
A. Cambios en el Clima y Fenómenos Meteorológicos Extremos	35
B. Océanos y Zonas Costeras	37
C. Glaciares y Montañas.....	39
Annex B: El Cambio Climático en Cifras: Emisiones, Impactos, Soluciones y Beneficios ...	41
A. La Necesidad de Actuar Rápidamente Contra los Supercontaminantes Climáticos.....	41
B. Puntos de Inflexión Climáticos	42
C. Fuentes de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.....	44
D. Ejemplos de Medidas de Mitigación de Supercontaminantes Climáticos	46
E. Beneficios Colaterales de la Mitigación	47
F. Riesgos y Vulnerabilidades Climáticas en LAC.....	48
G. La Adaptación al Cambio Climático en Cifras	53
H. Videos (en inglés)	55
Referencias.....	56

Tabla de Figuras, Cuadros y Recuadros

Figura 1. Puntos Críticos de Inflexión Climáticos.....	6
Figura 2. Principales Fuentes de Emisiones Mundiales de GEI	8
Figura 3. Principales Fuentes de GEI en LAC.....	10
Figura 4. Principales Fuentes de Emisiones de GEI en Canadá	10
Figura 5. Principales Fuentes de Emisiones de GEI en EE.UU.....	11
Cuadro 1. Resumen de Impactos Climáticos	18
Recuadro 1. Acciones Clave de Mitigación de los CCVC en LAC.....	28
Recuadro 2. Acciones Clave de Mitigación de los CCVC en EE.UU. y Canadá	30
Recuadro 3. Acciones Clave para Proteger y Restaurar los Sumideros de Carbono en las Américas	32

El presente informe fue traducido al español por María Candela Conforti.

GLOSARIO

Acrónimos

- IE6** El Sexto Ciclo de Evaluación del IPCC consta de un informe de evaluación de cuatro partes (IE6) con tres informes de grupos de trabajo y un informe de síntesis (SYR, por sus siglas en inglés), y varios informes especiales. El IE6 es la evaluación más reciente publicada por el IPCC sobre la ciencia del cambio climático, los impactos y las estrategias de mitigación.
- Informe Especial 15 del IE6** Informe Especial sobre el Calentamiento Global de 1,5°C elaborado por autores de los tres grupos de trabajo de la Sexta Evaluación del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 grados centígrados con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza (publicado en octubre de 2018).
El primer borrador se sometió a la revisión de expertos entre el 31 de julio y el 24 de septiembre de 2017; el segundo borrador se sometió a la revisión de expertos y gobiernos entre el 8 de enero y el 25 de febrero de 2018 y el borrador final se sometió a la revisión final entre el 4 de junio y el 29 de julio de 2018. La fecha límite de presentación de la bibliografía fue el 1 de noviembre de 2017.
- IE6 SRCCL** Informe Especial sobre el Cambio Climático y la Tierra elaborado por autores de los tres grupos de trabajo de la Sexta Evaluación del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres (publicado en agosto de 2019).
El primer borrador se sometió a la revisión de expertos entre el 11 de junio y el 5 de agosto de 2018; el segundo borrador se sometió a la revisión de expertos y gobiernos entre el 19 de noviembre de 2018 y el 14 de enero de 2019 y el borrador final se sometió a la revisión final entre el 29 de abril y el 19 de junio de 2019. La fecha límite de presentación de la bibliografía fue el 28 de octubre de 2018.
- IE6 SROCC** Informe Especial sobre los Océanos y la Criósfera en un Clima Cambiante elaborado por autores de los tres grupos de trabajo de la Sexta Evaluación del IPCC sobre cómo el océano y la criósfera han cambiado y se espera que cambien con el calentamiento global en curso, los riesgos y oportunidades que estos cambios conllevan para los ecosistemas y las personas, y las opciones de mitigación, adaptación y gobernanza para reducir los riesgos futuros (publicado en septiembre de 2019).
El primer borrador se sometió a la revisión de expertos entre el 4 de mayo y el 29 de junio de 2018; el segundo borrador se sometió a la revisión de expertos y gobiernos entre el 16 de noviembre de 2018 y el 11 de enero de 2019 y el borrador final se sometió a la revisión final entre el 14 de junio y el 9 de agosto de 2019. La fecha límite de presentación de bibliografía fue el 15 de octubre de 2018.
- IE6 SYR** Informe de Síntesis de la Sexta Evaluación del IPCC (publicado en marzo de 2023). El Grupo del IPCC aprobó el borrador del anteproyecto durante su 52ª Sesión, celebrada entre el 24 y el 28 de febrero de 2020. Este informe se sometió a un amplio proceso de revisión y negociación con los gobiernos y las organizaciones observadoras.

IE6 GT1	<p>Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del IPCC sobre las bases científicas (publicado en agosto de 2021).</p> <p>El primer borrador se sometió a la revisión de expertos entre el 29 de abril y el 23 de abril de 2019; el segundo borrador se sometió a la revisión de expertos y gobiernos entre el 2 de marzo y el 5 de junio de 2020 y el borrador final se sometió a la revisión final entre el 4 de mayo y el 20 de junio de 2021. La fecha límite para la presentación de la bibliografía fue el 31 de enero de 2021.</p>
IE6 GT2	<p>Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del IPCC sobre impactos, adaptación y vulnerabilidad (publicado en febrero de 2022).</p> <p>El primer borrador se sometió a la revisión de expertos entre el 18 de octubre y el 13 de diciembre de 2019; el segundo borrador se sometió a la revisión de expertos y gobiernos entre el 4 de diciembre de 2020 y el 29 de enero de 2021 y el borrador final se sometió a la revisión final entre el 1 de octubre y el 26 de noviembre de 2021. La fecha límite para la presentación de la bibliografía fue el 1 de noviembre de 2020.</p>
IE6 GT3	<p>Contribución del Grupo de Trabajo III al Sexto Informe de Evaluación del IPCC sobre las estrategias de mitigación y su potencial (publicado en abril de 2022).</p> <p>El primer borrador se sometió a la revisión de expertos entre el 13 de enero y el 8 de marzo de 2020; el segundo borrador se sometió a la revisión de expertos y gobiernos entre el 18 de enero y el 14 de marzo de 2021 y el borrador final se sometió a la revisión final entre el 29 de noviembre de 2021 y el 30 de enero de 2022. La fecha límite para la presentación de la bibliografía fue el 14 de diciembre de 2020.</p>
CH₄	Metano
CO₂	Dióxido de Carbono
GEI	Gases de efecto invernadero
PCG	Potencial de calentamiento global
HFC	Hidrofluorocarbonos
CtIDH	Corte Interamericana de Derechos Humanos
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
LAC	Latinoamérica y el Caribe
LULUCF	Uso de la tierra, cambios en el uso de la tierra y silvicultura
N₂O	Óxido nitroso
O₃	Ozono troposférico
REDD+	Reducción de las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación de los bosques en los países en desarrollo

Términos

Límite de Seguridad de 1,5°C	El consenso científico afirma que limitar el aumento de la temperatura global a un máximo de 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales es la única manera de evitar los impactos más graves del cambio climático, frenar los bucles de retroalimentación que se autoperpetúan y evitar, o al menos retrasar, puntos críticos de inflexión irreversibles. Limitar el calentamiento global a un máximo de 1,5 °C requiere reducir los contaminantes climáticos de vida corta no CO ₂ y CO ₂ , así como proteger los sumideros de carbono existentes.
Forestación	Plantación de nuevos bosques en tierras que históricamente no han contenido bosques.
Neutralidad en carbono	<i>Véase</i> emisiones netas iguales a cero. Puede referirse a las emisiones netas de CO ₂ o de GEI iguales a cero, lo que a menudo se denomina neutralidad climática. La neutralidad en carbono no frena el ritmo de calentamiento a corto plazo a menos que también incluya una reducción sustancial del metano.
Sumidero de carbono	Cualquier cosa que absorba más dióxido de carbono del que emita (es decir, remueve y almacena dióxido de carbono de la atmósfera). Ejemplos de sumideros de carbono naturales incluyen océanos, bosques, turberas, manglares, praderas marinas, bosques de algas, marismas y pantanos.
Fuente de carbono	Cualquier cosa que libere más dióxido de carbono del que absorba. Ejemplos de fuentes de carbono son las emisiones asociadas con la extracción y combustión de combustibles fósiles y la deforestación.
Fuente de metano	Cualquier cosa que libere más metano del que absorba. En un periodo de 20 años, el metano es 80 veces más potente que el CO ₂ para calentar el planeta. Por lo tanto, las fuentes de metano tienen un fuerte impacto en la temperatura del planeta a corto plazo. Entre los ejemplos de fuentes de metano se incluyen el venteo de gas en los yacimientos petrolíferos y las fugas en los gasoductos, la descomposición de los residuos orgánicos en condiciones de poco oxígeno y la fermentación entérica del ganado.
Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)	El IPCC fue creado en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), y aprobado por Resolución de la Asamblea General de la ONU en 1988 . El IPCC elabora revisiones y recomendaciones integrales con respecto al estado actual de los conocimientos sobre el cambio climático y sus posibles impactos ambientales y socioeconómicos. Desde su concepción, el IPCC ha elaborado seis Informes de Evaluación. Los autores y revisores del IPCC son voluntarios seleccionados bajo un proceso establecido. Actualmente el IPCC cuenta con 195 miembros. Los informes se someten a procesos de revisión interactivos para su comentario y revisión antes de su publicación final. El Resumen para Responsables de Políticas es negociado por los gobiernos antes de su publicación. Es importante destacar que debido al proceso establecido, los informes del IPCC no reflejan los últimos datos científicos. Todos los informes del IPCC se someten a dos etapas de revisión. Un Primer Borrador se somete a la revisión de los expertos. Tras dicha revisión, los autores elaboran un Segundo Borrador basado en los comentarios recibidos. A continuación, este borrador se somete a una segunda revisión por parte de los gobiernos y los expertos. Los autores elaboran un Borrador Final basado en los comentarios recibidos durante la segunda revisión. El Borrador

Final se distribuye a los gobiernos en la etapa de la revisión gubernamental final del Resumen para Responsables de Políticas. Nótese que la fecha límite para la presentación de la bibliografía suele ser un mes antes de la revisión del Segundo Borrador, que suele ocurrir al menos un año antes de la publicación de la versión final. En el momento de la publicación, el análisis está como mínimo un año desfasado. En el caso del Informe de Síntesis, que integra las principales conclusiones de los informes de los tres grupos de trabajo, el análisis lleva varios años desfasado, ya que no refleja los nuevos datos científicos desde la publicación de los informes de los Grupos de Trabajo.

Carbono irre recuperable

Reservas de carbono en sistemas naturales que “son potencialmente vulnerables a la liberación por la actividad humana y que, de perderse, no podrían ser restaurados para el 2050”¹

Impactos lineales vs. no lineales

Los impactos lineales aumentan aproximadamente en proporción al aumento del calentamiento, es decir, se escalonan con el calentamiento: un poco más de calentamiento provoca un poco más de impacto.

Los impactos no lineales son diferentes: un poco más de calentamiento puede desencadenar retroalimentaciones que se auto-amplifican y son desproporcionadas con respecto al calentamiento extra, y también puede empujar a los sistemas climáticos regionales o globales hacia puntos críticos de inflexión que provoquen un cambio de estado. Estos cambios pueden producirse de forma abrupta y ser irreversibles, como si se cayera por un precipicio. Nótese que en el caso de algunos puntos críticos de inflexión que se desencadenan a una temperatura determinada, los efectos pueden prolongarse durante décadas e incluso siglos. Por ejemplo, cuando el calentamiento supere los 1,6 °C durante varios años, el manto de hielo de Groenlandia se derretirá de forma irreversible. Si toda Groenlandia se derritiera, contribuiría a elevar el nivel del mar entre 5 y 7 metros a lo largo de siglos o milenios. Los impactos no lineales, como los puntos críticos de inflexión, no suelen estar bien representados en los modelos climáticos ni en los modelos económicos utilizados para evaluar los riesgos del cambio climático. La *aceleración del ritmo de calentamiento* puede desencadenar los puntos críticos de inflexión antes de lo previsto.

Emisiones netas iguales a cero vs. Cero emisiones

Las emisiones netas iguales a cero se consiguen cuando las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero que se liberan en la atmósfera se equilibran mediante las absorciones en un periodo específico. Cuando se miden varios gases, la cuantificación de las emisiones depende de los parámetros climáticos utilizados (por ej., el potencial de calentamiento global, el potencial de cambio en la temperatura global) así como del plazo elegido. Por el contrario, “cero emisiones” significa que no hay emisión de GEI, sin compensación por la remoción de dióxido de carbono o de GEI. A diferencia de las emisiones netas iguales a cero, que sólo requieren que cualquier emisión antropogénica emitida se equilibre con la eliminación de una cantidad igual de gases de efecto invernadero antropogénicos de la atmósfera, el concepto de cero emisiones requiere que no se emita ningún gas de efecto invernadero antropogénico.

Sobrepaso

Calentamiento global que supera temporalmente los 1,5°C por encima de los niveles preindustriales. Incluso en caso de sobrepaso, algunos impactos podrían ser irreversibles, aun cuando se logre reducir el calentamiento global.

El IE6 del IPCC define el calentamiento global como el aumento estimado de la temperatura media global en superficie promediada durante el último decenio en

comparación con las condiciones preindustriales (1,20°C entre 2014 y 2023²), mientras que el SR1.5 define el calentamiento global como “el calentamiento promedio de un período de 30 años en el que se toma como referencia el año actual, en el supuesto de que continúe el ritmo actual de calentamiento”³.

Según la Oficina Meteorológica del Reino Unido, es “más probable que improbable” que la temperatura global anual supere los 1,5 °C durante al menos un año entre 2023 y 2027⁴.

Acuerdo de París

El [Acuerdo de París](#) es un tratado internacional sobre cambio climático adoptado por 196 Partes en el marco de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (COP21) en París, Francia, el 12 de diciembre de 2015. Entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. Su objetivo es mantener “el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales” y proseguir los esfuerzos “para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5°C con respecto a los niveles preindustriales”. Para ello, permite a las partes establecer sus propias “contribuciones determinadas a nivel nacional” para la mitigación climática.

Proforestación

La práctica de permitir el crecimiento continuo de los bosques, preservar los bosques maduros y permitir que los bosques se regeneren sin intervención humana para alcanzar todo su potencial ecológico de secuestro máximo de carbono. Las estrategias de proforestación incluyen la prevención de la tala y la gestión forestal activa.

Reforestación

La práctica de repoblar un bosque existente mediante la plantación de nuevos ejemplares.

Retroalimentaciones que se autoperpetúan

También referidas como “retroalimentaciones positivas” o “retroalimentaciones que se refuerzan a sí mismas”, describen condiciones en las que una perturbación en una magnitud climática se amplifica por los cambios que esta provoca en una relación circular de causa y efecto. En el contexto climático, las retroalimentaciones que se autoperpetúan causan un calentamiento adicional más allá del calentamiento inicial (por ejemplo, la pérdida de hielo marino en el Ártico reduce la reflectividad, lo que a su vez aumenta el calentamiento, que entonces provoca que se derrita más hielo marino), creando un bucle por el cual el planeta se calienta cada vez más.

Contaminantes climáticos de vida corta (CCVC), o “super contaminantes”

Los CCVC son contaminantes distintos del CO₂ que tienen una vida atmosférica relativamente corta pero que son más potentes que el CO₂ para calentar el planeta. Entre los CCVC se encuentran el **metano**, un potente gas de efecto invernadero; el **ozono troposférico**, un gas de efecto invernadero y contaminante secundario formado por la interacción de la luz solar con los óxidos de nitrógeno, los compuestos orgánicos volátiles; los **hidrofluorocarbonos**, potentes gases de efecto invernadero que sustituyen a los clorofluorocarbonos e hidroclorofluorocarbonos sin agotar la capa de ozono; y el **carbón negro**, que no es un gas de efecto invernadero pero sí un potente aerosol y contaminante atmosférico que calienta el clima. El **óxido nítrico** es un supercontaminante pero no es de vida corta.

Punto crítico de inflexión

Nivel de cambio más allá del cual el sistema se reorganiza, generalmente de forma abrupta y/o irreversible. *Véase también*, impactos “lineales vs. no-lineales”.

**Convención Marco
de las Naciones
Unidas sobre el
Cambio Climático
(CMNUCC)**

La [Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático](#) es una convención de 198 Estados creada en 1992 como un marco de cooperación internacional para hacer frente a la amenaza global del cambio climático a través de medidas de mitigación y adaptación. El Acuerdo de París se negoció y aplicó bajo su amparo. El Art. 2 de la CMNUCC establece que: “El objetivo último... es lograr, de conformidad con las disposiciones pertinentes de la Convención, la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible”⁵.

I. RESUMEN

El cambio climático supone una amenaza existencial para la humanidad. La relación intrínseca entre el cambio climático y los derechos humanos se hace evidente cuando somos testigos de los efectos adversos en diversas dimensiones de la vida humana. Para hacer frente a la emergencia climática, debemos frenar al máximo el ritmo de calentamiento lo antes posible. Sólo una estrategia dual para reducir *tanto* los supercontaminantes climáticos distintos del dióxido de carbono *como* el dióxido de carbono (CO₂) puede mantener la temperatura global dentro de límites seguros y proteger los derechos humanos de las generaciones presentes y futuras.

La emergencia climática plantea un reto de *temperatura, puntos críticos de inflexión y tiempo*.

Temperatura. *La temperatura de la Tierra es demasiado alta a 1,2°C de calentamiento observados actualmente por encima de los niveles preindustriales.* Los impactos lineales ya están provocando daños tremendos que infringen los derechos humanos; y los bucles de retroalimentación que se autoperpetúan—donde la Tierra se calienta a sí misma—pronto empujarán al planeta más allá de una serie de puntos críticos de inflexión que impondrán impactos no lineales abruptos, irreversibles, y catastróficos y que causarán violaciones masivas de los derechos humanos.¹ El aumento de la temperatura se ve impulsado tanto por la escalada de las emisiones de dióxido de carbono como por las emisiones de supercontaminantes climáticos distintos del dióxido de carbono, especialmente el metano; así como también por la reducción de las emisiones de contaminantes atmosféricos reflectantes; la destrucción de bosques y sumideros de carbono y la pérdida de la capacidad reflectante de la nieve y el hielo del Ártico.

Puntos Críticos de Inflexión. *Se acercan puntos críticos de inflexión que causarán impactos irreversibles y potencialmente catastróficos.* Un estudio reciente sobre la historia del planeta revela que los sistemas climáticos regionales y globales pueden cambiar de estado, a veces bruscamente. Según una evaluación reciente, superar los 1,5°C aumenta la probabilidad de que se desencadenen o alcancen seis puntos críticos de inflexión climáticos que se autoperpetúan.⁶ En los modelos climáticos se prevén algunos cambios bruscos del sistema, con un grupo de seis cambios bruscos entre 1°C y 1,5°C de calentamiento y otros once entre 1,5°C y 2°C,⁷ tal como confirman dos informes especiales del IPCC.⁸ El objetivo del Acuerdo de París es mantener “el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2°C por encima de los niveles preindustriales” y proseguir los esfuerzos para “limitar el aumento de la temperatura a 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales”.

Tiempo. Si no se toman medidas rápidas para frenar el calentamiento, *es probable que superemos el umbral de 1,5°C a finales de la década.*⁹ La urgencia de la crisis climática es evidente, ya que

¹ Los impactos lineales aumentan aproximadamente en proporción al aumento del calentamiento, es decir, se escalonan con el calentamiento: un poco más de calentamiento provoca un poco más de impacto. Los impactos no lineales son diferentes: un poco más de calentamiento empuja al planeta más allá de una serie de puntos críticos de inflexión con impactos que son desproporcionados al calentamiento extra. Estos impactos abruptos no lineales son como caer por un precipicio. Nótese que en el caso de algunos puntos críticos de inflexión que se desencadenan a una temperatura específica, los impactos pueden prolongarse durante décadas e incluso siglos. Este es el caso, por ejemplo, del manto de hielo de Groenlandia. La aceleración del calentamiento podría desencadenar los puntos críticos de inflexión antes de lo previsto.

la ventana de oportunidad para evitar violaciones masivas y abruptas de los derechos humanos se está reduciendo hasta el final de la década.

Frenar el ritmo de calentamiento a corto plazo es primordial, y requiere medidas inmediatas y específicas. La reducción de los supercontaminantes climáticos puede evitar casi cuatro veces más calentamiento de aquí a 2050 que las estrategias centradas únicamente en el CO₂, y reducir a la mitad la tasa de calentamiento en comparación con un escenario de referencia con una mitigación climática limitada y cuando se tiene en cuenta la reducción de las partículas reflectantes que enmascaran el calentamiento como resultado de las estrategias de descarbonización que eliminan gradualmente el uso de combustibles fósiles.¹⁰

Estudios anteriores han concluido que podemos evitar hasta 0,6°C de calentamiento para 2050 (sin tener en cuenta el desenmascaramiento) y mantenernos dentro del límite de seguridad de 1,5°C con un sobrepaso limitado, pero esto sólo podría lograrse reduciendo los supercontaminantes climáticos distintos del CO₂—el metano (CH₄), los hidrofluorocarbonos (HFC), el ozono troposférico (O₃) (o a nivel del suelo) y los aerosoles de carbono negro. A título comparativo, una descarbonización agresiva que alcanzara un nivel de emisiones netas de CO₂ iguales a cero en 2050 podría evitar aproximadamente 0,2°C de aquí a 2050, sin tener en cuenta el desenmascaramiento que se produce al reducirse los sulfatos coemitidos con la quema de combustibles fósiles.¹¹

Las Américas disponen de soluciones para hacer frente a la emergencia climática que ayudarán a mantener el límite de calentamiento global a un máximo de 1,5°C y reducir el sobrepaso temporario de este umbral al menor tiempo posible, además demostrarían a otros países fuera de la región lo que deben hacer para proteger el clima. Acciones sectoriales específicas deben desplegarse rápidamente y a escala para mitigar los supercontaminantes climáticos de vida corta, proteger los bosques y otros sumideros y descarbonizar el sistema energético.

El cambio climático es un problema que avanza rápidamente y no puede resolverse con soluciones lentas. Tal como declaró el Dr. Mario Molina, ganador del Premio Nobel, “la velocidad debe convertirse en la medida clave de todas las estrategias de mitigación del cambio climático: una rápida reducción del calentamiento global antes de que conduzca a mayores retroalimentaciones que se refuerzan a sí mismas y [puntos críticos de inflexión](#); un rápido despliegue de acciones y tecnologías de mitigación; y poner todo esto a escala de forma rápida”. Y seamos claros: por “rapidez” nos referimos a medidas —incluidas las regulatorias— que puedan comenzar a aplicarse en dos o tres años, implementarse sustancialmente en cinco o diez años y producir una respuesta climática en una o dos décadas.”¹²

II. LA EMERGENCIA CLIMÁTICA GLOBAL

A. Temperatura, Puntos Críticos de Inflexión y Tiempo

La emergencia climática se relaciona con factores tales como temperatura, puntos críticos de inflexión y tiempo. La temperatura de la Tierra ya es demasiado alta con los 1,2°C de calentamiento observados actualmente por encima de los niveles preindustriales,¹³ con impactos lineales que hoy imponen daños tremendos; queda muy poco tiempo antes de que los bucles de

retroalimentación que se autoperpetúan—en los que la Tierra se calienta a sí misma—empujan al planeta más allá de una serie de puntos críticos de inflexión que suponen impactos abruptos no lineales que son irreversibles y catastróficos. El clima de la Tierra expulsará a millones y, con el tiempo, a miles de millones de personas del corredor de vida en el que ha evolucionado la civilización.¹⁴ El Secretario General de la ONU ha calificado la emergencia climática como una amenaza existencial para la humanidad.¹⁵

La evidencia científica demuestra que ya nos encontramos en un estado de emergencia planetaria, en el que tanto el riesgo como la urgencia de la situación son agudos.¹⁶ Los impactos climáticos actuales, con 1,2°C de calentamiento observado, son en gran medida impactos lineales que empeoran proporcionalmente con el calentamiento, pero con sorpresas regionales emergentes “no lineales”.¹⁷ Estos incluyen fenómenos meteorológicos extremos más frecuentes y severos¹⁸ como olas de calor nunca antes registradas,¹⁹ sequías,²⁰ incendios,²¹ precipitaciones,²² e inundaciones.²³

Con 1,2°C, ya estamos en un rango de temperaturas en el que pueden desencadenarse puntos críticos de inflexión no lineales, abruptos y potencialmente irreversibles. Superar los 1,5°C aumenta la probabilidad de desencadenar entre seis²⁴ y once²⁵ puntos críticos del sistema climático que se autoperpetúan y que se prevén entre 1,5°C y 2°C, incluida la pérdida del manto de hielo de Groenlandia y de la Antártida Occidental.²⁶ Juntas, la pérdida del manto de hielo de Groenlandia y de la Antártida Occidental provocarían un aumento de 10 metros en el nivel del mar en los próximos siglos si se fueran a cruzar los puntos críticos de inflexión.²⁷

Existe evidencia científica que el manto de hielo de Groenlandia ya demuestra indicios de que se está acercando a un punto crítico de inflexión, por lo cual se espera un deshielo acelerado.²⁸ El deshielo del manto de hielo de Groenlandia ya es el principal contribuyente a la tasa de aumento de la media global del nivel del mar.²⁹ Cuando toda Groenlandia se derrita, contribuirá a un aumento del nivel del mar de entre 5 y 7 metros.³⁰ Aunque el deshielo total del manto de hielo de Groenlandia podría tardar milenios, el ritmo de deshielo futuro y, por lo tanto, la tasa de aumento del nivel del mar, dependerá “en gran medida de la magnitud y la duración del sobrepaso de la temperatura.”³¹ En el extremo opuesto del planeta, 1,5°C de calentamiento global implica el calentamiento significativo de las aguas oceánicas alrededor de la Antártida Occidental y probablemente acelerará el colapso del manto de hielo.³²

Además, los bucles de retroalimentación que se autoperpetúan están acelerando aún más el calentamiento. La pérdida de la nieve y el hielo reflectantes del Ártico, que están siendo sustituidos por océano y tierra más oscuros que absorben la radiación solar entrante en lugar de reflejarla, contribuye a la “amplificación del calentamiento del Ártico”, el cual se está calentando cuatro veces más que la media mundial, acelerando aún más el calentamiento global.³³ El Ártico podría quedar sin hielo marino durante los meses de septiembre en un plazo de 10 a 15 años.³⁴ En el caso extremo de que se perdiera todo el hielo marino del Ártico durante los meses soleados, tal como podría ocurrir a mediados de siglo,³⁵ se añadiría el equivalente a 25 años de emisiones climáticas al ritmo actual.³⁶ La pérdida de nieve y hielo terrestre podría duplicar esta cifra.³⁷ Es posible que se esté produciendo un “cambio de régimen” similar en la Antártida³⁸, dada la baja extensión récord del hielo marino observada en los últimos tres años (2022 a 2024).³⁹

Otro bucle de retroalimentación es la destrucción de la Selva Amazónica, que está pasando de ser un “sumidero” que extrae dióxido de carbono de la atmósfera y lo almacena de forma segura en su biomasa y suelo, a una “fuente” de emisiones de dióxido de carbono cuando se talan o queman árboles.⁴⁰ Existe el riesgo de que cuando se haya destruido entre el 20 y el 25% de la Amazonia, la selva entre en un espiral de muerte y se convierta en una sabana con impactos devastadores para la región y el mundo.⁴¹ Si se liberara todo el carbono almacenado en la Amazonia, el planeta podría calentarse 0,25°C más.⁴²

B. El Presupuesto de Carbono

Otra forma de observar el reto climático es considerar el presupuesto de carbono restante calculado por los científicos antes de que nos estrellamos contra el límite de seguridad de los 1,5°C. La actualización más reciente que incorpora los datos del IE6 redujo el presupuesto de carbono a 250 mil millones de toneladas de CO₂, para una probabilidad de 50:50 de mantener el calentamiento en 1,5°C a partir de principios de 2023, y suponiendo que entre 2020 y 2050 las emisiones de metano se reduzcan a la mitad, las de óxido nítrico un 25% y las de sulfato se reduzcan un 77%.⁴³ El incumplimiento de las reducciones de metano y óxido nítrico disminuiría el presupuesto de carbono restante. La inclusión de las reducciones de sulfato que cabría esperar junto con la reducción del uso de combustibles fósiles representa un desenmascaramiento. Si bien este presupuesto incluye algunas retroalimentaciones climáticas del carbono,⁴⁴ no toma en cuenta de manera directa las retroalimentaciones no lineales y deficientemente limitadas⁴⁵ (incluidas las emisiones del permafrost debido a modelos de procesos limitados) ni los puntos críticos de inflexión, pero estos podrían considerarse en función de la elección del nivel de probabilidad de alcanzar la temperatura objetivo (con un mayor porcentaje de cobertura frente a estos riesgos).⁴⁶

Con los niveles actuales de emisión, este presupuesto de aproximadamente 250 GtCO₂ se agotaría a mediados de 2029.⁴⁷ Según Carbon Brief, para un país con altas emisiones como el Reino Unido, su cuota del presupuesto de carbono se agotará en 2 años.

C. Amenaza Existencial de 1,5°C a 2°C en el Futuro

Si se sobrepasan los 1,5°C, se prevé que muchos impactos climáticos se tornen no lineales, abruptos, irreversibles y catastróficos.⁴⁸ Superar los puntos críticos de inflexión desencadenará bucles de retroalimentación que se autoperpetuarán con el riesgo de un estado climático “invernadero” en el que miles de millones de personas vivan en lugares que se vuelvan demasiado calientes para la habitabilidad humana.⁴⁹ El “estado climático invernadero” se asemeja a “estados planetarios que se vieron por última vez hace varios millones de años” y convertiría gran parte del planeta en un lugar inhóspito para los seres humanos y muchas especies.⁵⁰ El límite de seguridad de 1,5°C procura mantener el calentamiento dentro de un “corredor seguro y justo” de vida para garantizar un sistema climático estable y reducir la exposición a los riesgos asociados.⁵¹ La Comisión de la Tierra, un equipo mundial de científicos, ha empezado a cuantificar estos límites seguros y justos del sistema terrestre, que incluyen limitar el calentamiento a 1,5°C para mantenerse dentro de unos límites seguros que eviten puntos críticos de inflexión del sistema climático.⁵² El IPCC confirmó la importancia crucial de mantener el límite de temperatura en 1,5°C y estimó que, con las tendencias actuales, este límite de temperatura se superaría a principios de la década de 2030.⁵³ Sin embargo, si se mantienen las emisiones climáticas récord, se prevé que el

ritmo de calentamiento aumente de 0,2°C a 0,25–0,32°C por década en los próximos 25 años.⁵⁴ En dicho caso, las temperaturas “alcanzarían 1,5°C a finales de la década de 2020 y 2°C en 2050.”⁵⁵

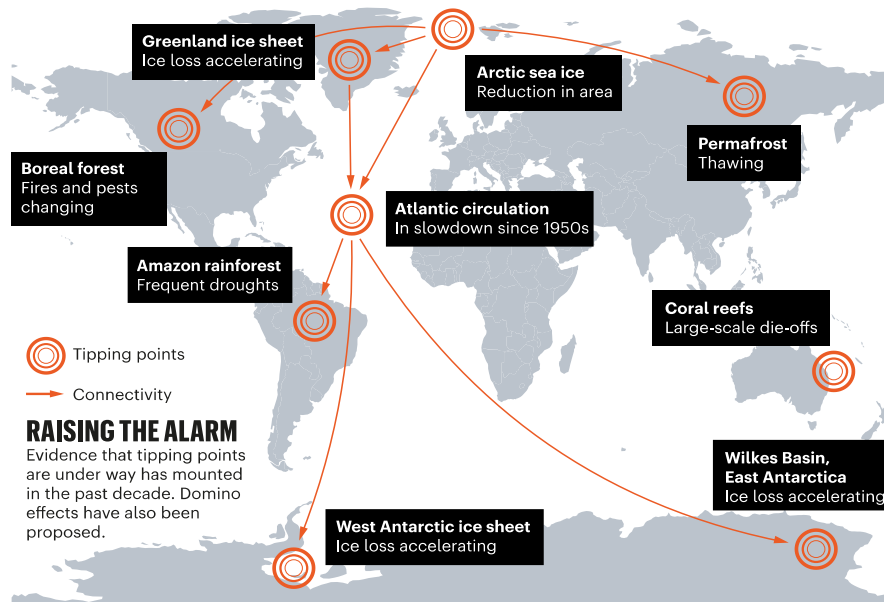
La ventana para lograr una mitigación eficaz y mantenerse por debajo de 1,5°C, frenar las retroalimentaciones que se autoperpetúan y evitar, o al menos retrasar, los puntos críticos de inflexión irreversibles se está reduciendo rápidamente hasta el final de la década.⁵⁶

Entre 1,5°C y 2°C, se prevé que se desencadenarán entre seis⁵⁷ y once⁵⁸ puntos críticos de inflexión, entre ellos la pérdida del hielo marino estival del Ártico, la pérdida de los mantos de hielo de la Antártida Occidental y de Groenlandia, cambios en los ecosistemas de los bosques boreales, la liberación de carbono del permafrost y la pérdida de arrecifes de coral.⁵⁹ Es posible que niveles de calentamiento actuales sean suficientes para pasar puntos críticos de inflexión de los mantos de hielo de la Antártida Occidental y de Groenlandia, arrecifes de coral, y causar el deshielo abrupto de permafrost en algunas regiones.⁶⁰ Según el Sexto Informe de Evaluación (IE6) del IPCC, con 2°C de calentamiento, el nivel de riesgo de que se desencadenen puntos críticos de inflexión “relativamente grandes, abruptos y a veces irreversibles” pasa a ser alto.⁶¹ Es posible que se produzcan otros puntos de inflexión aún no descubiertos debido a las limitaciones de los modelos actuales y a la exclusión de procesos como los relacionados con el permafrost y otras retroalimentaciones biogeoquímicas.⁶²

Además, se prevé que las interacciones de efecto dominó entre estos sistemas reduzcan los umbrales y aumenten el riesgo de desencadenar una cascada global de puntos de inflexión (**Figura 1**).⁶³ Por ejemplo, el destino de los mantos de hielo de la Antártida Occidental y de Groenlandia están vinculados: cruzar un punto crítico de inflexión en uno de los mantos de hielo implicaría cruzar también el punto crítico de inflexión en el otro,⁶⁴ y también podría desencadenar el colapso de la circulación de vuelco meridional del Atlántico (AMOC),⁶⁵ una rama de la estera rodante del océano. La adición de agua dulce procedente del deshielo de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida Occidental cambia la mecánica de la estera rodante del océano, lo que podría obligar a la ya debilitada AMOC a detenerse. Dado el papel que desempeña la AMOC en la circulación oceánica que sostiene la vida, la temperatura del agua y los nutrientes en el Atlántico, una interrupción total tendría efectos catastróficos, con una rapidez que superaría la capacidad de adaptación de las sociedades.

En síntesis, los puntos críticos de inflexión extremos desencadenados por retroalimentaciones que se autoperpetúan plantean riesgos para los sistemas humanos, como la desestabilización financiera y social y el aumento del potencial de conflictos y migraciones masivas, con consecuencias graves e irreversibles para los derechos humanos.⁶⁶

Figura 1. Puntos Críticos de Inflexión Climáticos



Fuente: Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) [Climate tipping points—too risky to bet against](#), Comment, NATURE, 575(7784): 592–595.

III. ABORDAR LA EMERGENCIA CLIMÁTICA

Hacer frente con éxito a la emergencia climática exige que los Estados seleccionen y apliquen soluciones de mitigación rápidas *ahora* para evitar al máximo el calentamiento e impedir que se superen los 1,5°C;⁶⁷ se frenen las retroalimentaciones que se autoperpetúan y se eviten puntos críticos de inflexión que empeoren los impactos climáticos;⁶⁸ y se proteja a las personas y los ecosistemas más vulnerables⁶⁹ del calor, la sequía, las inundaciones y otros fenómenos extremos que se agravarán drásticamente con cada incremento del calentamiento adicional.⁷⁰

A. Maratón: La Descarbonización Es Crucial Pero No Puede Frenar El Calentamiento a Corto Plazo Ni Evitar Impactos Abruptos No Lineales

Descarbonizar el sistema energético y lograr emisiones netas iguales a cero es fundamental para estabilizar el clima y mantener las temperaturas por debajo de 1,5°C a finales de este siglo. Sin embargo, incluso si todas las emisiones de CO₂ hoy se redujeran a cero, el planeta no volverá a los niveles preindustriales ya que un porcentaje significativo de CO₂ permanece en la atmósfera durante siglos.⁷¹ El calentamiento a corto plazo podría acelerarse debido al desenmascaramiento del calentamiento a medida que se reducen los aerosoles de sulfato, a menos que vaya acompañado de reducciones fuertes y sostenidas de los supercontaminantes climáticos.

El IE6 del IPCC y estudios más recientes confirman que la reducción de las emisiones procedentes del uso de combustibles fósiles—la principal fuente de CO₂—mediante la descarbonización del sistema energético, de forma aislada, en realidad acelerará el calentamiento en la próxima década.⁷² La quema de combustibles fósiles no sólo emite CO₂, sino también aerosoles de sulfato, que actúan enfriando el clima. Estos sulfatos refrigerantes desaparecen rápidamente de la atmósfera cuando cesa el uso de combustibles fósiles, mientras que gran parte del CO₂ perdura mucho más tiempo, lo que provoca un calentamiento relativamente mayor durante la primera o segunda década.⁷³

La maratón para descarbonizar a largo plazo es esencial para la estabilidad del sistema climático, pero el sprint para reducir los supercontaminantes debe producirse de inmediato para reducir la probabilidad de que se superen los 1,5°C,⁷⁴ prevenir las violaciones de los derechos humanos derivadas de los peores impactos climáticos y aumentar la resiliencia.

B. El Sprint: Reducir los Supercontaminantes Climáticos y Aplicar Soluciones Basadas en la Naturaleza Puede Frenar Rápidamente el Calentamiento a Corto Plazo

Reducir los supercontaminantes climáticos puede evitar casi cuatro veces más calentamiento de aquí a 2050 que las estrategias centradas únicamente en el CO₂, en comparación con un escenario de referencia con una mitigación climática limitada y cuando se tiene en cuenta la reducción de las partículas reflectantes que enmascaran el calentamiento como resultado de las estrategias de descarbonización que eliminan gradualmente el uso de combustibles fósiles.⁷⁵ Según estudios anteriores, la reducción rápida de los contaminantes climáticos de corta vida (CCVC), o supercontaminantes climáticos, podría evitar hasta 0,6°C de calentamiento para 2050 y hasta 1,2°C para 2100.⁷⁶ Esto reduciría el calentamiento previsto en el Ártico en dos tercios, la tasa de calentamiento global a la mitad y evitaría, o al menos retrasaría, las retroalimentaciones que se autoperpetúan y los puntos críticos de inflexión irreversibles.⁷⁷ El progreso en la reducción del aumento de las emisiones de HFC a través del acuerdo de la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal acordado en 2016 significa que estamos en vías de lograr alrededor de 0,1°C del calentamiento evitado para 2050. Las soluciones destinadas a reducir los CCVC también disminuyen el desperdicio de alimentos y energía y la contaminación atmosférica.⁷⁸

Según el IPCC, los CCVC son responsables de alrededor de la mitad del calentamiento global actual, contribuyen al aumento del nivel del mar y a fenómenos climáticos más frecuentes y extremos, y perjudican la salud humana, la seguridad alimentaria y la [biodiversidad](#).⁷⁹

Los CCVC son el metano (CH₄), el carbono negro (hollín), el ozono troposférico (O₃, “smog”) y los hidrofluorocarbonos (HFC, o refrigerantes).⁸⁰ Estos CCVC son entre decenas y miles de veces más potentes que el CO₂ para calentar el planeta, pero son de vida corta—es decir, permanecen en la atmósfera entre unos pocos días y unos pocos años, mientras que el CO₂ puede permanecer cientos de años. La reducción de estos contaminantes proporciona beneficios casi inmediatos para el cambio climático y la salud humana.

Otras estrategias rápidas de mitigación para alcanzar los objetivos climáticos a corto y largo plazo son la protección y expansión de los “sumideros de carbono” naturales, que son elementos naturales, como los océanos o los bosques, que absorben y almacenan carbono de la atmósfera.⁸¹

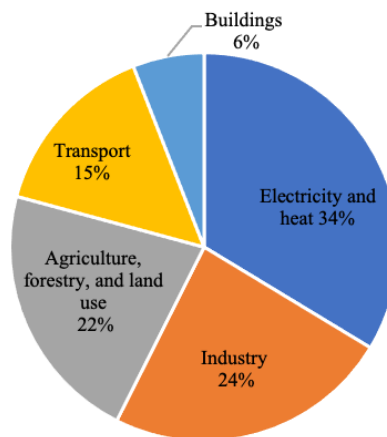
Estas soluciones basadas en la naturaleza también proporcionan muchos beneficios colaterales a las personas y los ecosistemas,⁸² como la mejora del almacenamiento de agua, la provisión de alimentos y medios de subsistencia y la mejora de la calidad del aire.

IV. LAS CAUSAS HUMANAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

A. Causas Globales del Cambio Climático

De los actuales 1,2°C de calentamiento desde los niveles preindustriales⁸³, las emisiones de CO₂ y de otros gases de efecto invernadero (GEI) procedentes de las actividades humanas son responsables de aproximadamente 1,14°C⁸⁴. Las emisiones mundiales de GEI siguen aumentando, y la media anual de dichas emisiones ha alcanzado los registros más altos de la última década.⁸⁵ El aumento de emisiones continuado ha llevado las concentraciones atmosféricas de GEI a nuevos récords cada año, incluyendo de CO₂, CH₄, and N₂O.⁸⁶

Figura 2. Principales Fuentes de Emisiones Mundiales de GEI



Las principales fuentes de emisiones mundiales de GEI provienen del sector de la energía (34%), la industria (24%), la agricultura, la silvicultura y el uso de la tierra (AFOLU) (22%), el transporte (15%) y la construcción (6%). *Fuente:* Dhakal S., Minx J. C., Toth F. L., Abdel-Aziz A., Figueroa Meza M. J., Hubacek K., Jonckheere I. G. C., Kim Y.-G., Nemet G. F., Pachauri S., Tan X. C., & Wiedmann T. (2022) *Chapter 2: Emissions Trends and Drivers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE*, Contribución del Grupo de Trabajo al Sexto Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Shukla P. R., et al. (eds.).

En cuanto a los supercontaminantes climáticos, entre el 50% y el 65% de las emisiones mundiales de metano provienen de fuentes antropogénicas de tres sectores principales: la producción de energía (35%),⁸⁷ la agricultura (40%),⁸⁸ y los residuos (20%),⁸⁹ con la quema de biomasa y biocombustibles como fuentes adicionales.⁹⁰

Los HFC han aumentado en todo el mundo un 18 % entre 2016 y 2020.⁹¹ Más del 75 % de las emisiones totales de HFC provienen de aparatos de aire acondicionado fijos y refrigeradores industriales/comerciales.⁹²

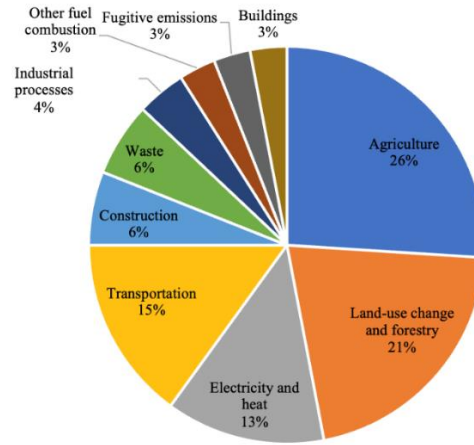
El carbono negro no es un gas de efecto invernadero, sino un potente aerosol que calienta el clima y es un componente del material particulado (concretamente, MP_{2,5}) que entra a la atmósfera a través de la combustión incompleta de combustibles fósiles, así como de biocombustibles y biomasa.⁹³ Tiene un impacto en el calentamiento global hasta 1.500 veces mayor que el CO₂ por unidad de masa.⁹⁴ El carbono negro es difícil de cuantificar debido a las limitadas observaciones a escala global.⁹⁵

El ozono troposférico no se emite directamente, sino que es producto de reacciones atmosféricas con contaminantes precursores, especialmente metano y otros compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno. Los niveles mundiales de ozono troposférico aumentaron menos de un 40% desde la era preindustrial hasta 2005, debido al incremento de los contaminantes precursores.⁹⁶ Además de contribuir al calentamiento, es responsable de millones de muertes prematuras,⁹⁷ de la pérdida de cosechas por un valor de miles de millones de dólares al año,⁹⁸ y del debilitamiento de los sumideros de carbono.⁹⁹

B. Causas del Cambio Climático en las Américas

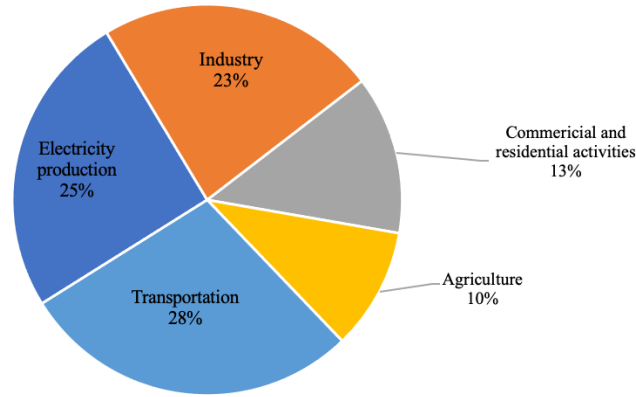
Desde 1990, y el Caribe (LAC) han contribuido en un 11% al aumento de las emisiones mundiales de GEI,¹⁰⁰ y en 2019, la región de LAC contribuyó a apenas el 8,1% de las emisiones mundiales.¹⁰¹ El sector energético representa el 43% de las emisiones en LAC, muy por debajo de la media mundial del 74%; mientras que la agricultura y el uso de la tierra y la silvicultura combinados representan el 45% de las emisiones, en comparación con la media mundial del 14%.¹⁰² El sector del uso de la tierra también desempeña un papel crucial en las emisiones de GEI en la región. La deforestación, impulsada principalmente por la expansión agrícola, también representa una fuente importante.¹⁰³ Además, el sector industrial contribuye a las emisiones de la región, sobre todo a través de la producción de cemento, acero y productos químicos.¹⁰⁴

Figura 3. Principales Fuentes de GEI en LAC



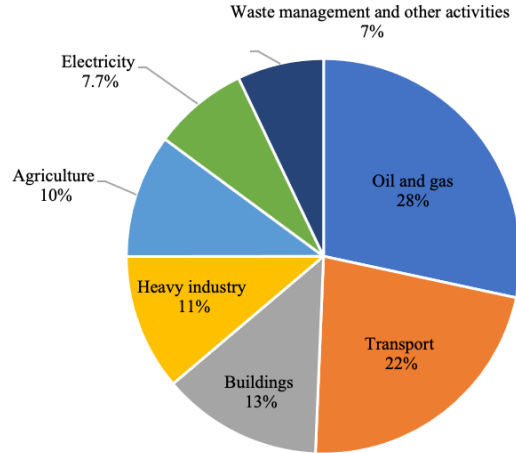
Las principales fuentes de emisiones de GEI en LAC son la agricultura (26%), el cambio del uso de la tierra y la silvicultura (21%), el transporte (15%), la producción de electricidad (13%), los residuos y la construcción (12%), y las emisiones restantes provienen de otras actividades tales como los procesos industriales y las emisiones fugitivas (13%). *Fuente:* Grupo del Banco Mundial (2022) [A ROADMAP FOR CLIMATE ACTION IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2021-2025](#), 3 (Figura 2).

Figura 4. Principales Fuentes de Emisiones de GEI en Canadá



La principales fuentes de emisiones de GEI en Canadá son el petróleo y el gas (28%), el transporte (22%), la construcción (13%), la industria pesada (11%), la agricultura (10%) y la producción de electricidad (7.7%) y las emisiones restantes provienen de la gestión de residuos y otras actividades (7%). *Fuente:* Environment and Climate Change Canada (2020) [CANADA'S NATIONAL REPORT ON BLACK CARBON AND METHANE CANADA'S THIRD BIENNIAL REPORT TO THE ARCTIC COUNCIL](#), Figura ES-6.

Figura 5. Principales Fuentes de Emisiones de GEI en EE.UU.



Las principales fuentes de emisiones de GEI en Estados Unidos son el transporte (28%), la producción de electricidad (25%), la industria (23%), las actividades comerciales y residenciales (13%) y la agricultura (10%). *Fuente:* Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (28 de abril de 2023) [Sources of Greenhouse Gas Emissions](#).

Estados Unidos y Canadá han contribuido históricamente a una cantidad mucho más significativa de emisiones de GEI y tienen una responsabilidad mucho mayor en la emergencia climática. Estados Unidos es el país que más ha contribuido al calentamiento global y ha sido responsable del 20% de las emisiones históricas de CO₂ entre 1850 y 2021.¹⁰⁵ En 2021, Estados Unidos contribuyó al 11% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (lo que equivale a la cuota combinada de emisiones de la UE y Rusia).¹⁰⁶ Actualmente, este país también es el segundo mayor emisor de gases de efecto invernadero del mundo.¹⁰⁷ Canadá es responsable del 2,6 % de las emisiones históricas de CO₂ entre 1850 y 2021.¹⁰⁸ En 2021, Canadá contribuyó al 1,56 % de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero.¹⁰⁹

De los países de las Américas, Brasil es uno de los principales emisores históricos (el 4° más alto, 5%).¹¹⁰ Gran parte de la contribución histórica de Brasil al calentamiento se atribuye a la deforestación de finales del siglo XIX y del siglo XX por los colonos, y en menor medida a las emisiones procedentes de combustibles fósiles.¹¹¹

En cuanto a las emisiones acumuladas de CO₂ en las Américas entre 1990 y 2020, Estados Unidos fue el país con la cuota más alta de emisiones (60%), seguido por Brasil (14%), Canadá (8,3%), México (4,8%) y Venezuela (2,9%).¹¹²

En cuanto a las emisiones de metano, América del Norte contribuyó al 11,9% de las emisiones mundiales de metano en 2022, siendo el sector energético la fuente más importante.¹¹³ América Central y del Sur contribuyeron al 10,8% de las emisiones mundiales de metano en 2022, siendo el sector agrícola la mayor fuente de emisiones.¹¹⁴ En las Américas, los principales emisores de metano en 2022 fueron EE.UU. (39,42%), Brasil (24,72%), México (0,07%), Argentina (0,07%) y Canadá (0,06%).¹¹⁵ En cuanto a las emisiones acumuladas de metano en las Américas entre 1990 y 2020, EE.UU. contribuyó a la mayor parte (36%), seguido por Brasil (21%), Venezuela (12%), México (6,8%), Argentina (6,6%) y Canadá (4,7%).¹¹⁶

C. Descripción General de los Supercontaminantes Climáticos por Sector

Los sectores que son fuentes de emisiones de CO₂ también son fuentes de supercontaminantes climáticos en toda América. La agricultura, el transporte y la refrigeración doméstica y comercial producen las mayores emisiones de metano, carbono negro, material particulado (MP) y HFC en LAC, EE.UU. y Canadá.¹¹⁷ Dado que los supercontaminantes climáticos también son contaminantes atmosféricos, su reducción presenta una oportunidad para abordar cuestiones tanto de salud pública como de seguridad alimentaria y cambio climático. Por ejemplo, la mitigación de las emisiones de supercontaminantes puede reducir el calentamiento en LAC en hasta 0,9°C para 2050.¹¹⁸ También puede reducir la mortalidad prematura por MP_{2,5} en al menos un 26% anual en LAC y evitar la pérdida de entre 3 y 4 millones de toneladas de cultivos básicos cada año.¹¹⁹ Las soluciones para reducir los supercontaminantes climáticos se exponen en la [Sección VI](#).

i. Energía

El sector energético, a través de la producción de combustibles fósiles, es la tercera mayor fuente de emisiones de metano en la región de LAC, representando alrededor del 18% de las emisiones totales de metano en 2019.¹²⁰ El metano es emitido debido al venteo y la quema incompleta durante la producción de petróleo y gas y cuando se filtra de tuberías y contenedores durante su almacenamiento y transporte. La producción de gas natural en LAC representó alrededor del 5% de la producción mundial total en 2020, con Argentina, Brasil, Colombia, México, Trinidad y Tobago y Venezuela siendo responsables de la mayor parte de la producción en 2021.¹²¹ Estudios recientes han demostrado que las emisiones de metano procedentes de la producción de petróleo y gas en México son dos veces mayores que las estimadas en el inventario de GEI de dicho país, debido al venteo del gas asociado en los sitios de los pozos y a las fugas de las instalaciones de almacenamiento y transporte.¹²²

Las emisiones de metano de la industria del petróleo y el gas pueden reducirse en casi un 75% con un ahorro generalizado, dado el precio promedio del gas natural desde 2017 a 2021.¹²³ Sin embargo, incluso si no se tiene en cuenta el valor del gas capturado, la mayoría de las medidas de reducción disponibles podrían aplicarse a un costo de US\$15/tCO₂e.¹²⁴ Algunos ejemplos de medidas de mitigación eficaces en términos de costos incluyen la aplicación de programas de detección y reparación de fugas, la instalación de unidades de recuperación de vapor y la sustitución de los equipos con fugas.¹²⁵

En Estados Unidos, el sector energético representa el 56% de las emisiones de metano.¹²⁶ Un estudio realizado por el Environmental Defense Fund concluyó que entre 2012 y 2018 las emisiones de metano en Estados Unidos fueron un 60 % superiores a las emisiones notificadas por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés).¹²⁷ Esto se debió a que la EPA subestimó las emisiones de metano procedentes de actividades anómalas como el venteo.¹²⁸ En Canadá, el sector energético representó el 58 % de las emisiones de metano.¹²⁹

ii. Transporte

La combustión de combustibles fósiles en el transporte es una fuente significativa de emisiones de carbono negro en LAC.¹³⁰ Durante la última década, esta región experimentó una de las tasas de

motorización más altas del mundo, alcanzando un promedio de 201 vehículos por cada 1.000 habitantes en 2015, mientras se enfrentaba a una disminución de la calidad y la productividad de los sistemas de transporte público.¹³¹ El sector del transporte representa actualmente el mayor consumo de energía en la región de LAC y depende casi por completo de los combustibles fósiles.¹³² Argentina, Brasil, México y Venezuela son responsables de las mayores emisiones de carbono negro del sector del transporte.¹³³

En EE.UU., el sector del transporte representa alrededor del 52% de las emisiones nacionales de carbono negro, y los motores diésel contribuyen a aproximadamente el 90% de las emisiones de carbono negro procedentes de dicho sector.¹³⁴ El transporte y los equipos móviles son, por lejos, la mayor fuente de carbono negro en Canadá, representando el 56% de las emisiones totales en 2021. Los motores diésel contribuyen a aproximadamente el 45% de las emisiones totales.¹³⁵

iii. Agricultura

El sector agrícola es una fuente importante de supercontaminantes climáticos en LAC. Es la mayor fuente de emisiones de metano de la región, representando el 61% en 2019,¹³⁶ siendo la ganadería y el cultivo de arroz responsables de más de la mitad de las emisiones de metano de este sector. Solo en América Latina, el subsector ganadero es responsable del 70% de las emisiones agrícolas de metano.¹³⁷

En EE.UU. y Canadá, la agricultura desempeña un papel menos significativo, aunque importante, en las emisiones de metano. En Estados Unidos, la agricultura representa el 27% de las emisiones de metano,¹³⁸ y en Canadá, también alcanza el 27%.¹³⁹

La quema de biomasa se ha implementado en toda LAC como una alternativa al tratamiento de residuos, mediante la cual los residuos agrícolas y forestales se queman para producir electricidad.¹⁴⁰ La quema de biomasa produce carbono negro y deteriora la calidad del aire en la región.¹⁴¹ El carbono negro procedente de la quema de biomasa en América del Sur se ha rastreado hasta la Península Antártica y el Océano Austral.¹⁴² En muchos países, la bioenergía con potencial de captura y almacenamiento de carbono (BECCS, por sus siglas en inglés) se clasifica como neutra en carbono, porque se argumenta que las emisiones de dióxido de carbono se compensan replantando árboles para sustituir los sumideros de carbono que se talan y queman, con emisiones inmediatas de dióxido de carbono. Sin embargo, la BECCS no es neutra en carbono durante varias décadas, si es que alguna vez lo es, ya que las emisiones de carbono procedentes de la tala y la quema de árboles no se compensarán durante décadas o siglos.¹⁴³ La bioenergía a gran escala también afectará la biodiversidad,¹⁴⁴ dañará la salud humana,¹⁴⁵ amenazará el suministro de agua y de alimentos¹⁴⁶ y perpetuará la injusticia ambiental.¹⁴⁷

iv. Residuos

El sector de los residuos es la segunda fuente de emisiones de metano en América Latina y el Caribe, y representa el 20% de las emisiones de la región.¹⁴⁸ El metano se produce cuando los residuos orgánicos de los vertederos son descompuestos por bacterias que producen metano. El Banco Interamericano de Desarrollo estima que la región producirá 296 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) en 2030, más de la mitad de los cuales se espera que sean

orgánicos.¹⁴⁹ El 56% de los países de la región eliminan sus residuos en vertederos sanitarios con una implementación limitada de sistemas de captura de biogás y el 40% en vertederos inadecuados.

Los residuos representan el 17% de las emisiones de metano en Estados Unidos,¹⁵⁰ y el 18% en Canadá.¹⁵¹ Los vertederos de residuos sólidos urbanos son la tercera mayor fuente de emisiones de metano relacionadas con la actividad humana en Estados Unidos, representando aproximadamente el 14,3% de estas emisiones en 2021. Las emisiones de metano de los vertederos de RSU en 2021 fueron aproximadamente equivalentes a las emisiones de GEI de casi 23,1 millones de vehículos de pasajeros a gasolina conducidos durante un año o las emisiones de CO₂ producto del uso de energía de casi 13,1 millones de hogares durante un año.¹⁵²

v. Refrigeración

Los HFC son alternativas a las sustancias que agotan la capa de ozono y se utilizan principalmente como refrigerantes para aparatos de refrigeración y aire acondicionado.¹⁵³ A diferencia de otras sustancias controladas por el Protocolo de Montreal, los HFC no agotan la capa de ozono, pero son GEI que contribuyen al calentamiento global varios miles de veces más que el CO₂.¹⁵⁴

En LAC, el 80% de las emisiones de HFC provienen de Argentina, Brasil y México.¹⁵⁵ Las emisiones de HFC en la región se componen principalmente de HFC-134a y HFC-152.¹⁵⁶ A medida que las temperaturas empiecen a subir, también lo hará la demanda de refrigeración. 48,8 millones de personas en LAC corren un alto riesgo de no tener acceso a una refrigeración sostenible.¹⁵⁷ Los pobres de las zonas urbanas son los que corren un mayor riesgo, con un incremento de 500.000 personas entre 2020 y 2021.¹⁵⁸ Además, con una población en aumento e ingresos y niveles de vida cada vez mayores, se espera que la región multiplique por seis su stock de aparatos de aire acondicionado para 2050.¹⁵⁹ Este aumento previsto de la necesidad y la demanda no sólo podría incrementar las emisiones potenciales de HFC, sino que el aumento del stock de aparatos de aire acondicionado y otros equipos de refrigeración también podría sobrecargar las redes de energía eléctrica.¹⁶⁰

El Banco Interamericano de Desarrollo estima que la intensidad energética (la cantidad de energía consumida por unidad de PIB) en LAC disminuyó un 0,8%, frente a una disminución media mundial del 2,1% anual.¹⁶¹ Las normas mínimas de rendimiento energético para refrigeración están un 30% por detrás de los principales fabricantes y tendrían que aumentar un 67% para cumplir con las normas establecidas por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.¹⁶² La mejora de la eficiencia energética en iluminación, refrigeración, aire acondicionado y motores podría ahorrar a la región un 20% en consumo eléctrico.¹⁶³

EE.UU., junto con la UE, representan el 80% de las emisiones de HCFC de los países del Anexo 1, y Canadá, junto con Australia, Rusia y Japón, el 20% restante de los países del Anexo 1.¹⁶⁴ El HCFC más común en uso actualmente en EE.UU. es el HCFC-22 o R-22, un refrigerante que todavía se utiliza en los aparatos de aire acondicionado y refrigeración existentes.¹⁶⁵

D. La Contribución de la Deforestación y del Uso de la Tierra al Cambio Climático

Los bosques y otras formas de vegetación son partes esenciales del ciclo del carbono, ya que sirven de “sumideros de carbono” para absorber CO₂ de la atmósfera y almacenarlo a lo largo del tiempo. La degradación de los bosques y de otros sumideros de carbono, por lo tanto, contribuye al calentamiento global al reducir el carbono almacenado en el sumidero de carbono.¹⁶⁶ La deforestación combinada con el calentamiento global plantean el riesgo de provocar retroalimentaciones que se autoperpetúan y de cruzar puntos críticos de inflexión.¹⁶⁷

La pérdida de bosques y de otros sumideros de carbono contribuye al calentamiento, tanto por privar a la atmósfera de los sumideros de carbono como por contribuir a la liberación de carbono del suelo y de la descomposición. La deforestación combinada con el calentamiento global plantean el riesgo de aumentar las retroalimentaciones que se autoperpetúan y de cruzar puntos críticos de inflexión en los ecosistemas, como la pérdida de la selva amazónica.¹⁶⁸ Detener la destrucción de nuestros bosques y de otros sumideros de carbono, como los manglares y las praderas marinas, para que sigan almacenando carbono y no se conviertan en fuentes de CO₂ puede proporcionar una rápida mitigación, y al mismo tiempo proteger la biodiversidad.¹⁶⁹

Con las tendencias actuales de calentamiento, el sumidero mundial de carbono terrestre, que ahora mitiga alrededor del 30% de las emisiones de carbono y ha evitado un calentamiento de 0,4°C desde 1900,¹⁷⁰ podría reducirse a la mitad ya en 2040, a medida que el aumento de las temperaturas reduzca la fotosíntesis y acelere la respiración,¹⁷¹ el proceso biológico de obtención de energía que produce dióxido de carbono y agua como subproductos.

Se calcula que los ecosistemas de la Tierra contienen 139 mil millones de toneladas métricas de “carbono irrecuperable”, definido como el carbono almacenado en sistemas naturales que “son vulnerables a la liberación por la actividad humana y que, de perderse, no podrían ser restaurados para el 2050.”¹⁷² Las mayores concentraciones de carbono irrecuperable se encuentran en la Amazonia, con reservas adicionales a nivel mundial en los bosques boreales, los manglares y las turberas.¹⁷³ Las actividades humanas, como la deforestación, la agricultura de tala y quema, la expansión agrícola, así como los impactos climáticos asociados, como sequías, inundaciones y cambios en las precipitaciones, amenazan estas reservas de carbono.

La deforestación masiva en LAC, causada por la expansión de la agricultura, el crecimiento de las ciudades, la explotación maderera y otras actividades humanas, agota los bosques y otros sumideros de carbono terrestres, como humedales, manglares, praderas y otros ecosistemas. Detener la destrucción de los bosques y otros sumideros naturales de carbono de la región, como los manglares y las praderas marinas, para que sigan almacenando carbono y no se conviertan en fuentes de carbono, puede proporcionar una rápida mitigación y también proteger la biodiversidad.¹⁷⁴ Si se liberara todo el carbono (el equivalente a 10 años de emisiones humanas) almacenado en la Amazonia, el planeta podría calentarse 0,3°C.¹⁷⁵ Además, la destrucción de estos ecosistemas naturales por la deforestación y las prácticas de uso de la tierra afecta a un amplio espectro de derechos, que se explican más adelante.

Se prevé que la retroalimentación entre el cambio climático y el cambio en el uso de la tierra, incluida la deforestación, pongan en peligro a la Amazonia y su eficacia como sumidero de

carbono—sólo en la última década, la Amazonia meridional se ha convertido en una fuente neta de carbono, en gran parte debido al cambio climático y la deforestación.¹⁷⁶ Entre 1991 y 2022, el aumento promedio de la temperatura en LAC se incrementó en unos 0,2°C por década (comparado con los 0,1°C por década entre 1961 y 1990).¹⁷⁷

La selva amazónica ya se encuentra al límite de su punto crítico de inflexión estimado, entre el 20% y el 40% de pérdida total,¹⁷⁸ con un 20% destruido por completo y un 6% adicional irreparable en ausencia de intervención humana.¹⁷⁹ La deforestación continuada y la desecación de la vegetación y los suelos en la Amazonia en escenarios de altas emisiones podrían dar lugar a una pérdida de hasta el 50% de la cubierta forestal para 2050.¹⁸⁰ Además, los cambios en el ciclo hídrico global pueden estar llevando a la Amazonia a un punto crítico de inflexión.¹⁸¹ La combinación de condiciones más secas, la deforestación y el calentamiento han ido reduciendo la resiliencia de la cubierta forestal amazónica desde 2000, aumentando el riesgo de regresión, punto en el cual la selva tropical se convertirá en sabana.¹⁸² Con el aumento de la deforestación, incluida la provocada por incendios, mayores perturbaciones y temperaturas más elevadas, hay un punto más allá del cual la selva amazónica será difícil de restablecer,¹⁸³ y mediciones recientes sugieren que la zona del Sudoeste de la Amazonia ya ha pasado a ser una fuente neta de carbono a medida que aumenta la mortalidad de los árboles y disminuye la fotosíntesis.¹⁸⁴ En el 2023, la cuenca del río Amazonas (83% del cual es selva tropical) entró en lo que se ha denominado "la sequía más extrema" del registro histórico, marcada por niveles bajos de agua en los últimos 120 años en muchos de los afluentes del río.¹⁸⁵ Las sequías ponen a prueba la resiliencia de la selva y podrían provocar un punto de inflexión.¹⁸⁶

Estados Unidos y Canadá también tienen una importante cubierta forestal. Casi un tercio del territorio estadounidense está cubierto por bosques. Estos bosques de EE.UU. fueron un sumidero neto de carbono en 2021, secuestrando 794 MMT equivalentes de CO₂ (o 216 MMT de carbono) ese año.¹⁸⁷ Esto representó una compensación del 13% de las emisiones de GEI. Sin embargo, dichos bosques corren el riesgo de sufrir una mayor tasa de incendios forestales, y hay estudios que atribuyen el aumento de los incendios forestales en el oeste de Estados Unidos al calentamiento global provocado por el ser humano.¹⁸⁸

Canadá es el tercer país con mayor superficie forestal del mundo.¹⁸⁹ A pesar de esto, los bosques no han actuado como sumideros de carbono en Canadá desde 2001, y solo en 2016 los bosques gestionados de Canadá contribuyeron a unas 78 megatoneladas de emisiones.¹⁹⁰ Las emisiones son el resultado de prácticas de tala como la tala de bosques antiguos y la quema de vegetación forestal, así como del creciente impacto del cambio climático, incluidos los brotes de escarabajos del pino y los incendios forestales.¹⁹¹

E. La Contribución de la Destrucción de los Sumideros Oceánicos al Cambio Climático

Los sumideros de carbono oceánico son zonas del océano que absorben y almacenan dióxido de carbono de la atmósfera como parte del ciclo natural del carbono. Al igual que los bosques, la absorción de dióxido de carbono por el océano mitiga los efectos del cambio climático al reducir la cantidad de dióxido de carbono liberado en la atmósfera. Según la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés), el océano absorbe alrededor del 30% del CO₂ que se libera en la atmósfera. Como resultado del aumento de las

emisiones globales de CO₂, la acidez del océano ha aumentado aproximadamente un 30%, el agua del mar se ha calentado 0,88°C y la Circulación Meridional de Retorno del Atlántico se ha ralentizado aproximadamente un 15%.¹⁹² Sin el océano, la Tierra sería 36°C más caliente.¹⁹³

Además de ser importantes sumideros de carbono, alrededor de 3 mil millones de personas dependen de los ecosistemas marinos del mundo para su seguridad alimentaria, su economía y su cultura.¹⁹⁴ En LAC, el océano desempeña un papel fundamental en la absorción y el almacenamiento de dióxido de carbono. El Caribe cuenta con extensos arrecifes de coral, praderas marinas y manglares, todos ellos muy eficaces para almacenar carbono. Proteger y restaurar estos ecosistemas puede ayudar a aumentar el almacenamiento de carbono en los océanos de la región.

En América del Sur, el Río Amazonas desempeña un papel importante en el almacenamiento de carbono oceánico de la región, ya que aporta grandes cantidades de carbono orgánico al océano a través de la escorrentía.¹⁹⁵ Sin embargo, la deforestación y el cambio en el uso de la tierra en la cuenca del Amazonas (descritos anteriormente) plantean un riesgo para este potencial de almacenamiento de carbono.¹⁹⁶ En la subregión de América Central, aunque los manglares ofrecen un potencial significativo para el almacenamiento de carbono, que son muy eficaces en el secuestro de carbono, estos se ven amenazados por la deforestación, el desarrollo costero y la acuicultura. En general, las oportunidades de almacenamiento de carbono en los océanos de LAC son significativas, pero también existen riesgos que deben abordarse para aprovechar plenamente este potencial.

En Estados Unidos, se calcula que los hábitats costeros de carbono azul retienen 4,8 millones de toneladas métricas de CO₂ al año.¹⁹⁷ Estados Unidos anunció en 2021 que conservaría el 30% de la tierra y el océano para 2030 (a través de la iniciativa 30x30).¹⁹⁸ Dentro de Estados Unidos, varios estados están incorporando ecosistemas de carbono azul dentro de sus inventarios de GEI, colaborando con la NOAA mediante la creación de áreas marinas y costeras protegidas, incluidas las Reservas Nacionales de Investigación Estuarina y los Santuarios Marinos Nacionales. En 2019, la NOAA incorporó el carbono azul costero en el Inventario de Gases de Efecto Invernadero de Estados Unidos de la EPA, y en 2020, Estados Unidos se convirtió en el primer país del mundo en añadir el carbono azul de las praderas marinas costeras, los manglares y las marismas saladas a su inventario nacional de gases de efecto invernadero.¹⁹⁹

Asimismo, los ecosistemas costeros de Canadá (el país con el litoral más extenso del mundo), incluidos el océano, las marismas, las praderas marinas, los bosques de algas y los sedimentos blandos marinos, son sumideros de carbono fundamentales.²⁰⁰

La sobrepesca supone una de las mayores amenazas para la salud de los océanos. Esta práctica amenaza la resiliencia de los ecosistemas marinos, a los efectos del cambio climático en las aguas oceánicas, y el calentamiento añadido compromete la capacidad de los organismos marinos para repoblarse.²⁰¹ Por ejemplo, los especímenes jóvenes de platija de cola amarilla del sur de Nueva Inglaterra y las costas del Atlántico Medio de EE.UU. necesitan “piscinas frías” para sobrevivir, y sin embargo, la tasa de calentamiento de las aguas del noreste de EE.UU. es una de las más altas del mundo.²⁰² A pesar de algunos éxitos en la repoblación de ciertas poblaciones de peces, se sabe que en Estados Unidos 48 poblaciones están sobreexplotadas, lo que significa que el tamaño de la

población es lo suficientemente bajo como para poner en peligro la capacidad de la población para mantener su rendimiento máximo sostenible.²⁰³

V. IMPACTOS CLIMÁTICOS EN LAS AMÉRICAS

Al calentamiento actual de 1,2°C, LAC ya está experimentando importantes fenómenos relacionados con el clima que están afectando directa e indirectamente los derechos humanos protegidos por el sistema interamericano. Un mayor calentamiento multiplicará y magnificará estas violaciones de derechos. Si el calentamiento global supera los 1,5°C, estos impactos aumentarán significativamente en escala y gravedad. Sin embargo, los impactos climáticos tendrán consecuencias diferenciadas en toda la región en función de numerosos factores geográficos, económicos, culturales y políticos. Las necesidades de adaptación de muchos individuos y grupos serán menores bajo el límite de 1,5°C.²⁰⁴ Las estrategias que abordan los impactos del cambio climático sin centrarse adecuadamente en los factores sociales y económicos de vulnerabilidad que permiten que estos impactos violen y erosionen de manera desigual e injusta los derechos de determinadas personas y comunidades ponen en grave peligro muchos de los derechos fundamentales del sistema interamericano. Los esfuerzos de mitigación y adaptación al cambio climático deben tener en cuenta las necesidades de estos grupos para evitar violaciones de los derechos humanos y garantizar una transición justa, equitativa y sostenible.

Cuadro 1. Resumen de Impactos Climáticosⁱⁱ

Impacto		Impactos Actuales	Impactos Futuros Previstos
Muertes producto de enfermedades relacionadas con el clima	Global	39.503.684 millones de muertes en 2019 ²⁰⁵	3,4 millones de muertes al año a finales de siglo ²⁰⁶
	LAC	16,52 millones de casos de dengue entre 2010–2019 ²⁰⁷	260% de aumento del dengue a mediados de siglo ²⁰⁸
	EE.UU. y Canadá	642.602 casos de enfermedades transmitidas por mosquitos, tik y pulgas entre 2004–2016 (EE.UU.) ²⁰⁹	9.900 casos anuales de enfermedad de Lyme a finales de siglo (Canadá) ²¹⁰
Muertes producto de temperaturas extremas	Global	Más de 5 millones al año (2000–2019) ²¹¹	Aumento de entre el 100% y el 1000% de la tasa de mortalidad excesiva debida al calor extremo para finales de siglo ²¹²
	LAC	200.055 personas al año (2000–2019) ²¹³	
	EE.UU. y Canadá		Se prevé que la mortalidad relacionada con el calor sea más del doble en la década de 2050 y el triple en la de 2080 con respecto a los niveles actuales en las principales ciudades canadienses ²¹⁴ 7.300 muertes adicionales para la década de 2030 y 16.000 para la de 2050 (EE.UU.) ²¹⁵

ⁱⁱ Obsérvese que el alcance de estas futuras repercusiones previstas variará en función de la escala del aumento de la temperatura mundial, de la medida en que los Estados puedan adaptarse al cambio climático y de cualquier otra posible escalada de la emergencia climática causada por el cruce de puntos de inflexión clave u otros acontecimientos.

Impacto		Impactos Actuales	Impactos Futuros Previstos
Exposición a calor extremo	Global	0,7 billones de personas-día/año expuestas al calor extremo solo en zonas urbanas ²¹⁶	1.280 millones de personas a finales de siglo ²¹⁷
	LAC	16,64 millones de personas-día/año entre 1983–2016 ²¹⁸	Aumento de los días extremadamente calurosos de 5 a 10 veces para mediados de siglo (Sudamérica) ²¹⁹
	EE.UU. y Canadá	3,18 millones de personas-día/año entre 1983–2016 ²²⁰	107 millones de personas a mediados de siglo (EE.UU.) ²²¹
Horas de trabajo perdidas debido al calor extremo	Global	133.600 millones de horas de trabajo en 2018 ²²²	362–1091 mil millones de horas ²²³
	LAC	22.000 millones de dólares de pérdida de ingresos en 2021 (Sudamérica) ²²⁴	
	EE.UU. y Canadá		1.800 millones de horas (EE.UU.) ²²⁵
Exposición a la contaminación del aire	Global	7.280 millones de personas expuestas a PM 2,5 ²²⁶	14% del aumento global de la mortalidad relacionada con el ozono a finales de siglo ²²⁷ 6,6 millones de muertes por contaminación atmosférica en 2050 ²²⁸
	LAC	500 millones de personas ²²⁹	
	EE.UU. y Canadá	Más de 103 millones de personas expuestas al smog de ozono (EE.UU.) ²³⁰	
Desplazamiento interno debido a catástrofes relacionadas con el clima	Global	23,7 millones de personas en 2021 ²³¹	1.200 millones de personas en 2050 ²³²
	LAC	1,7 millones de personas en 2021 (LAC, EE.UU. y Canadá) ²³³	10,6 millones de personas en 2050 ²³⁴
	EE.UU. y Canadá		
Reducción en el rendimiento de los cultivos	Global		10% para 2050, 25% para 2100 ²³⁵
	LAC		Reducción del 19% de los cultivos de judías para 2050, reducción del 17,2% del maíz para 2050 ²³⁶ Reducción del 30% del rendimiento global de las plantaciones de aquí a 2050 (Caribe) ²³⁷
	EE.UU. y Canadá		Reducción del 7% del maíz y del 9% de la soja para mediados de siglo (EE.UU.) ²³⁸
Daños directos de catástrofes climáticas	Global		
	LAC		100.000 millones de dólares anuales de aquí a 2050 ²³⁹
	EE.UU. y Canadá	US\$1,1 billones (2013–2022) (EE.UU.) ²⁴⁰ US\$18.000 millones (2010–2019) (Canadá) ²⁴¹	US\$14,5 billones en 50 años (EE.UU.) ²⁴²
Pérdida de PIB	Global		65% del PIB a finales de siglo ²⁴³

Impacto	Impactos Actuales	Impactos Futuros Previstos
LAC	1,7% del PIB anual ²⁴⁴	16% del PIB a finales de siglo ²⁴⁵
EE.UU. y Canadá	0,8% del PIB en 2021 (Canadá) ²⁴⁶	2,5% del PIB en 2050 y 1–4% del PIB anual a finales de siglo (EE.UU.) ²⁴⁷

A. Resumen de Impactos en América Latina y el Caribe

En toda la región de LAC, los impactos del cambio climático ya están provocando inseguridad alimentaria e hídrica, migraciones y desplazamientos, alteración de los medios de subsistencia, importantes problemas de salud física y mental y graves pérdidas económicas.

Según el IE6 del IPCC para la región de LAC, es probable que el cambio climático convierta los riesgos existentes en riesgos graves clave para la región. Los mismos incluyen:

1. Riesgo de inseguridad alimentaria debido a las sequías;
2. Riesgo a las personas y la infraestructura debido a inundaciones y deslizamientos de tierra;
3. Riesgo de inseguridad hídrica debido a la disminución de la cobertura de nieve, el retroceso de los glaciares y la variabilidad de las precipitaciones;
4. Riesgo de aumento de epidemias, particularmente de enfermedades transmitidas por vectores;
5. Riesgos en cascada que abrumen los sistemas de servicios públicos;
6. Riesgo de cambios a gran escala y cambios de bioma en la Amazonia;
7. Riesgos para los ecosistemas de arrecifes de coral; y
8. Riesgos para los sistemas socio-ecológicos costeros debido al aumento del nivel del mar (SLR, por sus siglas en inglés), las mareas de tormenta y erosión costera.²⁴⁸

El calentamiento por encima de 1,5°C tendrá efectos devastadores en toda la región de LAC, especialmente en las zonas más vulnerables: en Colombia, Brasil y Argentina, la población que se verá afectada por inundaciones aumentará en un 100-200%; en Ecuador, en un 300% y en Perú, en un 400%.²⁴⁹

Se espera que el calentamiento por encima de 1,5°C tenga un impacto significativo en las islas del Caribe, por lo que es necesario tomar medidas urgentes para mitigar estos impactos y apoyar los esfuerzos de resiliencia y adaptación de la región.²⁵⁰ A medida que aumenta la temperatura global, la expansión térmica y el derretimiento de los glaciares y de los mantos de hielo provocarán un aumento del nivel del mar. Esto tendrá un impacto significativo en las islas bajas del Caribe, que ya están sufriendo inundaciones y erosión debido al aumento del nivel del mar.²⁵¹ Es probable que el aumento del nivel del mar también exacerbe las mareas de tormenta y las inundaciones costeras. El cambio climático también aumentará la intensidad y frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos como huracanes, tormentas tropicales e inundaciones.²⁵² Además, se espera que el aumento de las temperaturas provoque un incremento de las tasas de evaporación, lo que podría agravar los problemas de inseguridad alimentaria e hídrica en el Caribe.²⁵³ Muchas islas de la región ya sufren escasez de agua, y esto podría empeorar con un clima más cálido.²⁵⁴ El Caribe ya es propenso a estos fenómenos, y se agravarán con un clima más cálido, lo que provocará un aumento de los daños en infraestructuras y propiedades, así como la pérdida de vidas humanas.

Los impactos del cambio de uso de la tierra, en particular la deforestación, los incendios y otros efectos del cambio climático tienen repercusiones directas en la salud humana, los ecosistemas, la seguridad alimentaria, los medios de subsistencia y los sumideros de carbono en la región.²⁵⁵ Específicamente, los impactos previstos en LAC incluyen el aumento de la inseguridad alimentaria debido a las sequías; el aumento de la inseguridad hídrica debido al derretimiento de la nieve y del hielo de los glaciares (por ejemplo, en los Altos Andes) y a la variabilidad de las precipitaciones; el riesgo para las personas y la infraestructura debido a las inundaciones y el deslizamiento de tierras; el riesgo para la salud debido al aumento de las enfermedades transmitidas por vectores; importantes riesgos físicos y culturales para la Amazonia; y el riesgo para los sistemas costeros debido al aumento del nivel del mar y la erosión costera, entre otros impactos previstos.²⁵⁶

Entre 2000 y 2019, LAC fue la segunda región más propensa a catástrofes mundiales, con 152 millones de personas afectadas por 1.205 desastres, entre los que se incluyen inundaciones, tormentas, terremotos, sequías, deslizamientos de tierra, incendios forestales y calor extremo.²⁵⁷ Los estudios de atribución ahora pueden vincular el cambio climático a fenómenos meteorológicos extremos específicos y a los daños que causan.²⁵⁸ Este conjunto creciente de evidencia científica e histórica en la atribución climática refuerza la base jurídica para reparar los daños.

Según el IE6 del GTI, “[E]s *prácticamente seguro* que ha aumentado la frecuencia y la intensidad de los episodios de calor extremo (incluidas las olas de calor) en la mayoría de las regiones terrestres desde la década de 1950... hay un *nivel de confianza alto* en que el cambio climático inducido por el ser humano es la principal fuerza impulsora de estos cambios.”²⁵⁹ En escenarios de emisiones altas, los periodos de una semana de temperaturas récord son entre dos y siete veces más probables en 2021–2050 y entre tres y veintiún veces más probables en 2051–2080, en comparación con las tres últimas décadas—lo que sería prácticamente imposible sin el calentamiento antropogénico.²⁶⁰ Además, la intensidad de los incendios nocturnos ha aumentado en todo el mundo un 7,2% en las dos últimas décadas debido al aumento de las temperaturas, lo que provoca incendios más intensos, duraderos y de mayor tamaño.²⁶¹

Una serie de impactos para la región son de especial importancia para entender cómo los derechos humanos se ven afectados por el inicio del cambio climático en la región y se abordan a continuación.

B. Resumen de Impactos en EE.UU. y Canadá

Estados Unidos y Canadá también están experimentando impactos dramáticos como resultado del cambio climático. Estos impactos afectan de manera desproporcionada a las comunidades indígenas costeras. Si bien ambos países tienen acceso a mayores recursos para comprometerse en la mitigación y adaptación al clima que la región de LAC, el impacto económico del cambio climático está agotando y agotará significativamente los recursos de dos de las mayores economías del mundo. Los impactos del cambio climático en EE.UU. y Canadá ilustran que incluso los países del norte global no pueden escapar a los efectos del cambio climático sobre los derechos humanos.

Según el IE6 del IPCC sobre América del Norte, “si no se limita el calentamiento a 1,5°C, se prevé que los principales riesgos para América del Norte se intensifiquen rápidamente a mediados de siglo (nivel de confianza alto). Estos riesgos provocarán cambios irreversibles en los ecosistemas,

daños cada vez mayores en infraestructura y viviendas, tensiones en los sectores económicos, alteraciones en los medios de subsistencia y problemas de salud mental y física, ocio y seguridad. La aplicación inmediata, generalizada y coordinada de medidas de adaptación destinadas a reducir los riesgos y centradas en la equidad tiene el mayor potencial para mantener y mejorar la calidad de vida de los norteamericanos, garantizar medios de vida sostenibles y proteger la biodiversidad y la productividad ecológica y económica a largo plazo en América del Norte.”²⁶²

El calor extremo y los huracanes ya han causado un alto índice de víctimas mortales en Estados Unidos y Canadá, además de costar miles de millones de dólares en daños. El impacto de los huracanes Irma y María fue especialmente devastador, con miles de decesos solo en el territorio estadounidense de Puerto Rico.²⁶³ A medida que aumenten la tasa y la escala de los desastres climáticos, también lo harán los recursos económicos necesarios para mitigarlos y adaptarse a ellos. Las pérdidas económicas inducidas por el cambio climático podrían costar a la economía estadounidense US\$14,5 mil millones en los próximos 50 años.²⁶⁴ Esto, a su vez, dificulta la capacidad de Estados Unidos y Canadá para utilizar su mayor poder económico como fuerza para fomentar la cooperación climática mundial.

Estados Unidos y Canadá también están experimentando un aumento de las inundaciones, las sequías y la pérdida de glaciares, lo que está dañando la vida y los medios de subsistencia de las comunidades costeras, además de destruir viviendas e importantes sitios de interés cultural indígena.

Aunque Estados Unidos y Canadá son naciones ricas, sigue habiendo zonas de pobreza y privaciones, sobre todo en las comunidades pesqueras de subsistencia.²⁶⁵ La erosión costera, la acidificación de los océanos y el aumento de los fenómenos meteorológicos extremos dificultan la capacidad de estas comunidades para ejercer sus derechos personales, sociales, económicos y culturales. Los daños a las economías de Estados Unidos y Canadá también son desproporcionados para las comunidades de menores ingresos, lo que provoca un aumento de la desigualdad y la pérdida de oportunidades sociales y económicas.²⁶⁶

El IE6 del IPCC prevé que los principales riesgos en América del Norte se intensificarán rápidamente a mediados de siglo. Estos incluyen un aumento de los riesgos climáticos, como los incendios forestales y las olas de calor, un aumento de los riesgos sanitarios, incluidas las enfermedades transmitidas por vectores, daños a la capacidad de producción de alimentos de la región y una escalada de los impactos del cambio climático en los ecosistemas marinos, de agua dulce y terrestres.²⁶⁷ El Gobierno de EE.UU. podría gastar entre US\$25 y 128 mil millones adicionales al año en sólo seis tipos de gastos federales: ayuda destinada a catástrofes costeras, seguros contra inundaciones, seguros de cosechas, seguros de asistencia sanitaria, extinción de incendios forestales e inundaciones en instalaciones federales para finales de siglo.²⁶⁸

C. Impactos del Cambio Climático en la Economía y la Salud

El Informe de Perspectivas Económicas Mundiales 2022 del Fondo Monetario Internacional insta a los responsables de políticas a establecer políticas climáticas creíbles e irreversibles y afirma que los costos de la transición serían “insignificantes frente a los innumerables costos a largo plazo de la inacción.”²⁶⁹

Sin embargo, al momento de evaluar las repercusiones económicas del cambio climático, es importante destacar las limitaciones de los actuales modelos de financiación climática. Los modelos climáticos no describen de manera precisa ni el futuro ni las implicaciones financieras.²⁷⁰

La evaluación más reciente de los modelos de financiación climática concluye que los mismos no incluyen los puntos críticos de inflexión, los bucles de retroalimentación, el aumento del nivel del mar, el estrés térmico, las interrupciones del suministro de alimentos, los efectos en cascada ni los costos de adaptación.²⁷¹ El comunicado de prensa de la evaluación afirma que “[e]sto limita seriamente la utilidad de los modelos para los líderes empresariales y los responsables de políticas, quienes razonablemente pueden creer que estos modelos captan eficazmente los niveles de riesgo, sin ser conscientes de que muchos de los impactos climáticos más graves no se han tenido en cuenta.”²⁷² Es preciso considerar la siguiente información entendiendo que estas proyecciones son inverosímilmente conservadoras si superamos los 1,5°C.

Pérdida de PBI. Cambridge Econometrics cuantificó en un 65% el impacto negativo sobre el PBI mundial en un escenario sin introducción de cambios (business-as-usual, BAU, por sus siglas en inglés) con un calentamiento de 4°C para 2100. Los autores afirmaron que “[e]s probable que estas estimaciones de grandes daños subestimen las pérdidas reales, ya que nuestro método se basa en la relación observada entre temperatura y producción económica, y nos centramos únicamente en los efectos del calentamiento gradual sobre la productividad. No tienen en cuenta los puntos críticos de inflexión ni otros cambios sin precedentes en el sistema climático.”²⁷³

Los fenómenos extremos relacionados con el clima ya han costado porcentajes de dos dígitos del PBI en algunos casos.²⁷⁴ En las clasificaciones de los impactos de los fenómenos meteorológicos extremos de 2000 a 2019 en términos de pérdidas económicas como porcentaje del PBI, ocho de los 20 primeros países se encuentran en el Caribe.²⁷⁵ Entre 1970 y 2021, los desastres registrados relacionados con factores climáticos, meteorológicos e hídricos costaron a los países de las Américas US\$2 trillones.²⁷⁶ Para 2050, los daños del cambio climático podrían costar US\$100 mil millones anuales a la región de LAC.²⁷⁷

Pobreza, Inseguridad Alimentaria e Hídrica. Las perturbaciones climáticas reducen los ingresos del 40% más pobre en más del doble del promedio de la población de LAC y podrían sumir a un número estimado de 2,4–5,8 millones de personas de la región a la pobreza extrema para 2030.²⁷⁸ Se prevé que las plantaciones en el Caribe caigan en rendimiento hasta un 30% para 2050.²⁷⁹ Un menor rendimiento tendría consecuencias negativas en varios ámbitos, como el crecimiento de la producción y la inversión en agricultura, el sector de exportaciones, la reducción de la pobreza y la seguridad alimentaria. También hay evidencia de un aumento presente y futuro de la escasez de agua, lo que aumentaría aún más la pobreza en la región.²⁸⁰

La inacción continua ante el cambio climático provocará la pérdida de 900.000 oportunidades de empleo al año en EE.UU. durante los próximos 50 años debido a los daños causados por el clima.²⁸¹ En Canadá, los hogares con bajos ingresos podrían sufrir una pérdida de ingresos del 12% si la temperatura global aumentara 2°C.²⁸²

Las sequías prolongadas, los cambios en las precipitaciones y el cambio en el uso de la tierra agravan la inseguridad alimentaria en LAC, y el aumento de los precios de los alimentos y los factores socioeconómicos pueden dificultar el acceso a dietas saludables en la región.²⁸³ En América del Sur, que comprende el 66% de la población de LAC,²⁸⁴ 168,7 millones de personas sufren inseguridad alimentaria moderada o grave.²⁸⁵ Esta cifra no hará más que aumentar a medida que el cambio climático ejerza mayor presión sobre los sistemas alimentarios,²⁸⁶ lo que subraya la necesidad de reducir el calentamiento a corto plazo para disminuir los impactos del cambio climático sobre la seguridad alimentaria en LAC.

El aumento del nivel del mar provoca la intrusión de agua salada, que puede impedir el acceso a agua potable y supone una de las mayores amenazas para los sistemas de agua dulce.²⁸⁷ En el Caribe, la demanda de agua ya está superando la oferta, lo que se ve agudizado por las severas sequías agravadas por el calentamiento global.²⁸⁸ A pesar del aumento de las precipitaciones, algunos lugares de LAC siguen experimentando inseguridad hídrica—entre 2014 y 2016, Brasil vivió una crisis por falta de agua, cuando el principal embalse de Sao Paulo alcanzó solo el 5% de su capacidad de 1,3 mil millones de m³.²⁸⁹

Salud y Acceso a la Atención Médica. Los impactos del cambio climático se están acelerando y afectando de manera desproporcionada la salud de las poblaciones vulnerables de LAC. La falta de acción expeditiva para reducir el calentamiento cuesta vidas: de todas las muertes relacionadas con el calor, entre el 20% (Argentina) y el 77% (Ecuador) pueden atribuirse al cambio climático causado por el ser humano en LAC.²⁹⁰ El entorno cambiante también aumenta la probabilidad de enfermedades infecciosas como el dengue.²⁹¹ Entre 2000–2009 y 2010–2019, los casos de dengue casi se triplicaron (de 6,78 millones a 16,52 millones) en LAC.²⁹² La contaminación atmosférica incrementó las tasas de hospitalización y mortalidad por COVID-19 en esta región.²⁹³ Las malas condiciones sanitarias en los países de bajos ingresos pueden exacerbar los riesgos para la salud y provocar más muertes en la región si no se toman más medidas climáticas, ambientales y económicas, lo que subraya la necesidad de actuar de inmediato para reducir el calentamiento a corto plazo.²⁹⁴

D. Las Implicancias de la Vulnerabilidad en LAC

Los grupos vulnerables de la región de LAC se ven desproporcionadamente afectados por el cambio climático en las formas que se detallan a continuación. Las implicancias de la vulnerabilidad ante los impactos climáticos ya plantean amenazas a los derechos humanos y dificultan una transición justa tanto en términos de mitigación como de adaptación.

Pueblos Indígenas. Los pueblos indígenas de América Latina son especialmente vulnerables a los impactos del cambio climático debido a su dependencia de los recursos naturales para su subsistencia y a su profunda conexión cultural con la tierra. Según el Banco Mundial, el 24% de la población indígena de la región vive en condiciones de pobreza extrema (2,7 veces más que la población no indígena), y estas pueblos se ven afectadas de manera desproporcionada por el cambio climático.²⁹⁵ Este problema amenaza la cultura, los medios de subsistencia y la seguridad de los pueblos indígenas.²⁹⁶ El aumento del nivel del mar, la pérdida de biodiversidad y otros impactos del cambio climático agravan aún más la pérdida de las lenguas indígenas.²⁹⁷

Los pueblos indígenas de LAC ya tienen más probabilidades de experimentar una mayor pobreza, menos empleo y un acceso limitado a la educación, los servicios sanitarios y los procesos de toma de decisiones.²⁹⁸ Esto se ve agravado por los impactos del cambio climático que agudizan e imponen vulnerabilidades adicionales debido a la dependencia de las comunidades indígenas del entorno natural para su supervivencia cultural y física.²⁹⁹ Muchas de estas comunidades también se ven obligadas a vivir en zonas propensas a riesgos climáticos, como las zonas costeras bajas y las llanuras aluviales.³⁰⁰ Sin embargo, los pueblos indígenas, aunque sólo representan el 5% de la población mundial, protegen el 80% de la biodiversidad del planeta (especialmente las mujeres).³⁰¹

Mujeres y Minorías de Género. Los impactos climáticos afectan de manera desproporcionada a las mujeres y a las minorías de género en LAC. En esta región, las mujeres experimentan mayores niveles de inseguridad alimentaria y pobreza en comparación con los hombres.³⁰² Las mujeres y las minorías de género también tienen más dificultades para migrar en América del Sur debido a la falta de redes sociales que están más disponibles para los hombres y, por lo tanto, tienen más probabilidades de permanecer en las zonas que sufren los impactos del cambio climático.³⁰³ Las desigualdades de género existentes, combinadas con la degradación del medio ambiente, también exacerbaban la violencia de género, como la violencia doméstica, el matrimonio forzado, la trata de personas, la prostitución forzada y los crímenes de odio.³⁰⁴

Niños y Jóvenes. Los niños y los jóvenes se enfrentan a impactos sanitarios desproporcionados causados por un mundo que se calienta rápidamente. Por ejemplo, la contaminación atmosférica tiene un impacto desproporcionado en los jóvenes, ya que el 98% de los niños de los países de ingresos bajos y medios respiran aire contaminado,³⁰⁵ lo que provoca la muerte de uno de cada diez niños o un retraso permanente en su desarrollo.³⁰⁶ En la región de LAC, 105 millones de niños ya están expuestos a la contaminación atmosférica.³⁰⁷ Si el planeta alcanza 2,4°C de calentamiento en 2050, comparado con 1,7°C, 370 millones de niños más estarán expuestos a olas de calor de larga duración.³⁰⁸

Ancianos. Los adultos mayores (65 años y más) son desproporcionadamente vulnerables a los impactos en la salud asociados con el cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos.³⁰⁹ Las personas mayores son particularmente vulnerables a la exposición al calor, y se prevé que el cambio climático aumente el riesgo de exposición. En LAC, el cambio climático ya está aumentando la exposición al calor de las personas mayores.³¹⁰ Entre 2012 y 2021, en promedio, los adultos mayores de 65 años estuvieron expuestos a 12,3 millones más de personas-días de olas de calor cada año, en comparación con la línea de base de 1995-2005.³¹¹ En casi todos los países de América del Sur, el número de muertes relacionadas con el calor ha aumentado de manera continua entre las personas mayores de 65 años desde el año 2000.³¹² El número de muertes relacionadas con el calor aumentó un 160% en promedio en el período 2017-2021, en comparación con el período 2000-2004.³¹³ Las personas mayores también son vulnerables al cambio climático porque son particularmente vulnerables a las enfermedades, la calidad del aire, el humo de los incendios forestales, las olas de calor y otros problemas agravados causados por la emergencia climática.³¹⁴

Comunidades Pobres y Económicamente Marginadas. Los impactos climáticos agravan los factores desencadenantes subyacentes que perjudican a la economía y afectan de forma desproporcionada a las comunidades empobrecidas. Cada año, entre 150.000 y 2,1 millones de

personas sufren pobreza extrema debido a desastres naturales en LAC —para 2030, esta cifra podría aumentar a 5,8 millones de personas al año, principalmente debido a los efectos del cambio climático relacionados con la salud.³¹⁵ Para quienes viven en las zonas más empobrecidas, existe una mayor probabilidad de sufrir impactos climáticos debilitantes, exacerbados por las malas condiciones de vida, la falta de servicios y recursos públicos y los lugares contaminantes cercanos.³¹⁶ La desigualdad en la región también se interrelaciona con la pobreza, tornando a las comunidades pobres altamente vulnerables a estos impactos. El acceso limitado a los recursos debido a la desigualdad socioeconómica estructural hace que sea mucho más difícil para las comunidades pobres acceder a las opciones de adaptación.³¹⁷

Migración, Desplazamiento y Refugiados Climáticos. Los fenómenos meteorológicos extremos inducidos por el calentamiento global amplifican los factores sociales, económicos y ambientales que provocan migraciones masivas y desplazamientos de la población. Existe una tendencia al aumento de la migración climática interna en América Latina, África subsahariana y Asia meridional, con el potencial de superar los 143 millones de migrantes en 2050.³¹⁸ En México y América Central, los migrantes climáticos internos podrían duplicarse entre 2020 y 2050.³¹⁹ En un escenario más respetuoso con el clima, que cumpla con el límite de temperatura de 1,5°C del Acuerdo de París, el cual todavía es posible con reducciones inmediatas y profundas de los supercontaminantes climáticos tal como se describe en la [Sección VI](#), habría hasta un 87% menos de migrantes climáticos en América Latina en comparación con un escenario sin introducción de cambios.³²⁰

El cambio climático está provocando desplazamientos transfronterizos masivos en las Américas. Por ejemplo, en 2017, los huracanes Irma y María obligaron a las Bahamas y a la isla de Barbuda, en Antigua y Barbuda, a realizar evacuaciones obligatorias en toda la isla, y provocaron la migración de más de 135.000 puertorriqueños a Estados Unidos.³²¹ Hay una escasez de acuerdos regionales sobre cómo abordar y prevenir los desplazamientos en las Américas, que incluyan protocolos para gestionar los desplazamientos provocados tanto por desastres repentinos, como los huracanes, como por efectos climáticos de aparición menos repentina que hacen inhabitables las zonas de asentamiento actuales, tales como los asentamientos en las costas erosionadas del Caribe.³²²

Los refugiados climáticos se enfrentan a una mayor discriminación y violencia en muchos países cuando solicitan asilo.³²³ Esto se ve agravado por el hecho de que los gobiernos no identifican o categorizan a las personas desplazadas por motivos climáticos, lo que dificulta el acceso de los refugiados climáticos a la protección y la migración.³²⁴ Reconocer y garantizar la protección de los refugiados climáticos como una clase vulnerable distinta de ciudadanos es fundamental para garantizar la justicia climática.

Además de provocar un aumento de la migración y de los refugiados climáticos, los efectos del cambio climático pueden afectar de forma desproporcionada a los refugiados y desplazados actuales.³²⁵ Por ejemplo, casi 2,5 millones de venezolanos han emigrado a Colombia, y otros 2 millones a Chile, Ecuador y Perú,³²⁶ y se enfrentan a vulnerabilidades adicionales como dificultades económicas, explotación sexual, reclutamiento por grupos armados o pandillas callejeras, intimidación, falta de buenas oportunidades de empleo, acceso limitado a la atención médica y xenofobia.³²⁷

Defensores del Clima y del Medio Ambiente. Los activistas climáticos y ambientales tienen más probabilidades de sufrir violencia y criminalización por su activismo. Desde 2012, Global Witness ha concluido que al menos 1.700 defensores de la tierra y el medio ambiente han sido asesinados por proteger sus tierras y recursos.³²⁸ En Brasil, el 85% de estos asesinatos se produjeron en la Amazonia, y se intensificaron tras la elección del expresidente Bolsonaro. Los principales impulsores de estos ataques son la desigualdad de la tierra, los conflictos violentos por la tierra, la corrupción de los que toman las tierras, la reducción de la protección cívica y una cultura de impunidad corporativa que permite que el poder corporativo, apoyado por las políticas gubernamentales, perpetúe la crisis climática y de biodiversidad y asesine a los defensores del medio ambiente.³²⁹ Los activistas climáticos y ambientales también son criminalizados al ser acusados de coacción, usurpación de tierras y otros delitos para justificar la acción policial, o cargan con demandas SLAPPⁱⁱⁱ entabladas por los actores del poder corporativo para disuadir el activismo.³³⁰

VI. SOLUCIONES EN LAS AMERICAS PARA ABORDAR LA EMERGENCIA CLIMÁTICA

Abordar la emergencia climática de manera expeditiva y efectiva en las Américas requerirá respuestas coordinadas a nivel regional, nacional y subnacional. Las soluciones son multifacéticas y requieren la mitigación de los supercontaminantes climáticos, la descarbonización y la protección y restauración de los sumideros de carbono simultáneamente para mantener el planeta por debajo del límite seguro de temperatura de 1,5°C. Además, es fundamental asignar recursos para garantizar la mitigación, la adaptación y la resiliencia a gran escala, ya que la falta de financiación y la escasa capacidad de aplicación suponen graves obstáculos en la región y agravan los impactos sobre las comunidades y los ecosistemas.³³¹ La única forma de detener las violaciones de derechos futuras y actuales es una combinación de acciones fundamentales mediante las cuales se mitiguen los supercontaminantes climáticos, se logre la descarbonización y se protejan los sumideros de carbono.

A. Acciones Sectoriales Específicas para Mitigar Inmediata y Sustancialmente los Supercontaminantes Climáticos y Lograr la Descarbonización en LAC

Los Estados deben aplicar soluciones que abarquen a toda la economía y se centren en sectores altamente contaminantes como la energía, el transporte y los residuos. La adopción de estas medidas de mitigación de eficacia comprobada, con la creación de capacidad y la coordinación regional adecuadas, ofrece oportunidades y beneficios adicionales para la región, como mejoras a corto plazo en la calidad de vida de la población, la creación de puestos de trabajo y la mejora del desarrollo sostenible.³³²

ⁱⁱⁱ Los juicios SLAPP, o juicios estratégicos contra la participación pública, son demandas civiles destinadas a intimidar y silenciar a las personas u organizaciones que se manifiestan sobre cuestiones públicas. Véase en general Cornell Law School, [SLAPP suit](#).

Recuadro 1. Acciones Clave de Mitigación de los CCVC en LAC

- Incorporar las mejores prácticas o actualizar las mejores tecnologías disponibles en los procesos industriales, como la reducción de la quema en antorcha en la industria del petróleo y el gas;
- Buscar la máxima ambición para cumplir con todos los compromisos asumidos en virtud de los tratados atmosféricos, como garantizar la eliminación total o acelerada de los hidrofluorocarbonos (HFC), incorporando al mismo tiempo las máximas medidas de eficiencia energética en el sector de la refrigeración;
- Incorporar medidas dentro de los programas de infraestructuras a gran escala de autoridades públicas como el sector de los residuos, tales como la captura y utilización de las emisiones de metano de los vertederos;
- Aplicar soluciones sostenibles y de bajas emisiones para reducir las emisiones de carbono negro, como ofrecer opciones de transporte alternativas y no motorizadas y gestionar el transporte de mercancías en el sector del transporte;
- Cambio de prácticas, algunas de ellas arraigadas en tradiciones culturales, económicas y sociales, para cocinar y calefaccionar los hogares, así como en la agricultura y las industrias artesanales, y
- Aplicar soluciones climáticas “naturales”, como la proforestación, la mejora de la gestión del suelo y la conservación de bosques, humedales, praderas marinas y otros sumideros naturales.

Energía

- Garantizar el despliegue de las mejores tecnologías disponibles para detener las fugas y prohibir el venteo en el sector del petróleo y el gas;³³³
- Detener el desperdicio de energía capturando el metano en lugar de quemarlo;
- Desinvertir en combustibles fósiles;
- Acelerar la transición hacia las energías renovables invirtiendo en fuentes de energía renovable; y
- Buscar datos sobre energía eólica marina y aprovechar la energía de las olas.

Agricultura

- Mejorar y cambiar las prácticas agrícolas, como la aplicación de diferentes estrategias de pastoreo, cría y alimentación del ganado;
- Se han encontrado varias soluciones efectivas en términos de costos para

reducir las emisiones de N₂O, incluido el uso de nuevas tecnologías en los procesos agrícolas;³³⁴ y

- Detener la quema con fines agrícolas.

Residuos

- Mejorar el tratamiento de residuos sólidos y aguas residuales;³³⁵
- Reducir el desperdicio de alimentos, desviando los residuos orgánicos de los vertederos y mejorando la gestión de los mismos;³³⁶ y
- Desarrollar infraestructura de cadenas de frío sostenibles para reducir los residuos orgánicos enviados a los vertederos.

Transporte

- Introducir rápidamente normas estrictas sobre las emisiones de los vehículos nuevos y eliminar los vehículos con emisiones elevadas, aplicándolas plenamente; y

- Promover y transferir la electrificación en el transporte.

Construcción

- Mejorar la eficiencia energética en múltiples sectores, incluida la construcción y la infraestructura, tanto mediante la modernización como mediante el uso de tecnología energéticamente eficiente en infraestructura nueva;
- Eliminar el gas en las nuevas construcciones y las cocinas con fugas de gas;³³⁷
- Cambiar a energías limpias para la electrificación y calefacción, incluyendo incentivos para promover la instalación de paneles solares y tecnologías de almacenamiento en baterías;
- Cambiar a equipamientos de cocina limpios para reducir el carbono negro;³³⁸
- Cambiar a métodos más limpios de calefacción para reducir el metano y el carbono negro;³³⁹
- Sustituir o modernizar la tecnología de refrigeración utilizada en los equipos de refrigeración y aire acondicionado;³⁴⁰ y
- Actualizar o adoptar normas mínimas de rendimiento energético para los equipos de refrigeración y fortalecer las leyes que prohíben la importación de equipos de refrigeración que no cumplan con las normas en los países exportadores.

B. Acciones Sectoriales Específicas para Mitigar Inmediata y Sustancialmente los Supercontaminantes Climáticos y Lograr la Descarbonización en Estados Unidos y Canadá

Como países de ingresos altos y con emisiones de GEI desproporcionadamente elevadas, tanto en la actualidad como históricamente, Canadá y Estados Unidos deben tomar medidas urgentes para contrarrestar la crisis climática. La variedad de contaminantes (CCVC, óxido nitroso y dióxido de carbono) y de industrias contaminantes torna necesaria la aplicación simultánea de múltiples soluciones. Estados Unidos y Canadá tienen la capacidad de liderar el desarrollo de nuevas tecnologías para aumentar la eficiencia energética, incrementar la tecnología de captura de carbono y garantizar una transición justa. Abordar la emergencia climática en Canadá y Estados Unidos requiere una acción urgente en diversos sectores, el sector privado y en todos los niveles de gobierno.

Estados Unidos y Canadá deben centrarse en el desarrollo de tecnologías para la transición hacia un futuro sin emisiones de carbono, enfocándose en sectores contaminantes clave como la energía, el transporte, los residuos y la agricultura. Estas acciones de mitigación ofrecen oportunidades para que estos dos países se conviertan en líderes del desarrollo sostenible, creen puestos de trabajo y garanticen una transición justa.

Recuadro 2. Acciones Clave de Mitigación de los CCVC en EE.UU. y Canadá

- Explorar el potencial de desarrollo de las tecnologías necesarias, como el hidrógeno limpio, energías renovables y estrategias de captura de carbono;
- Cambiar los incentivos financieros, incluida la eliminación de las subvenciones a los combustibles fósiles, desinvirtiendo fondos públicos de combustibles fósiles e incentivando el desarrollo de tecnologías más sostenibles;
- Incorporar las mejores prácticas o actualizar las mejores tecnologías disponibles en los procesos industriales, especialmente en el sector energético;
- Modernizar la infraestructura, la construcción y la tecnología para reducir las emisiones y mejorar la eficiencia energética en todos los sectores;
- Explorar soluciones climáticas naturales practicando una gestión sostenible de la tierra y protegiendo los sumideros de carbono;
- Gestionar las emisiones procedentes de los residuos y la agricultura; y
- Eliminar las lagunas en la presentación obligatoria de informes sobre emisiones.

Energía

- Eliminar las subvenciones a los combustibles fósiles y desinvertir fondos públicos de combustibles fósiles;
- Eliminar las lagunas en la presentación obligatoria de informes sobre emisiones, incluidas las emisiones procedentes de la puesta en marcha, el cierre y las averías de los grandes productores de energía;
- Limitar las emisiones de metano en el sector del petróleo y el gas, incluso mediante la promulgación de regulaciones que limiten las emisiones procedentes del venteo y fugas;³⁴¹
- Apoyar el desarrollo de energías renovables, por ejemplo diversificando las cadenas de suministro, explorando el potencial de los pequeños reactores modulares y apoyando las innovaciones en materia de combustibles biogénicos con bajas emisiones de carbono;³⁴²
- Ampliar el suministro de hidrógeno azul y verde, apoyar el crecimiento de los biocombustibles y de los combustibles sostenibles para la

aviación,³⁴³ e invertir en hidrógeno limpio creando demanda de hidrógeno bajo en carbono y desarrollando tecnologías de uso final del hidrógeno;³⁴⁴

- Regular los artefactos que utilizan madera como combustible para reducir las emisiones de carbono negro;³⁴⁵
- Sustituir las fuentes de gas natural por fuentes de energía con cero emisiones de carbono, especialmente en los sectores de energía eléctrica, fabricación, productos químicos y construcción;³⁴⁶ y
- Ampliar las renovables invirtiendo en la cadena de suministro de energías renovables, expandiendo la red eléctrica, garantizando el acceso a tierras adecuadas para el despliegue de energías renovables instalando las mismas.³⁴⁷

Tecnología de Emisiones Negativas

- Explorar soluciones basadas en la naturaleza mediante la restauración de hábitats, la protección de los sumideros de carbono y la adopción de prácticas

indígenas y otras prácticas de gestión sostenible de la tierra;³⁴⁸

- Apoyar el desarrollo de nuevas tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS, por sus siglas en inglés).³⁴⁹ Esto incluye mejorar la captura biológica de carbono con almacenamiento geológico, incluyendo la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS, por sus siglas en inglés) y la fertilización oceánica,³⁵⁰ y mejorar e invertir en tecnologías no biológicas, incluyendo la meteorización mejorada de rocas y la captura directa en el aire;³⁵¹
- Establecer centros de captura de carbono en lugares clave, como la Costa del Golfo y Medio Oriente;³⁵² y
- Explorar opciones para eliminar el metano de la atmósfera, incluso a través de la oxidación química catalítica, el aumento de los sumideros atmosféricos y la eliminación microbiana por los metanótrofos.³⁵³

Construcción e infraestructura

- Adoptar restricciones a la exportación de equipos de refrigeración que no cumplan con las normas de eficiencia energética y las obligaciones del Protocolo de Montreal del país exportador;
- Invertir en mejorar la eficiencia energética en diversos sectores, incluyendo la construcción y la infraestructura, tanto mediante la modernización como el desarrollo de nuevas tecnologías;³⁵⁴
- Reducir las emisiones de las instalaciones y la infraestructura existentes, incluso mediante la modernización, la electrificación y la captura de carbono;³⁵⁵
- Aplicar códigos de edificación para reducir la intensidad de las emisiones

de la infraestructura comercial y residencial, incluida la calefacción, la refrigeración y el uso de electricidad; y

- Introducir normas gubernamentales para las compras exigiendo que el gobierno adquiera únicamente productos y servicios con cero emisiones en las categorías donde sea posible.³⁵⁶

Transporte

- Aplicar normas más estrictas para las emisiones de los vehículos como exigir filtros de partículas diésel;
- Promover la electrificación del transporte mediante el apoyo e inversión en infraestructura, incluyendo la actualización de las redes eléctricas para apoyar la producción de autos eléctricos, la inversión en ómnibus eléctricos y sistemas de ferroviarios,³⁵⁷ y invertir en vehículos eléctricos;³⁵⁸ y
- Abordar las emisiones de carbono negro del transporte apoyando una rotación de los vehículos con motores diésel.³⁵⁹

Agricultura

- Desarrollar soluciones para reducir las emisiones de N₂O de los procesos agrícolas, como la agricultura de precisión, los inhibidores de nitrógeno y las bacterias promotoras del crecimiento de las plantas;³⁶⁰
- Invertir en mejorar la eficiencia energética en el sector agrícola;³⁶¹ y
- Tomar medidas para reducir el consumo de productos animales, incluyendo la inversión en proteínas alternativas, promoviendo las dietas bajas en carne y brindando acceso a alternativas vegetales.³⁶²

Residuos

- Mitigar las emisiones de metano de las fuentes de agricultura como la fermentación entérica;³⁶³
- Incentivar el desvío de los residuos orgánicos de los vertederos;³⁶⁴ y
- Mitigar las emisiones de metano de los vertederos de residuos sólidos urbanos,³⁶⁵ incluso a través de regulaciones que exijan controles de metano en los vertederos.³⁶⁶

C. Proteger y Restaurar los Sumideros de Carbono en las Américas

Salvar los sumideros de carbono terrestres en las Américas requiere una estrategia múltiple de protección de los bosques de la región mediante la prevención de la deforestación y la restauración de los sumideros a través de la proforestación.³⁶⁷

Recuadro 3. Acciones Clave para Proteger y Restaurar los Sumideros de Carbono en las Américas

- Establecer derechos a la tierra para las comunidades indígenas y locales;
- Aplicar medidas de zonificación para reducir la usurpación de tierras urbanizadas;
- Establecer reservas de tierras protegidas y promover la protección de los bosques y las prácticas que favorezcan la forestación;
- Proteger los humedales amenazados;
- Preservar las turberas existentes y restaurar las degradadas;
- Restaurar los ecosistemas costeros de ‘carbono azul’; y
- Prohibir la bioenergía.

Los esfuerzos para proteger los sumideros de carbono terrestres deben empezar por reconocer los derechos indígenas a la tierra e incorporar estrategias de gestión de tierras indígenas, como la silvopastura y la agricultura regenerativa.³⁶⁸ Las soluciones indígenas y de las comunidades locales podrían ayudar a restaurar una parte significativa de este potencial de almacenamiento de carbono, ya que estas comunidades administran al menos el 22% del carbono forestal mundial, que consiste en áreas que albergan el 80% de la biodiversidad del planeta.³⁶⁹ Sólo en la Amazonia, los bosques gestionados por los pueblos indígenas secuestraron 340 millones de toneladas métricas de carbono al año entre 2001 y 2021.³⁷⁰ Las investigaciones han demostrado que el establecimiento de derechos a la tierra para las comunidades indígenas y locales tiende a reducir las tasas de deforestación y las emisiones de carbono, mientras que las tasas de deforestación son mayores en las zonas donde no se garantizan estos derechos.³⁷¹

Por ejemplo, entre 2000 y 2012, la deforestación en la Amazonia brasileña sólo se produjo en el 0,6% de las tierras protegidas por comunidades indígenas, en comparación con el 7,0% de las tierras no indígenas.³⁷² Además, debido a la gestión de la tierra y a las prácticas de defensa del medio ambiente, los bosques administrados por comunidades indígenas contienen un 36% más de carbono por hectárea que las tierras no indígenas de la Amazonia brasileña.³⁷³ Sólo en este lugar, las tierras indígenas y las zonas protegidas por el gobierno podrían evitar la deforestación de 27,2

millones de hectáreas de aquí a 2050, ahorrando 12 mil millones de toneladas de CO² (lo que equivale a las emisiones de CO² de todos los países de América Latina y el Caribe en tres años).³⁷⁴

Además, las medidas para proteger los sumideros oceánicos incluyen la restauración de los ecosistemas costeros de “carbono azul.”³⁷⁵ En la última década, los ecosistemas oceánicos y terrestres han secuestrado el 52% de las emisiones antropogénicas de CO₂—sin embargo, es posible que esto no tome en cuenta otros ecosistemas costeros.³⁷⁶ Por ejemplo, los manglares secuestran carbono a un ritmo diez veces mayor que el de las selvas tropicales cada año.³⁷⁷ Reducir las tasas de deforestación de los manglares podría secuestrar hasta un 55–61% más de carbono.³⁷⁸ Por lo tanto, proteger los sumideros costeros, terrestres y oceánicos existentes es fundamental para una rápida mitigación.

El Panel de Alto Nivel para una Economía Oceánica Sostenible, un grupo multilateral formado por representantes de 14 países oceánicos, prevé que para 2050 las opciones de mitigación del cambio climático y almacenamiento de carbono basadas en los océanos podrían representar el 21% de la reducción de emisiones necesaria para limitar el calentamiento global a 1,5°C.³⁷⁹ Esto equivale a un porcentaje mayor que todas las emisiones actuales de las centrales eléctricas de carbón en todo el mundo.

Otra estrategia para preservar los sumideros es mediante el despliegue de REDD+, o reducción de emisiones a partir de la gestión sostenible de los bosques tropicales y la conservación y mejora de las reservas forestales de carbono,³⁸⁰ que ya ha logrado una reducción de 11 mil millones de toneladas de emisiones de CO² en 14 países hasta 2022.³⁸¹ Los países pueden obtener pagos basados en resultados de diversas fuentes, entre ellas públicas y privadas, bilaterales y multilaterales, y otras.³⁸² Estas fuentes incluyen el Fondo Verde para el Clima, el Gobierno de Noruega, el Gobierno de Alemania, el Programa REM Colombia—Visión Amazonía y la Iniciativa Forestal Centroafricana.³⁸³

Entre las salvaguardias comunes antes de poner en marcha un proyecto REDD+ se incluyen el consentimiento libre, previo e informado de las comunidades que residen dentro o cerca del proyecto, el reconocimiento de los derechos a la tierra y a los recursos, y las consultas de buena fe entre los Estados y las comunidades que dependen de los bosques.³⁸⁴ Esto se debe a que los proyectos REDD+ pueden interferir en el acceso de las comunidades (normalmente pueblos indígenas y comunidades locales) a los bosques y a los recursos forestales,³⁸⁵ desplazar a las comunidades,³⁸⁶ agudizar los conflictos por la tierra,³⁸⁷ y en última instancia, comercializar un bosque como proyecto de reducción de emisiones, en lugar de utilizar otros beneficios de ese recurso natural.³⁸⁸ La Declaración de las Naciones Unidas sobre los Derechos de los Pueblos Indígenas subraya la importancia del papel de los pueblos indígenas en la gestión de los bosques y señala que las salvaguardias REDD+ exigen “la participación plena y efectiva de... los pueblos indígenas y las comunidades locales”, lo que implica además la necesidad del consentimiento libre, previo e informado para llevar a cabo estos proyectos.³⁸⁹

D. La Mitigación Efectiva del CO2 y los Supercontaminantes Climáticos Es Fundamental para Dar Tiempo a LAC a Adaptarse, Crear Resiliencia y Proteger los Derechos

Aplicar estas acciones de mitigación ayudará a evitar los peores impactos del cambio climático, mientras que se dará tiempo y recursos materiales a los Estados para formular e implementar acciones equitativas, justas y sostenibles para ayudar a las personas y a las comunidades a hacer frente a los impactos inevitables.

ANEXO A: IMPACTOS DETALLADOS EN LAS AMERICAS

A. Cambios en el Clima y Fenómenos Meteorológicos Extremos

Olas de calor. Si no se toman medidas rápidas, es probable que las olas de calor masivas sigan aumentando en frecuencia e intensidad en la región de LAC, especialmente en los lugares más cercanos al ecuador. En 2021 y 2022, varios países de dicha región registraron temperaturas máximas sin precedentes.³⁹⁰ Entre 2016 y 2020, varios países experimentaron un aumento en el número promedio de días de exposición a olas de calor (en comparación con 1986-2005), incluyendo 9,3 días en Colombia, 11,2 días en Honduras y 15,2 días en Surinam.³⁹¹ World Weather Attribution, una iniciativa puesta en marcha junto a científicos del clima para explicar cómo se han intensificado los fenómenos meteorológicos recientes debido al cambio climático, confirmó que el cambio climático hizo 60 veces más probable el récord de calor de principios de la temporada estival en Argentina y Paraguay, lo que provocó un aumento de los cortes de electricidad, incendios forestales, muertes relacionadas con el calor y disminuciones de las cosechas y la productividad laboral.³⁹² Estas olas de calor aumentaron los incendios forestales en Argentina y Paraguay en un 283% y en un 258% respectivamente a principios de 2022.³⁹³ Además, el informe confirma que olas de calor similares aumentarán en frecuencia e intensidad con el calentamiento global añadido.³⁹⁴ La mejor y más rápida manera de reducir el ritmo de calentamiento a corto plazo es reducir las emisiones de supercontaminantes climáticos, como se discute en la Sección II *supra*.

En EE.UU., las olas de calor se producen con más frecuencia que antes en las grandes ciudades. Su frecuencia ha aumentado de forma constante, pasando de una media de dos olas de calor al año durante la década de 1960 a seis al año durante las décadas de 2010 y 2020.³⁹⁵ En Canadá, el calor extremo causó la muerte de casi 600 personas en Columbia Británica en 2021, y se ha producido un aumento significativo de los incendios forestales.³⁹⁶ En 2021, la región del noroeste del Pacífico, que abarca los estados estadounidenses de Oregón y Washington y las provincias canadienses de Columbia Británica y Alberta, experimentó una ola de calor sin precedentes. Los efectos de este suceso fueron catastróficos, incluyendo cientos de muertes atribuibles en todo el noroeste del Pacífico, mortalidad masiva de la vida marina, reducción del rendimiento de cultivos y frutas, inundaciones fluviales por el rápido deshielo de la nieve y los glaciares y un aumento sustancial de los incendios forestales —contribuyendo estos últimos a los deslizamientos de tierra ocurridos en los meses siguientes.³⁹⁷

De acuerdo con el IE6 del GTI, “[E]s prácticamente seguro que ha aumentado la frecuencia y la intensidad de los episodios de calor extremo (incluidas las olas de calor) en la mayoría de las regiones terrestres desde la década de 1950.... y hay un nivel de confianza alto en que el cambio climático inducido por el ser humano es la principal fuerza impulsora de estos cambios.”³⁹⁸ Los impactos actuales del cambio climático ya han hecho que las olas de calor extremas en la región de LAC sean un 60% más probables; si las temperaturas globales aumentan 2°C las olas de calor en la región serán cuatro veces más severas—esta severidad sería imposible sin el calentamiento del Antropoceno.³⁹⁹ Además, las temperaturas extremas ya han aumentado el riesgo de incendios forestales hasta niveles de riesgo extremo que duran una media de 7 a 10 días más.⁴⁰⁰ El calor extremo amenaza la vida, la salud, la seguridad hídrica y la seguridad alimentaria.

Huracanes y Ciclones. En 2021, LAC experimentó un número de ciclones tropicales superior a la media que causaron alrededor de US\$80 mil millones en daños a personas e infraestructuras.⁴⁰¹ Este fue el sexto año consecutivo en el que la temporada de huracanes en el Atlántico fue superior a la media.⁴⁰² La creciente intensidad y frecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos desencadenan desplazamientos en la región, siendo Perú, Colombia y Guatemala los países que experimentan el mayor promedio de desplazamientos causados por huracanes extremos.⁴⁰³ Estos fenómenos meteorológicos ponen de relieve la necesidad de abordar el cambio climático con la mayor rapidez y eficacia posibles.

En EE.UU., en 2021, se produjeron 20 catástrofes meteorológicas y climáticas diferentes que costaron miles de millones de dólares. El costo total de estos sucesos fue de \$145 mil millones, lo que lo convierte en el tercer año más costoso registrado, por detrás de 2017 y 2005. 2021 fue el séptimo año consecutivo en el que se produjeron 10 o más catástrofes por un valor de 10 mil o más de miles de millones de dólares en Estados Unidos.⁴⁰⁴ En 2017, el huracán María causó el apagón más largo de la historia de Estados Unidos y provocó 2.975 víctimas fatales en el territorio estadounidense de Puerto Rico.⁴⁰⁵ El huracán Irma, que también azotó en 2017, provocó la destrucción del 25 % de los edificios en los Cayos de Florida y un 65 % sufrió daños significativos.⁴⁰⁶ En Canadá, el huracán Fiona (cuya calificación posteriormente bajó a tormenta Fiona) causó daños generalizados en las infraestructuras y provocó 660 millones de dólares solo en daños asegurados.⁴⁰⁷ Solo el aumento de la frecuencia de los huracanes podría elevar el gasto estadounidense en respuesta a desastres costeros entre \$22 y 94 mil millones anuales para finales de siglo.⁴⁰⁸

Precipitaciones. Se prevé que las precipitaciones medias cambien significativamente, aumentando en el noroeste y el sureste de América del Sur, y disminuyendo en el noreste y el suroeste de América del Sur.⁴⁰⁹ El aumento de las precipitaciones desencadena inundaciones y deslizamientos de tierra, que afectan a miles de personas y causan más daños. Sin embargo, la disminución de las precipitaciones afecta el suministro de agua y reduce la productividad y los ingresos agrícolas.⁴¹⁰ Solo en 2019, las inundaciones causaron la mayoría de los 1,5 millones de desplazamientos forzados en las Américas.⁴¹¹ El Banco Mundial estima que, sin una acción climática concertada, para 2050, más de 17 millones de personas en América Latina y el Caribe podrían verse obligadas a desplazarse para escapar de los efectos de evolución lenta del cambio climático.⁴¹² Los riesgos de crisis hídricas adicionales por el aumento o la disminución de las precipitaciones subrayan la necesidad de una acción climática rápida. En 2022, el centro y el este de México experimentaron precipitaciones entre un 40% y un 60% por debajo de los niveles normales, mientras que el noroeste de México estuvo un 40% por encima de lo normal.⁴¹³

En EE.UU., durante todo el periodo comprendido entre 1910 y 2020, la parte del país que experimentó precipitaciones extremas en un solo día aumentó a un ritmo de aproximadamente medio punto porcentual por década.⁴¹⁴ En Canadá, dos días de intensas precipitaciones en Columbia Británica en 2021 provocaron la pérdida de al menos cinco vidas, aislaron por completo a la ciudad de Vancouver del resto de Canadá por carretera y ferrocarril, y la convirtieron en la catástrofe natural más costosa de la historia de esta provincia.⁴¹⁵

Sequías. La frecuencia e intensidad de las sequías han aumentado en LAC, lo que ha provocado que 3,5 millones de personas necesiten asistencia humanitaria solo en la región del Corredor Seco

de Centroamérica.⁴¹⁶ El Corredor Seco entró en su quinto año consecutivo de sequía en 2019 y se prevé que aumenten su duración entre un 12% y un 30%, su intensidad entre un 17% y un 42% y su frecuencia entre un 21% y un 42% para finales de siglo.⁴¹⁷ En 2022, el 30% del territorio mexicano experimentó una sequía de moderada a extrema, y el 68% de Puerto Rico sufrió una sequía de moderada a grave.⁴¹⁸ En mayo de 2022, más de la mitad (56%) de México experimentó una sequía de moderada a excepcional.⁴¹⁹ En la Amazonia, la sequía extrema provocó un aumento de los incendios, incrementando la conversión de selva tropical en sabana.⁴²⁰ En 2022, Chile entró en el decimocuarto año de su mega sequía, la sequía más larga y grave del país en más de mil años.⁴²¹ La energía hidroeléctrica actualmente suministra el 50% de la electricidad en América Latina; además, el agua es un insumo clave para otras formas de generación de energía.⁴²² La escasez de agua probablemente conducirá a cortes de electricidad principalmente en áreas urbanas, tal como se observó cuando Venezuela no pudo operar la represa de Guri, el segundo centro hidroeléctrico más grande del mundo, en medio de una sequía.⁴²³ Durante el último año, Argentina—uno de los principales exportadores mundiales de soja y maíz, ha sufrido la peor sequía en más de 60 años, lo que ha afectado su producción agrícola y ha agravado la inflación y la crisis económica.⁴²⁴ El impacto de la sequía en la balanza de pagos de este país es un ejemplo de lo que puede esperar la región de la relación entre los fenómenos extremos y la economía. Ya se han sufrido pérdidas similares en Brasil y Paraguay, que experimentaron una pérdida de hasta el 70% en la producción de soja y el 43% en la de maíz; la pérdida causada por la sequía durante un año en Uruguay costó al sector agrícola y ganadero US\$56 millones.⁴²⁵ El aumento de la frecuencia y la intensidad de las sequías señala la gravedad de la necesidad de una acción climática intensiva.

En EE.UU., el aumento del calor y la reducción de la nieve a causa del cambio climático han amplificado las recientes sequías hidrológicas (grave escasez de agua) en California, la cuenca del río Colorado y el río Grande. En California, el aumento de las temperaturas intensificó la sequía entre 2011 y 2016, que se había iniciado tras años de escasas precipitaciones, causando escasez de agua a ecosistemas, ciudades, explotaciones agrícolas y generadores de energía.⁴²⁶ En Canadá, el cambio climático contribuyó a una sequía extrema en Columbia Británica en 2015 que fue inusual por su gravedad, alcance e impactos. En Alberta, las mismas condiciones de sequía llevaron al gobierno a declarar a dicha provincia zona de desastre agrícola.⁴²⁷ Las implicancias de estas sequías tienen repercusiones de gran alcance dada la enorme influencia de Estados Unidos y Canadá en la economía mundial.

B. Océanos y Zonas Costeras

La región de LAC es especialmente vulnerable a los impactos del cambio climático debido a su dependencia de los ecosistemas costeros para obtener alimentos y medios de subsistencia. El aumento del nivel del mar, la acidificación de los océanos y los fenómenos meteorológicos extremos están provocando daños en las infraestructuras costeras, el desplazamiento de comunidades y la pérdida de biodiversidad.

Aumento del Nivel del Mar. En las tres últimas décadas, el nivel del mar ha aumentado a un ritmo superior al mundial en el Atlántico Sur y seguirá subiendo en los océanos que rodean a la región. El nivel del mar ha subido 2,21 mm al año en la vertiente del Pacífico de América del Sur; 3,23 mm al año en las costas del Atlántico Norte tropical, alrededor de América Central y el sur del Caribe; 3,60 mm al año en las costas del Atlántico Norte subtropical y el Golfo de México; y 3,66

mm al año en la costa atlántica de América del Sur.⁴²⁸ (En comparación, el promedio mundial de aumento del nivel del mar entre 1993 y 2022 fue de 3,4 mm al año.⁴²⁹) Este fenómeno provocará más inundaciones costeras en las zonas bajas y la erosión de las costas. En las islas bajas del Caribe y las ciudades costeras, el aumento del nivel del mar plantea varios riesgos, que afectan, por ejemplo, los medios de subsistencia, la agricultura, la acuicultura y la economía. Estos riesgos subrayan la necesidad de una acción climática decisiva, rápida y eficaz.

Estados Unidos y Canadá también son vulnerables a los efectos del cambio climático en la zona costera. Las comunidades pesqueras de subsistencia, como las de Alaska, corren el riesgo de sufrir consecuencias nutricionales, infraestructurales, económicas y sanitarias para la lengua, la educación y las propias comunidades a medida que las zonas costeras sigan viéndose afectadas. Hay más de un trillón de dólares en bienes inmuebles a lo largo de la costa de Estados Unidos, todo lo cual está en riesgo de daños y degradación.⁴³⁰ En Canadá, las comunidades costeras del norte, muchas de las cuales son indígenas, han experimentado algunos de los cambios climáticos más rápidos a nivel mundial, y los cambios previstos para la región seguirán siendo significativos.⁴³¹

Acidificación del Océano. Las emisiones de GEI y el aumento de la temperatura asociado también están alterando la química de los océanos, aumentando la acidez del agua de mar, con efectos devastadores para la vida marina en la región de LAC. En todo el Caribe, y en las aguas más frías del Pacífico hasta la Patagonia, la acidificación de los océanos está afectando la capacidad de organismos vivos, como los mariscos y los corales, para formar conchas y esqueletos, lo que perjudicará gravemente la seguridad alimentaria y los medios de subsistencia en la región. Estos efectos se ven agravados por la sobrepesca, la contaminación, el calentamiento de los océanos y la reducción de los niveles de oxígeno. La región depende en gran medida del mar para su alimentación y sustento, y sin una reducción significativa de las emisiones, las consecuencias serán catastróficas. El aumento de las temperaturas, la acidificación de los océanos y otros impactos del cambio climático están provocando la degradación de los arrecifes de coral en el Caribe.

En EE.UU., la acidificación de los océanos también supone una grave amenaza para la biodiversidad de zonas ecológicamente sensibles, como la costa de Alaska.⁴³² En Canadá, las frías aguas costeras del país pueden ser especialmente propensas a la acidificación debido a la presencia natural de aguas subsaturadas a poca profundidad (costa del Pacífico), o de grandes aportaciones de agua dulce (costa del Ártico).⁴³³ En la región noreste del Océano Pacífico, por ejemplo, el horizonte de saturación es naturalmente poco profundo –tan sólo 100 metros por debajo de la superficie. Los científicos prevén que la profundidad de saturación será menor a medida que aumenten las concentraciones globales de CO₂ atmosférico durante el próximo siglo, lo que pondrá en riesgo de acidificación oceánica a los organismos que viven cerca de la superficie.⁴³⁴

Arrecifes de Coral. Los arrecifes de coral prestan servicios ecosistémicos esenciales, como la protección frente a las mareas de tormenta y las olas, y el apoyo a la pesca y el turismo. Su pérdida tendrá importantes repercusiones económicas y ecológicas en las Américas en general. Incluso si el calentamiento global se limita a un aumento de 1,5°C, entre el 70% y el 90% de los arrecifes de coral de aguas cálidas desaparecerán; esta cifra aumenta hasta casi desaparecer, si no totalmente, cuando las temperaturas sube a 2°C.⁴³⁵ La cubierta de corales vivos constructores de arrecifes del Caribe ha disminuido en más de un 80% en los últimos 50 años.⁴³⁶ Dado que los arrecifes de coral

sustentan el 25% de la vida marina de nuestros océanos, la desaparición masiva de los mismos provocará inseguridad alimentaria en la mayor parte del mundo, especialmente en las poblaciones costeras.⁴³⁷

Los arrecifes de coral también actúan como amortiguadores naturales de las costas frente a las olas, las mareas de tormenta, las inundaciones y la erosión, proporcionando protección a millones de personas sólo en Estados Unidos que viven en zonas costeras quienes sufrirán efectos más graves sin la protección de los arrecifes de coral.⁴³⁸ Se calcula que 1.000 millones de personas en todo el mundo se benefician de los servicios ecosistémicos que proporcionan los arrecifes de coral, incluidos los alimentos, la protección costera y los ingresos procedentes del turismo y la pesca.⁴³⁹ Más allá de la protección y la seguridad alimentaria, los arrecifes de coral proporcionan un gran beneficio económico a través del turismo, que en algunos casos representa un tercio del PBI en el Caribe y hasta el 80% en las Maldivas.⁴⁴⁰ La pérdida de arrecifes de coral provocará pérdidas económicas de hasta US\$375 mil millones anuales como resultado de la pérdida de turismo y la destrucción por inundaciones y otras tormentas.⁴⁴¹

Degradación Costera. La erosión de las costas es uno de los principales impactos del cambio climático en las zonas costeras de la región de LAC. El aumento del nivel del mar y la mayor frecuencia e intensidad de las tormentas están provocando la pérdida de playas, acantilados y humedales costeros.⁴⁴² Dicha erosión está amenazando la infraestructura, como viviendas, carreteras y puertos, y también está afectando los medios de vida de las comunidades locales que dependen del turismo y la pesca. La erosión de las costas se debe a una combinación de factores naturales y humanos. Los factores naturales incluyen la acción de las olas, las mareas y las corrientes, mientras que los factores humanos incluyen el desarrollo costero, la extracción de arena y la deforestación. Este fenómeno tiene importantes repercusiones económicas y sociales. Disminuye el valor de las propiedades costeras, afecta los ingresos del turismo y provoca el desplazamiento de comunidades. La pérdida de humedales costeros, como los manglares, también reduce la protección que estos ofrecen contra las mareas de tormenta y las inundaciones.⁴⁴³ Muchas medidas, como la mitigación de los GEI, la financiación de infraestructuras de adaptación y la protección de manglares y humedales, reducirían significativamente los impactos y protegerían a las comunidades costeras.⁴⁴⁴

C. Glaciares y Montañas

Pérdida de Hielo. El nivel del mar está subiendo a un ritmo acelerado debido al deshielo de los glaciares y al calentamiento antropogénico.⁴⁴⁵ Entre 1992–1999 y 2010–2019, el ritmo de pérdida de glaciares y mantos de hielo se multiplicó por cuatro y, junto con la pérdida de masa glaciaria, fue el factor que más contribuyó al aumento del nivel del mar entre 2006 y 2018,⁴⁴⁶ poniendo en peligro a 900 millones de personas que viven en zonas costeras bajas—uno de cada diez habitantes de la Tierra.⁴⁴⁷ Desde la década de 1980, los glaciares de los Andes han disminuido entre un 30% y un 50% en total, y el sureste de los Andes ha experimentado la mayor pérdida de masa glaciaria de todo el mundo.⁴⁴⁸ La disminución del suministro de agua debido al retroceso de los glaciares tendrá efectos socioeconómicos negativos, por ejemplo, afectará la producción de fruta en Argentina.⁴⁴⁹ En América del Sur, los campos de hielo de la Patagonia son las mayores masas de hielo del hemisferio sur fuera de la Antártida y están perdiendo volumen rápidamente, provocando inundaciones y cambiando los ecosistemas fluviales.⁴⁵⁰ Los impulsores no climáticos están

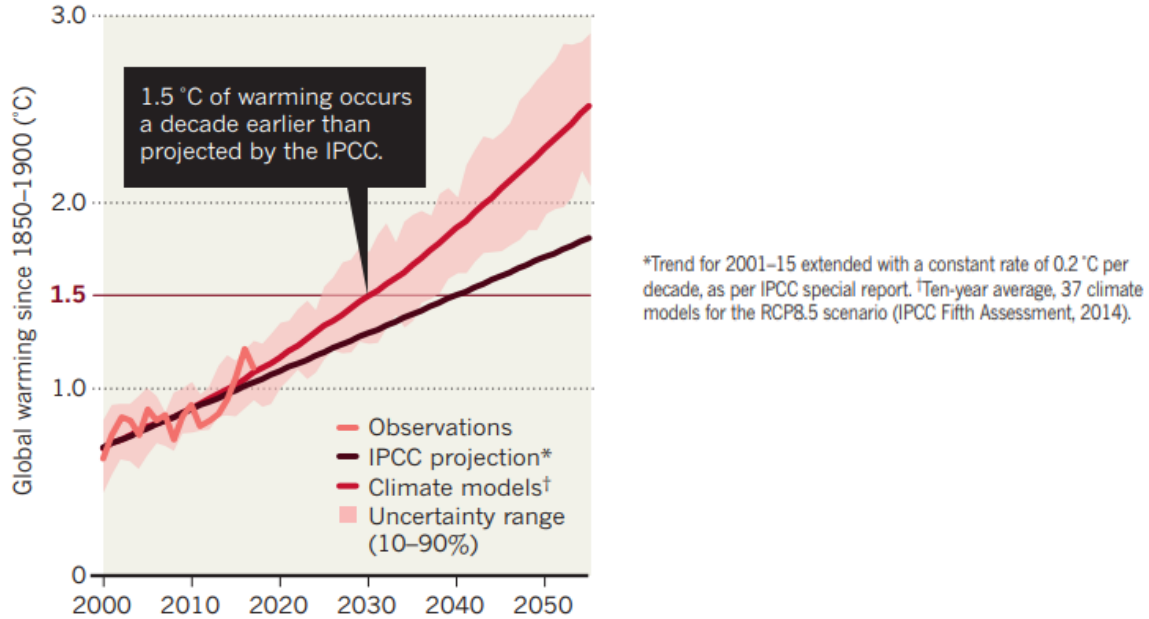
exacerbando la vulnerabilidad de las comunidades costeras bajas ante el aumento del nivel del mar y los fenómenos extremos a nivel del mar.⁴⁵¹

La reducción rápida de las emisiones es fundamental para evitar una mayor pérdida de hielo y, tal y como se explica en la [Sección II](#) *supra*, la reducción de las emisiones de supercontaminantes climáticos es la mejor y más rápida forma de frenar el ritmo de calentamiento a corto plazo —una reducción rápida puede disminuir el ritmo de aumento del nivel del mar en un 18% para 2050.⁴⁵²

ANNEX B: EL CAMBIO CLIMÁTICO EN CIFRAS: EMISIONES, IMPACTOS, SOLUCIONES Y BENEFICIOS

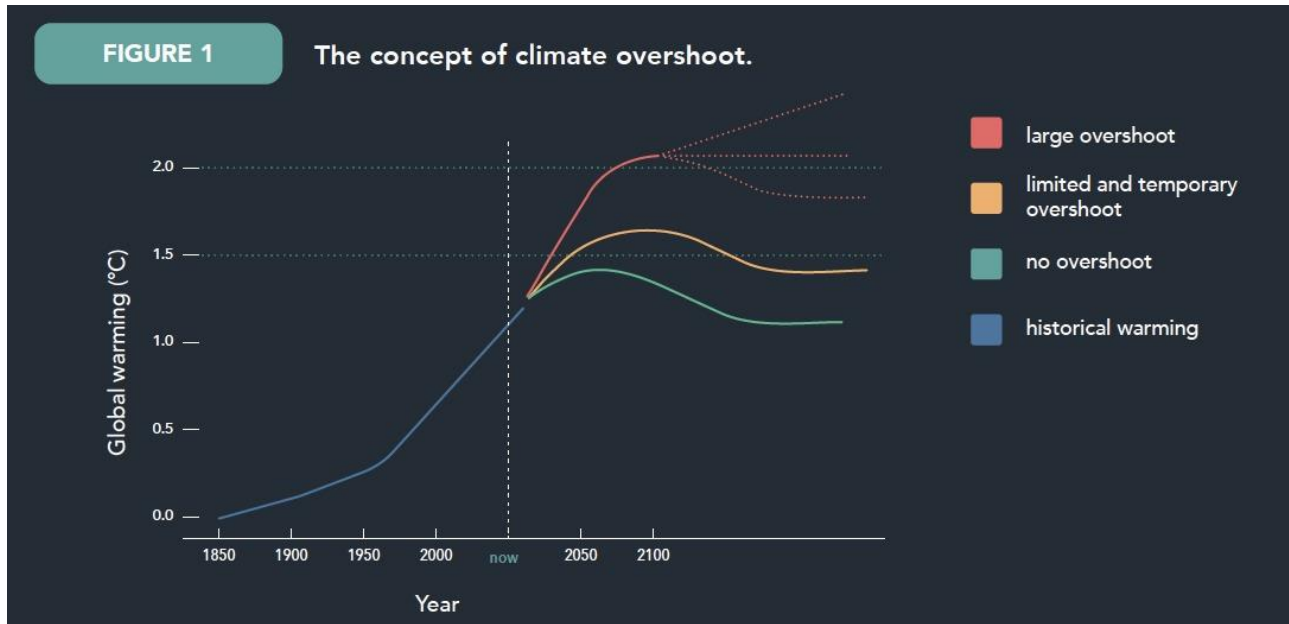
A. La Necesidad de Actuar Rápidamente Contra los Supercontaminantes Climáticos

Figura 1. Trayectoria de Temperatura Hacia la Ruptura de la Barrera de 1,5°C



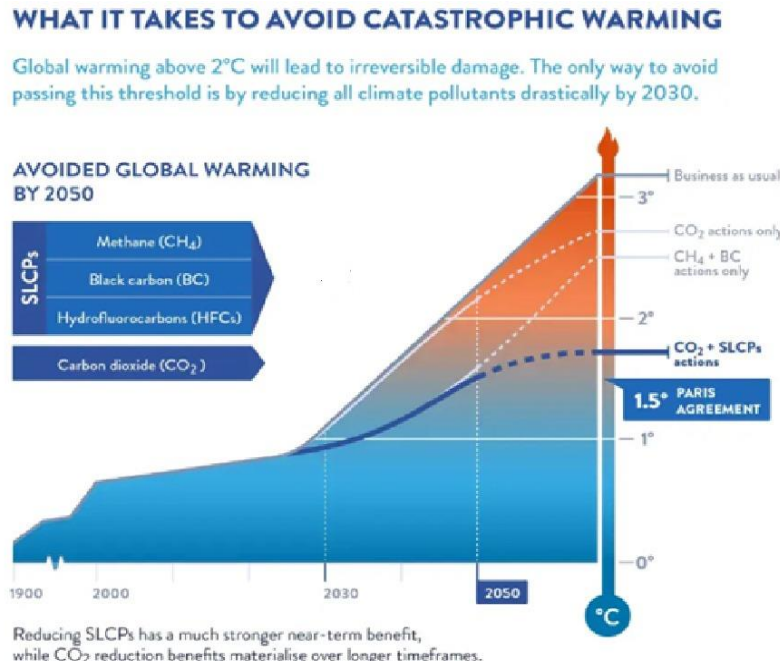
Fuente: Xu Y., Ramanathan V., & Victor D. (2018) [Global warming will happen faster than we think](#), Comment, NATURE 564(7734): 30-32.

Figura 2. El Concepto de Rebasamiento Climático



Fuente: Climate Overshoot Commission (2023) [REDUCING THE RISKS OF CLIMATE OVERSHOOT](#), 27.

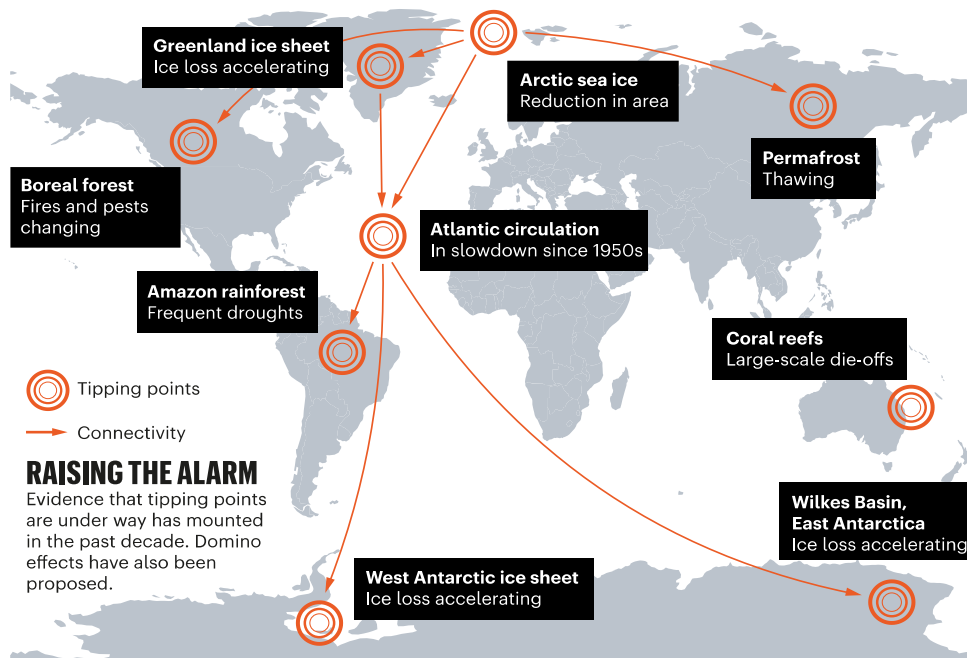
Figura 3. Consecuencias del Retraso en la Mitigación de los Contaminantes Climáticos de Vida Corta en la Temperatura



Fuente: Climate & Clean Air Coalition, [What are short-lived climate pollutants?](#), SLCP Infographics (última visita el 8 de septiembre de 2023).

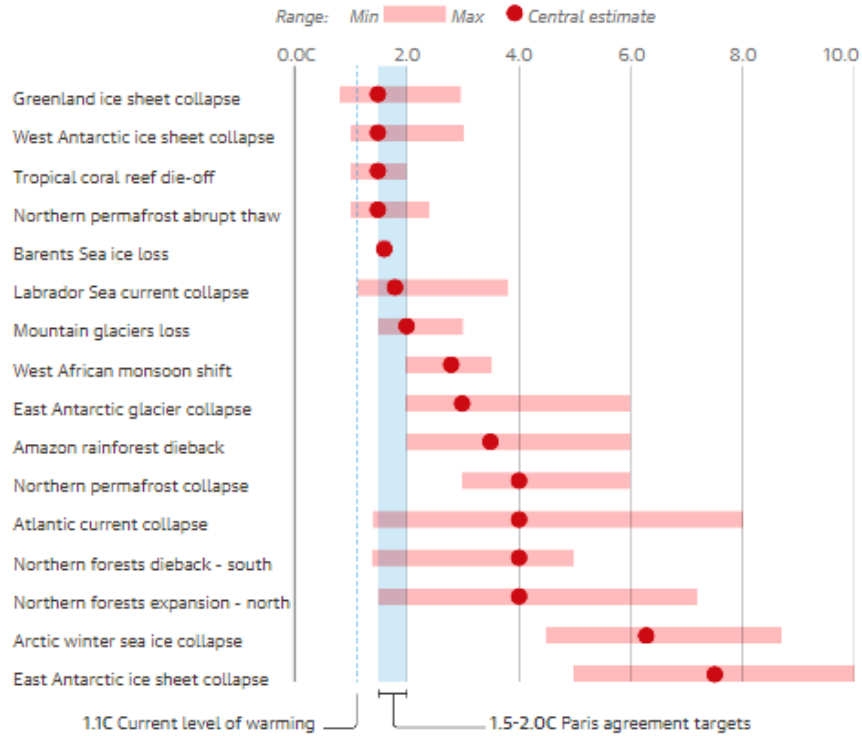
B. Puntos de Inflexión Climáticos

Figura 4. Puntos Críticos de Inflexión Climáticos



Fuente: Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) [Climate tipping points—too risky to bet against](#), Comment, NATURE, 575(7784): 592–595.

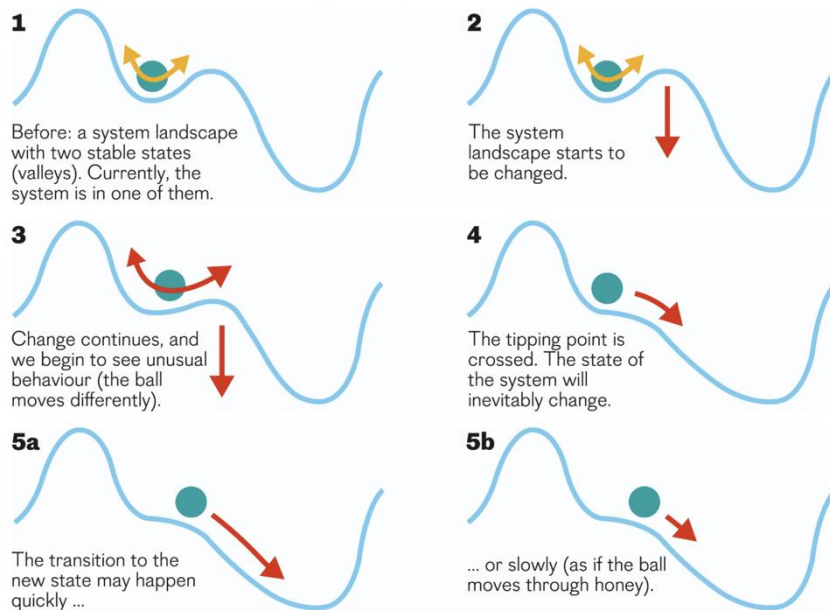
Figura 5. Rango de Calentamiento Global que Desencadenará Puntos de Inflexión



Fuente: Carrington D. (2022) *World on brink of five 'disastrous' climate tipping points, study finds*, THE GUARDIAN.

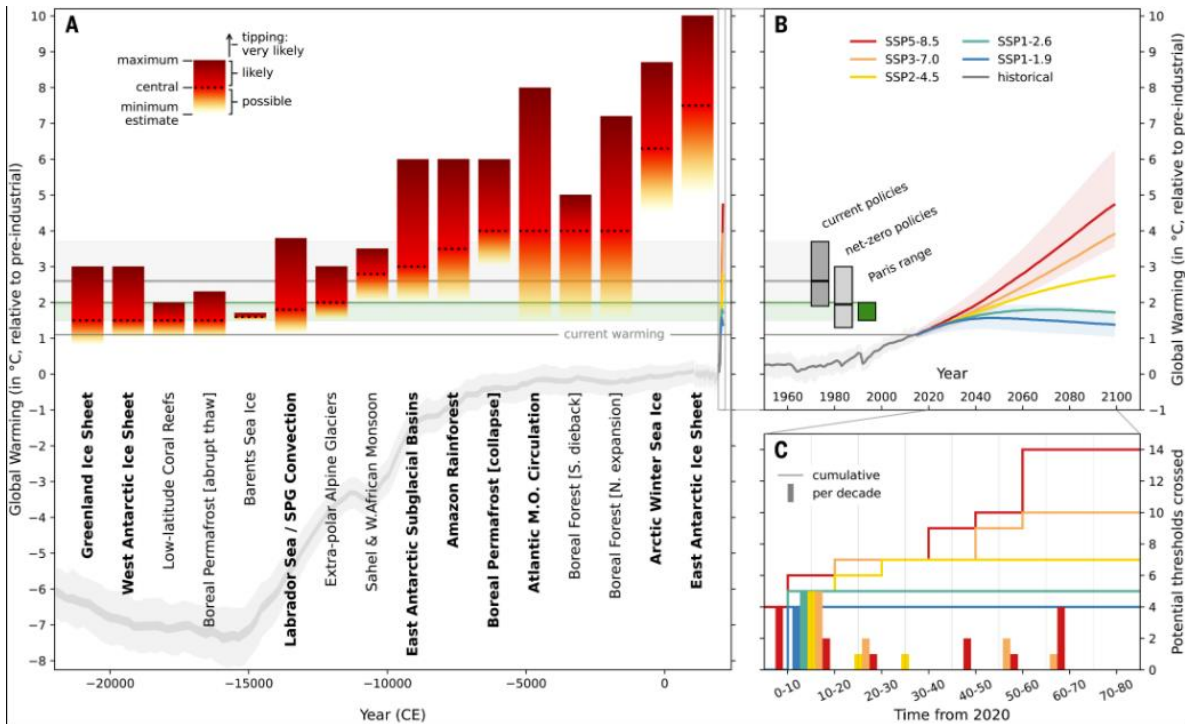
Figura 6. Comprendiendo los Puntos de Inflexión

How can we think of tipping points?



Fuente: Rockström J. (2023) *Tipping Points and Feedback Loops*, in THE CLIMATE BOOK: THE FACTS AND THE SOLUTIONS, Thunberg G. (ed.), 36.

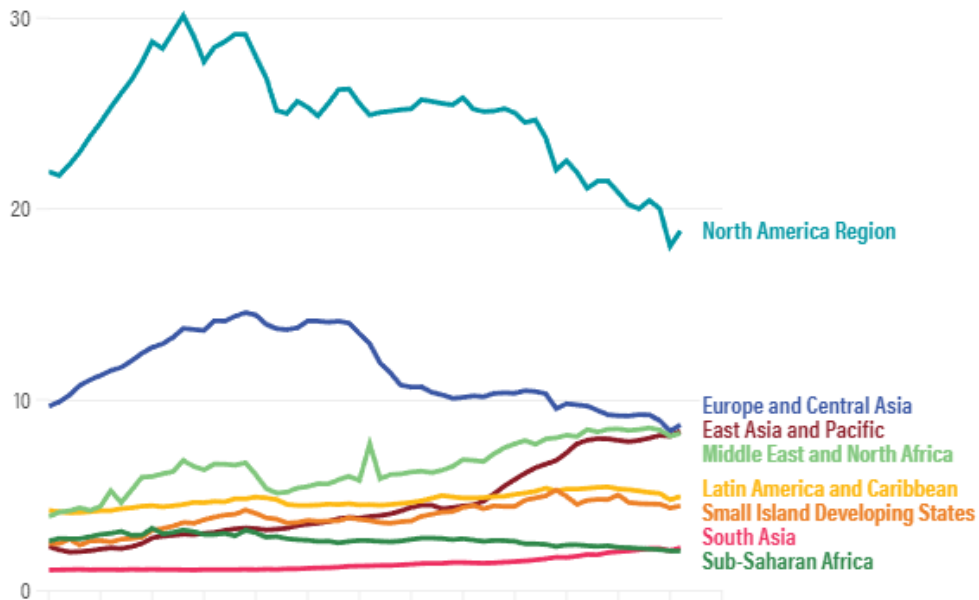
Figura 7. Límites de Temperatura que Provocan Puntos de Inflexión



Fuente: Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) [Exceeding 1.5 °C global warming could trigger multiple climate tipping points](#), SCIENCE 377(6611): 1–10, Figura 2.

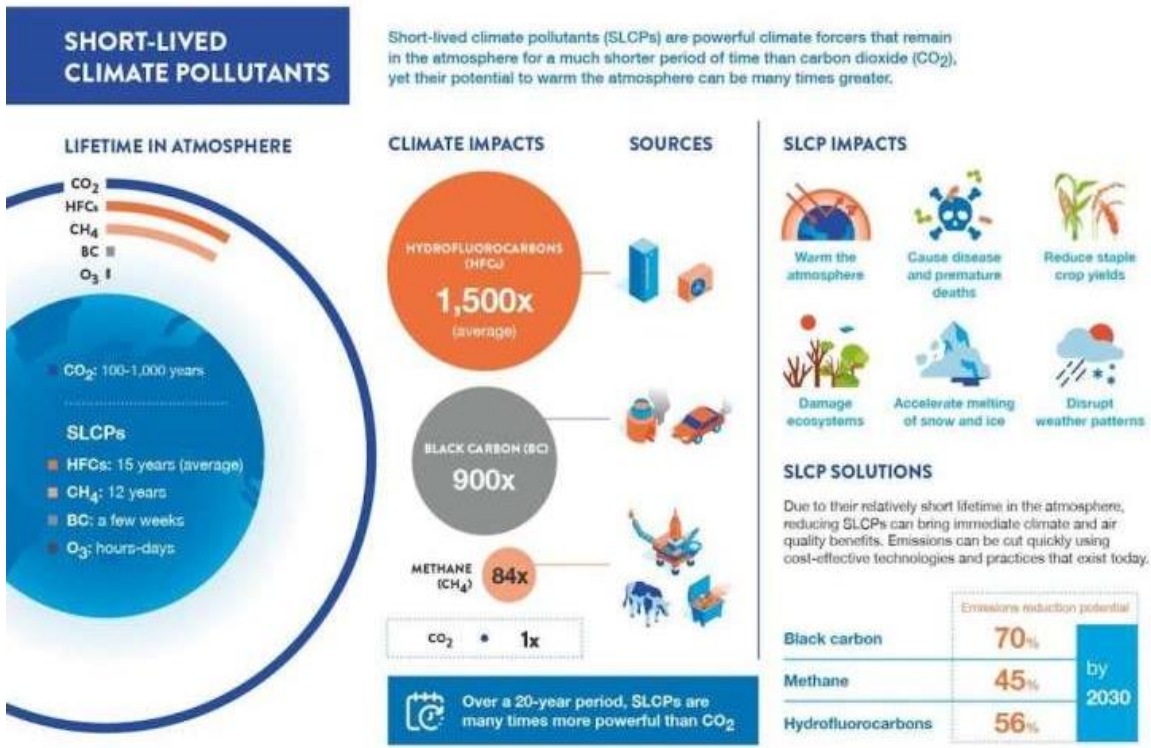
C. Fuentes de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

Figura 8. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero por Sector, LAC y el Mundo



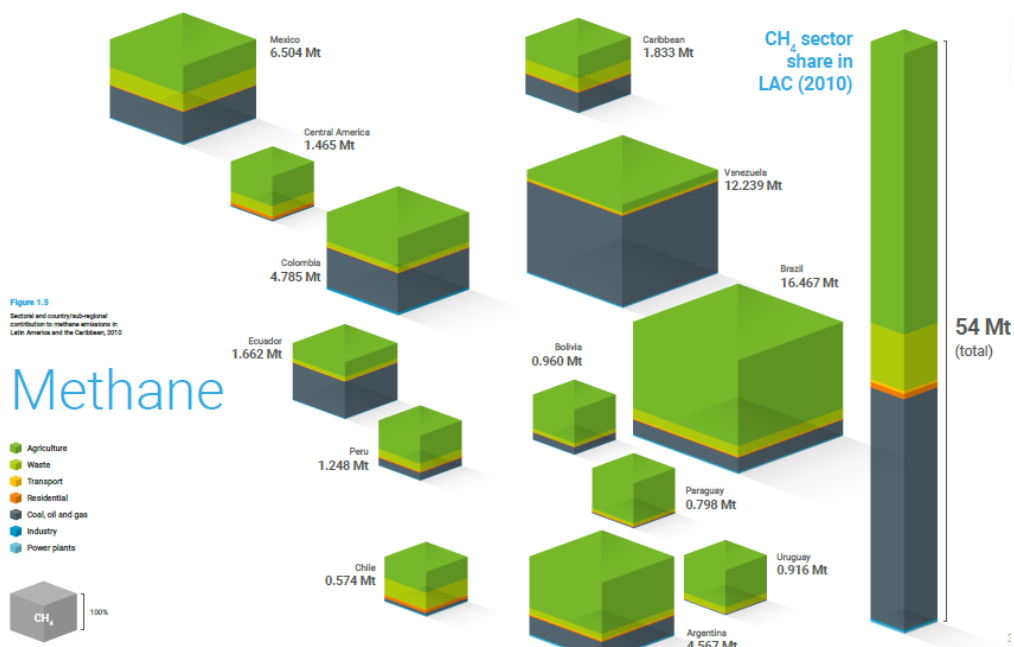
Fuente: Vigna L. & Friedrich J. (8 de mayo de 2023) [9 Charts Explain Per Capita Greenhouse Gas Emissions by Country](#), World Resources Institute.

Figura 9. Descripción General de los Contaminantes Climáticos de Vida Corta



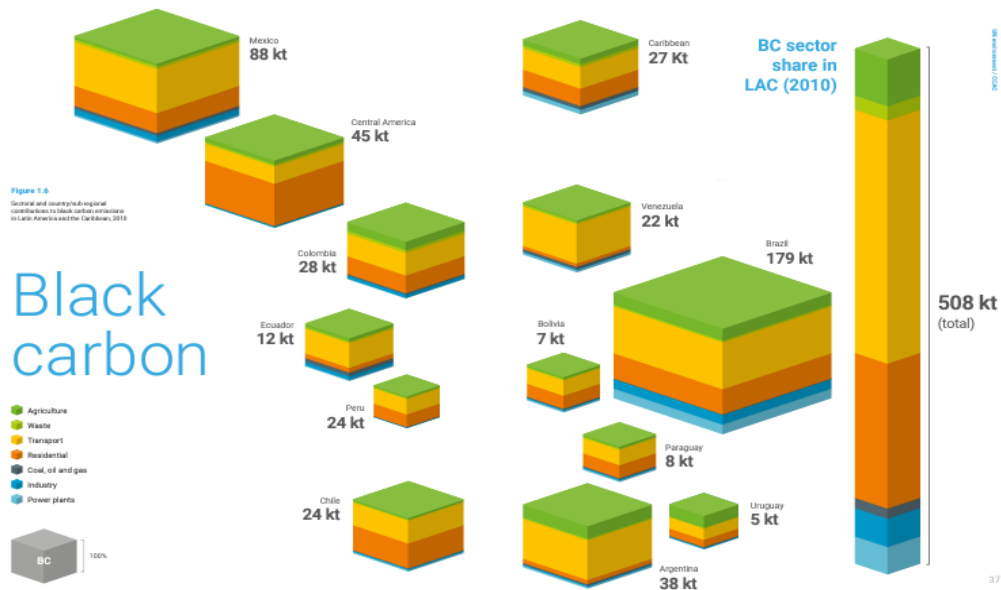
Fuente: Climate & Clean Air Coalition, [What are short-lived climate pollutants?](#), SLCP Infographics (última visita el 8 de septiembre de 2023).

Figura 10. Fuentes de Emisiones de Metano, LAC



Fuente: Climate & Clean Air Coalition (2018) [Integrated Assessment of Short-Lived Climate Pollutants in Latin America and the Caribbean](#).

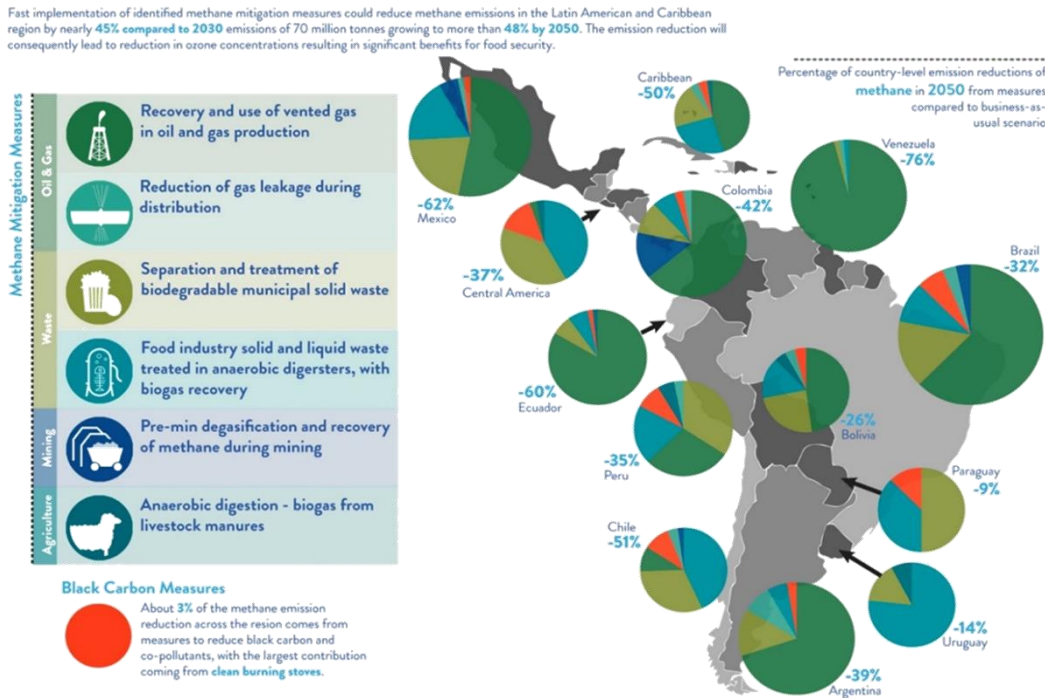
Figura 11. Fuentes de Emisiones de Carbono Negro, LAC



Fuente: Climate & Clean Air Coalition (2018) *Integrated Assessment of Short-Lived Climate Pollutants in Latin America and the Caribbean.*

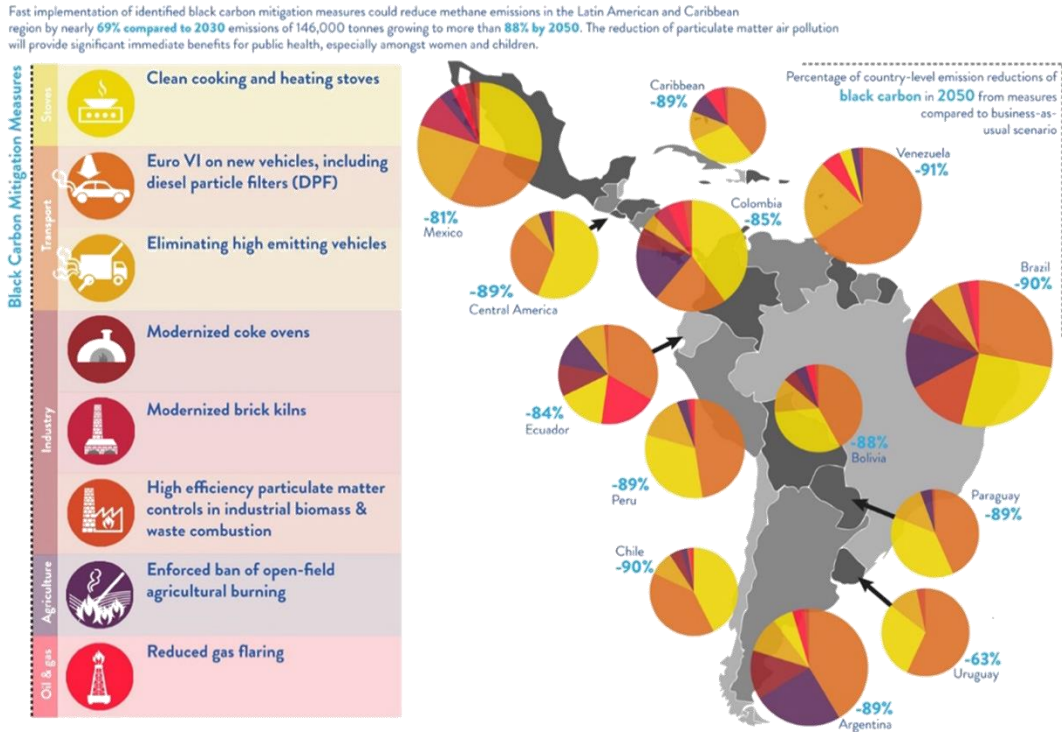
D. Ejemplos de Medidas de Mitigación de Supercontaminantes Climáticos

Figura 12. Medidas de Mitigación y Posibles Reducciones del Metano



Fuente: Climate & Clean Air Coalition (2018) *Integrated Assessment of Short-Lived Climate Pollutants in Latin America and the Caribbean.*

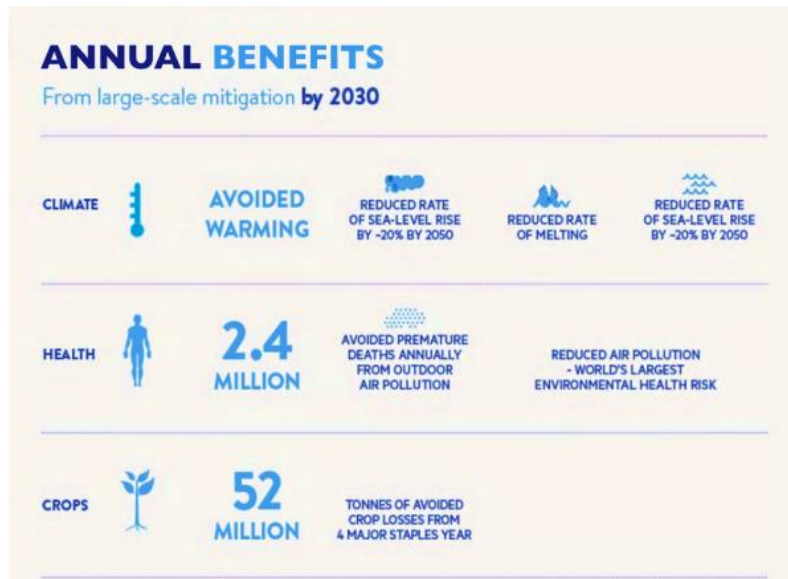
Figura 13. Medidas de Carbono Negro y Posibles Reducciones



Fuente: Climate & Clean Air Coalition (2018) *Integrated Assessment of Short-Lived Climate Pollutants in Latin America and the Caribbean*.

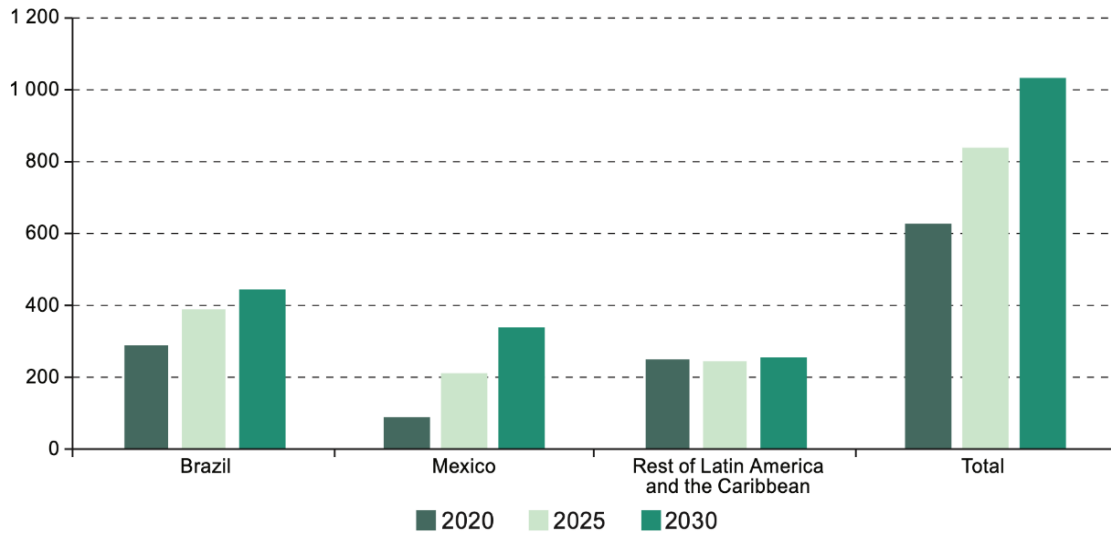
E. Beneficios Colaterales de la Mitigación

Figura 14. Beneficios Anuales de la Mitigación de Contaminantes Climáticos de Vida Corta para 2030



Fuente: United States Agency for International Development (2022) *Short-Lived Climate Pollutants & USAID's Climate Strategy: Achieving Fast Mitigation*.

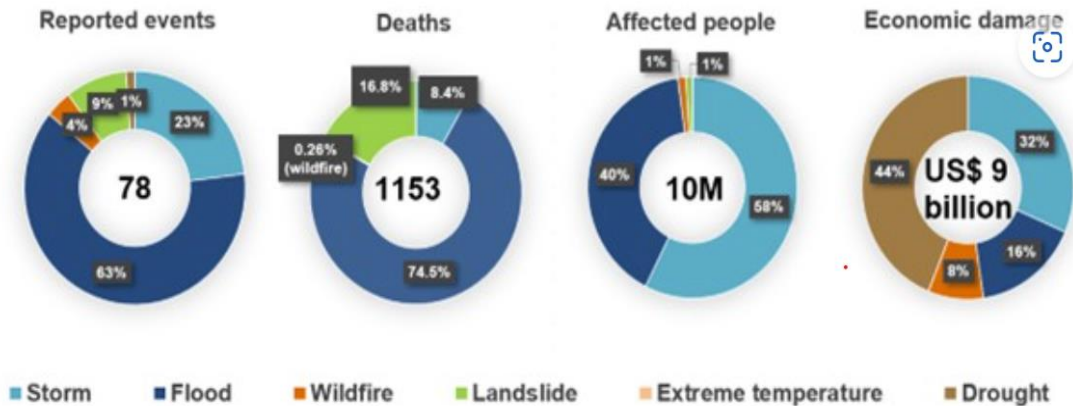
Figura 0-15. Potenciales Empleos Creados a Través de la Transición Energética, 2020-2030 (miles de empleos creados)



Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe & Organización Internacional del Trabajo (2018) [COYUNTURA LABORAL EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE: SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL CON EMPLEO EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE](#), N° 19 LC/TS.2018/85.

F. Riesgos y Vulnerabilidades Climáticas en LAC

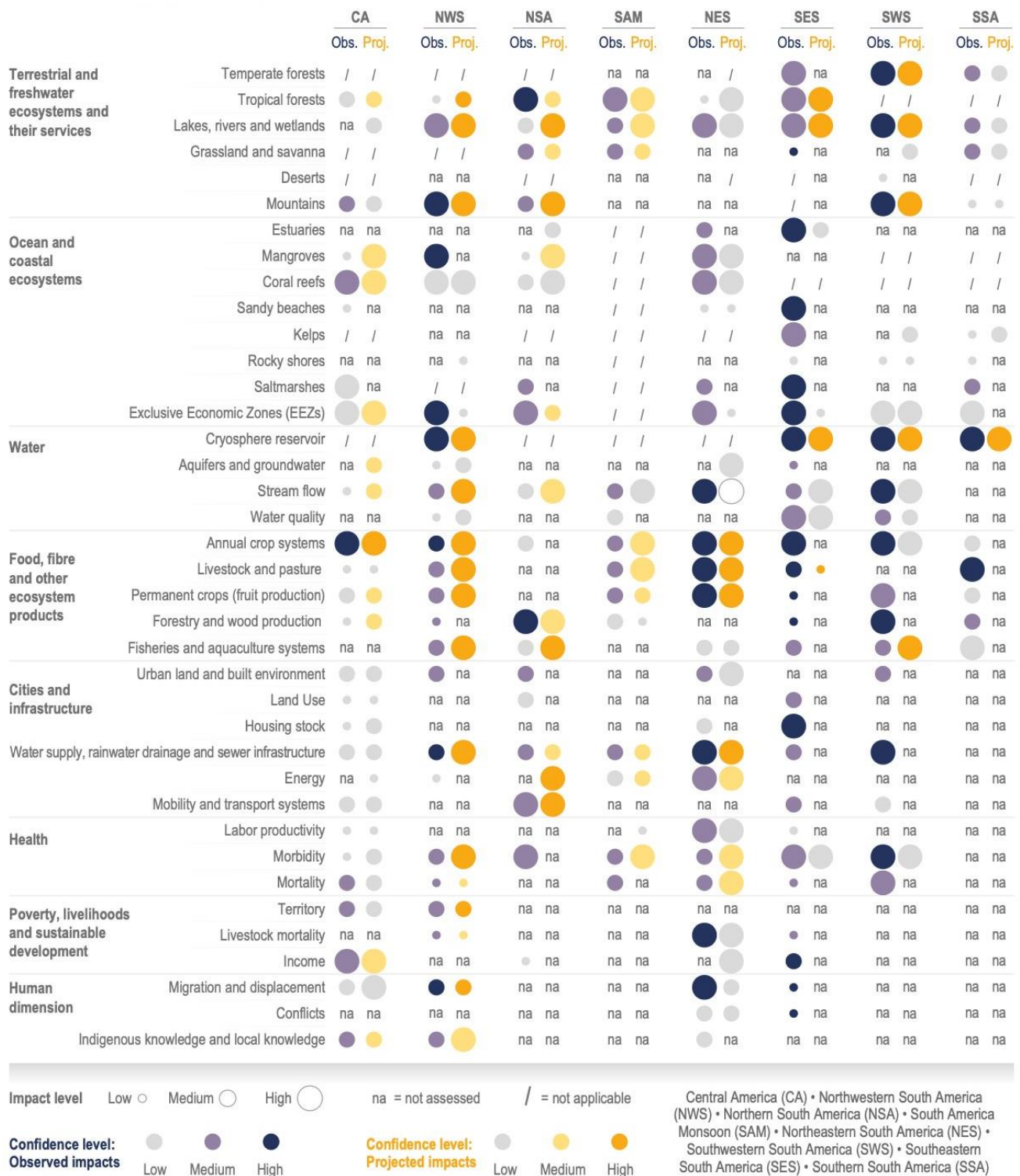
Figura 16. Desastres Relacionados con el Tiempo, el Clima, y el Agua en LAC



Weather, climate and water-related disasters in Latin America and the Caribbean in 2022. Impact numbers for some disaster occurrences may be lacking due to data unavailability. Source: CRED EM-DAT

Fuente: World Meteorological Organization (2023) [Climate change vicious cycle spirals in Latin America and the Caribbean](#).

Figura 17. Impactos Climáticos Observados y Proyectados para América Central y América del Sur



Fuente: Castellanos E., et al. (2022) *Chapter 12: Central and South America*, in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., et al. (eds.).

Figura 18. Peligros Observados y Proyectados en América Central y América del Sur, Niveles Actuales Frente a un Aumento de 2–4°C

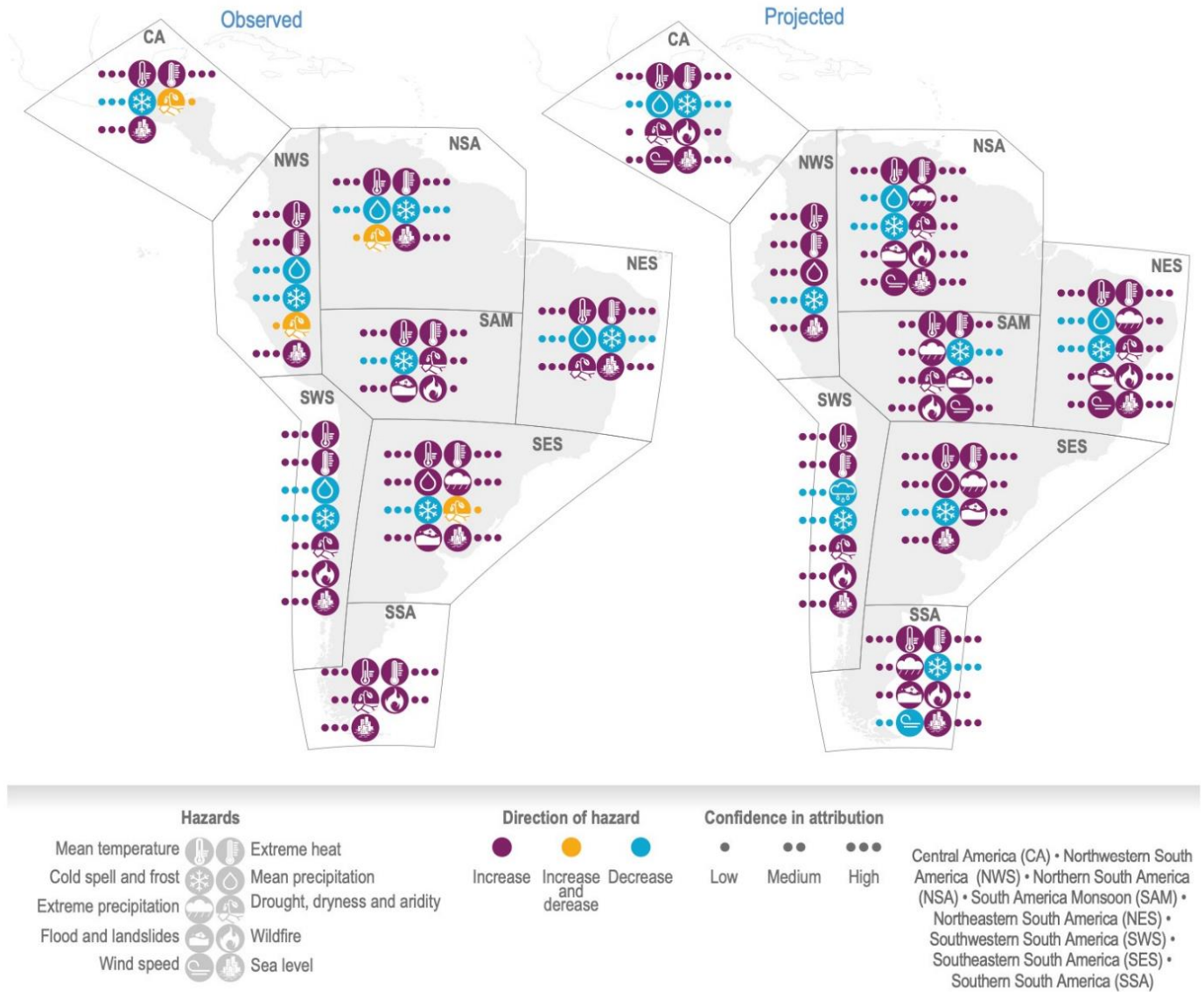
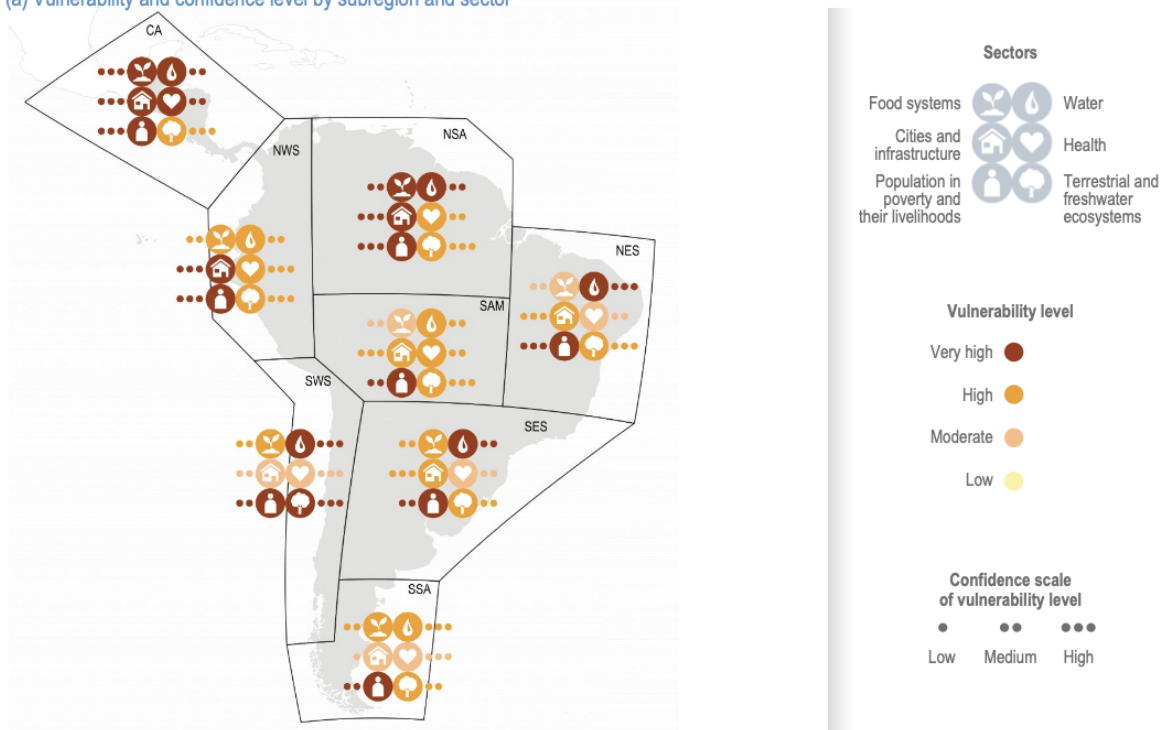


Figure 12.6 | Observed trends (WGI AR6 Tables 11.13, 11.14, 11.15) (Seneviratne et al., 2021) and summary of confidence in direction of projected change in climatic impact drivers, representing their aggregate characteristic changes for mid-century for RCP4.5, SSP3-44 4.5 and SRES A1B scenarios, or above within each AR6 region, approximately corresponding (for CIDs that are independent of SLR) to global warming levels between 2°C and 2.4°C (WGI AR6 Table 12.6) (Ranasinghe et al., 2021).

Fuente: Castellanos E., et al. (2022) [Chapter 12: Central and South America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., et al. (eds.).

Figura 19. Vulnerabilidades en LAC por Sector

(a) Vulnerability and confidence level by subregion and sector



(b) References used and vulnerability level attributed by subregion and sector

Sectors	Subregions							
	CA	NES	NSA	NWS	SAM	SES	SSA	SWS
Food systems	4,6,9,11,14,19,21,27,35,40,47	6,9,16,21,22,27,35,47	6,9,11,14,19,21,27,35,45,47	6,14,19,21,22,27,35,40,45	6,21,27,35,47	6,9,14,21,22,27,35,47	6,14,21,22,27,35,39,47	6,14,21,22,27,35,39,40,45
Cities and infrastructure	5,35	5,31,25	5,35	5,35	5,35	5,35	5,35	5,35
Population in poverty and their livelihoods	7,15,10,12,13,23,25,40	10,12,13,15,17,2,5,28,49	10,12,13,15,17,25,28,33	10,12,13,15,25,40	10,12,13,15,17,25,28	10,12,13,15,17,25,28	10,12,13,15,25	10,12,13,15,25,40,44
Water	26,35,41	26,35,48,49,50	24,26,35	24,26,35	24,26,35	24,26,35,41	24,26,35,39	24,26,35,39
Health	20,30,35	20,30,35,50	20,30,35	20,30,35	20,30,35	20,30,35	20,30,35	20,30,35
Terrestrial and freshwater ecosystems	29,35,38	2,29,32,35,37,38,42	2,29,35,37,38	2,8,24,29,35,37,38	2,29,35,37,38	29,35,38	24,29,35,38	3,18,24,29,35,38,46

Central America (CA) • Northwestern South America (NWS) • Northern South America (NSA) • South America Monsoon (SAM) • Northeastern South America (NES) • Southwestern South America (SWS) • Southeastern South America (SES) • Southern South America (SSA)

Figure 12.7 | Sectoral distribution of vulnerability levels to climate change for sub-regions. The vulnerability levels are based on studies that include: (a) databases with climate-change vulnerability indexes by country and sector, (b) studies that apply climate-change vulnerability indexes by sector at the local, national, regional or global scale, and (c) studies that define some vulnerability level based on the authors' expert judgment.

Panel (a) shows the vulnerability and confidence levels for each sub-region.

Panel (b) indicates the references used and the level of vulnerability by sub-region. The numbers within the table indicate the reference used for the assessment in the following order: (1) Aitken et al. (2016); (2) Anderson et al. (2018b); (3) Bañales-Seguel et al. (2018); (4) Bouroncle et al. (2017); (5) CAF (2014); (6) Carrão et al. (2016); (7) Donatti et al. (2019); (8) Eguiguren-Velepucha et al. (2016); (9) FAO (2020a); (10) FAO (2020b); (11) FAO (2021a); (12) FAO (2021b); (13) FAO (2021c); (14) FAO et al. (2021); (15) FAO and ECLAC (2020); (16) Ferreira Filho and Moraes (2015); (17) Filho et al. (2016); (18) Fuentes-Castillo et al. (2020); (19) FSIN and Global Network Against Food Crisis (2021); (20) Global Health Security Index (2019); (21) Godber and Wall (2014); (22) Handsyde et al. (2017); (23) Hannah et al. (2017); (24) Immerzeel et al. (2020); (25) Inform Risk Index (2021); (26) Koutroulis et al. (2019); (27) Krishnamurthy et al. (2014); (28) Lapola et al. (2019a); (29) Li et al. (2018); (30) Lin et al. (2020); (31) Mansur et al. (2016); (32) Martins et al. (2017); (33) Menezes et al. (2018); (34) Nagy et al. (2018); (35) ND-Gain (2020); (36) Northey et al. (2017); (37) Olivares et al. (2015); (38) Pacifici et al. (2015); (39) Qin et al. (2020); (40) Romeo et al. (2020); (41) Liu and Chen (2021); (42) Silva et al. (2019b); (43) Soto Winckler and Del Castillo Pantoja (2019); (44) Soto et al. (2019); (45) Tomby and Zhang (2019); (46) Venegas-González et al. (2018b); (47) Yeni and Alpas (2017); (48) Marengo et al. (2017); (49) Bedran-Martins et al. (2018); (50) Confalonieri et al. (2014a). Detailed methodology can be found in SM12.2.

Fuente: Castellanos E., et al. (2022) *Chapter 12: Central and South America*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY*, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., et al. (eds.).

Figura 20. Riesgos Climáticos en América Central y América del Sur por Aumento de Temperatura Superior a 2°C

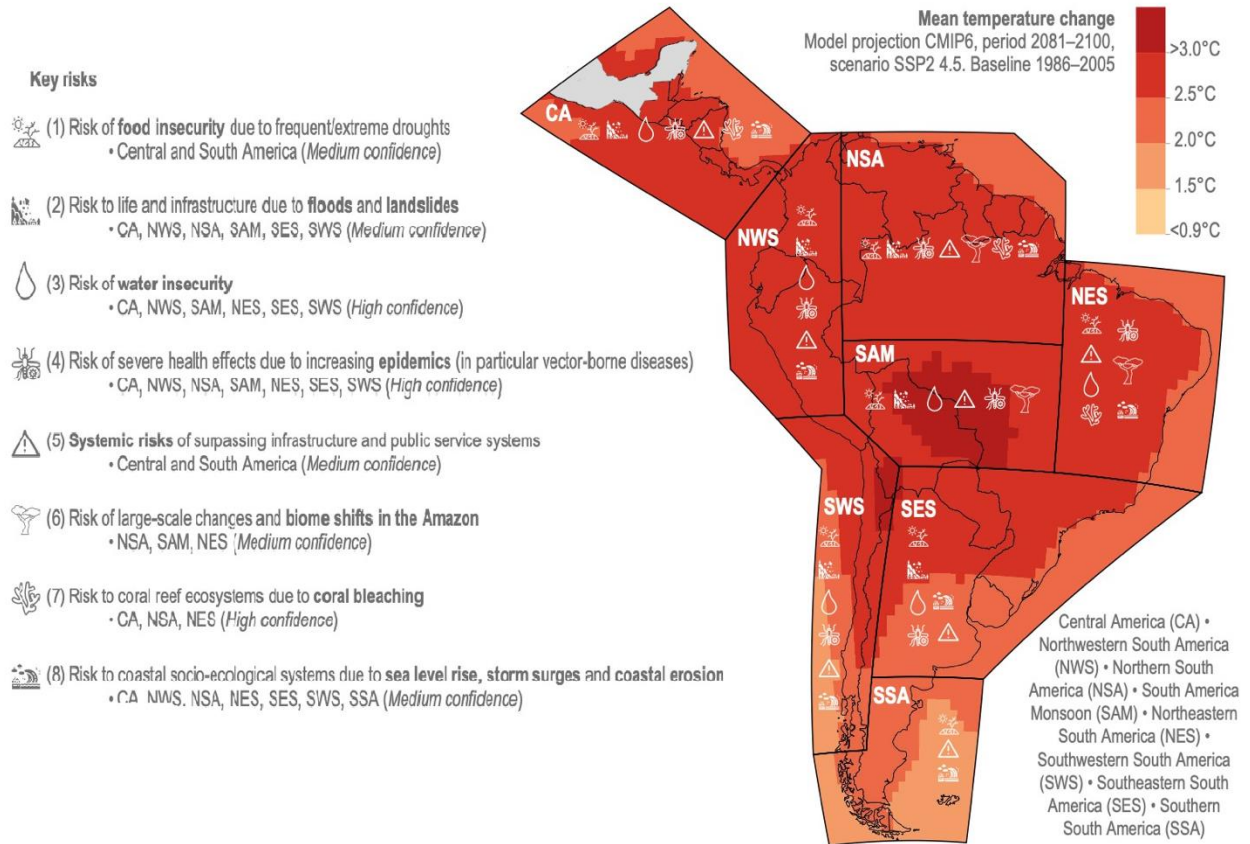
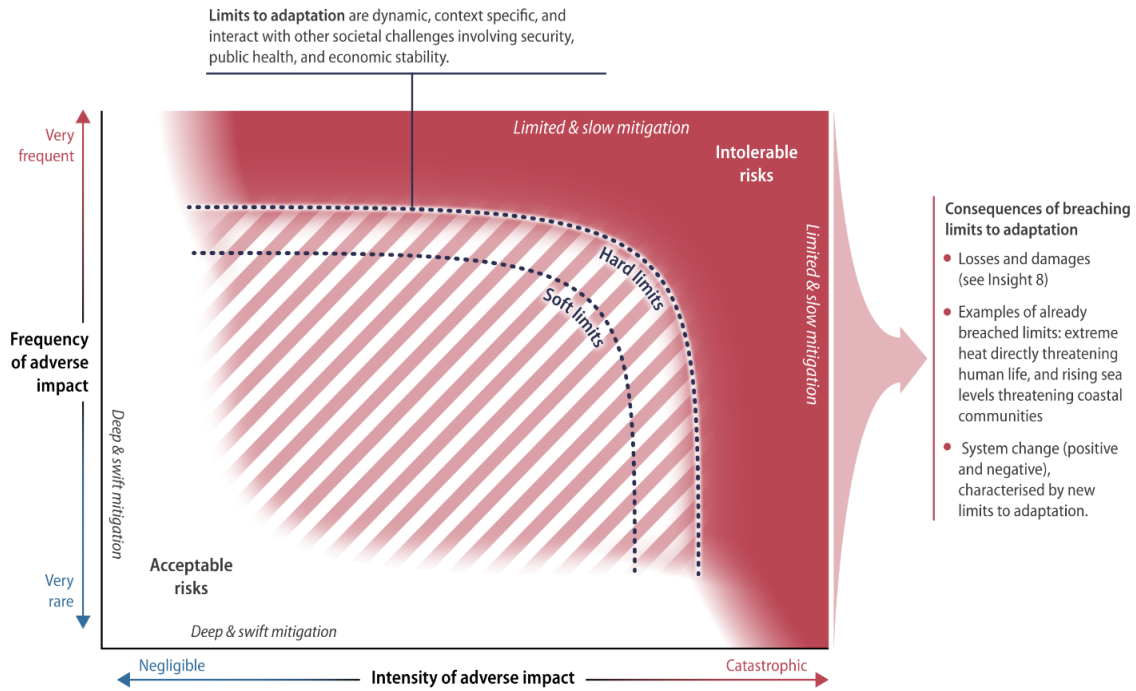


Figure 12.11 | Synthesis of key risks for the CSA region. The base map indicates the mean temperature change between the SSP2 4.5 scenario using CMIP6 model projections for 2081–2100 and a baseline period of 1986–2005 (WGI AR6 Atlas, Gutiérrez et al., 2021).

Fuente: Castellanos E., et al. (2022) *Chapter 12: Central and South America*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY*, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., et al. (eds.).

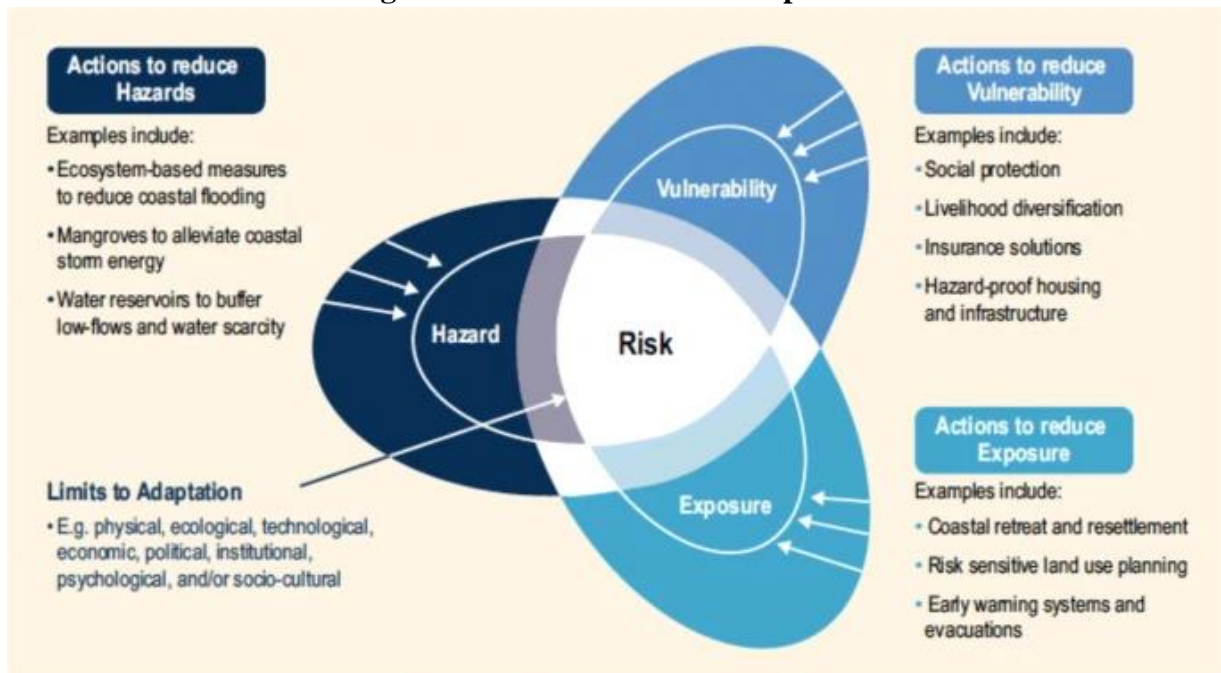
G. La Adaptación al Cambio Climático en Cifras

Figura 21. Los Límites a la Adaptación



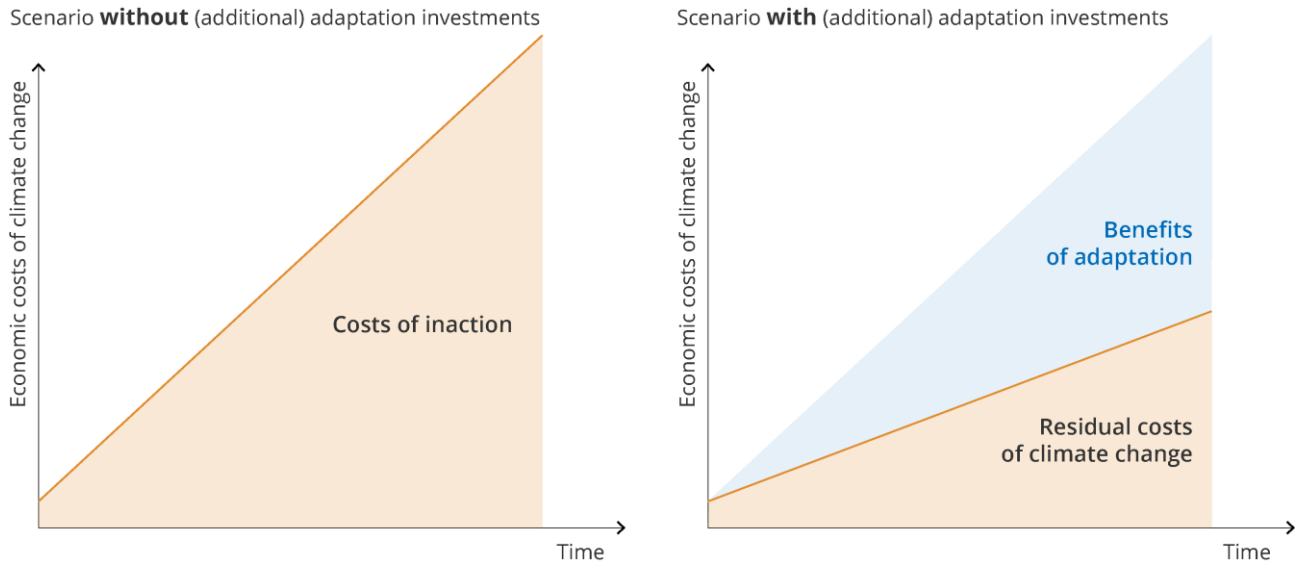
Fuente: 10 New Insights from Climate Science (2022) [Questioning the myth of endless adaptation](#).

Figura 22. Los Límites a la Adaptación



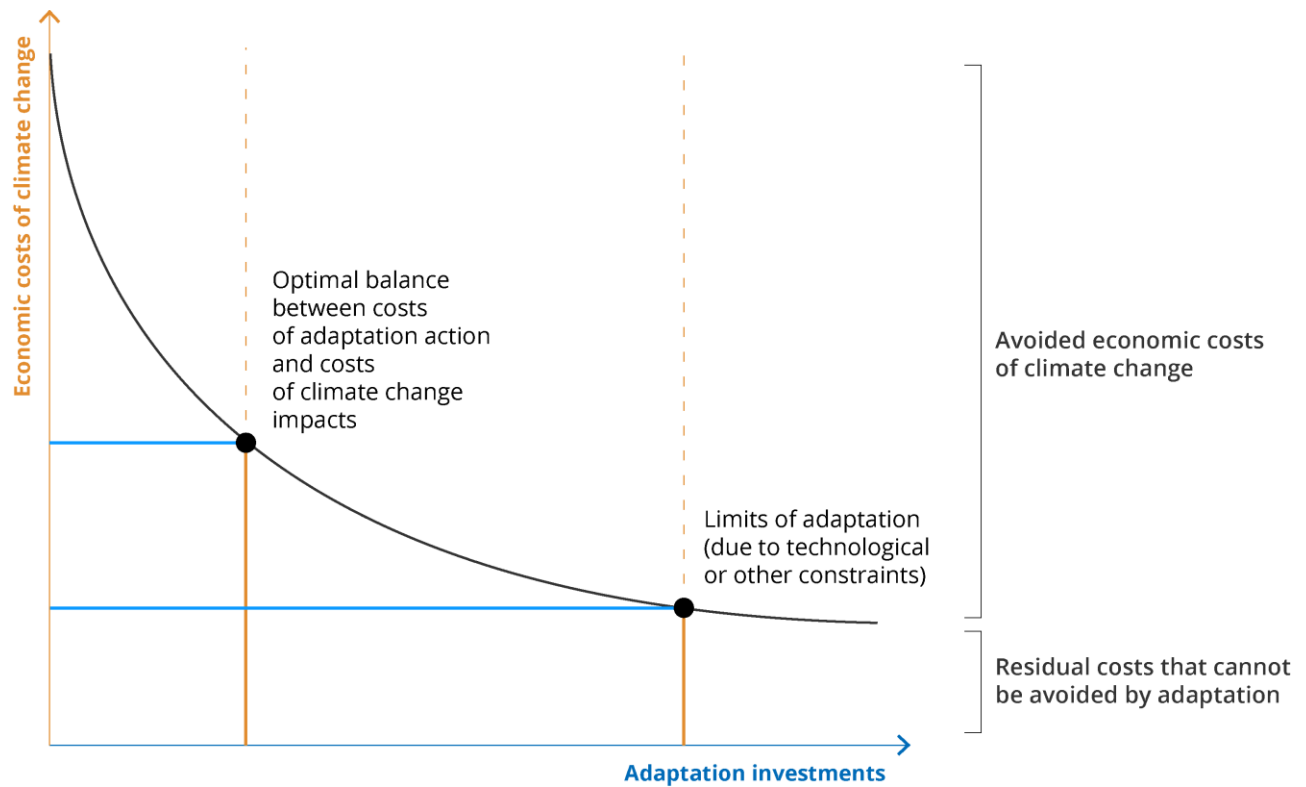
Fuente: Mechler R., et. al. (2020) [Loss and Damage and limits to adaptation: recent IPCC insights and implications for climate science and policy](#), SUSTAIN. SCI. 15: 1245–1251, 1249.

Figura 23. Los Costos de la Falta de Acción versus los Beneficios de la Adaptación



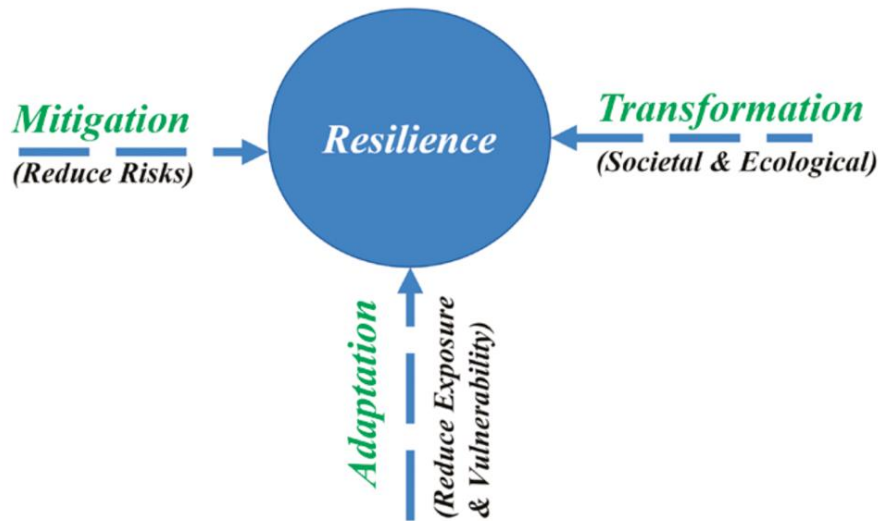
Fuente: European Environment Agency (2023) [Assessing the costs and benefits of climate change adaptation](#).

Figura 24. El Vínculo entre las Inversiones en Adaptación y los Costos Económicos del Cambio Climático



Fuente: European Environment Agency (2023) [Assessing the costs and benefits of climate change adaptation](#).

Figura 25. Los Tres Pilares de la Resiliencia



Fuente: Ramanathan V. & von Braun J. (eds.), *Resilience of People and Ecosystems under Climate Stress*, Proceedings of a Conference Held at Casina Pio IV, Vatican City, 13-14 July 2022, Libreria Editrice Vaticana: Vatican City.

H. Videos (en inglés)

Explicaciones de los puntos de inflexión y los riesgos catastróficos

[How 16 Tipping Points Could Push Our Entire Planet Into Crisis | World Economic Forum](#)

[Climate Tipping Points by Tim Lenton | YouTube](#)

[How Close Are We to a Climate Change Tipping Point? | YouTube](#)

Los límites a la adaptación

["We're coming closer to limits of adaptation" Climate researcher Johan Rockström | YouTube](#)

Explicación de las causas del cambio climático: los contaminantes CO₂ y no-CO₂ y la importancia de los sumideros de carbono

[Project Drawdown presents the Drawdown Roadmap: The Science Behind the Roadmap | YouTube](#)

[The Benefits of Reducing Short-lived Climate Pollutants | Drew Shindell, Climate & Clean Air Coalition | Youtube](#)

[Climate Resilience: Why, When and How? | Professor V. Ramanathan | The Pontifical Academy of Sciences](#)

REFERENCIAS

¹ Goldstein A., Noon M. L., Ledezma J. C., Roehrdanz P. R., Raghav S., McGreevey M., Stone C., Shrestha S., Golden Kroner R., Hole D., & Turner W. (2021) [IRRECOVERABLE CARBON: THE PLACES WE MUST PROTECT TO AVERT CLIMATE CATASTROPHE](#), Conservation International, 7 (“‘Irrecoverable carbon’ refers to the vast stores of carbon in nature that are vulnerable to release from human activity and, if lost, could not be restored by 2050 — when the world must reach net-zero emissions to avoid the worst impacts of climate change... There are high concentrations of irrecoverable carbon in the Amazon (31.5 Gt), the Congo Basin (8.1 Gt), and New Guinea (7.3 Gt). Other important irrecoverable carbon reserves are located in the Pacific Northwest of North America, the Valdivian forests of Chile, the mangroves and swamp forests of Guyana, the peatlands of Northern Scotland, Niger Delta’s mangroves, Cambodia’s Tonle Sap Lake, the Scandinavian and Siberian boreal forests, and the eucalyptus forest of Southeast Australia, among others.”). See also Goldstein A., *et al.* (2020) [Protecting irrecoverable carbon in Earth’s ecosystems](#), NAT. CLIM. CHANGE 10(4): 287–295; and Noon M. L., Goldstein A., Ledezma J. C., Roehrdanz P. R., Cook-Patton S. C., Spawn-Lee S. A., Wright T. M., Gonzalez-Roglich M., Hole D. G., Rockström J., & Turner W. R. (2021) [Mapping the irrecoverable carbon in Earth’s ecosystems](#), NAT. SUSTAIN. 5: 37–46.

² World Meteorological Organization (2024) [STATE OF THE GLOBAL CLIMATE 2023](#), 3 (“The ten-year average 2014–2023 global temperature is $1.20 \pm 0.12^\circ\text{C}$ above the 1850–1900 average, the warmest 10-year period on record.”).

³ Forster P. M. ... Zhai P. (2023) [Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence](#), EARTH SYSTEM SCIENCE DATA 15(6): 2295–2327, 2295 (“The indicators show that human-induced warming reached $1.14 [0.9 \text{ to } 1.4]^\circ\text{C}$ averaged over the 2013–2022 decade and $1.26 [1.0 \text{ to } 1.6]^\circ\text{C}$ in 2022.”); 2309 (“AR6 defined the current human-induced warming relative to the 1850–1900 baseline as the decade average of the previous 10-year period (see AR6 WGI Chap. 3). ...SR1.5 defined current human-induced warming as the average of a 30-year period centred on the current year, assuming the recent rate of warming continues (see SR1.5 Chap. 1). This definition is currently almost identical to the present-day single-year value of human-induced warming, differing by about 0.01°C (see results in Sect. 7.4); the attribution assessment in SR1.5 was therefore provided as a single-year warming. This section also updates the SR1.5 single-year approach by providing a year 2022 value.”).

⁴ World Meteorological Organization (2023) [WMO GLOBAL ANNUAL TO DECADEAL CLIMATE UPDATE](#), 2 (“The annual mean global near-surface temperature for each year between 2023 and 2027 is predicted to be between 1.1°C and 1.8°C higher than the average over the years 1850–1900. • The chance of global near-surface temperature exceeding 1.5°C above preindustrial levels for at least one year between 2023 and 2027 is more likely than not (66%). It is unlikely (32%) that the five-year mean will exceed this threshold.”).

⁵ United Nations (1992) [UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE](#), art. 2 (“The ultimate objective of this Convention and any related legal instruments that the Conference of the Parties may adopt is to achieve, in accordance with the relevant provisions of the Convention, stabilization of greenhouse gas concentrations in the atmosphere at a level that would prevent dangerous anthropogenic interference with the climate system. Such a level should be achieved within a time frame sufficient to allow ecosystems to adapt naturally to climate change, to ensure that food production is not threatened and to enable economic development to proceed in a sustainable manner”).

⁶ Here we distinguish between abrupt shifts, as in Drijfhout *et al.* (2015), and the more restrictive definition of “core climate tipping points” defined by Armstrong McKay *et al.* (2022) as “when change in part of the climate system becomes (i) selfperpetuating beyond (ii) a warming threshold as a result of asymmetry in the relevant feedbacks, leading to (iii) substantial and widespread Earth system impacts.” See Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) [Exceeding \$1.5^\circ\text{C}\$ global warming could trigger multiple climate tipping points](#), SCIENCE 377(6611): 1–10, 7 (“Current warming is $\sim 1.1^\circ\text{C}$ above preindustrial and even with rapid emission cuts warming will reach $\sim 1.5^\circ\text{C}$ by the 2030s (23). We cannot rule out that WAIS [West Antarctic Ice Sheet] and GrIS [Greenland Ice Sheet] tipping points have already been passed (see above) and several other tipping elements have minimum threshold values within the 1.1 to 1.5°C range. Our best estimate thresholds for GrIS, WAIS, REEF [low-latitude coral reefs], and North Atlantic

subpolar gyre / Labrador-Irminger Sea convection abrupt permafrost thaw (PFAT) are $\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ although WAIS and GrIS collapse may still be avoidable if GMST [Global Mean Surface Temperature] returns below 1.5°C within an uncertain overshoot time (likely decades) (94). ... The chance of triggering CTPs [Climate tipping points] is already non-negligible and will grow even with stringent climate mitigation (SSP1-1.9 in Fig. 2, B and C). Nevertheless, achieving the Paris Agreement's aim to pursue efforts to limit warming to 1.5°C would clearly be safer than keeping global warming below 2°C (90) (Fig. 2). Going from 1.5 to 2°C increases the likelihood of committing to WAIS and GrIS collapse near complete warm-water coral die-off, and abrupt permafrost thaw; further, the best estimate threshold for LABC [North Atlantic subpolar gyre / Labrador-Irminger Sea convection] collapse is crossed. The likelihood of triggering AMOC [Atlantic Meridional Overturning Circulation] collapse, Boreal forest shifts, and extra-polar glacier loss becomes non-negligible at $>1.5^{\circ}\text{C}$ and glacier loss becomes likely by $\sim 2^{\circ}\text{C}$. A cluster of abrupt shifts occur in ESM [Earth System Models] at 1.5 to 2°C (19). Although not tipping elements, ASSI [Arctic Summer Sea Ice] loss could become regular by 2°C , gradual permafrost thaw would likely become widespread beyond 1.5°C , and land carbon sink weakening would become significant by 2°C ."); and Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) [AR6 SYNTHESIS REPORT: CLIMATE CHANGE 2023](#), *Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Arias P., Bustamante M., Elgizouli I., Flato G., Howden M., Méndez C., Pereira J., Pichs-Madruga R., Rose S. K., Saheb Y., Sánchez R., Ürge-Vorsatz D., Xiao C., & Yassaa N. (eds.), 42 ("Risks associated with large-scale singular events or tipping points, such as ice sheet instability or ecosystem loss from tropical forests, transition to high risk between 1.5°C – 2.5°C (*medium confidence*) and to very high risk between 2.5°C – 4°C (*low confidence*). The response of biogeochemical cycles to anthropogenic perturbations can be abrupt at regional scales and irreversible on decadal to century time scales (*high confidence*). The probability of crossing uncertain regional thresholds increases with further warming (*high confidence*).").

² Drijfhout S., Bathiany S., Beaulieu C., Brovkin V., Claussen M., Huntingford C., Scheffer M., Sgubin G., & Swingedouw D. (2015) [Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models](#), PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 112(43): E5777–E5786, E5777 ("Abrupt transitions of regional climate in response to the gradual rise in atmospheric greenhouse gas concentrations are notoriously difficult to foresee. However, such events could be particularly challenging in view of the capacity required for society and ecosystems to adapt to them. We present, to our knowledge, the first systematic screening of the massive climate model ensemble informing the recent Intergovernmental Panel on Climate Change report, and reveal evidence of 37 forced regional abrupt changes in the ocean, sea ice, snow cover, permafrost, and terrestrial biosphere that arise after a certain global temperature increase. Eighteen out of 37 events occur for global warming levels of less than 2° , a threshold sometimes presented as a safe limit."). See also Wang S., Foster A., Lenz E. A., Kessler J. D., Stroeve J. C., Anderson L. O., Turetsky M., Betts R., Zou S., Liu W., Boos W. R., & Hausfather Z. (2023) [Mechanisms and Impacts of Earth System Tipping Elements](#), REV. GEOPHYS. 61(e2021RG000757): 1–81, 48 ("Earth system elements that this review indicates are at higher risk of crossing critical thresholds or undergoing substantial changes in response to warming this century under moderate (RCP4.5) emissions scenarios include loss of Arctic summer sea ice, loss of portions of the GIS, loss of portions of the West Antarctic Ice-sheet, Amazon rainforest dieback, boreal forest ecosystem shifts, some permafrost carbon release, and coral reef loss (Figure 14). In contrast, methane release from marine methane hydrates and strato-cumulus cloud deck evaporation will likely require longer timescales and higher emissions forcing in order to occur at large scales, while disruptions of tropical monsoons may be contingent on large shifts in other Earth system components and are unlikely to occur as a direct response to changes in aerosol forcing or land cover (see Section 2.6). Critical thresholds for weakening of the AMOC remain unclear and a transition of this system to a different state may not occur this century (see Section 2.1). While the GIS and WAIS may transgress critical thresholds this century (see Section 2.3), timescales of ice loss may require many centuries to millennia to run to completion (Bakker et al., 2016; Clark et al., 2016; Golledge et al., 2015; Huybrechts & De Wolde, 1999)."); Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) [Climate tipping points—too risky to bet against](#), Comment, NATURE 575(7784): 592–595, 593 ("A further key impetus to limit warming to 1.5°C is that other tipping points could be triggered at low levels of global warming. The latest IPCC models projected a cluster of abrupt shifts between 1.5°C and 2°C , several of which involve sea ice. This ice is already shrinking rapidly in the Arctic...."); Arias P. A., et al. (2021) [Technical Summary](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), TS-71–TS-72 ("It is likely that under stabilization of global warming at 1.5°C , 2.0°C , or 3.0°C relative to 1850–1900, the AMOC will continue to weaken for several decades by about 15%, 20% and 30% of

its strength and then recover to pre-decline values over several centuries (*medium confidence*). At sustained warming levels between 2°C and 3°C, there is limited evidence that the Greenland and West Antarctic Ice Sheets will be lost almost completely and irreversibly over multiple millennia; both the probability of their complete loss and the rate of mass loss increases with higher surface temperatures (*high confidence*). At sustained warming levels between 3°C and 5°C, near-complete loss of the Greenland Ice Sheet and complete loss of the West Antarctic Ice Sheet is projected to occur irreversibly over multiple millennia (*medium confidence*); with substantial parts or all of Wilkes Subglacial Basin in East Antarctica lost over multiple millennia (*low confidence*). Early-warning signals of accelerated sea-level-rise from Antarctica, could possibly be observed within the next few decades. For other hazards (e.g., ice sheet behaviour, glacier mass loss and global mean sea level change, coastal floods, coastal erosion, air pollution, and ocean acidification) the time and/or scenario dimensions remain critical, and a simple and robust relationship with global warming level cannot be established (*high confidence*)... The response of biogeochemical cycles to anthropogenic perturbations can be abrupt at regional scales and irreversible on decadal to century time scales (*high confidence*). The probability of crossing uncertain regional thresholds increases with climate change (*high confidence*). It is *very unlikely* that gas clathrates (mostly methane) in deeper terrestrial permafrost and subsea clathrates will lead to a detectable departure from the emissions trajectory during this century. Possible abrupt changes and tipping points in biogeochemical cycles lead to additional uncertainty in 21st century atmospheric GHG concentrations, but future anthropogenic emissions remain the dominant uncertainty (*high confidence*). There is potential for abrupt water cycle changes in some high-emission scenarios, but there is no overall consistency regarding the magnitude and timing of such changes. Positive land surface feedbacks, including vegetation, dust, and snow, can contribute to abrupt changes in aridity, but there is only *low confidence* that such changes will occur during the 21st century. Continued Amazon deforestation, combined with a warming climate, raises the probability that this ecosystem will cross a tipping point into a dry state during the 21st century (*low confidence*).”); and Lee J.-Y., Marotzke J., Bala G., Cao L., Corti S., Dunne J. P., Engelbrecht F., Fischer E., Fyfe J. C., Jones C., Maycock A., Mutemi J., Ndiaye O., Panickal S., & T. Zhou (2021) [Chapter 4: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 4-96 (Table 4.10 lists 15 components of the Earth system susceptible to tipping points).

⁸ See Hoegh-Guldberg O., *et al.* (2018) [Chapter 3: Impacts of 1.5°C of Global Warming on Natural and Human Systems](#), in [GLOBAL WARMING OF 1.5 °C](#), Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 262 (“Tipping points refer to critical thresholds in a system that, when exceeded, can lead to a significant change in the state of the system, often with an understanding that the change is irreversible. An understanding of the sensitivities of tipping points in the physical climate system, as well as in ecosystems and human systems, is essential for understanding the risks associated with different degrees of global warming. This subsection reviews tipping points across these three areas within the context of the different sensitivities to 1.5°C versus 2°C of global warming. Sensitivities to less ambitious global temperature goals are also briefly reviewed. Moreover, an analysis is provided of how integrated risks across physical, natural and human systems may accumulate to lead to the exceedance of thresholds for particular systems. The emphasis in this section is on the identification of regional tipping points and their sensitivity to 1.5°C and 2°C of global warming, whereas tipping points in the global climate system, referred to as large-scale singular events, were already discussed in Section 3.5.2. A summary of regional tipping points is provided in Table 3.7.”); and Abram N., *et al.* (2019) [Chapter 1: Framing and Context of the Report](#), in [THE OCEAN AND CRYOSPHERE IN A CHANGING CLIMATE](#), Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., *et al.* (eds.), 1-81 (“While some aspects of the ocean and cryosphere might respond in a linear (i.e., directly proportional) manner to a perturbation by some external forcing, this may change fundamentally when critical thresholds are reached. A very important example for such a threshold is the transition from frozen water to liquid water at around 0 °C that can lead to rapid acceleration of ice-melt or permafrost thaw (e.g., Abram *et al.*, 2013; Trusel *et al.*, 2018). Such thresholds often act as tipping points, as they are associated with rapid and abrupt changes even when the underlying forcing changes gradually (Figure 1.1a, 1.1c). Tipping elements include, for example, the collapse of the ocean’s large-scale overturning circulation in the Atlantic (Section 6.7), or the collapse of the West Antarctic Ice Sheet through a process called marine ice sheet instability (Cross-Chapter Box 8 in Chapter 3; Lenton, *et al.* 2008). Potential ocean and cryosphere tipping elements form part of the scientific case for efforts to limit climate warming to well below 2°C (IPCC, 2018).”).

⁹ Xu Y., Ramanathan V., & Victor D. G. (2018) *Global warming will happen faster than we think*, Comment, NATURE 564(7734): 30–32, 30–31 (“But the latest IPCC special report underplays another alarming fact: global warming is accelerating. Three trends—rising emissions, declining air pollution and natural climate cycles—will combine over the next 20 years to make climate change faster and more furious than anticipated. In our view, there’s a good chance that we could breach the 1.5 °C level by 2030, not by 2040 as projected in the special report (see ‘Accelerated warming’). The climate-modelling community has not grappled enough with the rapid changes that policymakers care most about, preferring to focus on longer-term trends and equilibria.”). See also Climate & Clean Air Coalition (2014) *TIME TO ACT TO REDUCE SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS*, 25 (Figure: SLCP Climate Benefits, Avoided global warming [showing that the avoided global warming from rapid implementation of SLCP mitigation measures is 0.6°C by 2050]). Since the Xu, Ramanathan, and Victor Comment was published, the IPCC has updated its estimate for when 1.5 °C will be exceeded: see Arias P. A., et al. (2021) *Technical Summary*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS*, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), TS-9 (“Timing of crossing 1.5°C global warming: Slightly different approaches are used in SR1.5 and in this Report. SR1.5 assessed a likely range of 2030 to 2052 for reaching a global warming level of 1.5°C (for a 30-year period), assuming a continued, constant rate of warming. In AR6, combining the larger estimate of global warming to date and the assessed climate response to all considered scenarios, the central estimate of crossing 1.5°C of global warming (for a 20-year period) occurs in the early 2030s, ten years earlier than the midpoint of the likely range assessed in the SR1.5, assuming no major volcanic eruption. (TS.1.3, Cross-Section Box TS.1)”).

¹⁰ Dreyfus G. B., Xu Y., Shindell D. T., Zaelke D., & Ramanathan V. (2022) *Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 119(22): 1–8, 1, 5, 6 (“Aggressive decarbonization to achieve net-zero CO₂ emissions in the 2050s (as in the decarb-only scenario) results in weakly accelerated net warming compared to the reference case, with a positive warming up to 0.03 °C in the mid-2030s, and no net avoided warming until the mid-2040s due to the reduction in co-emitted cooling aerosols (Figure 3a). By 2050, decarbonization measures result in very limited net avoided warming (0.07°C), consistent with Shindell and Smith, but rise to a likely detectable 0.25°C by 2060 and a major benefit of 1.4°C by 2100 (Table S5). In contrast, pairing decarbonization with mitigation measures targeting CH₄, BC, HFC, and N₂O (not an SLCP due to its longer lifetime) independent from decarbonization are essential to slowing the rate of warming by the 2030s to under 0.3°C per decade (Table 1, Figure 3b), similar to the 0.2°C to 0.25°C per decade warming prior to 2020. Recent studies suggest that rate of warming rather than level of warming controls likelihood of record-shattering extreme weather events. By 2050, the net avoided warming from the targeted non-CO₂ measures is 0.26°C, almost 4 times larger than the net benefit of decarbonization alone (0.07°C) (Table S5).”; “These non-CO₂ targeted measures when combined with decarbonization can provide net cooling by 2030 and reduce the rate of warming from 2030 to 2050 by about 50%, roughly half of which comes from methane, significantly larger than decarbonization alone over this time frame.”; “Moreover, decarbonization alone increases the warming rate in the near term (Table 1). Notably, the warming rate in the decarbonization scenario would not drop below the current rate of warming until the 2040s (Fig. 3B). Pairing decarbonization with measures targeting SLCP slows the rate of warming a decade or two earlier than decarbonization alone.”).

¹¹ Xu Y. & Ramanathan V. (2017) *Well below 2 °C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 114(39): 10315–10323, 10321 (“The SP [super pollutant] lever targets SLCPs. Reducing SLCP emissions thins the SP blanket within few decades, given the shorter lifetimes of SLCPs (weeks for BC to about 15 years for HFCs). The mitigation potential of the SP lever with a maximum deployment of current technologies ... is about 0.6 °C by 2050 and 1.2 °C by 2100 (SI Appendix, Fig. S5B and Table S1).”). See also Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS*, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 821 (“Across the SSPs, the collective reduction of CH₄, ozone precursors and HFCs can make a difference of global mean surface air temperature of 0.2 with a very likely range of [0.1–0.4] °C in 2040 and 0.8 with a very likely range of [0.5–1.3] °C at the end of the 21st century (comparing SSP3-7.0 and SSP1-1.9), which is substantial in the context of the Paris Agreement. Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface

temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*).”); and Dreyfus G. B., Xu Y., Shindell D. T., Zaelke D., & Ramanathan V. (2022) [Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming](#), PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 119(22): 1–8, 5 (“Aggressive decarbonization to achieve net-zero CO₂ emissions in the 2050s (as in the decarb-only scenario) results in weakly accelerated net warming compared to the reference case, with a positive warming up to 0.03 °C in the mid-2030s, and no net avoided warming until the mid-2040s due to the reduction in co-emitted cooling aerosols (Figure 3a). By 2050, decarbonization measures result in very limited net avoided warming (0.07°C), consistent with Shindell and Smith, but rise to a likely detectable 0.25°C by 2060 and a major benefit of 1.4°C by 2100 (Table S5).”).

¹² Molina M., Ramanathan V., & Zaelke D. (2 April 2020) [Best path to net zero: Cut short-lived super-pollutants](#), BULLETIN OF THE ATOMIC SCIENTISTS (“Speed must become the key measure of all climate mitigation strategies: a speedy reduction of global warming before it leads to further, self-reinforcing climate change feedbacks and [tipping points](#); a speedy deployment of mitigation actions and technologies; and getting this all up to scale in a speedy manner. And let us be clear: By “speed,” we mean measures—including regulatory ones—that can begin within two-to-three years, be substantially implemented in five-to-10 years, and produce a climate response within the next decade or two.”). See also Molina M., Zaelke D., Sarma K. M., Andersen S. O., Ramanathan V., & Kaniaru D. (2009) [Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions](#), Proc. Nat’l. Acad. Sci. 106(49): 20616–20621, 20616 (“Current emissions of anthropogenic greenhouse gases (GHGs) have already committed the planet to an increase in average surface temperature by the end of the century that may be above the critical threshold for tipping elements of the climate system into abrupt change with potentially irreversible and unmanageable consequences. This would mean that the climate system is close to entering if not already within the zone of “dangerous anthropogenic interference” (DAI). Scientific and policy literature refers to the need for “early,” “urgent,” “rapid,” and “fast-action” mitigation to help avoid DAI and abrupt climate changes. We define “fast-action” to include regulatory measures that can begin within 2–3 years, be substantially implemented in 5–10 years, and produce a climate response within decades. We discuss strategies for short-lived non-CO₂ GHGs and particles, where existing agreements can be used to accomplish mitigation objectives. Policy makers can amend the Montreal Protocol to phase down the production and consumption of hydrofluorocarbons (HFCs) with high global warming potential. Other fast-action strategies can reduce emissions of black carbon particles and precursor gases that lead to ozone formation in the lower atmosphere, and increase biosequestration, including through biochar. These and other fast-action strategies may reduce the risk of abrupt climate change in the next few decades by complementing cuts in CO₂ emissions.”).

¹³ See Copernicus Climate Services (9 January 2023) [2022 was a year of climate extremes, with record high temperatures and rising concentrations of greenhouse gases](#) (last visited 11 June 2023) (“2022 was the 5th warmest year – however, the 4th–8th warmest years are very close together. The last eight years have been the eight warmest on record. The annual average temperature was 0.3°C above the reference period of 1991–2020, which equates to approximately 1.2°C higher than the period 1850–1900. Atmospheric carbon dioxide concentrations increased by approximately 2.1 ppm, similar to the rates of recent years. Methane concentrations in the atmosphere increased by close to 12 ppb, higher than average, but below the last two years’ record highs. La Niña conditions persisted during much of the year, for the third year in a row”); National Aeronautics and Space Administration (12 January 2023) [NASA Says 2022 Fifth Warmest Year on Record, Warming Trend Continues](#); and National Oceanic and Atmospheric Administration (12 January 2022) [2022 was world’s 6th-warmest year on record](#).

¹⁴ Rockström J., et al. (2021) [Identifying a Safe and Just Corridor for People and the Planet](#), EARTH’S FUTURE 9(4): 1–7, 1 (“Human development depends on safeguarding the stability of the planet (Steffen et al., 2018; Xu et al., 2020). Current human activities, especially of high consuming wealthy societies, are threatening the stability of Earth’s life support systems and its capacity to support our future well-being in the Anthropocene (Steffen, Broadgate, et al., 2015). Simultaneously, key human development needs remain, including attaining the UN Sustainable Development Goals for all by 2030, and ensuring continued human well-being for a world population of possibly 10 billion people in 2050. Addressing these challenges requires a full integration of people’s lives and the planet’s stability.”).

¹⁵ Guterres A. (15 May 2018) [Remarks at Austrian World Summit](#), United Nations, Speeches (“Climate change is, quite simply, an existential threat for most life on the planet – including, and especially, the life of humankind.”).

¹⁶ Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) [Climate tipping points—too risky to bet against](#), Comment, NATURE, 575(7784): 592–595, 594 (“In our view, the clearest emergency would be if we were approaching a global cascade of tipping points that led to a new, less habitable, ‘hothouse’ climate state¹¹. Interactions could happen through ocean and atmospheric circulation or through feedbacks that increase greenhouse-gas levels and global temperature. Alternatively, strong cloud feedbacks could cause a global tipping point^{12,13}. We argue that cascading effects might be common. Research last year¹⁴ analysed 30 types of regime shift spanning physical climate and ecological systems, from collapse of the West Antarctic ice sheet to a switch from rainforest to savanna. This indicated that exceeding tipping points in one system can increase the risk of crossing them in others. Such links were found for 45% of possible interactions¹⁴. In our view, examples are starting to be observed. ... If damaging tipping cascades can occur and a global tipping point cannot be ruled out, then this is an existential threat to civilization. No amount of economic cost–benefit analysis is going to help us. We need to change our approach to the climate problem. ... In our view, the evidence from tipping points alone suggests that we are in a state of planetary emergency: both the risk and urgency of the situation are acute....”). See also Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) [Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points](#), SCIENCE 377(6611): 1–10, 7 (“Current warming is ~1.1°C above preindustrial and even with rapid emission cuts warming will reach ~1.5°C by the 2030s (23). We cannot rule out that WAIS and GrIS tipping points have already been passed (see above) and several other tipping elements have minimum threshold values within the 1.1 to 1.5°C range. Our best estimate thresholds for GrIS, WAIS, REEF, and abrupt permafrost thaw (PFAT) are ~1.5°C although WAIS and GrIS collapse may still be avoidable if GMST returns below 1.5°C within an uncertain overshoot time (likely decades) (94).”).

¹⁷ Dennis B. & Dance S. (31 July 2023) [It’s not just hot. Climate anomalies are emerging around the globe](#), THE WASHINGTON POST (“But some events were so abnormal that they sent a wave of consternation through the scientific community. Antarctic sea ice is [at a historically low level](#) for this time of year, according to federal data. Sea surface temperatures across the North Atlantic have been “off the charts,” Europe’s Copernicus Climate Change Service reported, noting that the figures set records for this time of year “by a very large margin.” Water temperatures off the coast of South Florida rose to unfathomable levels in recent days, leading scientists to fear for the [fate of the only living coral barrier reef](#) in the continental United States.¶ “On the one hand, we knew these things were going to happen. These have been the predictions for a long time,” said Claudia Tebaldi, a scientist at the Pacific Northwest National Laboratory. ¶ And yet, she said, “this year, in particular, has seemed so extreme. ... The size of the anomalies is surprising.” ¶ For years, climate scientists have detailed again and again the many impacts that are likely as the world grows steadily hotter, such as more intense storms, more torrential rainfall, [fast-rising seas](#) and melting ice caps. ¶ But they also have been unequivocal that with more warming comes the possibility of unforeseen consequences — of rapid changes, irreversible collapses and other feedback loops.¶ More than a decade ago, [a study](#) from the National Academies of Sciences, Engineering and Medicine found that while many aspects of climate change and its effects “are expected to be approximately linear and gradual,” that won’t always be the case. ¶ “It is clear that the risk of surprises can be expected to increase with the duration and magnitude of the warming,” the authors wrote. ¶ That reality seems to be playing out.”).

¹⁸ Xu Y. & Ramanathan V. (2017) [Well below 2 °C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes](#), PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 114(39): 10319–10323, 10320 (“Box 2. Risk Categorization of Climate Change to Society. ... [A] 2 °C warming would double the land area subject to deadly heat and expose 48% of the population. A 4 °C warming by 2100 would subject 47% of the land area and almost 74% of the world population to deadly heat, which could pose existential risks to humans and mammals alike unless massive adaptation measures are implemented, such as providing air conditioning to the entire population or a massive relocation of most of the population to safer climates. ... This bottom 3 billion population comprises mostly subsistent farmers, whose livelihood will be severely impacted, if not destroyed, with a one- to five-year megadrought, heat waves, or heavy floods; for those among the bottom 3 billion of the world’s population who are living in coastal areas, a 1- to 2-m rise in sea level (likely with a warming in excess of 3 °C) poses existential threat if they do not relocate or migrate. It has been estimated that several hundred million people would be subject to famine with warming in excess of 4 °C (54).

However, there has essentially been no discussion on warming beyond 5 °C. Climate change-induced species extinction is one major concern with warming of such large magnitudes (>5 °C). The current rate of loss of species is ~1,000-fold the historical rate, due largely to habitat destruction. At this rate, about 25% of species are in danger of extinction in the coming decades (56). Global warming of 6 °C or more (accompanied by increase in ocean acidity due to increased CO₂) can act as a major force multiplier and expose as much as 90% of species to the dangers of extinction (57). The bodily harms combined with climate change-forced species destruction, biodiversity loss, and threats to water and food security, as summarized recently (58), motivated us to categorize warming beyond 5 °C as unknown??, implying the possibility of existential threats.”). See also Xu C., Kohler T. A., Lenton T. M., Svenning J.-C., & Scheffer M. (2020) *Future of the human climate niche*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 117(21): 11350–11355, 11350 (“Here, we demonstrate that for millennia, human populations have resided in the same narrow part of the climatic envelope available on the globe, characterized by a major mode around ~11 °C to 15 °C mean annual temperature (MAT). ... We show that in a business-as-usual climate change scenario, the geographical position of this temperature niche is projected to shift more over the coming 50 y than it has moved since 6000 BP. ... Specifically, 3.5 billion people will be exposed to MAT ≥ 29.0 °C, a situation found in the present climate only in 0.8% of the global land surface, mostly concentrated in the Sahara, but in 2070 projected to cover 19% of the global land (Fig. 3). ... For instance, accounting for population growth projected in the SSP3 scenario, each degree of temperature rise above the current baseline roughly corresponds to one billion humans left outside the temperature niche, absent migration (SI Appendix, Fig. S14).”); Watts N., et al. (2021) *The 2020 report of The Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises*, THE LANCET 397(10269): 129–170, 129 (“Vulnerable populations were exposed to an additional 475 million heatwave events globally in 2019, which was, in turn, reflected in excess morbidity and mortality (indicator 1.1.2). During the past 20 years, there has been a 53.7% increase in heat-related mortality in people older than 65 years, reaching a total of 296 000 deaths in 2018 (indicator 1.1.3). The high cost in terms of human lives and suffering is associated with effects on economic output, with 302 billion h of potential labour capacity lost in 2019 (indicator 1.1.4). India and Indonesia were among the worst affected countries, seeing losses of potential labour capacity equivalent to 4–6% of their annual gross domestic product (indicator 4.1.3).”);

¹⁹ Zachariah M., Philip S., Pinto I., Vahlberg M., Singh R., Otto F., Barnes C., & Kimutai J. (2023) *Extreme heat in North America, Europe and China in July 2023 made much more likely by climate change* (“In line with what has been expected from past climate projections and IPCC reports these events are not rare anymore today. North America, Europe and China have experienced heatwaves increasingly frequently over the last years as a result of warming caused by human activities, hence the current heat waves are not rare in today's climate with an event like the currently expected approximately once every 15 years in the US/Mexico region, once every 10 years in Southern Europe, and once in 5 years for China. • Without human induced climate change these heat events would however have been extremely rare. In China it would have been about a 1 in 250 year event while maximum heat like in July 2023 would have been virtually impossible to occur in the US/Mexico region and Southern Europe if humans had not warmed the planet by burning fossil fuels.”). Note also the record-breaking June 2021 heatwave in the Pacific Northwest (U.S. and Canada) would have been virtually impossible absent human-caused climate change and would have been much less detrimental to human health. See Philip S. Y., et al. (2021) *Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada*, WORLD WEATHER ATTRIBUTION, 2 (“Also, this heatwave was about 2°C hotter than it would have been if it had occurred at the beginning of the industrial revolution (when global mean temperatures were 1.2°C cooler than today.”); and Newburger E. (1 July 2021) *Historic heat wave linked to hundreds of deaths in Pacific Northwest and Canada*, CNBC (“Dr. Jennifer Vines, Multnomah County's health officer, said the preliminary cause of death was hyperthermia, an abnormally high body temperature resulting from an inability of the body to deal with heat. Many of the dead were found alone and without air conditioning.... “While it is too early to say with certainty how many of these deaths are heat related, it is believed likely that the significant increase in deaths reported is attributable to the extreme weather B.C. has experienced,” Lapointe said in a statement.”). In Western Europe, global warming made the 2019 heatwaves up to 100 times more likely. See Vautard R., et al. (2020) *Human contribution to the record-breaking June and July 2019 heatwaves in Western Europe*, ENVIRON. RES. LETT. 15(9): 094077, 1–9, 5 (“For the France average, the heatwave was an event with a return period estimated to be 134 years. As for the June case, except for HadGEM-3A, which has a hot and dry bias, the changes in intensity are systematically underestimated, as they range from 1.1 °C (CNRM-CM6.1) to 1.6 °C (EC-EARTH). By combining information from models and observations, we conclude that the probability of such an event to occur for France has increased by a factor of at least 10 (see the synthesis in figure 3). This factor is very uncertain and could

be two orders of magnitude higher. The change in intensity of an equally probable heatwave is between 1.5 degrees and 3 degrees. We found similar numerical results for Lille, with however an estimate of change in intensity higher in the observations, and models predict trend estimates that are consistently lower than observation trends, a fact that needs further investigation beyond the scope of this attribution study. We conclude for these cases that such an event would have had an extremely small probability to occur (less than about once every 1000 years) without climate change in France. Climate change had therefore a major influence to explain such temperatures, making them about 100 times more likely (at least a factor of ten).”).

²⁰ Dahl K. A., Abatzoglou J. T., Phillips C. A., Ortiz-Partida J. P., Licker R., Merner L. D., & Ekwurzel B. (2023) [Quantifying the contribution of major carbon producers to increases in vapor pressure deficit and burned area in western US and southwestern Canadian forests](#), ENVIRON. RES. LETT. 18(6): 064011, 1–11, 2 (“Vapor pressure deficit (VPD)—a measure of atmospheric water demand defined as the difference between the amount of water vapor in the air and the amount of water vapor that air would hold at saturation—has emerged as a key metric linking climate change and burned area (BA) due to its role in regulating ecosystem water dynamics (Grossiord et al 2020, Clarke et al 2022). Through the lens of regional wildfire risk, rising VPD ultimately translates to a greater likelihood that fuels will ignite and carry fire across a landscape. More than two-thirds of the observed summertime increase in VPD in the western US has been attributed to anthropogenic warming (Zhuang et al 2021). In turn, the increase in summertime VPD has driven increases in fuel aridity in the region, resulting in nearly a doubling of BA in western US forests during 1984–2015 (Abatzoglou and Williams 2016). Regionally, there is a strong and established interannual relationship between VPD and BA across forested subregions of the western US and southwestern Canada (Abatzoglou et al 2018, Williams et al 2019, Whitman et al 2022). In flammability-limited ecosystems like forests, area burned is exponentially related to VPD (Juang et al 2022).”).

²¹ Night-time fire intensity has increased globally in the last two decades due to rising temperatures, causing more intense, longer-lasting, and larger fires. See Balch J. K., Abatzoglou J. T., Joseph M. B., Koontz M. J., Mahood A. L., McGlinchy J., Cattau M. E., & Williams A. P. (2022) [Warming weakens the night-time barrier to global fire](#), NATURE 602: 442–448, 442 (“Night-time provides a critical window for slowing or extinguishing fires owing to the lower temperature and the lower vapour pressure deficit (VPD). However, fire danger is most often assessed based on daytime conditions^{1,2}, capturing what promotes fire spread rather than what impedes fire. Although it is well appreciated that changing daytime weather conditions are exacerbating fire, potential changes in night-time conditions—and their associated role as fire reducers—are less understood. Here we show that night-time fire intensity has increased, which is linked to hotter and drier nights. Our findings are based on global satellite observations of daytime and night-time fire detections and corresponding hourly climate data, from which we determine landcover-specific thresholds of VPD (VPD_t), below which fire detections are very rare (less than 95 per cent modelled chance). Globally, daily minimum VPD increased by 25 per cent from 1979 to 2020. Across burnable lands, the annual number of flammable night-time hours—when VPD exceeds VPD_t —increased by 110 hours, allowing five additional nights when flammability never ceases. Across nearly one-fifth of burnable lands, flammable nights increased by at least one week across this period. Globally, night fires have become 7.2 per cent more intense from 2003 to 2020, measured via a satellite record. These results reinforce the lack of night-time relief that wildfire suppression teams have experienced in recent years. We expect that continued night-time warming owing to anthropogenic climate change will promote more intense, longer-lasting and larger fires.”); discussed in Dickie G. (19 July 2022) [Steamy nights in European heatwave worsen health and fire risks – experts](#), REUTERS.

²² The eastern coast of South Africa saw extreme flooding in 2022, which affected 40,000 people and caused US \$1.57 billion in property damage. A recent study shows that the probability of such extreme rainfall in the region has doubled due to human-induced climate change. See Pinto I., et al. (2022) [Climate change exacerbated rainfall causing devastating flooding in Eastern South Africa](#), WORLD WEATHER ATTRIBUTION: 1–21, 2 (“40,000 people were impacted by the rainfall and subsequent floods- 435 deaths were reported from the affected areas, 55 injured and 54 people missing (Government of South Africa, 2022a). At least 13,500 houses were damaged or destroyed - among these, over 4,000 homes in informal settlements in eThekweni Metropolitan Municipality were destroyed, leaving 6278 people homeless and 7245 people in shelters (Ibid.). 630 schools were affected in the KZN province in the impacted areas, and 124 schools damaged, thus impacting around 270,000 students (Government of South Africa, 2022b). Critical infrastructure such as bridges and roads were also severely damaged, including two major highways

(IFRC, 2022), and the mobile phone infrastructure of KwaZulu-Natal saw 400 towers impacted due to power outages and flooded fibre conduiting (Tech Central, 2022). In addition, large parts of Durban were left without electricity and water for days due to damage to water treatment and power plant stations (IFRC, 2022). The overall property damage is estimated around 17 billion rand/US\$1.57 billion (IOL, 2022a).”; “...the probability of an event such as the rainfall that resulted in this disaster has approximately doubled due to human-induced climate change. The intensity of the current event has increased by 4-8%.”).

²³ For example, the catastrophic flooding that inundated a third of Pakistan in 2022 was very likely made more severe by climate change, increasing rainfall, glacier melt, and extending a La Niña event in the Pacific for a rare third year. See Clarke B., Otto F., & Harrington L. (5 September 2022) [Pakistan floods: What role did climate change play?](#), THE CONVERSATION (“Clues as to the role of climate change can also come from aspects that contributed to this disaster. There are three main factors. ¶ First, extreme rainfall. A warmer atmosphere holds more moisture. For every degree the atmosphere warms it can hold about 6%-7% more moisture, which often results in more rain falling during the most extreme events (south Asia has warmed around 0.7°C since 1900). Had this event happened in a world where carbon dioxide concentrations were instead at pre-industrial levels, the rains probably would have been less intense. ¶ Second, the monsoon itself, which is highly complex and variable. It forms in south Asia in the summer, when air over land warms faster than air over the sea, which creates a flow of air onto the land. The winds bring great volumes of moisture that precipitate into deluges when they meet higher ground, especially the Himalayas. ¶ Unusual monsoon rains over Pakistan have some predictability. They occur when multiple phenomena coincide, including a La Niña event in the Pacific and large meanders in the high-altitude jet stream, as was the case in both 2010 and this year. ¶ There is emerging evidence that this confluence of factors may occur more regularly as the climate changes. If such trends continue, then flooding in Pakistan and other simultaneous extremes across the northern Hemisphere will happen more often in the future. ¶ Pakistan also experienced extended and brutal heatwaves in May and June this year, which were amplified by climate change. This heat amplified the monsoonal "thermal low"—a low-pressure system created by hot air rising rapidly—which greatly enhanced the flow of moisture-laden air onto southern Pakistan. ¶ Third, Pakistan has more than 7,000 glaciers in its northern mountainous regions. As these glaciers melt, their waters contribute to the flooding. This melting is driven to a large degree by climate change and is especially prominent this year as a result of the heatwave.”); Otto F. E. L., Zachariah M., Saeed F., Siddiqi A., & Shahzad K. (2022) [Climate change likely increased extreme monsoon rainfall, flooding highly vulnerable communities in Pakistan](#), WORLD WEATHER ATTRIBUTION, 3 (“However, for the 5-day rainfall extreme, the majority of models and observations we have analysed show that intense rainfall has become heavier as Pakistan has warmed. Some of these models suggest climate change could have increased the rainfall intensity up to 50% for the 5-day event definition.”); and Trenberth K. (15 September 2022) [2022's supercharged summer of climate extremes: How global warming and La Niña fueled disasters on top of disasters](#), THE CONVERSATION.

²⁴ These six tipping points, shown in **Figure Error! Main Document Only.**, are the Greenland ice sheet, West Antarctic ice sheet, low-latitude (warm water) coral reefs, abrupt permafrost thaw, abrupt loss of Barents Sea winter ice, and collapse of the subpolar gyre (SPG) overturning circulation in the Labrador Sea. See Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) [Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points](#), SCIENCE 377(6611): 1–10, 7 (“Current warming is ~1.1°C above preindustrial and even with rapid emission cuts warming will reach ~1.5°C by the 2030s (23). We cannot rule out that WAIS [West Antarctic Ice Sheet] and GrIS [Greenland Ice Sheet] tipping points have already been passed (see above) and several other tipping elements have minimum threshold values within the 1.1 to 1.5°C range. Our best estimate thresholds for GrIS, WAIS, REEF [low-latitude coral reefs], and North Atlantic subpolar gyre / Labrador-Irminger Sea convection abrupt permafrost thaw (PFAT) are ~1.5°C although WAIS and GrIS collapse may still be avoidable if GMST [Global Mean Surface Temperature] returns below 1.5°C within an uncertain overshoot time (likely decades) (94). ... The chance of triggering CTPs [Climate tipping points] is already non-negligible and will grow even with stringent climate mitigation (SSP1-1.9 in Fig. 2, B and C). Nevertheless, achieving the Paris Agreement’s aim to pursue efforts to limit warming to 1.5°C would clearly be safer than keeping global warming below 2°C (90) (Fig. 2). Going from 1.5 to 2°C increases the likelihood of committing to WAIS and GrIS collapse near complete warm-water coral die-off, and abrupt permafrost thaw; further, the best estimate threshold for LABC [North Atlantic subpolar gyre / Labrador-Irminger Sea convection] collapse is crossed. The likelihood of triggering AMOC [Atlantic Meridional Overturning Circulation] collapse, Boreal forest shifts, and extra-polar glacier

loss becomes non-negligible at $>1.5^{\circ}\text{C}$ and glacier loss becomes likely by $\sim 2^{\circ}\text{C}$. A cluster of abrupt shifts occur in ESM [Earth System Models] at 1.5 to 2°C (19). Although not tipping elements, ASSI [Arctic Summer Sea Ice] loss could become regular by 2°C , gradual permafrost thaw would likely become widespread beyond 1.5°C , and land carbon sink weakening would become significant by 2°C .”).

²⁵ Here we distinguish between abrupt shifts, as in Drijfhout *et al.* (2015), and the more restrictive definition of “core climate tipping points” defined by Armstrong McKay *et al.* (2022) as “when change in part of the climate system becomes (i) self-perpetuating beyond (ii) a warming threshold as a result of asymmetry in the relevant feedbacks, leading to (iii) substantial and widespread Earth system impacts.” For description of the eleven abrupt shifts, *see* Drijfhout S., Bathiany S., Beaulieu C., Brovkin V., Claussen M., Huntingford C., Scheffer M., Sgubin G., & Swingedouw D. (2015) [Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models](#), PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 112(43): E5777–E5786, E5777, E5784 (“Abrupt transitions of regional climate in response to the gradual rise in atmospheric greenhouse gas concentrations are notoriously difficult to foresee. However, such events could be particularly challenging in view of the capacity required for society and ecosystems to adapt to them. We present, to our knowledge, the first systematic screening of the massive climate model ensemble informing the recent Intergovernmental Panel on Climate Change report, and reveal evidence of 37 forced regional abrupt changes in the ocean, sea ice, snow cover, permafrost, and terrestrial biosphere that arise after a certain global temperature increase. Eighteen out of 37 events occur for global warming levels of less than 2° , a threshold sometimes presented as a safe limit.”; 11 abrupt shifts are shown between 1.0 – 1.5°C in “Fig. 4. Abrupt shifts as a function of global temperature increase. Shown are the number of abrupt climate changes occurring in the CMIP5 database for different intervals of warming relative to the preindustrial climate.”).

²⁶ Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) [Exceeding \$1.5^{\circ}\text{C}\$ global warming could trigger multiple climate tipping points](#), SCIENCE 377(6611): 1–10, 7 (“Current warming is $\sim 1.1^{\circ}\text{C}$ above preindustrial and even with rapid emission cuts warming will reach $\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ by the 2030s (23). We cannot rule out that WAIS [West Antarctic Ice Sheet] and GrIS [Greenland Ice Sheet] tipping points have already been passed (see above) and several other tipping elements have minimum threshold values within the 1.1 to 1.5°C range. Our best estimate thresholds for GrIS, WAIS, REEF [low-latitude coral reefs], and North Atlantic subpolar gyre / Labrador-Irminger Sea convection abrupt permafrost thaw (PFAT) are $\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ although WAIS and GrIS collapse may still be avoidable if GMST [Global Mean Surface Temperature] returns below 1.5°C within an uncertain overshoot time (likely decades) (94). ... The chance of triggering CTPs [Climate tipping points] is already non-negligible and will grow even with stringent climate mitigation (SSP1-1.9 in Fig. 2, B and C). Nevertheless, achieving the Paris Agreement’s aim to pursue efforts to limit warming to 1.5°C would clearly be safer than keeping global warming below 2°C (90) (Fig. 2). Going from 1.5 to 2°C increases the likelihood of committing to WAIS and GrIS collapse near complete warm-water coral die-off, and abrupt permafrost thaw; further, the best estimate threshold for LABC [North Atlantic subpolar gyre / Labrador-Irminger Sea convection] collapse is crossed. The likelihood of triggering AMOC [Atlantic Meridional Overturning Circulation] collapse, Boreal forest shifts, and extra-polar glacier loss becomes non-negligible at $>1.5^{\circ}\text{C}$ and glacier loss becomes likely by $\sim 2^{\circ}\text{C}$. A cluster of abrupt shifts occur in ESM [Earth System Models] at 1.5 to 2°C (19). Although not tipping elements, ASSI [Arctic Summer Sea Ice] loss could become regular by 2°C , gradual permafrost thaw would likely become widespread beyond 1.5°C , and land carbon sink weakening would become significant by 2°C .”).

²⁷ Armstrong McKay D. I. & Loriani S. (eds.) (2023) [Section 1: Earth systems tipping points](#), in [GLOBAL TIPPING POINTS REPORT 2023](#), Lenton T. M., et al. (eds.), 9, 12 (“With about 1.2°C of global warming compared to pre-industrial levels, we are getting dangerously close to the temperature thresholds of some major tipping points for the ice sheets of Greenland and West Antarctica. Crossing these would lock in unavoidable long-term global sea level rise of up to 10 metres.”; “Table 1.2.1: Summary of evidence for tipping dynamics, key drivers and biophysical impacts in each system considered in this chapter” [see column on biophysical impacts for Greenland and West Antarctic ice sheets].). For higher estimates of sea-level rise based on Earth’s past climate, *see* International Cryosphere Climate Initiative (2023) [STATE OF THE CRYOSPHERE REPORT 2023 – TWO DEGREES IS TOO HIGH](#), 12 (“Because of the existence of these thresholds, when temperatures reached 2°C above pre-industrial in the Earth’s past, sea levels peaked at around 12–20 meters higher than present-day levels. During the height of the Pliocene 3 million years ago, when CO_2 levels were comparable to today and temperatures stabilized at 2 – 3°C higher than pre-industrial, sea levels

may have peaked at around 20 meters higher than today's.19,20,26,40 Such extensive sea level rise would be catastrophic for today's coastal communities — yet we are currently on track for even higher temperature peaks than those that drove these past sea level rises.”).

²⁸ Boers N. & Rypdal M. (2021) [Critical slowing down suggests that the western Greenland Ice Sheet is close to a tipping point](#), Proc. Nat'l. Acad. Sci. 118(21): 1–7, 1 (“A crucial nonlinear mechanism for the existence of this tipping point is the positive melt-elevation feedback: Melting reduces ice sheet height, exposing the ice sheet surface to warmer temperatures, which further accelerates melting. We reveal early-warning signals for a forthcoming critical transition from ice-core-derived height reconstructions and infer that the western Greenland Ice Sheet has been losing stability in response to rising temperatures. We show that the melt-elevation feedback is likely to be responsible for the observed destabilization. Our results suggest substantially enhanced melting in the near future.”).

²⁹ King M. D., Howat I. M., Candela S. G., Noh M. J., Jeong S., Noël B. P. Y., van den Broeke M. R., Wouters B., & Negrete A. (2020) [Dynamic ice loss from the Greenland Ice Sheet driven by sustained glacier retreat](#), Comm. Earth & Env't.: 1–7, 1 (“The Greenland Ice Sheet is losing mass at accelerated rates in the 21st century, making it the largest single contributor to rising sea levels. Faster flow of outlet glaciers has substantially contributed to this loss, with the cause of speedup, and potential for future change, uncertain.”).

³⁰ Fox-Kemper B., et al. (2021) [Chapter 9: Ocean, Cryosphere and Sea Level Change](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 1308–1309, 1302 (“[T]he main uncertainty related to high-end sea-level rise is “when” rather than “if” it arises: the upper limit of 1.02 m of *likely* sea-level range by 2100 for the SSP 5-8.5 scenario will be exceeded in any future warming scenario on time scales of centuries to millennia (*high confidence*), but it is uncertain how quickly the long-term committed sea level will be reached (Section 9.6.3.5). Hence, global-mean sea level might rise well above the *likely* range before 2100, which is reflected by assessments of ice-sheet contributions based on structured expert judgment (Bamber et al., 2019) leading to a 95th percentile of projected future sea-level rise as high as 2.3 m in 2100 (Section 9.6.3.3)... High-end sea-level rise can therefore occur if one or two processes related to ice-sheet collapse in Antarctica result in an additional sea-level rise at the maximum of their plausible ranges (Sections 9.4.2.5, 9.6.3.3; Table 9.7) or if several of the processes described in this box result in individual contributions to additional sea-level rise at moderate levels. In both cases, global-mean sea-level rise by 2100 would be substantially higher than the assessed *likely* range, as indicated by the projections including *low confidence* processes reaching in 2100 as high as 1.6 m at the 83rd percentile and 2.3 m at the 95th percentile (Section 9.6.3.3).”; “While ice-sheet processes in whose projection there is *low confidence* have little influence up to 2100 on projections under SSP1-1.9 and SSP1-2.6 (Table 9.9), this is not the case under higher emissions scenarios, where they could lead to GMSL rise well above the *likely* range. In particular, under SSP5-8.5, *low confidence* processes could lead to a total GMSL rise of 0.6-1.6 m over this time period (17th-83rd percentile range of p-box including SEJ- and MICI-based projections), with 5th-95th percentile projections extending to 0.5-2.3 m (*low confidence*).”). See also Wang S., Foster A., Lenz E. A., Kessler J. D., Stroeve J. C., Anderson L. O., Turetsky M., Betts R., Zou S., Liu W., Boos W. R., & Hausfather Z. (2023) [Mechanisms and Impacts of Earth System Tipping Elements](#), REV. GEOPHYS. 61: 1–81, 19–20 (“As mentioned above, reduction of the GIS will likely require a millennium. Yet the weakening of ice shelf buttressing directly accelerates ice flow and discharge independent of MISC and MICI processes, with immediate implications for observed rates of sea-level rise. Consequently, under our current best understanding, Greenland and Antarctic ice-sheet collapse cannot be considered an abrupt or fast phenomenon in which most sea level impacts manifest within decades. Nevertheless, ice-sheet losses may contribute to regional sea level rise under RCP8.5 and worst-case scenarios that reaches 1–2 m for many cities globally by 2100, seriously threatening existing communities and infrastructure (Trisos et al., 2022). Over longer timescales, sustained high rates of global sea-level rise (>1 cm/yr by 2200, with further acceleration to up to a couple centimeters per year beyond) may broadly strain coastal adaptation efforts (Oppenheimer et al., 2019). At the same time, models indicate that strong climate mitigation may avert significant fractions of potential sea-level rise and prevent ice-sheet collapse across large regions. In several modeling studies the RCP2.6 scenario prevents collapse of the WAIS (Bulthuis et al., 2019; DeConto & Pollard, 2016) and may reduce the Antarctic contribution to global sea level rise by 2100 to 13 cm (Edwards et al., 2021)... Although significant uncertainties remain regarding the precise temperature thresholds that

could trigger ice-sheet collapse, research to date suggests that aggressive climate mitigation could limit risks from ice-sheet instabilities (Table 4).”).

³¹ Robinson A., Calov R., & Ganopolski A. (2012) [Multistability and critical thresholds of the Greenland ice sheet](#), NAT. CLIM. CHANGE 2(6): 429–432, 429 (“Recent studies have focused on the short-term contribution of the Greenland ice sheet to sea-level rise, yet little is known about its long-term stability. The present best estimate of the threshold in global temperature rise leading to complete melting of the ice sheet is 3.1 °C (1.9–5.1 °C, 95% confidence interval) above the preindustrial climate, determined as the temperature for which the modelled surface mass balance of the present-day ice sheet turns negative. Here, using a fully coupled model, we show that this criterion systematically overestimates the temperature threshold and that the Greenland ice sheet is more sensitive to long-term climate change than previously thought. We estimate that the warming threshold leading to a monostable, essentially ice-free state is in the range of 0.8–3.2 °C, with a best estimate of 1.6 °C. By testing the ice sheet’s ability to regrow after partial mass loss, we find that at least one intermediate equilibrium state is possible, though for sufficiently high initial temperature anomalies, total loss of the ice sheet becomes irreversible. Crossing the threshold alone does not imply rapid melting (for temperatures near the threshold, complete melting takes tens of millennia). However, the timescale of melt depends strongly on the magnitude and duration of the temperature overshoot above this critical threshold.”).

³² Armstrong McKay D. I. & Loriani S. (eds.) (2023) [Section 1: Earth systems tipping points](#), in [GLOBAL TIPPING POINTS REPORT 2023](#), Lenton T. M., et al. (eds.), 17 (“Substantial ocean warming and ice shelf basal melting is committed in the Amundsen Sea over the 21st Century, which will likely accelerate the retreat of several key WAIS outlet glaciers including the Thwaites and Pine Island glaciers (Naughten et al. 2023).”), [discussing](#) Naughten K. A., Holland P. R., & De Rydt J. (2023) [Unavoidable future increase in West Antarctic ice-shelf melting over the twenty-first century](#), NAT. CLIM. CHANG. 13(11): 1222–1228, 1223–1224 (“Future warming and melting are markedly stronger than historical trends, with ensemble mean future warming trends ranging from 0.8 to 1.4 °C per century (Extended Data Table 1) compared with the historical mean of 0.25 °C per century. Even under the most ambitious mitigation scenario, Paris 1.5 °C, the Amundsen Sea warms three times faster than in the twentieth century. ... The Paris 1.5 °C, Paris 2 °C and RCP 4.5 trends are all statistically indistinguishable, assessed in any combination, for both warming and melting. Only RCP 8.5, the most extreme scenario, is distinct from the others. This result suggests that climate mitigation has limited power to prevent ocean warming which controls sea-level rise from the WAIS and that internal climate variability presents a larger source of uncertainty than future greenhouse gas emissions. ... Therefore, while mitigation of the worst-case climate change scenario still has the potential to reduce Amundsen Sea warming, it will probably not make a difference for several decades. By this time, the impact on some glacier basins of the WAIS could be irreversible, even if ocean temperatures then returned to present-day values.”). [See also](#) Kloenne U., Nauels A., Pearson P., DeConto R. M., Findlay H. S., Hugelius G., Robinson A., Rogelj J., Schuur E. A. G., Stroeve J., & Schleussner C.-F. (2023) [Only halving emissions by 2030 can minimize risks of crossing cryosphere thresholds](#), NAT. CLIM. CHANG. 13(1): 9–11, 10 (“The IPCC assesses that ... [f]or Antarctica, there is large uncertainty around potential instabilities, which could trigger significant losses. The threshold for instability of the West Antarctic Ice Sheet (WAIS) might be between 1.5–2°C. Only parts would be lost below 2°C, with complete or near-complete loss at 2–3°C peak warming. Above 3°C the WAIS will be completely and the East Antarctic Wilkes Subglacial Basin substantially or completely lost over multiple millennia. Large losses from East Antarctica could occur above 5°C.”).

³³ Rantanen M., Karpechko A. Y., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T. & Laaksonen A. (2022) [The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979](#), COMMUN. EARTH ENVIRON. 3(168): 1–10, 3 (“During 1979–2021, major portions of the Arctic Ocean were warming at least four times as fast as the global average (Fig. 1c). The most extreme AA values occur in the sea areas near Novaya Zemlya, which were locally warming up to seven times as fast as the global average. These high warming rates are consistent with recent research⁴⁴, and evidently, the primary reason for such a high amplification ratio is the reduction of cold-season ice cover, which has been most pronounced in the Barents Sea^{44,45}. Furthermore, it has been found that changes in atmospheric circulation have amplified the warming in this area^{46,47}. In general, there are no regions within the Arctic Circle where AA⁴³ is smaller than two, apart from the northern North Atlantic.”); [discussed in](#) Budryk Z. (11 August 2022) [Arctic warming up to four times as fast as global average: study](#), THE HILL; and Fountain H. (11 August 2022) [Arctic Warming Is Happening Faster Than Described, Analysis Shows](#), THE NEW YORK TIMES. [See also](#) Jacobs P.,

Lenzen N. J. L., Schmidt G. A., & Rohde R. A. (2021) [The Arctic Is Now Warming Four Times As Fast As the Rest of the Globe](#), Presentation at the American Geophysical Union Fall Meeting, A13E-02 (“We demonstrate the Arctic is likely warming over 4 times faster than the rest of the world, some 3-4 times the global average, with higher rates found both for more recent intervals as well as more accurate latitudinal boundaries. These results stand in contrast to the widely-held conventional wisdom — prevalent across scientific and lay publications alike — that the Arctic is “only” warming around twice as fast as the global mean.”); *discussed in* Voosen P. (14 December 2021) [The Arctic is warming four times faster than the rest of the world](#), SCIENCE; and Chylek P., Folland C., Klett J. D., Wang M., Hengartner N., Lesins G., & Dubey M. K. (2022) [Annual Mean Arctic Amplification 1970–2020: Observed and Simulated by CMIP6 Climate Models](#), GEOPHYS. RES. LETT. 49(13): 1–8, 1 (“While the annual mean Arctic Amplification (AA) index varied between two and three during the 1970–2000 period, it reached values exceeding four during the first two decades of the 21st century. The AA did not change in a continuous fashion but rather in two sharp increases around 1986 and 1999. During those steps the mean global surface air temperature trend remained almost constant, while the Arctic trend increased. Although the “best” CMIP6 models reproduce the increasing trend of the AA in 1980s they do not capture the sharply increasing trend of the AA after 1999 including its rapid step-like increase. We propose that the first sharp AA increase around 1986 is due to external forcing, while the second step close to 1999 is due to internal climate variability, which models cannot reproduce in the observed time.... Annual mean Arctic Amplification (AA) within the period 1970–2020 changed in steep steps around 1986 and 1999. It reached values over 4.0...”); *discussed in* Los Alamos National Laboratory (5 July 2022) [Arctic temperatures are increasing four times faster than global warming](#), PHYS.ORG.

³⁴ Kim Y.-H., Min S.-K., Gillett N. P., Notz D., & Malinina E. (2023) [Observationally-constrained projections of an ice-free Arctic even under a low emission scenario](#), NAT. COMMUN. 14: 3139, 5 (“Based on the GHG+ scaling factors, we produce observationally-constrained future changes in Arctic SIA under four SSP scenarios. Results indicate that the first sea ice-free September will occur as early as the 2030s–2050s irrespective of emission scenarios. Extended occurrences of an ice-free Arctic in the early summer months are projected later in the century under higher emissions scenarios.”). *See also* Bonan D. B., Schneider T., Eisenman I., & Wills R. C. J. (2021) [Constraining the Date of a Seasonally Ice-Free Arctic Using a Simple Model](#), GEOPHYS. RES. LETT. 48(18): 1–12, 1 (“Under a high-emissions scenario, an ice-free Arctic will likely (>66% probability) occur between 2036 and 2056 in September and between 2050 and 2068 from July to October. Under a medium-emissions scenario, the “likely” date occurs between 2040 and 2062 in September and much later in the 21st century from July to October.”); Docquier D. & Koenigk T. (2021) [Observation-based selection of climate models projects Arctic ice-free summers around 2035](#), COMMUN. EARTH ENVIRON. 2(144): 1–8, 4, 6 (“In the high-emission scenario, five out of six selection criteria that include ocean heat transport provide a first ice-free Arctic in September before 2040 (range of multi-model means: 2032–2039), more than 20 years before the date of ice-free Arctic for the multi-model mean without model selection (i.e. 2061)”); “This model selection reveals that sea-ice area and volume reach lower values at the end of this century compared to the multi-model mean without selection. This arises both from a more rapid reduction in these quantities through this century and from a lower present-day sea-ice area. Using such a model selection, the timing of an almost ice-free Arctic in summer is advanced by up to 29 years in the high-emission scenario, i.e. it could occur as early as around 2035.”); Peng G., Matthews J. L., Wang M., Vose R., & Sun L. (2020) [What Do Global Climate Models Tell Us about Future Arctic Sea Ice Coverage Changes?](#), CLIMATE 8(15): 1–24, 17 (“Excluding the values later than 2100, the averaged projected [first ice-free Arctic summer year (FIASY)] value for RCP4.5 was 2054 with a spread of 74 years; for RCP8.5, the averaged FIASY was 2042 with a spread of 42 years. ...which put the mean FIASY at 2037. The RCP8.5 projections tended to push FIASY earlier, except for those of the MICRO-ESM and MICRO-ESM-CHEM models. Those two models also tended to project earlier Arctic ice-free dates and longer durations.”); and Overland J. E. & Wang M. (2013) [When will the summer Arctic be nearly sea ice free?](#), GEOPHYS. RES. LETT. 40(10): 2097–2101, 2097 (“Three recent approaches to predictions in the scientific literature are as follows: (1) extrapolation of sea ice volume data, (2) assuming several more rapid loss events such as 2007 and 2012, and (3) climate model projections. Time horizons for a nearly sea ice-free summer for these three approaches are roughly 2020 or earlier, 2030 ± 10 years, and 2040 or later. Loss estimates from models are based on a subset of the most rapid ensemble members. ... Observations and citations support the conclusion that most global climate model results in the CMIP5 archive are too conservative in their sea ice projections. Recent data and expert opinion should be considered in addition to model results to advance the very likely timing for future sea ice loss to the first half of the 21st century, with a possibility of major loss within a decade or two.”). However, findings of ice-free September Arctic sea ice may be too early by a

decade if models are not properly accounting for larger changes in atmospheric circulation, *according to* Topál D. & Ding Q. (2023) [Atmospheric circulation-constrained model sensitivity recalibrates Arctic climate projections](#), NAT. CLIM. CHANG. 1–9, 5 (“To showcase our point, we use the abovementioned method to constrain the timing of the first sea-ice-free September in the SMILEs and CMIP6 models. The cumulative probability density functions (CDFs) corresponding to the time of emergence of the first seasonally sea-ice-free Arctic^{52,53} (below 1 million km² in September) in the raw and the calibrated SIE time series in the model ensembles show prospects of a 9–11-year delay of the ‘likely’ (in IPCC⁵⁴ terms) probability ($P > 0.66$) of a September ice-free Arctic, such that an ice-free summer before 2050 is ‘as likely as not’ (in IPCC terms $0.33 < P < 0.66$) (Fig. 5c; Methods). This result is in contrast to estimates from previous studies that project ice-free September as early as mid-century³³. Our results are also at odds with a recent study, where the authors used Arctic temperatures as an emergent constraint on ice-free projections in CMIP6 (ref. 40).”).

³⁵ Bonan D. B., Schneider T., Eisenman I., & Wills R. C. J. (2021) [Constraining the Date of a Seasonally Ice-Free Arctic Using a Simple Model](#), GEOPHYS. RES. LETT. 48(18): 1–12, 1 (“Under a high-emissions scenario, an ice-free Arctic will likely (>66% probability) occur between 2036 and 2056 in September and between 2050 and 2068 from July to October. Under a medium-emissions scenario, the “likely” date occurs between 2040 and 2062 in September and much later in the 21st century from July to October.”). However, findings of ice-free September Arctic sea ice may be too early by a decade if models are not properly accounting for larger changes in atmospheric circulation, *according to* Topál D. & Ding Q. (2023) [Atmospheric circulation-constrained model sensitivity recalibrates Arctic climate projections](#), NAT. CLIM. CHANG. 1–9, 5 (“To showcase our point, we use the abovementioned method to constrain the timing of the first sea-ice-free September in the SMILEs and CMIP6 models. The cumulative probability density functions (CDFs) corresponding to the time of emergence of the first seasonally sea-ice-free Arctic^{52,53} (below 1 million km² in September) in the raw and the calibrated SIE time series in the model ensembles show prospects of a 9–11-year delay of the ‘likely’ (in IPCC⁵⁴ terms) probability ($P > 0.66$) of a September ice-free Arctic, such that an ice-free summer before 2050 is ‘as likely as not’ (in IPCC terms $0.33 < P < 0.66$) (Fig. 5c; Methods). This result is in contrast to estimates from previous studies that project ice-free September as early as mid-century³³. Our results are also at odds with a recent study, where the authors used Arctic temperatures as an emergent constraint on ice-free projections in CMIP6 (ref. 40).”).

³⁶ Pistone K., Eisenman I., & Ramanathan V. (2019) [Radiative Heating of an Ice-Free Arctic Ocean](#), GEOPHYS. RES. LETT. 46(13): 7474–7480, 7477 (“This heating of 0.71 W/m² is approximately equivalent to the direct radiative effect of emitting one trillion tons of CO₂ into the atmosphere (see calculation in Appendix A). As of 2016, an estimated 2.4 trillion tons of CO₂ have been emitted since the preindustrial period due to both fossil fuel combustion (1.54 trillion tons) and land use changes (0.82 trillion tons), with an additional 40 billion tons of CO₂ per year emitted from these sources during 2007–2016 (Le Quéré et al., 2018). Thus, the additional warming due to the complete loss of Arctic sea ice would be equivalent to 25 years of global CO₂ emissions at the current rate.”). *See also* Institute for Governance & Sustainable Development (2019) [Plain Language Summary of Pistone K., et al.](#)

³⁷ Wadhams P. (2017) [A FAREWELL TO ICE: A REPORT FROM THE ARCTIC](#), Oxford University Press, 107–108 (“Warm air over an ice-free Arctic also causes the snowline to retreat. ... This of the same magnitude as the sea ice negative anomaly during the same period, and the change in albedo is roughly the same between snow-covered land and snow-free tundra as it is between sea ice and open water. Nobody has yet published the calculations for tundra as Pistone and her colleagues did for sea ice, but the similarity of the magnitudes means that snowline retreat and sea ice retreat are each adding about the same amount to global warming.”).

³⁸ National Snow & Ice Data Center, [The Sun sets on the Arctic melt season](#) (last visited 21 November 2023) (“On September 10, 2023, Antarctic extent reached an annual maximum of 16.96 million square kilometers (6.55 million square miles). This year’s maximum was 1.03 million square kilometers (398,000 square miles) below the previous record low set in 1986. There is growing evidence that the Antarctic sea ice system has entered a new regime, featuring a much stronger influence of warm ocean waters limiting ice growth (Figure 5b).”). *See also* Hobbs W., Spence P., Meyer A., Schroeter S., Fraser A. D., Reid P., Tian T. R., Wang Z., Liniger G., Doddridge E. W., & Boyd P. W. (2024) [Observational Evidence for a Regime Shift in Summer Antarctic Sea Ice](#), J. CLIM. 37(7): 2263–2275, 2272 (“In the last 15 years, summer Antarctic sea ice variability has been significantly greater than the earlier satellite record.

This increased variance is tied to a marked increase in month-to-month sea ice autocorrelation. These changes, along with changes in the spatial variance of Antarctic sea ice shown by Schroeter et al. (2023), are all consistent with theoretical precursors of a transition to a new sea ice state.”); and Gilbert E. (29 January 2024) [Why 2023 was such an exceptional year for Antarctic sea ice](#), CARBON BRIEF (“Although current sea ice extent is no longer the lowest on record, conditions are still well below the 1981-2010 average, and this situation may well persist into the 2024 melt season. So, while it is too early to say conclusively that the recent sea-ice lows are the beginning of a regime shift in Antarctic sea ice, it seems inevitable that it will eventually decline in response to human-caused climate change.”).

³⁹ National Snow & Ice Data Center (4 March 2024) [Leaping toward spring](#) (“Antarctic sea ice extent appears to have reached its seasonal minimum, ending up as tied with 2022 for second lowest in the satellite data record, just above 2023. Thus, the last three years are the three lowest in the 46-year record and the first three years that reached an extent below 2.0 million square kilometers (772,000 square miles). Having three such years in a row is unusual.”).

⁴⁰ Gatti L. V., et al. (2021) [Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change](#), NATURE 595(7867): 388–393, 388 (“Southeastern Amazonia, in particular, acts as a net carbon source (total carbon flux minus fire emissions) to the atmosphere. Over the past 40 years, eastern Amazonia has been subjected to more deforestation, warming and moisture stress than the western part, especially during the dry season... the intensification of the dry season and an increase in deforestation seem to promote ecosystem stress, increase in fire occurrence, and higher carbon emissions in the eastern Amazon. This is in line with recent studies that indicate an increase in tree mortality and a reduction in photosynthesis as a result of climatic changes across Amazonia.”). See also Brienen R. J. W., et al. (2015) [Long-term decline of the Amazon carbon sink](#), NATURE 519(7543): 344–348, 344 (“While this analysis confirms that Amazon forests have acted as a long-term net biomass sink, we find a long-term decreasing trend of carbon accumulation. Rates of net increase in above-ground biomass declined by one-third during the past decade compared to the 1990s. This is a consequence of growth rate increases levelling off recently, while biomass mortality persistently increased throughout, leading to a shortening of carbon residence times.”).

⁴¹ Lovejoy T. E. & Nobre C. (2018) [Amazon’s Tipping Point](#), SCI. ADV. 4(2): eaat2340, 1 (“We believe that negative synergies between deforestation, climate change, and widespread use of fire indicate a tipping point for the Amazon system to flip to nonforest ecosystems in eastern, southern and central Amazonia at 20–25% deforestation.”). See also Hoegh-Guldberg O., et al. (2018) [Chapter 3: Impacts of 1.5 °C of Global Warming on Natural and Human Systems](#), in [GLOBAL WARMING OF 1.5 °C, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change](#), Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 3-263 (“Global warming of 3°C is projected to reduce the extent of tropical rainforest in Central America, with biomass being reduced by about 40%, which can lead to a large replacement of rainforest by savanna and grassland (Lyra et al., 2017). Overall, modelling studies (Huntingford et al., 2013; Nobre et al., 2016) and observational constraints (Cox et al., 2013) suggest that pronounced rainforest dieback may only be triggered at 3°C–4°C (medium confidence), although pronounced biomass losses may occur at 1.5°C– 2°C of global warming.”).

⁴² Scientists Elena Shevliakova and Stephen Pacala presented their preliminary analysis at a [Princeton conference on safeguarding the Amazon](#): see Makhijani P. (23 October 2019) [A world without the Amazon? Safeguarding the Earth’s largest rainforest is focus of Princeton conference](#), PRINCETON UNIVERSITY (“Building on the earlier work of Brazilian climate scientists such as Carlos Nobre, who spoke at the conference, Shevliakova and Pacala modeled the climate impacts by 2050 of deforesting the whole of the Amazon and replacing it with pasture. If the Amazon disappears altogether, even in the scenario in which the world is able to slash its carbon emissions, average temperatures worldwide would rise 0.25°C beyond the expected increase, the scientists noted. “We will be less likely to reach Paris Agreement goals, including climate change stabilization under 1.5°C,” Shevliakova said. In the Amazonian region, the model indicated that by completely eliminating the forest, the region would get up to 4.5°C hotter, making it practically uninhabitable. The effect on rainfall would be equally catastrophic: on average, it would rain 25% less in Brazil. As Shevliakova stated, “It’s a bad story any way you look at it.””). See also Cuadros A. (4 January 2023) [Has the Amazon Reached Its ‘Tipping Point’?](#), THE NEW YORK TIMES (“For all the slashing and burning of recent years, the ecosystem still stores about 120 billion tons of carbon in its trunks, branches, vines and soil — the equivalent of about ten years of human emissions. If all of that carbon is released, it could warm the planet by as much as 0.3 degrees Celsius. According to the Princeton ecologist Stephen Pacala, this alone would probably make the Paris Agreement — the international accord to limit warming since preindustrial times to 2 degrees — “impossible to achieve.” Which,

in turn, may mean that other climate tipping points are breached around the world. As the British scientist Tim Lenton put it to me, “The Amazon feeds back to everything.”).

⁴³ Forster P. M., *et al.* (2023) *Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence*, EARTH SYST. SCI. DATA 15(6): 2295–2327, 2313, 2312–2313 (Table 7 gives remaining carbon budget for a 50% likelihood to limit global warming to 1.5°C of 250 GtCO₂ (values rounded to closes 50 GtCO₂); “The GCB updates have previously started from the AR6 WGI estimate and subtracted the latest estimates of historical CO₂ emissions. The RCB estimates presented here consider the same updates in historical CO₂ emissions from the GCB as well as the latest available quantification of human-induced warming to date and a reassessment of non-CO₂ warming contributions.... RCB estimates consider projected reductions in non-CO₂ emissions that are aligned with a global transition to net zero CO₂ emissions. These estimates assume median reductions in non-CO₂ emissions between 2020–2050 of CH₄ (50 %), N₂O (25 %) and SO₂ (77 %). If these non-CO₂ greenhouse gas emission reductions are not achieved, the RCB will be smaller (see Supplement, Sect. S8). Note that the 50 % RCB is expected to be exhausted a few years before the 1.5 °C global warming level is reached due to the way it factors future warming from non-CO₂ emissions into its estimate.”). *Compare with* Friedlingstein P., *et al.* (2022) *Global Carbon Budget 2022*, EARTH SYST. SCI. DATA 14(11): 4811–4900, 4814 (“The remaining carbon budget for a 50 % likelihood to limit global warming to 1.5, 1.7, and 2 °C has, respectively, reduced to 105 GtC (380 GtCO₂), 200 GtC (730 GtCO₂), and 335 GtC (1230 GtCO₂) from the beginning of 2023, equivalent to 9, 18, and 30 years, assuming 2022 emissions levels.”).

⁴⁴ Forster P. M., *et al.* (2023) *Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence*, EARTH SYST. SCI. DATA 15(6): 2295–2327, 2312 (“The RCB is estimated by application of the WGI AR6 method described in Rogelj *et al.* (2019), which involves the combination of the assessment of five factors: (i) the most recent decade of human-induced warming, (ii) the transient climate response to cumulative emissions of CO₂ (TCRE), (iii) the zero emissions commitment (ZEC), (iv) the temperature contribution of non-CO₂ emissions and (v) an adjustment term for Earth system feedbacks that are otherwise not captured through the other factors. AR6 WGI reassessed all five terms (Canadell *et al.*, 2021). The incorporation of factor (v) was further considered by Lamboll and Rogelj (2022).”).

⁴⁵ Canadell J. G., *et al.* (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS*, *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 5-739 (“The applicability of the linear feedback framework (Section 5.4.5.5) suggests that large-scale biogeochemical feedbacks are approximately linear in the forcing from changes in CO₂ and climate. Nevertheless, regionally the biosphere is known to be capable of producing abrupt changes or even ‘tipping points’ (Higgins and Scheiter, 2012; Lasslop *et al.*, 2016).”).

⁴⁶ Canadell J. G., *et al.* (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS*, *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 5-67 (“There is *low confidence* in the estimate of the non-CO₂ biogeochemical feedbacks, due to the large range in the estimates of α for some individual feedbacks (Figure 5.29c), which can be attributed to the diversity in how models account for these feedbacks, limited process-level understanding, and the existence of known feedbacks for which there is not sufficient evidence to assess the feedback strength.”). *See also* Chen D., Rojas M., Samset B. H., Cobb K., Diongue Niang A., Edwards P., Emori S., Faria S. H., Hawkins E., Hope P., Huybrechts P., Meinshausen M., Mustafa S. K., Plattner G.-K., & Tréguier A.-M. (2021) *Chapter 1: Framing, Context and Methods*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS*, *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 202 (“Such paleoclimate evidence has even fuelled concerns that anthropogenic GHGs could tip the global climate into a permanent hot state (Steffen *et al.*, 2018). However, there is no evidence of such non-linear responses at the global scale in climate projections for the next century, which indicate a near-linear dependence of global temperature on cumulative GHG emissions (Section 1.3.5, Chapter 5, Section 5.5 and Chapter 7, Section 7.4.3.1). At the regional scale, abrupt changes and tipping points, such as Amazon forest dieback and permafrost collapse, have occurred in projections with Earth System Models (Drijfhout *et al.*, 2015;

Bathiany et al., 2020; Chapter 4, Section 4.7.3). In such simulations, tipping points occur in narrow regions of parameter space (e.g., CO₂ concentration or temperature increase), and for specific climate background states. This makes them difficult to predict using ESMs relying on parameterizations of known processes. In some cases, it is possible to detect forthcoming tipping points through time-series analysis that identifies increased sensitivity to perturbations as the tipping point is approached (e.g., ‘critical slowing-down’, Scheffer et al., 2012.”); Bathiany S., Hidding J., & Scheffer M. (2020) [Edge Detection Reveals Abrupt and Extreme Climate Events](#), *J. CLIM.* 33(15): 6399–6421, 6416 (“Despite their societal relevance, our knowledge about the risks of future abrupt climate shifts is far from robust. Several important aspects are highly uncertain: future greenhouse gas emissions (scenario uncertainty), the current climate state (initial condition uncertainty), the question whether and how to model specific processes (structural uncertainty), and what values one should choose for parameters appearing in the equations (parametric uncertainty). Such uncertainties can be explored using ensemble simulations. For example, by running many simulations with different combinations of parameter values a perturbed-physics ensemble can address how parameter uncertainty affects the occurrence of extreme events (Clark et al. 2006). This strategy can be particularly beneficial for studying abrupt events as well since abrupt shifts are associated with region-specific processes, whereas models are usually calibrated to produce a realistic global mean climate at the expense of regional realism (Mauritsen et al. 2012; McNeill et al. 2016). The currently available model configurations are therefore neither reliable nor sufficient to assess the risk of abrupt shifts (Drijfhout et al. 2015). It is hence very plausible that yet-undiscovered tipping points can occur in climate models.”); McIntyre M. E. (2023) [Climate tipping points: A personal view](#), *PHYSICS TODAY* 76(3), 44–49, 45–46 (“Nearly all the climate system’s real complexity is outside the scope of any model, whether it’s a global climate model that aims to represent the climate system as a whole or a model that only simulates the carbon cycle, ice flow, or another subsystem.... Changes taking only a few years are almost instantaneous from a climate-system perspective. They’re a warning to take seriously the possibility of tipping points in the dynamics of the real climate system.⁹ The warning is needed because some modelers have argued that tipping points are less probable for the real climate system than for the simplified, low-order climate models studied by dynamic-systems researchers.³ Other researchers, however, have suggested that such a tipping point may be reached sometime in the next few decades or even sooner.^{6,7} Some of its mechanisms resemble those of the Dansgaard–Oeschger warmings and would suddenly accelerate the rate of disappearance of Arctic sea ice. As far as I am aware, no such tipping points have shown up in the behavior of the biggest and most sophisticated climate models. The suggested tipping-point behavior depends on fine details that are not well resolved in the models, including details of the sea ice and the layering of the upper ocean. Also of concern are increases in the frequency and intensity of destructive weather extremes. Such increases have already been observed in recent years. Climate scientists are asking how much further the increases will go and precisely how they will develop. That question is, of course, bound up with the question of tipping points. A failure to simulate many of the extremes themselves, especially extremes of surface storminess, must count as another limitation of the climate models. The reasons are related to the resolution constraints of climate models.”); Spratt D. (19 April 2023) [Faster than forecast, climate impacts trigger tipping points in the Earth system](#), *BULLETIN OF THE ATOMIC SCIENTISTS* (“While observed warming has been close to climate model projections, the impacts have in many instances been faster and even more extreme than the models forecasted. William Ripple and his co-researchers show that many positive feedbacks are not fully accounted for in climate models.... In September 2022, Stockholm University’s David Armstrong McKay and his colleagues concluded that even global warming of 1-degree Celsius risks triggering some tipping points, just one data point in an alarming mountain of research on tipping points presented in the last year and a half.... Speaking in 2018, Steffen said that the dominant linear, deterministic framework for assessing climate change is flawed, especially at higher levels of temperature rise. Model projections that don’t include these feedback and cascading processes “become less useful at higher temperature levels... or, as my co-author John Schellnhuber says, we are making a big mistake when we think we can ‘park’ the Earth System at any given temperature rise – say 2°C – and expect it to stay there.”); and Spratt D. & Dunlop I. (2017) [What lies beneath? The scientific understatement of climate risks](#), 21 (“As discussed above, climate models are not yet good at dealing with tipping points. This is partly due to the nature of tipping points, where a particular and complex confluence of factors abruptly change a climate system characteristic and drive it to a different state. To model this, all the contributing factors and their forces have to be well identified, as well as their particular interactions, plus the interactions between tipping points. Researchers say that “complex, nonlinear systems typically shift between alternative states in an abrupt, rather than a smooth manner, which is a challenge that climate models have not yet been able to adequately meet.”).

⁴⁷ Forster P., Rosen D., Lamboll R., & Rogelj J. (11 November 2022) [Guest post: What the tiny remaining 1.5C carbon budget means for climate policy](#), CARBON BRIEF (“The [latest estimates](#) from the [Global Carbon Project](#) (GCP) show that total worldwide CO₂ emissions in 2022 have reached near-record levels. The GCP’s estimates put the [remaining carbon budget](#) for 1.5C – specifically, the amount of CO₂ that can still be emitted for a 50% chance of staying below 1.5C of warming – at 380bn tonnes of CO₂ (GtCO₂). At the current rate of emissions, this budget would be blown in just nine years. While that is a disconcertingly short amount of time, the budget for 1.5C may actually be even tighter. Combining the latest insights from the [Intergovernmental Panel on Climate Change](#) (IPCC) with the GCP’s data, we estimate that the remaining 1.5C carbon budget could be just 260GtCO₂ – around 120GtCO₂ smaller. If emissions continued at current levels, this budget would run out in around six and half years.”).

⁴⁸ Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) [Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points](#), SCIENCE 377(6611): 1–10, 7 (“Current warming is ~1.1°C above preindustrial and even with rapid emission cuts warming will reach ~1.5°C by the 2030s (23). We cannot rule out that WAIS [West Antarctic Ice Sheet] and GrIS [Greenland Ice Sheet] tipping points have already been passed (see above) and several other tipping elements have minimum threshold values within the 1.1 to 1.5°C range. Our best estimate thresholds for GrIS, WAIS, REEF [low-latitude coral reefs], and North Atlantic subpolar gyre / Labrador-Irminger Sea convection abrupt permafrost thaw (PFAT) are ~1.5°C although WAIS and GrIS collapse may still be avoidable if GMST [Global Mean Surface Temperature] returns below 1.5°C within an uncertain overshoot time (likely decades) (94). ... The chance of triggering CTPs [Climate tipping points] is already non-negligible and will grow even with stringent climate mitigation (SSP1-1.9 in Fig. 2, B and C). Nevertheless, achieving the Paris Agreement’s aim to pursue efforts to limit warming to 1.5°C would clearly be safer than keeping global warming below 2°C (90) (Fig. 2). Going from 1.5 to 2°C increases the likelihood of committing to WAIS and GrIS collapse near complete warm-water coral die-off, and abrupt permafrost thaw; further, the best estimate threshold for LABC [North Atlantic subpolar gyre / Labrador-Irminger Sea convection] collapse is crossed. The likelihood of triggering AMOC [Atlantic Meridional Overturning Circulation] collapse, Boreal forest shifts, and extra-polar glacier loss becomes non-negligible at >1.5°C and glacier loss becomes likely by ~2°C. A cluster of abrupt shifts occur in ESM [Earth System Models] at 1.5 to 2°C (19). Although not tipping elements, ASSI [Arctic Summer Sea Ice] loss could become regular by 2°C, gradual permafrost thaw would likely become widespread beyond 1.5°C, and land carbon sink weakening would become significant by 2°C.”).

⁴⁹ Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) [Climate tipping points—too risky to bet against](#), Comment, NATURE 575(7784): 592–595, 592 (“Models suggest that the Greenland ice sheet could be doomed at 1.5 °C of warming³, which could happen as soon as 2030. ... The world’s remaining emissions budget for a 50:50 chance of staying within 1.5 °C of warming is only about 500 gigatonnes (Gt) of CO₂. Permafrost emissions could take an estimated 20% (100 Gt CO₂) off this budget, and that’s without including methane from deep permafrost or undersea hydrates. If forests are close to tipping points, Amazon dieback could release another 90 Gt CO₂ and boreal forests a further 110 Gt CO₂. With global total CO₂ emissions still at more than 40 Gt per year, the remaining budget could be all but erased already. ... We argue that the intervention time left to prevent tipping could already have shrunk towards zero, whereas the reaction time to achieve net zero emissions is 30 years at best. Hence we might already have lost control of whether tipping happens. A saving grace is that the rate at which damage accumulates from tipping — and hence the risk posed — could still be under our control to some extent.”). See also Ripple W. J., Wolf C., Newsome T. M., Gregg J. W., Lenton T. M., Palomo I., Eikelboom J. A. J., Law B. E., Huq S., Duffy P. B., & Rockström J. (2021) [World Scientists’ Warning of a Climate Emergency 2021](#), BIOSCIENCE: biab079, 1–5, 1 (“There is also mounting evidence that we are nearing or have already crossed tipping points associated with critical parts of the Earth system, including the West Antarctic and Greenland ice sheets, warm-water coral reefs, and the Amazon rainforest.”).

⁵⁰ Steffen W., et al. (2018) [Trajectories of the Earth System in the Anthropocene](#), PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 115(33): 8252–8259, 8253, 8256 (“Earth System dynamics can be described, studied, and understood in terms of trajectories between alternate states separated by thresholds that are controlled by nonlinear processes, interactions, and feedbacks. Based on this framework, we argue that social and technological trends and decisions occurring over the next decade or two could significantly influence the trajectory of the Earth System for tens to hundreds of thousands of years and potentially lead to conditions that resemble planetary states that were last seen several millions of years ago, conditions

that would be inhospitable to current human societies and to many other contemporary species... Hothouse Earth is likely to be uncontrollable and dangerous to many, particularly if we transition into it in only a century or two, and it poses severe risks for health, economies, political stability (12, 39, 49, 50) (especially for the most climate vulnerable), and ultimately, the habitability of the planet for humans.”).

⁵¹ Rockström J., *et al.* (2021) [Identifying a Safe and Just Corridor for People and the Planet](#), *EARTH'S FUTURE* 9(4): 1–7, 2 (“Critical to achieving a full integration of ‘safe’ and ‘just’ is to scientifically assess a safe and just corridor for human development on Earth (Figure 1), which we define as follows: Safe Earth system targets are those where biophysical stability of the Earth system is maintained and enhanced over time, thereby safeguarding its functions and ability to support humans and all other living organisms. Just Earth system targets are those where nature’s benefits, risks, and related responsibilities are equitably shared among all human beings in the world. A safe and just corridor for people and the planet is where safe and just Earth system target ranges overlap. This corridor bounds pathways of future human development that are both safe and just over time. This safe and just corridor will provide high-level “outcome” goals and the context for companies, cities, governments, and other actors who want to take action by operationalizing scientifically guided sustainability in their ventures (Andersen *et al.*, 2020). Safe and just also implies that the Earth’s natural resources, such as budgets for carbon, nutrients, water, and land, are finite (defined by safety) and have to be shared between people and with nature.”).

⁵² Earth Commission (31 May 2023) [A just world on a safe planet: First study quantifying Earth System Boundaries live](#) (“Safe: 1.5°C to avoid high likelihood of multiple climate tipping points. NOT YET BREACHED; Just: 1°C to avoid high exposure to significant harm from climate change. BREACHED AT 1.2°C; **Safe and Just: 1°C**”); *discussing* Rockström J., *et al.* (2023) [Safe and just Earth system boundaries](#), *NATURE* 619: 102–111.

⁵³ Arias P. A., *et al.* (2021) [Technical Summary](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change](#), Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), TS-9 (“Timing of crossing 1.5°C global warming: Slightly different approaches are used in SR1.5 and in this Report. SR1.5 assessed a likely range of 2030 to 2052 for reaching a global warming level of 1.5°C (for a 30-year period), assuming a continued, constant rate of warming. In AR6, combining the larger estimate of global warming to date and the assessed climate response to all considered scenarios, the central estimate of crossing 1.5°C of global warming (for a 20-year period) occurs in the early 2030s, ten years earlier than the midpoint of the likely range assessed in the SR1.5, assuming no major volcanic eruption. (TS.1.3, Cross-Section Box TS.1)”).

⁵⁴ Xu Y., Ramanathan V., & Victor D. G. (2018) [Global warming will happen faster than we think](#), *NATURE* 564(7734): 30–32, 31 (“In 2017, industrial carbon dioxide emissions are estimated to have reached about 37 gigatonnes². This puts them on track with the highest emissions trajectory the IPCC has modelled so far. This dark news means that the next 25 years are poised to warm at a rate of 0.25–0.32 °C per decade³. That is faster than the 0.2 °C per decade that we have experienced since the 2000s, and which the IPCC used in its special report.”). *See also* Hansen J. E., Sato M., Simons L., Nazarenko L. S., Sangha I., von Schuckmann K., Loeb N. G., Osman M. B., Jin Q., Kharecha P., Tselioudis G., Jeong E., Laci A., Ruedy R., Russell G., Cao J., & Li J. (23 May 2023) [Global warming in the pipeline](#), *IZV. ATMOS. OCEAN. PHYS. (preprint)*: 1–62, 39 (“With current policies, we expect climate forcing for a few decades post-2010 to increase 0.5–0.6 W/m² per decade and produce global warming at a rate of at least +0.27°C per decade. In that case, global warming should reach 1.5°C by the end of the 2020s and 2°C by 2050 (Fig. 25).”; Figure 25 caption reads “Edges of the predicted post-2010 accelerated warming rate (see text) are 0.36 and 0.27°C per decade.”); *and* Ritchie P. D. L., Alkhayuon H., Cox P. M., & Wieczorek S. (2023) [Rate-induced tipping in natural and human systems](#), *EARTH SYST. DYNAM.* 14(3): 669–683, 669–670 (“Large and abrupt changes in the state of an open system may occur when the external forcing exceeds some critical level (Scheffer, 2010; Lenton, 2011; Kuehn, 2011). The points in time, or in the level of forcing, at which such changes occur are commonly referred to as bifurcation-induced tipping points (Ashwin *et al.*, 2012). They have been identified in many domains, including ecosystems (Scheffer *et al.*, 1993, 2001, 2009; Siteur *et al.*, 2014; Dakos *et al.*, 2019; Pierini and Ghil, 2021) and the human brain (Rinzel and Ermentrout, 1998; Moehlis, 2008; Screen and Simmonds, 2010; Mityr *et al.*, 2013; Maturana *et al.*, 2020), and are of particular concern under anthropogenic climate change (Lenton *et al.*, 2008; Ashwin and von der Heydt, 2020; Arias *et al.*, 2021; Ritchie *et al.*, 2021; Boers and Rypdal, 2021; Boulton *et al.*, 2022). Furthermore, it has recently been recognised that critical levels can be exceeded temporarily without causing tipping (van der Bolt

et al., 2018; Ritchie et al., 2019; Alkhayuon et al., 2019; O’Keeffe and Wieczorek, 2020). This occurs when the time of exceedance is short compared to the inherent timescale of the system (O’Keeffe and Wieczorek, 2020; Ritchie et al., 2021; Alkhayuon et al., 2023). However, there is another, less obvious potential consequence of changes in external forcing. When an external forcing changes faster than some critical rate rather than necessarily by a large amount, this can lead to rate-induced tipping points (Stocker and Schmittner, 1997; Luke and Cox, 2011; Wieczorek et al., 2011; Ashwin et al., 2012; Ritchie and Sieber, 2016; Siteur et al., 2016; Suchithra et al., 2020; Arumugam et al., 2020; Pierini and Ghil, 2021; Wieczorek et al., 2023; Longo et al., 2021; Kuehn and Longo, 2022; Kaur and Sharathi Dutta, 2022; Hill et al., 2022; Arnscheidt and Rothman, 2022). In contrast to bifurcation-induced tipping, rate-induced tipping occurs due to fast enough changes in external forcing and usually does not exceed any critical levels as a result of external forcing. Such tipping points are much less widely known and yet are arguably even more relevant to contemporary issues such as climate change (Lohmann and Ditlevsen, 2021; Clarke et al., 2021; O’Sullivan et al., 2022), ecosystem collapse (Scheffer et al., 2008; Vanselow et al., 2019; van der Bolt and van Nes, 2021; Neijnsens et al., 2021; Vanselow et al., 2022), and the resilience of human systems (Witthaut et al., 2021).”).

⁵⁵ Hansen J. E., *et al.* (23 May 2023) [Global warming in the pipeline](#), IZV ATMOS. OCEAN. PHYS. (*preprint*): 1–62, 39 (“With current policies, we expect climate forcing for a few decades post-2010 to increase 0.5-0.6 W/m² per decade and produce global warming at a rate of at least +0.27°C per decade. In that case, global warming should reach 1.5°C by the end of the 2020s and 2°C by 2050 (Fig. 25).”; Figure 25 caption reads “Edges of the predicted post-2010 accelerated warming rate (see text) are 0.36 and 0.27°C per decade.”).

⁵⁶ Xu Y., Ramanathan V., & Victor D. G. (2018) [Global warming will happen faster than we think](#), Comment, NATURE 564(7734): 30–32, 30–31 (“But the latest IPCC special report underplays another alarming fact: global warming is accelerating. Three trends—rising emissions, declining air pollution and natural climate cycles—will combine over the next 20 years to make climate change faster and more furious than anticipated. In our view, there’s a good chance that we could breach the 1.5 °C level by 2030, not by 2040 as projected in the special report (see ‘Accelerated warming’). The climate-modelling community has not grappled enough with the rapid changes that policymakers care most about, preferring to focus on longer-term trends and equilibria.”). Since Xu, Ramanathan, and Victor Comment was published, the IPCC has updated its estimate for when 1.5 °C will be exceeded: *see* Arias P. A., *et al.* (2021) [Technical Summary](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), TS-9 (“Timing of crossing 1.5°C global warming: Slightly different approaches are used in SR1.5 and in this Report. SR1.5 assessed a likely range of 2030 to 2052 for reaching a global warming level of 1.5°C (for a 30-year period), assuming a continued, constant rate of warming. In AR6, combining the larger estimate of global warming to date and the assessed climate response to all considered scenarios, the central estimate of crossing 1.5°C of global warming (for a 20-year period) occurs in the early 2030s, ten years earlier than the midpoint of the likely range assessed in the SR1.5, assuming no major volcanic eruption. (TS.1.3, Cross-Section Box TS.1)”).

⁵⁷ These six tipping points, shown in **Figure Error! Main Document Only.**, are the Greenland ice sheet, West Antarctic ice sheet, low-latitude (warm water) coral reefs, abrupt permafrost thaw, abrupt loss of Barents Sea winter ice, and collapse of the subpolar gyre (SPG) overturning circulation in the Labrador Sea. *See* Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) [Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points](#), SCIENCE 377(6611): 1–10, 7 (“Going from 1.5 to 2°C increases the likelihood of committing to WAIS and GrIS collapse near complete warm-water coral die-off, and abrupt permafrost thaw; further, the best estimate threshold for LABC collapse is crossed. The likelihood of triggering AMOC collapse, Boreal forest shifts, and extra-polar glacier loss becomes non-negligible at >1.5°C and glacier loss becomes likely by ~2°C. A cluster of abrupt shifts occur in ESMs at 1.5 to 2°C (19). Although not tipping elements, ASSI loss could become regular by 2°C, gradual permafrost thaw would likely become widespread beyond 1.5°C, and land carbon sink weakening would become significant by 2°C.”).

⁵⁸ Here we distinguish between abrupt shifts, as in Drijfhout *et al.* (2015), and the more restrictive definition of “core climate tipping points” defined by Armstrong McKay *et al.* (2022) as “when change in part of the climate system becomes (i) self-perpetuating beyond (ii) a warming threshold as a result of asymmetry in the relevant feedbacks, leading to (iii) substantial and widespread Earth system impacts.” For description of the eleven abrupt shifts, *see*

Drijfhout S., Bathiany S., Beaulieu C., Brovkin V., Claussen M., Huntingford C., Scheffer M., Sgubin G., & Swingedouw D. (2015) *Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 112(43): E5777–E5786, E5777, E5784 (“Abrupt transitions of regional climate in response to the gradual rise in atmospheric greenhouse gas concentrations are notoriously difficult to foresee. However, such events could be particularly challenging in view of the capacity required for society and ecosystems to adapt to them. We present, to our knowledge, the first systematic screening of the massive climate model ensemble informing the recent Intergovernmental Panel on Climate Change report, and reveal evidence of 37 forced regional abrupt changes in the ocean, sea ice, snow cover, permafrost, and terrestrial biosphere that arise after a certain global temperature increase. Eighteen out of 37 events occur for global warming levels of less than 2°, a threshold sometimes presented as a safe limit.”); 11 abrupt shifts are shown between 1.0–1.5°C in “Fig. 4. Abrupt shifts as a function of global temperature increase. Shown are the number of abrupt climate changes occurring in the CMIP5 database for different intervals of warming relative to the preindustrial climate.”). See also Wang S., Foster A., Lenz E. A., Kessler J. D., Stroeve J. C., Anderson L. O., Turetsky M., Betts R., Zou S., Liu W., Boos W. R., & Hausfather Z. (2023) *Mechanisms and Impacts of Earth System Tipping Elements*, REV. GEOPHYS. 61(e2021RG000757): 1–81, 48 (“Earth system elements that this review indicates are at higher risk of crossing critical thresholds or undergoing substantial changes in response to warming this century under moderate (RCP4.5) emissions scenarios include loss of Arctic summer sea ice, loss of portions of the GIS, loss of portions of the West Antarctic Ice-sheet, Amazon rainforest dieback, boreal forest ecosystem shifts, some permafrost carbon release, and coral reef loss (Figure 14). In contrast, methane release from marine methane hydrates and strato-cumulus cloud deck evaporation will likely require longer timescales and higher emissions forcing in order to occur at large scales, while disruptions of tropical monsoons may be contingent on large shifts in other Earth system components and are unlikely to occur as a direct response to changes in aerosol forcing or land cover (see Section 2.6). Critical thresholds for weakening of the AMOC remain unclear and a transition of this system to a different state may not occur this century (see Section 2.1). While the GIS and WAIS may transgress critical thresholds this century (see Section 2.3), timescales of ice loss may require many centuries to millennia to run to completion (Bakker et al., 2016; Clark et al., 2016; Golledge et al., 2015; Huybrechts & De Wolde, 1999.”); Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, NATURE 575(7784): 592–595, 593 (“A further key impetus to limit warming to 1.5 °C is that other tipping points could be triggered at low levels of global warming. The latest IPCC models projected a cluster of abrupt shifts between 1.5 °C and 2 °C, several of which involve sea ice. This ice is already shrinking rapidly in the Arctic...”); Arias P. A., et al. (2021) *Technical Summary*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS*, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), TS-71–TS-72 (“It is likely that under stabilization of global warming at 1.5°C, 2.0°C, or 3.0°C relative to 1850–1900, the AMOC will continue to weaken for several decades by about 15%, 20% and 30% of its strength and then recover to pre-decline values over several centuries (*medium confidence*). At sustained warming levels between 2°C and 3°C, there is limited evidence that the Greenland and West Antarctic Ice Sheets will be lost almost completely and irreversibly over multiple millennia; both the probability of their complete loss and the rate of mass loss increases with higher surface temperatures (*high confidence*). At sustained warming levels between 3°C and 5°C, near-complete loss of the Greenland Ice Sheet and complete loss of the West Antarctic Ice Sheet is projected to occur irreversibly over multiple millennia (*medium confidence*); with substantial parts or all of Wilkes Subglacial Basin in East Antarctica lost over multiple millennia (*low confidence*). Early-warning signals of accelerated sea-level-rise from Antarctica, could possibly be observed within the next few decades. For other hazards (e.g., ice sheet behaviour, glacier mass loss and global mean sea level change, coastal floods, coastal erosion, air pollution, and ocean acidification) the time and/or scenario dimensions remain critical, and a simple and robust relationship with global warming level cannot be established (*high confidence*)... The response of biogeochemical cycles to anthropogenic perturbations can be abrupt at regional scales and irreversible on decadal to century time scales (*high confidence*). The probability of crossing uncertain regional thresholds increases with climate change (*high confidence*). It is very unlikely that gas clathrates (mostly methane) in deeper terrestrial permafrost and subsea clathrates will lead to a detectable departure from the emissions trajectory during this century. Possible abrupt changes and tipping points in biogeochemical cycles lead to additional uncertainty in 21st century atmospheric GHG concentrations, but future anthropogenic emissions remain the dominant uncertainty (*high confidence*). There is potential for abrupt water cycle changes in some high-emission scenarios, but there is no overall consistency regarding the magnitude and timing of such changes. Positive land surface feedbacks, including vegetation, dust, and snow, can contribute to abrupt changes in aridity, but there is only *low confidence* that such

changes will occur during the 21st century. Continued Amazon deforestation, combined with a warming climate, raises the probability that this ecosystem will cross a tipping point into a dry state during the 21st century (*low confidence*).”); and Lee J.-Y., Marotzke J., Bala G., Cao L., Corti S., Dunne J. P., Engelbrecht F., Fischer E., Fyfe J. C., Jones C., Maycock A., Mutemi J., Ndiaye O., Panickal S., & T. Zhou (2021) [Chapter 4: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change](#), Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 4-96 (Table 4.10 lists 15 components of the Earth system susceptible to tipping points).

⁵⁹ Drijfhout S., Bathiany S., Beaulieu C., Brovkin V., Claussen M., Huntingford C., Scheffer M., Sgubin G., & Swingedouw D. (2015) [Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models](#), PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 112(43): E5777–E5786, E5777 (“Abrupt transitions of regional climate in response to the gradual rise in atmospheric greenhouse gas concentrations are notoriously difficult to foresee. However, such events could be particularly challenging in view of the capacity required for society and ecosystems to adapt to them. We present, to our knowledge, the first systematic screening of the massive climate model ensemble informing the recent Intergovernmental Panel on Climate Change report, and reveal evidence of 37 forced regional abrupt changes in the ocean, sea ice, snow cover, permafrost, and terrestrial biosphere that arise after a certain global temperature increase. Eighteen out of 37 events occur for global warming levels of less than 2°, a threshold sometimes presented as a safe limit.”). See also Wang S., Foster A., Lenz E. A., Kessler J. D., Stroeve J. C., Anderson L. O., Turetsky M., Betts R., Zou S., Liu W., Boos W. R., & Hausfather Z. (2023) [Mechanisms and Impacts of Earth System Tipping Elements](#), REV. GEOPHYS. 61(e2021RG000757): 1–81, 48 (“Earth system elements that this review indicates are at higher risk of crossing critical thresholds or undergoing substantial changes in response to warming this century under moderate (RCP4.5) emissions scenarios include loss of Arctic summer sea ice, loss of portions of the GIS, loss of portions of the West Antarctic Ice-sheet, Amazon rainforest dieback, boreal forest ecosystem shifts, some permafrost carbon release, and coral reef loss (Figure 14). In contrast, methane release from marine methane hydrates and strato-cumulus cloud deck evaporation will likely require longer timescales and higher emissions forcing in order to occur at large scales, while disruptions of tropical monsoons may be contingent on large shifts in other Earth system components and are unlikely to occur as a direct response to changes in aerosol forcing or land cover (see Section 2.6). Critical thresholds for weakening of the AMOC remain unclear and a transition of this system to a different state may not occur this century (see Section 2.1). While the GIS and WAIS may transgress critical thresholds this century (see Section 2.3), timescales of ice loss may require many centuries to millennia to run to completion (Bakker *et al.*, 2016; Clark *et al.*, 2016; Golledge *et al.*, 2015; Huybrechts & De Wolde, 1999).”); Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) [Climate tipping points—too risky to bet against](#), Comment, NATURE 575(7784): 592–595, 593 (“A further key impetus to limit warming to 1.5 °C is that other tipping points could be triggered at low levels of global warming. The latest IPCC models projected a cluster of abrupt shifts between 1.5 °C and 2 °C, several of which involve sea ice. This ice is already shrinking rapidly in the Arctic...”); Arias P. A., *et al.* (2021) [Technical Summary](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change](#), Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), TS-71–TS-72 (“It is *likely* that under stabilization of global warming at 1.5°C, 2.0°C, or 3.0°C relative to 1850–1900, the AMOC will continue to weaken for several decades by about 15%, 20% and 30% of its strength and then recover to pre-decline values over several centuries (*medium confidence*). At sustained warming levels between 2°C and 3°C, there is limited evidence that the Greenland and West Antarctic Ice Sheets will be lost almost completely and irreversibly over multiple millennia; both the probability of their complete loss and the rate of mass loss increases with higher surface temperatures (*high confidence*). At sustained warming levels between 3°C and 5°C, near-complete loss of the Greenland Ice Sheet and complete loss of the West Antarctic Ice Sheet is projected to occur irreversibly over multiple millennia (*medium confidence*); with substantial parts or all of Wilkes Subglacial Basin in East Antarctica lost over multiple millennia (*low confidence*). Early-warning signals of accelerated sea-level-rise from Antarctica, could possibly be observed within the next few decades. For other hazards (e.g., ice sheet behaviour, glacier mass loss and global mean sea level change, coastal floods, coastal erosion, air pollution, and ocean acidification) the time and/or scenario dimensions remain critical, and a simple and robust relationship with global warming level cannot be established (*high confidence*)... The response of biogeochemical cycles to anthropogenic perturbations can be abrupt at regional scales and irreversible on decadal to century time scales (*high confidence*). The probability of crossing uncertain regional thresholds increases with climate change (*high confidence*). It is *very*

unlikely that gas clathrates (mostly methane) in deeper terrestrial permafrost and subsea clathrates will lead to a detectable departure from the emissions trajectory during this century. Possible abrupt changes and tipping points in biogeochemical cycles lead to additional uncertainty in 21st century atmospheric GHG concentrations, but future anthropogenic emissions remain the dominant uncertainty (*high confidence*). There is potential for abrupt water cycle changes in some high-emission scenarios, but there is no overall consistency regarding the magnitude and timing of such changes. Positive land surface feedbacks, including vegetation, dust, and snow, can contribute to abrupt changes in aridity, but there is only *low confidence* that such changes will occur during the 21st century. Continued Amazon deforestation, combined with a warming climate, raises the probability that this ecosystem will cross a tipping point into a dry state during the 21st century (*low confidence*).”); and Lee J.-Y., Marotzke J., Bala G., Cao L., Corti S., Dunne J. P., Engelbrecht F., Fischer E., Fyfe J. C., Jones C., Maycock A., Mutemi J., Ndiaye O., Panickal S., & T. Zhou (2021) [Chapter 4: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 4-96 (Table 4.10 lists 15 components of the Earth system susceptible to tipping points).

⁶⁰ Lenton T. M., et al. (eds.) (2023) [Summary Report](#), in [GLOBAL TIPPING POINTS REPORT 2023](#), 13 (“Already, at today’s 1.2°C global warming, tipping of warm-water coral reefs is likely and we cannot rule out that four other systems may pass tipping points: the ice sheets of Greenland and West Antarctica, the North Atlantic Subpolar Gyre circulation, and parts of the permafrost subject to abrupt thaw.”). See also Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) [Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points](#), *SCIENCE* 377(6611): 1–10, 7 (“Current warming is ~1.1°C above preindustrial and even with rapid emission cuts warming will reach ~1.5°C by the 2030s (23). We cannot rule out that WAIS [West Antarctic ice sheet] and GrIS [Greenland ice sheet] tipping points have already been passed (see above) and several other tipping elements have minimum threshold values within the 1.1 to 1.5°C range. Our best estimate thresholds for GrIS, WAIS, REEF, and abrupt permafrost thaw (PFAT) are ~1.5°C although WAIS and GrIS collapse may still be avoidable if GMST [global mean surface temperature] returns below 1.5°C within an uncertain overshoot time (likely decades) (94). Setting aside achievability (and recognizing internal climate variability of ~±0.1°C), this suggests that ~1°C is a level of global warming that minimizes the likelihood of crossing CTPs [climate tipping points].”).

⁶¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) [AR6 SYNTHESIS REPORT: CLIMATE CHANGE 2023](#), Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Arias P., Bustamante M., Elgizouli I., Flato G., Howden M., Méndez C., Pereira J., Pichs-Madruga R., Rose S. K., Saheb Y., Sánchez R., Ürgen-Vorsatz D., Xiao C., & Yassaa N. (eds.), 36 (“At 2°C of global warming, overall risk levels associated with the unequal distribution of impacts (RFC3), global aggregate impacts (RFC4) and large-scale singular events (RFC5) would be transitioning to high (*medium confidence*), those associated with extreme weather events (RFC2) would be transitioning to very high (*medium confidence*), and those associated with unique and threatened systems (RFC1) would be very high (*high confidence*) (Figure 3.3, panel a). With about 2°C warming, climate-related changes in food availability and diet quality are estimated to increase nutrition-related diseases and the number of undernourished people, affecting tens (under low vulnerability and low warming) to hundreds of millions of people (under high vulnerability and high warming), particularly among low-income households in low- and middle-income countries in sub-Saharan Africa, South Asia and Central America (*high confidence*). For example, snowmelt water availability for irrigation is projected to decline in some snowmelt dependent river basins by up to 20% (*medium confidence*). Climate change risks to cities, settlements and key infrastructure will rise sharply in the mid- and long-term with further global warming, especially in places already exposed to high temperatures, along coastlines, or with high vulnerabilities (*high confidence*).”; “RFC5: Large-scale singular events: relatively large, abrupt and sometimes irreversible changes in systems caused by global warming, such as ice sheet instability or thermohaline circulation slowing.”).

⁶² Drijfhout S., Bathiany S., Beaulieu C., Brovkin V., Claussen M., Huntingford C., Scheffer M., Sgubin G., & Swingedouw D. (2015) [Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models](#), *PROC. NAT’L. ACAD. SCI.* 112(43): E5777–E5786, E5784 (“Permafrost carbon release (51) and methane hydrates release (52) were not expected in CMIP5 simulations, because of missing biogeochemical components in those models

capable of simulating such changes.”). See also Bathiany S., Hidding J., & Scheffer M. (2020) [Edge Detection Reveals Abrupt and Extreme Climate Events](#), *J. CLIM.* 33(15): 6399–6421, 6416 (“Despite their societal relevance, our knowledge about the risks of future abrupt climate shifts is far from robust. Several important aspects are highly uncertain: future greenhouse gas emissions (scenario uncertainty), the current climate state (initial condition uncertainty), the question whether and how to model specific processes (structural uncertainty), and what values one should choose for parameters appearing in the equations (parametric uncertainty). Such uncertainties can be explored using ensemble simulations. For example, by running many simulations with different combinations of parameter values a perturbed-physics ensemble can address how parameter uncertainty affects the occurrence of extreme events (Clark et al. 2006). This strategy can be particularly beneficial for studying abrupt events as well since abrupt shifts are associated with region-specific processes, whereas models are usually calibrated to produce a realistic global mean climate at the expense of regional realism (Mauritsen et al. 2012; McNeall et al. 2016). The currently available model configurations are therefore neither reliable nor sufficient to assess the risk of abrupt shifts (Drijfhout et al. 2015). It is hence very plausible that yet-undiscovered tipping points can occur in climate models.”); Canadell J. G., et al. (2021) [Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 5-78 (“There is *low confidence* in the estimate of the non-CO₂ biogeochemical feedbacks, due to the large range in the estimates of α for some individual feedbacks (Figure 5.29c), which can be attributed to the diversity in how models account for these feedbacks, limited process-level understanding, and the existence of known feedbacks for which there is not sufficient evidence to assess the feedback strength.”); and Permafrost Pathways, [Course of Action: Mitigation Policy](#), Woodwell Climate Research Center (last visited 14 February 2023) (“Depending on how hot we let it get, carbon emissions from Arctic permafrost thaw are expected to be in the range of 30 to more than 150 billion tons of carbon (110 to more than 550 Gt CO₂) this century, with upper estimates on par with the cumulative emissions from the entire United States at its current rate. To put it another way, permafrost thaw emissions could use up between 25 and 40 percent of the remaining carbon budget that would be necessary to cap warming at the internationally agreed-upon 2 degrees Celsius global temperature threshold established in the Paris Agreement.... Despite the enormity of this problem, gaps in permafrost carbon monitoring and modeling are resulting in permafrost being left out of global climate policies, rendering our emissions targets fundamentally inaccurate. World leaders are in a race against time to reduce emissions and prevent Earth’s temperature from reaching dangerous levels. The problem is, without including current and projected emissions from permafrost, this race will be impossible to finish.... 82% [o]f IPCC models do not include carbon emissions from permafrost thaw.”).

⁶³ Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) [Climate tipping points—too risky to bet against](#), Comment, *NATURE* 575(7784): 592–595, 594 (“In our view, the clearest emergency would be if we were approaching a global cascade of tipping points that led to a new, less habitable, ‘hothouse’ climate state¹¹. Interactions could happen through ocean and atmospheric circulation or through feedbacks that increase greenhouse-gas levels and global temperature.”). See also Wunderling N., Donges J. F., Kurths J., & Winkelmann R. (2021) [Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming](#), *EARTH SYST. DYN.* 12(2): 601–619, 614 (“In this study, we show that this risk increases significantly when considering interactions between these climate tipping elements and that these interactions tend to have an overall destabilising effect. Altogether, with the exception of the Greenland Ice Sheet, interactions effectively push the critical threshold temperatures to lower warming levels, thereby reducing the overall stability of the climate system. The domino-like interactions also foster cascading, non-linear responses. Under these circumstances, our model indicates that cascades are predominantly initiated by the polar ice sheets and mediated by the AMOC. Therefore, our results also imply that the negative feedback loop connecting the Greenland Ice Sheet and the AMOC might not be able to stabilise the climate system as a whole.”); Klose A. K., Wunderling N., Winkelmann R., & Donges J. F. (2021) [What do we mean, ‘tipping cascade’?](#), *ENVIRON. RES. LETT.* 16(12): 125011, 1–12, 1 (“Here we illustrate how different patterns of multiple tipping dynamics emerge from a very simple coupling of two previously studied idealized tipping elements. In particular, we distinguish between a two phase cascade, a domino cascade and a joint cascade. A mitigation of an unfolding two phase cascade may be possible and common early warning indicators are sensitive to upcoming critical transitions to a certain degree. In contrast, a domino cascade may hardly be stopped once initiated and critical slowing down-based indicators fail to indicate tipping of the following element. These different potentials for intervention and anticipation across the distinct patterns of multiple tipping dynamics should be seen as a call to be more precise in

future analyses of cascading dynamics arising from tipping element interactions in the Earth system.”); Rocha J. C., Peterson G., Bodin Ö., & Levin S. (2018) *Cascading regime shifts within and across scales*, SCIENCE 362(6421): 1379–1383, 1383 (“A key lesson from our study is that regime shifts can be interconnected. Regime shifts should not be studied in isolation under the assumption that they are independent systems. Methods and data collection need to be further developed to account for the possibility of cascading effects. Our finding that ~45% of regime shift couplings can have structural dependence suggests that current approaches to environmental management and governance underestimate the likelihood of cascading effects.”); and Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) *AR6 SYNTHESIS REPORT: CLIMATE CHANGE 2023, Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Arias P., Bustamante M., Elgizouli I., Flato G., Howden M., Méndez C., Pereira J., Pichs-Madruga R., Rose S. K., Saheb Y., Sánchez R., Ürge-Vorsatz D., Xiao C., & Yassaa N. (eds.), 16 (“Human influence has likely increased the chance of compound extreme events since the 1950s. Concurrent and repeated climate hazards have occurred in all regions, increasing impacts and risks to health, ecosystems, infrastructure, livelihoods and food (*high confidence*). Compound extreme events include increases in the frequency of concurrent heatwaves and droughts (*high confidence*); fire weather in some regions (*medium confidence*); and compound flooding in some locations (*medium confidence*). Multiple risks interact, generating new sources of vulnerability to climate hazards, and compounding overall risk (*high confidence*). Compound climate hazards can overwhelm adaptive capacity and substantially increase damage (*high confidence*).”).

⁶⁴ Armstrong McKay D. I. & Loriani S. (eds.) (2023) *Section 1: Earth systems tipping points*, in *GLOBAL TIPPING POINTS REPORT 2023*, Lenton T. M., et al. (eds.), 101 (“Direct interactions between Greenland and West Antarctic ice sheets via sea level[:] It is known that an increase in sea level has an overall destabilizing influence on marine-based sectors of ice sheets, possibly triggering or enhancing the retreat of their grounding line (Schoof, 2007; Weertman, 1974). In the case of ice sheet collapse, the induced sea level rise would vary locally depending on gravitational effects (with sea level falling near the former ice sheet as less water is attracted towards it), rotational effects, and mantle deformation (Kopp et al., 2010; Mitrovica et al., 2009). Overall, sea level rise is expected to negatively impact both the GrIS and WAIS, but more strongly the latter, where most of the bedrock lies well below sea level (Gomez et al., 2020).”).

⁶⁵ Armstrong McKay D. I. & Loriani S. (eds.) (2023) *Section 1: Earth systems tipping points*, in *GLOBAL TIPPING POINTS REPORT 2023*, Lenton T. M., et al. (eds.), 100 (“The AMOC, Greenland Ice Sheet (GrIS), and West Antarctic Ice Sheet (WAIS) are key tipping systems and are threatened by increasing CO₂ emissions and temperatures (Armstrong McKay et al., 2022; Pörtner et al., 2019). Moreover, GrIS, AMOC, and WAIS interact on very different timescales, ranging from decades to multiple centuries. While some of those links might be stabilising, others are destabilizing and would allow for the possibility of large-scale cascading events.”). See also Rosser J., Winkelmann R., & Wunderling N. (2024) *Cryosphere tipping elements decisive for tipping risks and cascading effects in the Earth system*, NATURE PORTFOLIO (*preprint*), 1–35, 14 (“We initially focus on the GIS as it is consistently one of the most important elements in both the Sobol variance analysis (see Figs. 1 and 2) and the leave one out analysis (see Fig. 3), giving the biggest decrease in mean number of elements tipped when removed from the 1.5°C scenario. At 1.5°C, the impact of totally removing the GIS is a reduction of 56% in the mean number of elements tipped in the system, but it also has significant impacts in the qualitative behaviour of the system. As the GIS has a low tipping point (between 0.8–3.0°C) and strong links to other tipping elements (AMOC, WAIS), it is a key initiator of cascades at low global warming levels. So, when it is removed, the amount of tipping events and cascading effects that we record in the other elements is greatly reduced. Although these are the only elements with direct links to the GIS, there are cascading impacts through these links onto the entire system, so the outcome of removing the GIS is a significant reduction in tipping for every investigated element. ... AMOC behaves very differently to the GIS in the model, acting as a mediator of cascades and also as a stabiliser on the GIS in the cases where the AMOC tips due to its strong stabilising link to the GIS. This makes its impact much more nuanced than the GIS as seen in Figure 4. When the AMOC is removed entirely at 1.5°C, the mean number of elements tipped is reduced by 22%, much less than the 56% when the GIS term was removed. This is because the total removal of the AMOC tipping (and the subsequent loss of Amazon and ENSO tipping, which are only disintegrating at this temperature due to AMOC forcing) is mostly compensated by increases in the tipping of the GIS and WAIS, as the GIS is no longer stabilised by the AMOC and is more likely to tip and influence the WAIS. Therefore, removing an element can have both a quantitative impact on the amount of tipping in a system but also a large qualitative impact on the locations of tipping and the behaviour of different

elements. This suggests that if elements are missing from an analysis or a climate model, even the broad behaviour of climate elements may be incorrectly modelled, and the relative importance of elements and regions of the climate system may be misjudged.”); and Klose A. K., Donges J. F., Feudel U., & Winkelmann R. (2023) [Rate-induced tipping cascades arising from interactions between the Greenland Ice Sheet and the Atlantic Meridional Overturning Circulation](#), *EARTH SYS. DYNAM. (preprint)*: 1–25, 13, 15 (“Decreasing the surface mass balance emulating a warming climate beyond its effective threshold $a^{(2)}_{\text{odgc}}$ (corresponding to a strong surface mass balance decrease) does not allow for a GIS stabilization (Fig. 4(a) and (b)). Instead, for an AMOC residing sufficiently close to its hosing threshold, a GIS deglaciation and tipping of the AMOC to the ‘off’-state is observed.”; “A limited decrease of the surface mass balance may allow for a GIS stabilization by the negative temperature feedback. ... Accordingly, the occurrence of qualitatively distinct tipping dynamics and outcomes vary with the ice sheet melting time scales. This implies that safe pathways for the evolution of tipping element drivers preventing cascading tipping and their boundary to dangerous pathways involving cascades are controlled by rates of changes of the responsible control parameters in addition to their magnitude.”).

⁶⁶ Kemp L., Xu C., Depledge J., Ebi K. L., Gibbins G., Kohler T. A., Rockström J., Scheffer M., Schellnhuber H. J., Steffen W., & Lenton T. M. (2022) [Climate Endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios](#), *PROC. NAT’L. ACAD. SCI.* 119(34): 1–9, 3 (“Third, climate change could exacerbate vulnerabilities and cause multiple, indirect stresses (such as economic damage, loss of land, and water and food insecurity) that coalesce into system-wide synchronous failures. This is the path of systemic risk. Global crises tend to occur through such reinforcing “synchronous failures” that spread across countries and systems, as with the 2007–2008 global financial crisis (44). It is plausible that a sudden shift in climate could trigger systems failures that unravel societies across the globe. The potential of systemic climate risk is marked: The most vulnerable states and communities will continue to be the hardest hit in a warming world, exacerbating inequities. Fig. 1 shows how projected population density intersects with extreme $>29^{\circ}\text{C}$ mean annual temperature (MAT) (such temperatures are currently restricted to only 0.8% of Earth’s land surface area). Using the medium-high scenario of emissions and population growth (SSP3-7.0 emissions, and SSP3 population growth), by 2070, around 2 billion people are expected to live in these extremely hot areas. Currently, only 30 million people live in hot places, primarily in the Sahara Desert and Gulf Coast (43). Extreme temperatures combined with high humidity can negatively affect outdoor worker productivity and yields of major cereal crops. These deadly heat conditions could significantly affect populated areas in South and southwest Asia(47). Fig. 2 takes a political lens on extreme heat, overlapping SSP3-7.0 or SSP5-8.5 projections of $>29^{\circ}\text{C}$ MAT circa 2070, with the Fragile States Index (a measurement of the instability of states). There is a striking overlap between currently vulnerable states and future areas of extreme warming. If current political fragility does not improve significantly in the coming decades, then a belt of instability with potentially serious ramifications could occur.”). See also Stern N., Stiglitz J., & Taylor C. (2022) [The economics of immense risk, urgent action and radical change: towards new approaches to the economics of climate change](#), *J. ECON. METHODOL.* 29(3): 181–216, 181 (“Moreover, at the core of the standard IAM methodology is an analysis of intertemporal trade-offs; how much the current generation should sacrifice in order for future generations to be spared the devastation of climate change. Rising to the climate challenges does indeed involve deep normative questions, including how different generations’ welfare is to be compared and the rights of future generations. But the world has been much more focused than the IAMs on a different set of issues, the risks of catastrophic consequences. These potentially catastrophic risks are in large measure *assumed* away in the IAMs.”).

⁶⁷ Molina M., Zaelke D., Sarma K. M., Andersen S. O., Ramanathan V., & Kaniaru D. (2009) [Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions](#), *PROC. NAT’L. ACAD. SCI.* 106(49): 20616–20621, 20616 (“Current emissions of anthropogenic greenhouse gases (GHGs) have already committed the planet to an increase in average surface temperature by the end of the century that may be above the critical threshold for tipping elements of the climate system into abrupt change with potentially irreversible and unmanageable consequences. This would mean that the climate system is close to entering if not already within the zone of “dangerous anthropogenic interference” (DAI). Scientific and policy literature refers to the need for “early,” “urgent,” “rapid,” and “fast-action” mitigation to help avoid DAI and abrupt climate changes. We define “fast-action” to include regulatory measures that can begin within 2–3 years, be substantially implemented in 5–10 years, and produce a climate response within decades. We discuss strategies for short-lived non-CO₂ GHGs and particles, where existing agreements can be used to accomplish mitigation objectives. Policy makers can amend the

Montreal Protocol to phase down the production and consumption of hydrofluorocarbons (HFCs) with high global warming potential. Other fast-action strategies can reduce emissions of black carbon particles and precursor gases that lead to ozone formation in the lower atmosphere, and increase biosequestration, including through biochar. These and other fast-action strategies may reduce the risk of abrupt climate change in the next few decades by complementing cuts in CO₂ emissions.”). See also Molina M., Ramanathan V. & Zaelke D. (2020) [Best path to net zero: Cut short-lived climate pollutants](#), BULLETIN OF THE ATOMIC SCIENTISTS (“And let us be clear: By “speed,” we mean measures—including regulatory ones—that can begin within two-to-three years, be substantially implemented in five-to-10 years, and produce a climate response within the next decade or two.”).

⁶⁸ Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) [Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points](#), SCIENCE 377(6611): eabn7950, 1–10, 7 (“The chance of triggering CTPs is already non-negligible and will grow even with stringent climate mitigation (SSP1-1.9 in Fig. 2, B and C). Nevertheless, achieving the Paris Agreement’s aim to pursue efforts to limit warming to 1.5°C would clearly be safer than keeping global warming below 2°C (90) (Fig. 2). Going from 1.5 to 2°C increases the likelihood of committing to WAIS and GrIS collapse near complete warm-water coral die-off, and abrupt permafrost thaw; further, the best estimate threshold for LABC collapse is crossed. The likelihood of triggering AMOC collapse, Boreal forest shifts, and extra-polar glacier loss becomes non-negligible at >1.5°C and glacier loss becomes likely by ~2°C. A cluster of abrupt shifts occur in ESMs at 1.5 to 2°C (19). Although not tipping elements, ASSI loss could become regular by 2°C, gradual permafrost thaw would likely become widespread beyond 1.5°C, and land carbon sink weakening would become significant by 2°C.”). See also Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) [Climate tipping points—too risky to bet against](#), COMMENT, NATURE 575(7784): 592–595, 594 (“In our view, the clearest emergency would be if we were approaching a global cascade of tipping points that led to a new, less habitable, ‘hothouse’ climate state¹¹. Interactions could happen through ocean and atmospheric circulation or through feedbacks that increase greenhouse-gas levels and global temperature. Alternatively, strong cloud feedbacks could cause a global tipping point^{12,13}. We argue that cascading effects might be common. Research last year¹⁴ analysed 30 types of regime shift spanning physical climate and ecological systems, from collapse of the West Antarctic ice sheet to a switch from rainforest to savanna. This indicated that exceeding tipping points in one system can increase the risk of crossing them in others. Such links were found for 45% of possible interactions¹⁴. In our view, examples are starting to be observed. ... If damaging tipping cascades can occur and a global tipping point cannot be ruled out, then this is an existential threat to civilization. No amount of economic cost–benefit analysis is going to help us. We need to change our approach to the climate problem. ... In our view, the evidence from tipping points alone suggests that we are in a state of planetary emergency: both the risk and urgency of the situation are acute....”); Steffen W., *et al.* (2018) [Trajectories of the Earth System in the Anthropocene](#), PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 115(33): 8252–8259, 8254 (“This analysis implies that, even if the Paris Accord target of a 1.5 °C to 2.0 °C rise in temperature is met, we cannot exclude the risk that a cascade of feedbacks could push the Earth System irreversibly onto a “Hothouse Earth” pathway. The challenge that humanity faces is to create a “Stabilized Earth” pathway that steers the Earth System away from its current trajectory toward the threshold beyond which is Hothouse Earth (Fig. 2). The human-created Stabilized Earth pathway leads to a basin of attraction that is not likely to exist in the Earth System’s stability landscape without human stewardship to create and maintain it. Creating such a pathway and basin of attraction requires a fundamental change in the role of humans on the planet. This stewardship role requires deliberate and sustained action to become an integral, adaptive part of Earth System dynamics, creating feedbacks that keep the system on a Stabilized Earth pathway (Alternative Stabilized Earth Pathway).”); and Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) [AR6 SYNTHESIS REPORT: CLIMATE CHANGE 2023, Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change](#), Arias P., Bustamante M., Elgizouli I., Flato G., Howden M., Méndez C., Pereira J., Pichs-Madruga R., Rose S. K., Saheb Y., Sánchez R., Ürge-Vorsatz D., Xiao C., & Yassaa N. (eds.), 36, 42 (“In terrestrial ecosystems, 3–14% of the tens of thousands of species assessed will likely face a very high risk of extinction at a GWL of 1.5°C. Coral reefs are projected to decline by a further 70–90% at 1.5°C of global warming (high confidence). At this GWL, many low-elevation and small glaciers around the world would lose most of their mass or disappear within decades to centuries (high confidence). Regions at disproportionately higher risk include Arctic ecosystems, dryland regions, small island development states and Least Developed Countries (high confidence).”; “The likelihood of abrupt and irreversible changes and their impacts increase with higher global warming levels (*high confidence*). As warming levels increase, so do the risks of species extinction or irreversible loss

of biodiversity in ecosystems such as forests (*medium confidence*), coral reefs (*very high confidence*) and in Arctic regions (*high confidence*). Risks associated with large-scale singular events or tipping points, such as ice sheet instability or ecosystem loss from tropical forests, transition to high risk between 1.5°C–2.5°C (*medium confidence*) and to very high risk between 2.5°C–4°C (*low confidence*). The response of biogeochemical cycles to anthropogenic perturbations can be abrupt at regional scales and irreversible on decadal to century time scales (*high confidence*). The probability of crossing uncertain regional thresholds increases with further warming (*high confidence*).”).

⁶⁹ Xu Y. & Ramanathan V. (2017) [Well below 2 °C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes](#), PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 114(39): 10319–10323, 10320 (“Box 2. Risk Categorization of Climate Change to Society. ... [A] 2 °C warming would double the land area subject to deadly heat and expose 48% of the population. A 4 °C warming by 2100 would subject 47% of the land area and almost 74% of the world population to deadly heat, which could pose existential risks to humans and mammals alike unless massive adaptation measures are implemented, such as providing air conditioning to the entire population or a massive relocation of most of the population to safer climates. ... This bottom 3 billion population comprises mostly subsistent farmers, whose livelihood will be severely impacted, if not destroyed, with a one- to five-year megadrought, heat waves, or heavy floods; for those among the bottom 3 billion of the world’s population who are living in coastal areas, a 1- to 2-m rise in sea level (likely with a warming in excess of 3 °C) poses existential threat if they do not relocate or migrate. It has been estimated that several hundred million people would be subject to famine with warming in excess of 4 °C (54). However, there has essentially been no discussion on warming beyond 5 °C. Climate change-induced species extinction is one major concern with warming of such large magnitudes (>5 °C). The current rate of loss of species is ~1,000-fold the historical rate, due largely to habitat destruction. At this rate, about 25% of species are in danger of extinction in the coming decades (56). Global warming of 6 °C or more (accompanied by increase in ocean acidity due to increased CO₂) can act as a major force multiplier and expose as much as 90% of species to the dangers of extinction (57). The bodily harms combined with climate change-forced species destruction, biodiversity loss, and threats to water and food security, as summarized recently (58), motivated us to categorize warming beyond 5 °C as unknown??, implying the possibility of existential threats.”). See also Xu C., Kohler T. A., Lenton T. M., Svenning J.-C., & Scheffer M. (2020) [Future of the human climate niche](#), PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 117(21): 11350–11355, 11350 (“Here, we demonstrate that for millennia, human populations have resided in the same narrow part of the climatic envelope available on the globe, characterized by a major mode around ~11 °C to 15 °C mean annual temperature (MAT). ... We show that in a business-as-usual climate change scenario, the geographical position of this temperature niche is projected to shift more over the coming 50 y than it has moved since 6000 BP. ... Specifically, 3.5 billion people will be exposed to MAT ≥29.0 °C, a situation found in the present climate only in 0.8% of the global land surface, mostly concentrated in the Sahara, but in 2070 projected to cover 19% of the global land (Fig. 3). ... For instance, accounting for population growth projected in the SSP3 scenario, each degree of temperature rise above the current baseline roughly corresponds to one billion humans left outside the temperature niche, absent migration (SI Appendix, Fig. S14).”); Watts N., et al. (2021) [The 2020 report of The Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises](#), THE LANCET 397(10269): 129–170, 129 (“Vulnerable populations were exposed to an additional 475 million heatwave events globally in 2019, which was, in turn, reflected in excess morbidity and mortality (indicator 1.1.2). During the past 20 years, there has been a 53.7% increase in heat-related mortality in people older than 65 years, reaching a total of 296 000 deaths in 2018 (indicator 1.1.3). The high cost in terms of human lives and suffering is associated with effects on economic output, with 302 billion h of potential labour capacity lost in 2019 (indicator 1.1.4). India and Indonesia were among the worst affected countries, seeing losses of potential labour capacity equivalent to 4–6% of their annual gross domestic product (indicator 4.1.3).”); Atwoli L., et al. (2021) [Call for emergency action to limit global temperature increases, restore biodiversity, and protect health](#), THE LANCET 398(10304): 939–941, 939 (“Harms disproportionately affect the most vulnerable, including children, older populations, ethnic minorities, poorer communities, and those with underlying health problems.”); Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) [AR6 SYNTHESIS REPORT: CLIMATE CHANGE 2023, Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change](#), Arias P., Bustamante M., Elgizouli I., Flato G., Howden M., Méndez C., Pereira J., Pichs-Madruga R., Rose S. K., Saheb Y., Sánchez R., Ürge-Vorsatz D., Xiao C., & Yassaa N. (eds.), 36 (“In terrestrial ecosystems, 3–14% of the tens of thousands of species assessed will likely face a very high risk of extinction at a GWL of 1.5°C. Coral reefs are projected to decline by a further 70–90% at 1.5°C of global warming (high confidence). At this GWL, many low-elevation and small glaciers around the world would lose most of their mass or disappear within decades to centuries

(high confidence). Regions at disproportionately higher risk include Arctic ecosystems, dryland regions, small island development states and Least Developed Countries (high confidence).”); and Berwyn B. (14 February 2023) [Sea Level Rise Could Drive 1 in 10 People from Their Homes, with Dangerous Implications for International Peace, UN Secretary General Warns](#), INSIDE CLIMATE NEWS.

⁷⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) [Summary for Policymakers](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-19 (“With every additional increment of global warming, changes in extremes continue to become larger. For example, every additional 0.5°C of global warming causes clearly discernible increases in the intensity and frequency of hot extremes, including heatwaves (*very likely*), and heavy precipitation (*high confidence*), as well as agricultural and ecological droughts in some regions (*high confidence*). Discernible changes in intensity and frequency of meteorological droughts, with more regions showing increases than decreases, are seen in some regions for every additional 0.5°C of global warming (*medium confidence*). Increases in frequency and intensity of hydrological droughts become larger with increasing global warming in some regions (*medium confidence*). There will be an increasing occurrence of some extreme events unprecedented in the observational record with additional global warming, even at 1.5°C of global warming. Projected percentage changes in frequency are higher for rarer events (*high confidence*).”). See also Fischer E. M., Sippel S., & Knutti R. (2021) [Increasing probability of record-shattering climate extremes](#), NAT. CLIM. CHANGE 11: 689–695, 689 (“Here, we show models project not only more intense extremes but also events that break previous records by much larger margins. These record-shattering extremes, nearly impossible in the absence of warming, are likely to occur in the coming decades. We demonstrate that their probability of occurrence depends on warming rate, rather than global warming level, and is thus pathway-dependent. In high-emission scenarios, week-long heat extremes that break records by three or more standard deviations are two to seven times more probable in 2021–2050 and three to 21 times more probable in 2051–2080, compared to the last three decades.”).

⁷¹ Archer D., Eby M., Brovkin V., Ridgwell A., Cao L., Mikolajewicz U., Caldeira K., Matsumoto K., Munhoven G., Montenegro A., & Tokos K. (2009) [Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide](#), ANNU. REV. EARTH PLANET. SCI. 37(1): 117–34, (“The models presented here present a broadly coherent picture of the fate of fossil fuel CO₂ released to the atmosphere. Equilibration with the ocean will absorb most of it on a time scale of 2-20 centuries. Even if this equilibration were allowed to run to completion, a substantial fraction of the CO₂, 20-40%, would remain in the atmosphere awaiting slower chemical reactions with CaCO₃ and igneous rocks. The remaining CO₂ is abundant enough to continue to have a substantial impact of climate for thousands of years. The changes in climate amplify themselves somewhat by driving CO₂ out of the warmer ocean. ... Nowhere in these model results or in the published literature is there any reason to conclude that the effects of CO₂ release will be substantially confined to just a few centuries. In contrast, generally accepted modern understanding of the global carbon cycle indicates that climate effects of CO₂ releases to the atmosphere will persist for tens, if not hundreds, of thousands of years into the future.”).

⁷² Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) [Summary for Policymakers](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE](#), Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Shukla P. R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., & Malley J. (eds.), SPM-31 (“In modelled global low emission pathways, the projected reduction of cooling and warming aerosol emissions over time leads to net warming in the near- to mid-term. In these mitigation pathways, the projected reductions of cooling aerosols are mostly due to reduced fossil fuel combustion that was not equipped with effective air pollution controls.”). See also Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) [Chapter 6: Short-lived climate forcers](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-8 (“Additional CH₄ and BC mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with SO₂ reductions that would accompany decarbonization (*high confidence*).”).

⁷³ Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) [Summary for Policymakers](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE](#), Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Shukla P. R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R.,

McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., & Malley J. (eds.), SPM-31 (“In modelled global low emission pathways, the projected reduction of cooling and warming aerosol emissions over time leads to net warming in the near- to mid-term. In these mitigation pathways, the projected reductions of cooling aerosols are mostly due to reduced fossil fuel combustion that was not equipped with effective air pollution controls.”). *See also* Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) [Chapter 6: Short-lived climate forcers](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-8 (“Additional CH₄ and BC mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with SO₂ reductions that would accompany decarbonization (*high confidence*).”); Ramanathan V. & Feng Y. (2008) [On avoiding dangerous anthropogenic interference with the climate system: Formidable challenges ahead](#), *PROC. NAT'L. ACAD. SCI.* 105(38): 14245–14250, 14248 (“Switching from coal to “cleaner” natural gas will reduce CO₂ emission and thus would be effective in minimizing future increases in the committed warming. However, because it also reduces air pollution and thus the ABC [Atmospheric Brown Cloud] masking effect, it may speed up the approach to the committed warming of 2.4°C (1.4–4.3°C).”); United Nations Environment Programme & World Meteorological Organization (2011) [INTEGRATED ASSESSMENT OF BLACK CARBON AND TROPOSPHERIC OZONE](#), 254 (“Evaluating global mean temperature change, it was found that the targeted measures to reduce emissions of methane and BC could greatly reduce warming rates over the next few decades (Figure 6.1; Box 6.1). When all measures are fully implemented, warming during the 2030s relative to the present would be only half as much as in the reference scenario. In contrast, even a fairly aggressive strategy to reduce CO₂ emissions, as for the CO₂-measures scenario, does little to mitigate warming until after the next 20-30 years (Box 6.2). In fact, sulfur dioxide (SO₂) is co-emitted with CO₂ in some of the most highly emitting activities, coal burning in large-scale combustion such as in power plants, for example, that are obvious targets for reduced usage under a CO₂-emissions mitigation strategy. Hence such strategies can lead to additional near-term warming (Figure 6.1), in a well-known temporary effect (e.g. Raes and Seinfeld, 2009), although most of the nearterm warming is driven by CO₂ emissions in the past. The CO₂-measures scenario clearly leads to long-term benefits however, with a dramatically lower warming rate at 2070 under that scenario than under the scenario with only CH₄ and BC measures (see Figure 6.1 and timescales in Box 6.2). Hence the near-term measures clearly cannot be substituted for measures to reduce emissions of long-lived GHGs. The near-term measures largely target different source sectors for emissions than the CO₂ measures, so that the emissions reductions of the short-lived pollutants are almost identical regardless of whether the CO₂ measures are implemented or not, as shown in Chapter 5. The near-term measures and the CO₂ measures also impact climate change over different timescales owing to the different lifetimes of these substances. In essence, the near-term CH₄ and BC measures are effectively uncoupled from CO₂ measures examined here.”); and Wanser K., Wong A., Karspeck A., & Esguerra N. (2023) [NEAR-TERM CLIMATE RISK AND INTERVENTION: A ROADMAP FOR RESEARCH, U.S. RESEARCH INVESTMENT, AND INTERNATIONAL SCIENTIFIC COOPERATION](#), *SilverLining*, 12 (“Particles (i.e., aerosols) in the atmosphere generally increase the total amount of sunlight reflected to space by scattering incoming sunlight. Anthropogenic activities produce both GHGs and other particulate matter; while GHGs warm climate, aerosols have a cooling effect both by directly scattering sunlight (i.e., the aerosol direct effect) and indirectly as the aerosols interact with clouds, increasing their brightness and/or their duration (i.e., the cloud–aerosol effect) ... The potential global cooling effect of all anthropogenic aerosols is estimated at 0.5–1.1°C (see Figure 6). Thus, these effects are potentially very large while also serving as a large source of uncertainty, making reducing these uncertainties among the highest priorities for climate research, particularly in the context of assessing near-term climate risk. Particles from emissions produced by human activities are also associated with significant adverse health and environmental effects. Actions are ongoing around the world to substantially reduce them, including recent regulation to substantially reduce sulfate emissions from ships. As the world reduces these particulate emissions, the loss of this cooling “shield” could lead to rapid substantial warming.”).

⁷⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) [Summary for Policymakers](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE](#), *Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., & Malley J. (eds.), SPM-30–SPM-31 (“Deep GHG emissions reductions by 2030 and 2040, particularly reductions of methane emissions, lower peak warming, reduce the likelihood of overshooting warming limits and lead to less reliance on net negative CO₂ emissions that reverse warming in the latter half of the century... Future non-CO₂ warming depends on

reductions in non-CO₂ GHG, aerosol and their precursor, and ozone precursor emissions. In modelled global low emission pathways, the projected reduction of cooling and warming aerosol emissions over time leads to net warming in the near- to mid-term. In these mitigation pathways, the projected reductions of cooling aerosols are mostly due to reduced fossil fuel combustion that was not equipped with effective air pollution controls. Non-CO₂ GHG emissions at the time of net zero CO₂ are projected to be of similar magnitude in modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) or lower. These non-CO₂ GHG emissions are about 8 [5–11] GtCO₂-eq per year, with the largest fraction from CH₄ (60% [55–80%]), followed by N₂O (30% [20–35%]) and F-gases (3% [2–20%]). [FOOTNOTE 52] Due to the short lifetime of CH₄ in the atmosphere, projected deep reduction of CH₄ emissions up until the time of net zero CO₂ in modelled mitigation pathways effectively reduces peak global warming. (*high confidence*) {3.3, AR6 WG I SPM D1.7}”).

⁷⁵ Dreyfus G. B., Xu Y., Shindell D. T., Zaelke D., & Ramanathan V. (2022) [Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming](#), PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 119(22): 1–8, 5 (“Aggressive decarbonization to achieve net-zero CO₂ emissions in the 2050s (as in the decarb-only scenario) results in weakly accelerated net warming compared to the reference case, with a positive warming up to 0.03 °C in the mid-2030s, and no net avoided warming until the mid-2040s due to the reduction in co-emitted cooling aerosols (Figure 3a). By 2050, decarbonization measures result in very limited net avoided warming (0.07°C), consistent with Shindell and Smith, but rise to a likely detectable 0.25°C by 2060 and a major benefit of 1.4°C by 2100 (Table S5). In contrast, pairing decarbonization with mitigation measures targeting CH₄, BC, HFC, and N₂O (not an SLCP due to its longer lifetime) independent from decarbonization are essential to slowing the rate of warming by the 2030s to under 0.3°C per decade (Table 1, Figure 3b), similar to the 0.2°C to 0.25°C per decade warming prior to 2020. Recent studies suggest that rate of warming rather than level of warming controls likelihood of record-shattering extreme weather events. By 2050, the net avoided warming from the targeted non-CO₂ measures is 0.26°C, almost 4 times larger than the net benefit of decarbonization alone (0.07°C) (Table S5).”).

⁷⁶ Xu Y. & Ramanathan V. (2017) [Well below 2 °C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes](#), PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 114(39): 10315–10323, 10321 (“The SP [super pollutant] lever targets SLCPs. Reducing SLCP emissions thins the SP blanket within few decades, given the shorter lifetimes of SLCPs (weeks for BC to about 15 years for HFCs). The mitigation potential of the SP lever with a maximum deployment of current technologies ... is about 0.6 °C by 2050 and 1.2 °C by 2100 (SI Appendix, Fig. S5B and Table S1).”). See also Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) [Chapter 6: Short-lived climate forcers](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 821 (“Across the SSPs, the collective reduction of CH₄, ozone precursors and HFCs can make a difference of global mean surface air temperature of 0.2 with a very likely range of [0.1–0.4] °C in 2040 and 0.8 with a very likely range of [0.5–1.3] °C at the end of the 21st century (comparing SSP3-7.0 and SSP1-1.9), which is substantial in the context of the Paris Agreement. Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*).”).

⁷⁷ Shindell D., et al. (2012) [Simultaneously Mitigating Near-Term Climate Change and Improving Human Health and Food Security](#), SCIENCE 335(6065): 183–189, 183–185 (“The global mean response to the CH₄ plus BC measures was $-0.54 \pm 0.05^\circ\text{C}$ in the climate model. ...Roughly half the forcing is relatively evenly distributed (from the CH₄ measures). The other half is highly inhomogeneous, especially the strong BC forcing, which is greatest over bright desert and snow or ice surfaces. Those areas often exhibit the largest warming mitigation, making the regional temperature response to aerosols and ozone quite distinct from the more homogeneous response to well-mixed greenhouse gases.... BC albedo and direct forcings are large in the Himalayas, where there is an especially pronounced response in the Karakoram, and in the Arctic, where the measures reduce projected warming over the next three decades by approximately two thirds and where regional temperature response patterns correspond fairly closely to albedo forcing (for example, they are larger over the Canadian archipelago than the interior and larger over Russia than Scandinavia or the North Atlantic).”). See also United Nations Environment Programme & World Meteorological Organization (2011) [INTEGRATED ASSESSMENT OF BLACK CARBON AND TROPOSPHERIC OZONE](#), 254, 262

(“Evaluating global mean temperature change, it was found that the targeted measures to reduce emissions of methane and BC could greatly reduce warming rates over the next few decades (Figure 6.1; Box 6.1). When all measures are fully implemented, warming during the 2030s relative to the present would be only half as much as in the reference scenario. In contrast, even a fairly aggressive strategy to reduce CO₂ emissions, as for the CO₂-measures scenario, does little to mitigate warming until after the next 20-30 years (Box 6.2).”; “Large impacts of the measures examined here were also seen for the Arctic despite the minimal amount of emissions currently taking place there. This occurs due to the high sensitivity of the Arctic both to pollutants that are transported there from remote sources and to radiative forcing that takes place in areas of the northern hemisphere outside the Arctic. The 16 measures examined here, including the measures on pellet stoves and coal briquettes, reduce warming in the Arctic by 0.7 °C (range 0.2 to 1.3 °C) at 2040. This is a large portion of the 1.1 °C (range 0.7 to 1.7 °C) warming projected under the reference scenario for the Arctic, and hence implementation of the measures would be virtually certain to substantially slow, but not halt, the pace of Arctic climate change.”).

⁷⁸ Potential for mitigation from landfills (29-36 million metric tons CH₄ in 2030) and energy sector (circa 29-57 million metric tons CH₄ in 2030 from oil and gas; 12-25 MtCH₄ from coal). See United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *Summary for Policymakers*, in [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 6, 10. (“Oil, gas and coal: the fossil fuel sector has the greatest potential for targeted mitigation by 2030. Readily available targeted measures could reduce emissions from the oil and gas sector by 29–57 Mt/yr and from the coal sector by 12–25 Mt/yr. Up to 80 per cent of oil and gas measures and up to 98 per cent of coal measures could be implemented at negative or low cost; “Waste: existing targeted measures could reduce methane emissions from the waste sector by 29–36 Mt/yr by 2030”). Cutting black carbon and tropospheric ozone (which methane is a precursor of) can reduce air pollution levels and save up to 2.4 million lives every year and increase annual crop production by more than 50 million tons. See United Nations Environment Programme & World Meteorological Organization (2011) [INTEGRATED ASSESSMENT OF BLACK CARBON AND TROPOSPHERIC OZONE](#), 193, 201 (“Implementing all measures could avoid 2.4 million premature deaths (within a range of 0.7–4.6 million) associated with reductions in PM_{2.5}, associated with 5.3–37.4 million years of life lost (YLL), based on the 2030 population.”; “Total global production gains of all crops ranges between 30 and 140 million tonnes (model mean: 52 million tonnes). The annual economic gains for all four crops in all regions ranges between US\$4billion and US\$33 billion, of which US\$2–28 billion in Asia.”).

⁷⁹ Shindell D. (14 June 2023) [Wildfire smoke and dirty air are also climate change problems: Solutions for a world on fire](#), MODERN SCIENCES (“[Black carbon](#) – the tiny particles in the air from wildfires and also from vehicles – along with [methane](#), [hydrofluorocarbons](#) and [tropospheric ozone](#), are known as [short-lived climate pollutants](#). They account for [around half of today’s global warming](#), contributing to rising sea levels and more frequent and extreme climatic events, including the devastating wildfires we’re increasingly seeing across the world. In addition, these pollutants have disastrous impacts on human health, food supplies and [biodiversity](#).”).

⁸⁰ Dreyfus G. B., Xu Y., Shindell D. T., Zaelke D., & Ramanathan V. (2022) [Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming](#), PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 119(22): e2123536119, 1–8, 1 (“We find that mitigation measures that target only decarbonization are essential for strong long-term cooling but can result in weak near-term warming (due to unmasking the cooling effect of co-emitted aerosols) and lead to temperatures exceeding 2°C before 2050. In contrast, pairing decarbonization with additional mitigation measures targeting short-lived climate pollutants (SLCPs) and N₂O, slows the rate of warming a decade or two earlier than decarbonization alone and avoids the 2°C threshold altogether. These non-CO₂ targeted measures when combined with decarbonization can provide net cooling by 2030, reduce the rate of warming from 2030 to 2050 by about 50%, roughly half of which comes from methane, significantly larger than decarbonization alone over this timeframe.”)

⁸¹ Goldstein A., Noon M. L., Ledezma J. C., Roehrdanz P. R., Raghav S., McGreevey M., Stone C., Shrestha S., Golden Kroner R., Hole D., & Turner W. (2021) [IRRECOVERABLE CARBON: THE PLACES WE MUST PROTECT TO AVERT CLIMATE CATASTROPHE](#), Conservation International, 7 (“‘Irrecoverable carbon’ refers to the vast stores of carbon in nature that are vulnerable to release from human activity and, if lost, could not be restored by 2050 — when the world must reach net-zero emissions to avoid the worst impacts of climate change... There are high concentrations of

irrecoverable carbon in the Amazon (31.5 Gt), the Congo Basin (8.1 Gt), and New Guinea (7.3 Gt). Other important irrecoverable carbon reserves are located in the Pacific Northwest of North America, the Valdivian forests of Chile, the mangroves and swamp forests of Guyana, the peatlands of Northern Scotland, Niger Delta's mangroves, Cambodia's Tonle Sap Lake, the Scandinavian and Siberian boreal forests, and the eucalyptus forest of Southeast Australia, among others.”). See also Griscom B. W., *et al.* (2017) [Natural climate solutions](#), PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 114(44): 11645–11650, 11645 (“Better stewardship of land is needed to achieve the Paris Climate Agreement goal of holding warming to below 2 °C; however, confusion persists about the specific set of land stewardship options available and their mitigation potential. To address this, we identify and quantify “natural climate solutions” (NCS): 20 conservation, restoration, and improved land management actions that increase carbon storage and/or avoid greenhouse gas emissions across global forests, wetlands, grasslands, and agricultural lands. We find that the maximum potential of NCS—when constrained by food security, fiber security, and biodiversity conservation—is 23.8 petagrams of CO₂ equivalent (PgCO_{2e}) y⁻¹ (95% CI 20.3–37.4). This is ≥30% higher than prior estimates, which did not include the full range of options and safeguards considered here. About half of this maximum (11.3 PgCO_{2e} y⁻¹) represents cost-effective climate mitigation, assuming the social cost of CO₂ pollution is ≥100 USD MgCO_{2e}⁻¹ by 2030. Natural climate solutions can provide 37% of cost-effective CO₂ mitigation needed through 2030 for a >66% chance of holding warming to below 2 °C. One-third of this cost-effective NCS mitigation can be delivered at or below 10 USD MgCO₂⁻¹. Most NCS actions—if effectively implemented—also offer water filtration, flood buffering, soil health, biodiversity habitat, and enhanced climate resilience. Work remains to better constrain uncertainty of NCS mitigation estimates. Nevertheless, existing knowledge reported here provides a robust basis for immediate global action to improve ecosystem stewardship as a major solution to climate change.”); Goldstein A., *et al.* (2020) [Protecting irrecoverable carbon in Earth's ecosystems](#), NAT. CLIM. CHANGE 10(4): 287–295; and Noon M. L., Goldstein A., Ledezma J. C., Roehrdanz P. R., Cook-Patton S. C., Spawn-Lee S. A., Wright T. M., Gonzalez-Roglich M., Hole D. G., Rockström J., & Turner W. R. (2021) [Mapping the irrecoverable carbon in Earth's ecosystems](#), NAT. SUSTAIN. 5: 37–46.

⁸² Griscom B. W., *et al.* (2017) [Natural climate solutions](#), PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 114(44): 11645–11650, 11645 (“Better stewardship of land is needed to achieve the Paris Climate Agreement goal of holding warming to below 2 °C; however, confusion persists about the specific set of land stewardship options available and their mitigation potential. To address this, we identify and quantify “natural climate solutions” (NCS): 20 conservation, restoration, and improved land management actions that increase carbon storage and/or avoid greenhouse gas emissions across global forests, wetlands, grasslands, and agricultural lands. We find that the maximum potential of NCS—when constrained by food security, fiber security, and biodiversity conservation—is 23.8 petagrams of CO₂ equivalent (PgCO_{2e}) y⁻¹ (95% CI 20.3–37.4). This is ≥30% higher than prior estimates, which did not include the full range of options and safeguards considered here. About half of this maximum (11.3 PgCO_{2e} y⁻¹) represents cost-effective climate mitigation, assuming the social cost of CO₂ pollution is ≥100 USD MgCO_{2e}⁻¹ by 2030. Natural climate solutions can provide 37% of cost-effective CO₂ mitigation needed through 2030 for a >66% chance of holding warming to below 2 °C. One-third of this cost-effective NCS mitigation can be delivered at or below 10 USD MgCO₂⁻¹. Most NCS actions—if effectively implemented—also offer water filtration, flood buffering, soil health, biodiversity habitat, and enhanced climate resilience. Work remains to better constrain uncertainty of NCS mitigation estimates. Nevertheless, existing knowledge reported here provides a robust basis for immediate global action to improve ecosystem stewardship as a major solution to climate change.”). See also Moomaw W. R., Masino S. A., & Faison E. K. (2019) [Intact Forests in the United States: Proforestation Mitigates Climate Change and Serves the Greatest Good](#), Perspective, FRONT. FOR. GLOB. CHANGE 2(27): 1–10, 1 (“Climate change and loss of biodiversity are widely recognized as the foremost environmental challenges of our time. Forests annually sequester large quantities of atmospheric carbon dioxide (CO₂), and store carbon above and below ground for long periods of time. Intact forests—largely free from human intervention except primarily for trails and hazard removals—are the most carbon-dense and biodiverse terrestrial ecosystems, with additional benefits to society and the economy. ... The recent *1.5 Degree Warming Report* by the Intergovernmental Panel on Climate Change identifies *reforestation* and *afforestation* as important strategies to increase negative emissions, but they face significant challenges: afforestation requires an enormous amount of additional land, and neither strategy can remove sufficient carbon by growing young trees during the critical next decade(s). In contrast, growing existing forests intact to their ecological potential—termed *proforestation*—is a more effective, immediate, and low-cost approach that could be mobilized across suitable forests of all types. Proforestation serves the greatest public good by maximizing co-benefits such as nature-based

biological carbon sequestration and unparalleled ecosystem services such as biodiversity enhancement, water and air quality, flood and erosion control, public health benefits, low impact recreation, and scenic beauty.”); and World Wildlife Fund (2020) [LIVING PLANET REPORT 2020 – BENDING THE CURVE OF BIODIVERSITY LOSS](#), Almond R. E. A., Grooten M., & Petersen T. (eds.), 6 (“The global Living Planet Index continues to decline. It shows an average 68% decrease in population sizes of mammals, birds, amphibians, reptiles and fish between 1970 and 2016. ... It matters because biodiversity is fundamental to human life on Earth, and the evidence is unequivocal – it is being destroyed by us at a rate unprecedented in history. Since the industrial revolution, human activities have increasingly destroyed and degraded forests, grasslands, wetlands and other important ecosystems, threatening human well-being. Seventy-five per cent of the Earth’s ice-free land surface has already been significantly altered, most of the oceans are polluted, and more than 85% of the area of wetlands has been lost.”).

⁸³ World Meteorological Organization (2024) [STATE OF THE GLOBAL CLIMATE 2023](#), 3 (“The ten-year average 2014–2023 global temperature is $1.20 \pm 0.12^\circ\text{C}$ above the 1850–1900 average, the warmest 10-year period on record.”).

⁸⁴ Forster P. M., et al. (2023) [Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence](#), EARTH SYST. SCI. DATA 15(6): 2295–2327, 2296 (“The indicators show that human-induced warming reached $1.14 [0.9 \text{ to } 1.4]^\circ\text{C}$ averaged over the 2013–2022 decade and $1.26 [1.0 \text{ to } 1.6]^\circ\text{C}$ in 2022. Over the 2013–2022 period, human-induced warming has been increasing at an unprecedented rate of over 0.2°C per decade.”). See also Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) [Summary for Policymakers](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-5 (“The likely range of total human-caused global surface temperature increase from 1850–1900 to 2010–2019 [11] is 0.8°C to 1.3°C , with a best estimate of 1.07°C . It is likely that well-mixed GHGs contributed a warming of 1.0°C to 2.0°C , other human drivers (principally aerosols) contributed a cooling of 0.0°C to 0.8°C , natural drivers changed global surface temperature by -0.1°C to 0.1°C , and internal variability changed it by -0.2°C to 0.2°C . It is very likely that well-mixed GHGs were the main driver[12] of tropospheric warming since 1979, and extremely likely that human-caused stratospheric ozone depletion was the main driver of cooling of the lower stratosphere between 1979 and the mid-1990s.”... Footnote 11: “The period distinction with A.1.2 arises because the attribution studies consider this slightly earlier period. The observed warming to 2010–2019 is $1.06 [0.88 \text{ to } 1.21]^\circ\text{C}$.” Footnote 12: “Throughout this SPM, ‘main driver’ means responsible for more than 50% of the change.”).

⁸⁵ Dhakal S., Minx J. C., Toth F. L., Abdel-Aziz A., Figueroa Meza M. J., Hubacek K., Jonckheere I. G. C., Kim Y.-G., Nemet G. F., Pachauri S., Tan X. C., & Wiedmann T. (2022) [Chapter 2: Emissions Trends and Drivers](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE](#), Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Shukla P. R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasiija A., Lisboa G., Luz S., & Malley J. (eds.), 228 (“Global GHG emissions continued to rise since AR5, but the rate of emissions growth slowed (high confidence). GHG emissions reached $59 \pm 6.6 \text{ GtCO}_2\text{-eq}$ in 2019 (Table 2.1 and Figure 2.5). In 2019, CO_2 emissions from the FFI were $38 (\pm 3.0) \text{ Gt}$, CO_2 from LULUCF $6.6 \pm 4.6 \text{ Gt}$, CH_4 $11 \pm 3.2 \text{ GtCO}_2\text{-eq}$, N_2O $2.7 \pm 1.6 \text{ GtCO}_2\text{-eq}$ and F-gases $1.4 \pm 0.41 \text{ GtCO}_2\text{-eq}$. There is high confidence that average annual GHG emissions for the last decade (2010–2019) were the highest on record in terms of aggregate $\text{CO}_2\text{-eq}$ emissions...”)

⁸⁶ In 2023, the global average atmospheric concentrations reached new highs, with CO_2 at 419.3 parts per million (ppm), CH_4 at 1922.6 parts per billion (ppb) and N_2O at 336.7 ppb. Over the past two decades, CO_2 concentrations have increased at a rate 100 times faster than at any point since the last ice age (11,000–17,000 years ago). Rates of increase for methane for the 2020–2022 (16.3 ppb/yr) period nearly doubled from the 2007–2019 average (7.3 ppb/year), but were not as high for 2023 (+10.9 ppb). See National Oceanic and Atmospheric Administration (5 April 2024) [No sign of greenhouse gases increases slowing in 2023](#) (“The global surface concentration of CO_2 , averaged across all 12 months of 2023, was 419.3 parts per million (ppm), an increase of 2.8 ppm during the year. This was the 12th consecutive year CO_2 increased by more than 2 ppm, extending [the highest sustained rate](#) of CO_2 increases during the 65-year monitoring record. ... Atmospheric methane, less abundant than CO_2 but more potent at trapping heat in the atmosphere, rose to an average of 1922.6 parts per billion (ppb). The 2023 methane increase over 2022 was 10.9 ppb, lower than the record growth rates seen in 2020 (15.2 ppb), 2021 (18 ppb) and 2022 (13.2 ppb), but still the 5th

highest since renewed methane growth started in 2007. ... In 2023, levels of nitrous oxide, the third-most significant human-caused greenhouse gas, climbed by 1 ppb to 336.7 ppb. The two years of highest growth since 2000 occurred in 2020 (1.3 ppb) and 2021 (1.3 ppb).”); and National Oceanic and Atmospheric Administration Global Monitoring Laboratory (22 March 2019) [Global carbon dioxide growth in 2018 reached 4th highest on record](#), News & Features (“In the last two decades, the rate of increase has been roughly 100 times faster than previous natural increases, such as those that occurred at the end of the last ice age 11,000-17,000 years ago.”).

⁸⁷ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 28 (“Fossil fuels: release during oil and gas extraction, pumping and transport of fossil fuels accounts for roughly 23 per cent of all anthropogenic emissions, with emissions from coal mining contributing 12 per cent.”).

⁸⁸ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 28 (“Agriculture: emissions from enteric fermentation and manure management represent roughly 32 per cent of global anthropogenic emissions. Rice cultivation adds another 8 per cent to anthropogenic emissions. Agricultural waste burning contributes about 1 per cent or less.”).

⁸⁹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 28 (“Waste: landfills and waste management represents the next largest component making up about 20 per cent of global anthropogenic emissions.”).

⁹⁰ Saunio M., *et al.* (2020) [The Global Methane Budget 2000-2017](#), EARTH SYST. SCI. DATA 12(3): 1561–1623, 1561 (“For the 2008–2017 decade, global methane emissions are estimated by atmospheric inversions (a top-down approach) to be 576 Tg CH₄ yr⁻¹ (range 550–594, corresponding to the minimum and maximum estimates of the model ensemble). Of this total, 359 Tg CH₄ yr⁻¹ or ~ 60 % is attributed to anthropogenic sources, that is emissions caused by direct human activity (i.e. anthropogenic emissions; range 336–376 Tg CH₄ yr⁻¹ or 50 %–65 %).”).

⁹¹ World Meteorological Organization (2022) [SCIENTIFIC ASSESSMENT OF OZONE DEPLETION 2022: EXECUTIVE SUMMARY](#), GAW Report No. 278, 14 (“Global atmospheric abundances and emissions of most HFCs are increasing. CO₂-equivalent emissions of HFCs derived from observations increased by 18% from 2016 to 2020.”).

⁹² World Meteorological Organization (2022) [SCIENTIFIC ASSESSMENT OF OZONE DEPLETION: 2022](#), GAW Report No. 278 (Figure 2-15).

⁹³ Bond T. C., *et al.* (2013) [Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment](#), J. GEOPHYS. RES. ATMOS. 118(11): 5380–5552, 5420 (“Major sources of BC are also major sources of PM_{2.5}, but the converse is not always true; major sources of PM_{2.5} may produce little BC if their emissions are primarily inorganic. Sources that are BC and OC emitters are shown in the table. Resuspended dust, secondary pollutants like sulfate and nitrate, or sea salt, could also be contributors to PM_{2.5} at some locations but are not included in Table 11.”); major sources in Table 11 include (in order of decreasing importance): transport (vehicle exhaust including gasoline and diesel); IN = industry including coal and oil and biomass burning; coal burning power plants; RE = residential energy; OB = open burning of biomass and refuse; SA = secondary aerosols; O = Others.

⁹⁴ Climate & Clean Air Coalition, [Black carbon](#) (last visited 18 July 2023).

⁹⁵ Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) [Chapter 6: Short-lived Climate Forcers](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 848 (“Knowledge of carbonaceous aerosol atmospheric abundance continues to rely on global models due to a lack of global-scale observations. For BC, models agree within a factor of two with measured surface mass concentrations in Europe and North America, but underestimate concentrations at the Arctic surface by one to two orders of magnitude, especially in winter and spring (Lee *et al.*, 2013; Lund *et al.*, 2018a).”).

⁹⁶ Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Bernsten T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) [Chapter 6: Short-lived Climate Forcers](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 837–838 (“Based on limited isotopic evidence, Chapter 2 assesses that the global tropospheric ozone increased by less than 40% between 1850 and 2005 (low confidence) (Section 2.2.5.3). The CMIP6 models are in line with this increase of tropospheric ozone with an ensemble-mean value of 109 ± 25 Tg (model range) from 1850–1859 to 2005–2014 (Figure 6.4). This increase is higher than the AR5 value of 100 ± 25 Tg from 1850–2010 due to higher ozone precursor emissions in CMIP6. However, the AR5 and CMIP6 values are close when considering the reported uncertainties. The uncertainties are equivalent in CMIP6 and AR5 despite enhanced inclusion of coupled processes in the CMIP6 ESMs (e.g., biogenic NMVOC emissions or interactive stratospheric ozone chemistry).”).

⁹⁷ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 51–57 (“Long-term exposure to ozone can cause inflammation and allergic responses leading to respiratory mortality, as well as the development of a systemic oxidative, proinflammatory environment that can increase the risk of cardiovascular diseases. ... It should be noted that the larger impact of ozone on health has been reported in several previous studies. Malley et al. (2017) used the new health exposure relationships (Turner et al. 2016) along with modelled ozone distributions, and found a 125 per cent increase in respiratory deaths attributable to ozone exposure in 2010 compared to previous estimates – 1.04–1.23 million deaths compared to 0.40–0.55 million. ... Further to this, a bias-adjusted model recently reported total worldwide ozone-related premature deaths of 1.0 ± 0.3 million (Shindell et al. 2018). The value for respiratory-related premature deaths due to ozone was 0.6 ± 0.2 million for 2010, and 1.0 ± 0.3 million without bias adjustment, the latter being consistent with the value reported by Malley et al. (2017).”).

⁹⁸ Feng Z., Xu Y., Kobayashi K., Dai L., Zhang T., Agathokleous E., Calatayud V., Paoletti E., Mukherjee A., Agrawal M., Park R. J., Oak Y. J., & Yue X. (2022) [Ozone pollution threatens the production of major staple crops in East Asia](#), NAT. FOOD 3: 47–56, 47 (“East Asia is a hotspot of surface ozone (O_3) pollution, which hinders crop growth and reduces yields. Here, we assess the relative yield loss in rice, wheat and maize due to O_3 by combining O_3 elevation experiments across Asia and air monitoring at about 3,000 locations in China, Japan and Korea. China shows the highest relative yield loss at 33%, 23% and 9% for wheat, rice and maize, respectively. The relative yield loss is much greater in hybrid than inbred rice, being close to that for wheat. Total O_3 -induced annual loss of crop production is estimated at US\$63 billion.”). See also United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 68 (“Methane also plays a significant role in reducing crop yields and the quality of vegetation. Ozone exposure is estimated to result in yield losses in wheat, 7.1 per cent; soybean, 12.4 per cent; maize, 6.1 per cent; and rice, 4.4 per cent for near present-day global totals (Mills et al. 2018; Shindell et al. 2016; Avnery et al. 2011a)”; and Shindell D., Faluvegi G., Kasibhatla P., & Van Dingenen R. (2019) [Spatial Patterns of Crop Yield Change by Emitted Pollutant](#), EARTH’S FUTURE 7(2): 101–112, 101 (“Our statistical modeling indicates that for the global mean, climate and composition changes have decreased wheat and maize yields substantially whereas rice yields have increased. Well-mixed greenhouse gases drive most of the impacts, though aerosol-induced cooling can be important, particularly for more polluted area including India and China. Maize yield losses are most strongly attributable to methane emissions (via both temperature and ozone).”).

⁹⁹ Mar K. A., Unger C., Walderdorff L., & Butler T. (2022) [Beyond \$CO_2\$ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health](#), ENV. SCI. POL. 134: 127–136, 129 (“Methane is an important contributor to the formation of tropospheric O_3 . In addition to acting as a greenhouse gas and being directly harmful to human health (see [Section 3.3](#)), it also harms plants by causing cellular damage within the leaves, adversely affecting plant production, reducing the rate of photosynthesis, and requiring increased resource allocation to detoxify and repair leaves (Ashmore, 2005, Sitch et al., 2007). This results in an estimated \$11–\$18 billion worth of global crop losses annually (Avnery et al., 2011). Beyond this, however, O_3 damage to plants may significantly reduce the ability of terrestrial ecosystems to absorb carbon, negating some of the enhanced carbon uptake due to CO_2 fertilization that is

expected to partially offset rising atmospheric CO₂ concentrations ([Sitch et al., 2007](#), [Ciais et al., 2013](#), [Armeth et al., 2010](#), [Ainsworth et al., 2012](#)).”).

¹⁰⁰ Dhakal S., Minx J. C., Toth F. L., Abdel-Aziz A., Figueroa Meza M. J., Hubacek K., Jonckheere I. G. C., Kim Y.-G., Nemet G. F., Pachauri S., Tan X. C., & Wiedmann T. (2022) [Chapter 2: Emissions Trends and Drivers](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE](#), *Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., & Malley J. (eds.), 233 (“Latin America and the Caribbean contributed 11% of GHG emissions growth since 1990 (2.2 GtCO₂-eq), and 5% (0.3 GtCO₂-eq) since 2010.”).

¹⁰¹ Organisation for Economic Co-operation and Development, *et al.* (2022) [LATIN AMERICAN ECONOMIC OUTLOOK 2022: TOWARDS A GREEN AND JUST TRANSITION](#), 30 (“LAC’s share in total GHG emissions (8.1%) (Figure 4) is proportional to its share in total world population (8.4%), slightly higher than its share in global GDP (6.4%) but lower than the per-capita emissions of other regions with similar development levels.”).

¹⁰² International Monetary Fund (2021) [REGIONAL ECONOMIC OUTLOOK: WESTERN HEMISPHERE](#), 35 (“LAC, with the exception of the Caribbean, makes limited use of fossil fuels in electricity generation (renewable share of 60 percent) thanks to enabling policies and governments’ catalytic role in financing green technologies. The energy sector amounts to only 43 percent of total GHG emissions in LAC, well below the world average of 74 percent. LAC, however, stands out for its large share of emissions from agriculture, livestock, forestry, and change in land use (45 percent in LAC versus the world average of 14 percent).”).

¹⁰³ World Bank Group (2022) [A ROADMAP FOR CLIMATE ACTION IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2021-2025](#), 11 (“The livestock sector and associated land-use changes alone account for one-third of regional GHG emissions. Over the last decade, land-use changes have driven the largest share of growth in regional emissions, contributing two-thirds of the net increase. Emissions from deforestation have been increasing since 2016, with the largest annual increase since 2010 occurring in 2020, largely due to accelerating deforestation in Brazil following a decline in the 2000s.”).

¹⁰⁴ World Bank Group (2022) [A ROADMAP FOR CLIMATE ACTION IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2021-2025](#), 12 (“Transitioning toward cleaner technologies that emit fewer greenhouse gases in the cement, glass, chemical, and pulp and paper sectors will be important to help decarbonize the manufacturing sector in LAC. Targeting larger manufacturing hubs with significant GHG emission profiles, such as heavy industries in Brazil and Mexico, the cement sector in Colombia and Peru, and agro-processing in Argentina or Central America, would contribute towards a material reduction in manufacturing’s carbon footprint across the region.”).

¹⁰⁵ Evans S. (5 October 2021) [Analysis: Which countries are historically responsible for climate change?](#), CARBON BRIEF (“By the end of 2021, the US will have emitted more than 509GtCO₂ since 1850. At 20.3% of the global total, this is by far the largest share and is associated with some 0.2C of warming to date.”).

¹⁰⁶ Rivera A., Movalia S., Pitt H., & Larsen K. (2022) [Global Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020 and Preliminary 2021 Estimates](#), Rhodium Group, 3 (Figure 3).

¹⁰⁷ Climate Watch, [US Greenhouse Gas Emissions](#) (last visited 27 June 2023).

¹⁰⁸ Evans S. (5 October 2021) [Analysis: Which countries are historically responsible for climate change?](#), CARBON BRIEF (“Japan on 2.7% and Canada, with 2.6%, close out the top 10 largest contributors to historical emissions.”).

¹⁰⁹ Climate Watch, [US Greenhouse Gas Emissions](#) (last visited 27 June 2023).

¹¹⁰ Evans S. (5 October 2021) [Analysis: Which countries are historically responsible for climate change?](#), CARBON BRIEF (“By the end of 2021, the US will have emitted more than 509GtCO₂ since 1850. At 20.3% of the global total,

this is by far the largest share and is associated with some 0.2C of warming to date.... Russia is third, with some 6.9% of global cumulative CO2 emissions, followed by Brazil (4.5%) and Indonesia (4.1%). Notably, the chart above shows how the latter pair are in the top 10 largely as a result of their emissions from deforestation, despite relatively low totals from the use of fossil fuels.... Japan on 2.7% and Canada, with 2.6%, close out the top 10 largest contributors to historical emissions.”).

¹¹¹ Evans S. (5 October 2021) [Analysis: Which countries are historically responsible for climate change?](#), CARBON BRIEF (“Russia is third, with some 6.9% of global cumulative CO2 emissions, followed by Brazil (4.5%) and Indonesia (4.1%). Notably, the chart above shows how the latter pair are in the top 10 largely as a result of their emissions from deforestation, despite relatively low totals from the use of fossil fuels.... The rainforest nations of Brazil and Indonesia were also being deforested in the late 19th and early 20th centuries by settlers growing [rubber](#), [tobacco](#) and other cash crops. But deforestation began “[in earnest](#)” from around 1950, including for cattle ranching, logging and [palm-oil plantations](#).”).

¹¹² ClimateWatch, [Historical GHG Emissions](#) (last visited 18 July 2023).

¹¹³ International Energy Agency (2023) [Methane Tracker Database](#).

¹¹⁴ International Energy Agency (2023) [Methane Tracker Database](#).

¹¹⁵ International Energy Agency (2023) [Methane Tracker Database](#).

¹¹⁶ ClimateWatch, [Historical GHG Emissions](#) (last visited 18 July 2023).

¹¹⁷ Climate & Clean Air Coalition & United Nations Environment Programme (2018) [INTEGRATED ASSESSMENT OF SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN](#), 3 (“Agriculture, transport, domestic and commercial refrigeration are the sectors that product the largest emissions of methane, particulate matter, black carbon, and HFCs.”).

¹¹⁸ Climate & Clean Air Coalition & United Nations Environment Programme (2018) [INTEGRATED ASSESSMENT OF SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN](#), 3 (“The results indicate a maximum potential reduction in warming of up to 0.9° C by 2050, if implementing SLCP measures across the LAC region.”).

¹¹⁹ Climate & Clean Air Coalition & United Nations Environment Programme (2018) [INTEGRATED ASSESSMENT OF SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN](#), 3 (“A number of SLCP measures has been identified that, by 2050, has the potential to reduce warming in LAC by up to 0.9 degrees Celsius, premature mortality from PM2.5 by at least 26 per cent annually, and avoid the loss of 3–4 million tonnes of four staple crops each year.”).

¹²⁰ ClimateWatch, [Historical GHG Emissions](#) (last visited 15 June 2023).

¹²¹ Project on Organization, Development, Education and Research (2022) [The Gas Industry in Latin America and the Caribbean](#), 26, Graphic 11 (“Natural gas production in Latin America amounted to 182.94 billion cubic meters (bcm) in 2020, representing 4.75% of total world production.[62]”).

¹²² Shen L., Zavala-Araiza D., Gautam R., Omara M., Scarpelli T., Sheng J., Sulprizio M. P., Zhuang J., Zhang Y., Qu Z., Lu X., Hamburg S. P., Jacob D. (2021) [Unravelling a large methane emission discrepancy in Mexico using satellite observations](#), REM. SENS. ENVIRON. 260: 1–9, 1 (“Our results show that Mexico’s oil and gas sector has the largest discrepancy, with oil and gas emissions (1.3 ±0.2 Tg a1) higher by a factor of two relative to bottom-up estimates—accounting for a quarter of total anthropogenic emissions. Our satellite-based inverse modeling estimates show that more than half of the oil/gas emissions in eastern Mexico are from the southern onshore basin (0.79 ±0.13 Tg a1), pointing at high emission sources which are not represented in current bottom-up inventories (e.g., venting of associated gas, high-emitting gathering/processing facilities related to the transport of associated gas from offshore).

¹²³ International Energy Agency (2022) [Methane Emissions from Oil and Gas Operations](#) (“Taking average natural gas prices from 2017 to 2021 – before the recent price surge – the annual investment required is less than the total value of the captured methane that could be sold, meaning that related methane emissions from oil and gas could be reduced by almost 75% at an overall saving to the global oil and gas industry.”).

¹²⁴ International Energy Agency (2023) [Global Methane Tracker 2023: Strategies to reduce emissions from oil and gas operations](#) (“Even if there was no value to the captured gas, almost all available abatement measures would be cost effective in the presence of an emissions price of only about 15 USD/tCO₂-eq.”).

¹²⁵ International Energy Agency (2023) [Global Methane Tracker 2023: Strategies to reduce emissions from oil and gas operations](#) (“The technologies and measures to prevent methane emissions from oil and gas operations are well known and have been deployed in multiple locations around the world. Key examples include leak detection and repair campaigns, installing emissions control devices, and replacing components that emit methane in their normal operations.”).

¹²⁶ Climate Watch, [US Greenhouse Gas Emissions](#) (last visited 27 June 2023).

¹²⁷ Alvarez. R. A., *et al.* (2018) [Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain](#), SCIENCE 361(6398): 186–188, 186 (“Methane emissions from the U.S. oil and natural gas supply chain were estimated by using ground-based, facility-scale measurements and validated with aircraft observations in areas accounting for ~30% of U.S. gas production. When scaled up nationally, our facility-based estimate of 2015 supply chain emissions is 13 ± 2 teragrams per year, equivalent to 2.3% of gross U.S. gas production. This value is ~60% higher than the U.S. Environmental Protection Agency inventory estimate, likely because existing inventory methods miss emissions released during abnormal operating conditions. Methane emissions of this magnitude, per unit of natural gas consumed, produce radiative forcing over a 20-year time horizon comparable to the CO₂ from natural gas combustion. Substantial emission reductions are feasible through rapid detection of the root causes of high emissions and deployment of less failure-prone systems.”)

¹²⁸ Alvarez. R. A., *et al.* (2018) [Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain](#), SCIENCE 361(6398): 186–188, 186 (“Component-based inventory estimates like the GHGI have been shown to underestimate facility-level emissions probably because of the technical difficulty and safety and liability risks associated with measuring large emissions from, for example, venting tanks such as those observed in aerial survey”).

¹²⁹ Climate Watch, [US Greenhouse Gas Emissions](#) (last visited 27 June 2023).

¹³⁰ Blanco-Donado E. P., Schneider I. L., Artaxo P., Lozano-Osorio J., Artaxo P., Portz L., & Oliveira M. L. S. (2022) [Source identification and global implications of black carbon](#), GEOSCI. FRONT. 13(101149): 1–13, 1 (“In Latin America and the Caribbean, the main sources of BC emission are vehicular traffic in urban areas and biomass burning from deforestation, cooking, and heating (Artaxoetal., 2013; Britoetal., 2013).”).

¹³¹ Rivas M. E., Suarez-Aleman A., & Serebesky T. (2019) [STYLIZED URBAN TRANSPORTATION FACTS IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN](#), Technical Note No. IDB-TN-1640, Inter-American Development Bank, 5, 7, 10 (“Over the past 10 years, most of countries in LAC have increased their motorization rate, with the average annual growth rate in the region equaling 4.7 percent. In 2015, the average motorization for LAC reached 201 vehicles per 1000 inhabitants.”; “Some cities have witnessed a reduction in their public transportation shares by one-half. This passenger leakage to private transportation modes has an impact on public transportation performance, which in turn increases the leakage, generating a vicious circle between private and public transportation.”; “The productivity of urban transport has decrease in the region, which is exacerbated by a low cost recovery. The evidence shows that productivity of the public transport sector in LAC, expressed by different partial indicators, has stagnated or even decreased. This has resulted in rising costs in the public transport sector, as is also observed in other labor-intensive sectors. These rising costs can be attributed in part to difficulties associated with replacing labor with capital as well as a slowdown in technological advances. Public transportation faces two additional aggravating factors: vehicular

congestion and the negative impact of a positive income elasticity with respect to the demand for private transportation).”).

¹³² Rehermann F. & Pablo-Romero M. (2018) [Economic growth and transport energy consumption in the Latin American and Caribbean countries](#), ENERGY POL'Y 122: 518–527, 519 (“Therefore, the economic growth in the Latin American and Caribbean (LAC) countries may have a noticeable impact on the energy consumption in the transport sector. In this sense, in 2015, the transport sector accounted for 36.8% of total energy consumption (higher than the world percentage shown before), followed by the industrial and residential sectors, with 31.6% and 15.7%, respectively (IEA,2018). It should also be noted that this transport sector energy consumption continues to be based mainly on oil, accounting for 88.4% of total energy consumed, followed by biofuels, natural gas and electricity, with 7.8%, 3.5%, and 0.3%, respectively (IEA, 2018).”).

¹³³ Climate & Clean Air Coalition & United Nations Environment Programme (2018) [INTEGRATED ASSESSMENT OF SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN](#), Figure 1.6.

¹³⁴ Brewer T. L. (2019) [Black carbon emissions and regulatory policies in transportation](#), ENERGY POLICY 129: 1047–1055, 1047 (“Globally, transportation accounts for approximately 19 percent of BC emissions, and diesel engines contribute 90 percent of transportation's share (US EPA, 2017). The transportation sector in the United States is estimated to account for about 52 percent of US black carbon emissions, and diesel engines contribute about 90 percent of the transportation BC emissions”).

¹³⁵ Environment and Climate Change Canada (2021) [Black Carbon Inventory 2013-2021](#), 13 (“Transportation and Mobile Equipment is by far the largest source of black carbon in Canada, accounting for 15 kt (56%) of total emissions in 2021. Of the various sources in this category, off-road diesel engines account for 8.9 kt (34%) of total emissions in 2021. The other large source in this category is diesel engines used for on-road transport, which account for 2.4 kt (9.1%) of total emissions.”)

¹³⁶ ClimateWatch, [Historical GHG Emissions](#) (last visited 15 June 2023).

¹³⁷ International Center for Tropical Agriculture (14 May 2020) [Latin America's Latin America's livestock sector needs emissions reduction to meet 2030 targets](#), PHYS.ORG (“Livestock is a pivotal source of income for Latin American countries but the sector is one of the largest sources of greenhouse gas emissions (GHG) in the region. Agriculture in Latin America produces 20 percent of the region's emissions, 70 percent of which comes from livestock, according to research by the CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).”); Arango J., Ruden A., Martinez-Baron D., Loboguerrero A.M., Berndt A., Chacon M., Torres, C.F., Oyhantcabal W., Gomez C.A., Ricci P., Ku-Vera J., Burkart S., Moorby J.M., Chirinda N. (2020) [Ambition Meets Reality: Achieving GHG Emission Reduction Targets in the Livestock Sector in Latin America](#), FRONT. SUST. FOOD SYST. 4(65): 1–9, 1–2 (“Despite its economic importance, the cattle sector is also a major source of GHG emissions, particularly as enteric methane emissions (Table 1). ... Previous studies have shown that emission reduction ambitions submitted under the Paris Agreement would lead to global GHG emission reductions of 52–58 GtCO₂ eq yr⁻¹ by 2030. Unfortunately, this level of emission reductions will not limit global warming to 1.5° C (IPCC, 2018).”).

¹³⁸ Climate Watch, [US Greenhouse Gas Emissions](#) (last visited 27 June 2023).

¹³⁹ Climate Watch, [US Greenhouse Gas Emissions](#) (last visited 27 June 2023).

¹⁴⁰ Silva-Martinez R. D., Sanches-Pereira A., Ortiz W., Galindo M. F. G., & Coelho S. T. (2020) [The state-of-the-art of organic waste to energy in Latin America and the Caribbean](#), REN. ENERGY 156: 509–525, 516–517 (“In the Caribbean Islands, biomass from agricultural and forest residues is utilized to produce electricity through combustion techniques. In countries like the Dominican Republic [12] or Cuba, combustion is practiced to employ the energy content of residues such as sugarcane straw and bagasse, rice husk, coffee husk, and firewood [13]. In the British Virgin Islands most wastes are incinerated, despite the high costs involved [7]. Conversely, in Puerto Rico for example, there is no incineration of waste or residues, where all waste are landfilled or recycled [7]. In the case of Central

America, currently sugarcane bagasse and straw are the only agricultural residues to produce energy at large scale [8]. ... In the case of South America, particularly in Brazil, bagasse from sugarcane is the main source of agro electricity with an operating power potential of more than 9 GW [17], considering that burning bagasse is still by far the least cost option in comparison with other thermochemical routes [18].”)

¹⁴¹ Engelhardt V., Perez T., Donoso L., Muller T., & Wiedensohler A. (2022) [Black carbon and particulate matter mass concentrations in the Metropolitan District of Caracas, Venezuela: An assessment of temporal variation and contributing sources](#), *ELEM. SCI ANTH.* 10: 1–22, 1 (“The annual median for eBC and PM2.5 was 1.6 and 9.2 mgm⁻³, respectively, in the urban site, while PM2.5 in the forest site was 6.6mgm⁻³. To our knowledge, these are the first measurements of this type in the northernmost area of South America. eBC and PM2.5 sources identification during wet and dry seasons was obtained by percentiles of the conditional bivariate probability function(CBPF). CBPF showed seasonal variations of eBC and PM2.5 sources and that their contributions are higher during the dry season. Biomass burning events are a relevant contributing source of aerosols for both sites of measurements inferred by fire pixels from satellite data, the national fire department’s statistics data, and backward trajectories. Our results indicate that biomass burning might affect the atmosphere on a regional scale, contribute to regional warming, and have implications for local and regional air quality and, therefore, human health”).

¹⁴² Goncalves Jr. S. J., Magalhaes N., Charello R. C., Evangelista H., & Godoi R. H. M. (2022) [Relative contributions of fossil fuel and biomass burning sources to black carbon aerosol on the Southern Atlantic Ocean Coast and King George Island \(Antarctic Peninsula\)](#), *AN. ACAD. BRAS. CIENC.* 94(e20210805): 1–20, 16 (“It is plausible to assume that the most significant contribution of BC to the study, in general, is from fossil fuel combustion since in the summer for the Southern Hemisphere, there are slight burning spots from the surrounding continents. A thorough understanding of fire events and an accurate prediction of air masses and continual measurements for the determination of BC in the Antarctica atmosphere are deemed essential, especially in the period of the dry season in the regions of South America, which appears the most biomass burning events arise (around August to November).”).

¹⁴³ Booth M. S. (2018) [Not Carbon Neutral: Assessing the Net Emissions Impact of Residues Burned for Bioenergy](#), *ENVIRON. RES. LETT.* 13: 1–10, 8 (“For bioenergy to offer genuine climate mitigation, it is essential to move beyond the assumption of instantaneous carbon neutrality. The [net emissions impact (NEI)] approach provides a simple means to estimate net bioenergy emissions over time, albeit one that tends to underestimate actual impacts. The model finds that for plants burning locally sourced wood residues, from 41% (extremely rapid decomposition) to 95% (very slow decomposition) of cumulative direct emissions should be counted as contributing to atmospheric carbon loading by year 10. Even by year 50 and beyond, the model shows that net emissions are a significant proportion of direct emissions for many fuels.”). See also Sterman J. D., et al. (2018) [Does Replacing Coal with Wood Lower CO₂ Emissions? Dynamic Lifecycle Analysis of Wood Bioenergy](#), *ENVIRON. RES. LETT.* 13: 1–10, 8 (“Scenario 2 shows the realistic case with the combustion efficiency and supply chain emissions estimated for wood pellets (supplementary table S5), again assuming 25% of the biomass is harvested by thinning. Because production and combustion of wood generate more CO₂ than coal, the first impact of bioenergy use is an increase in atmospheric CO₂. Regrowth gradually transfers C from the atmosphere to biomass and soil C stocks, leading to a carbon debt payback time of 52 years; after 100 years CO₂ remains 62% above the zero C case.”).

¹⁴⁴ See Intergovernmental Panel on Climate Change (2019) [Summary for Policymakers](#), in [CLIMATE CHANGE AND LAND: AN IPCC SPECIAL REPORT ON CLIMATE CHANGE, DESERTIFICATION, LAND DEGRADATION, SUSTAINABLE LAND MANAGEMENT, FOOD SECURITY, AND GREENHOUSE GAS FLUXES IN TERRESTRIAL ECOSYSTEMS](#), Shukla P. R., et al. (eds.), 27 (“Impacts on adaptation, desertification, land degradation and food security are maximum potential impacts, assuming carbon dioxide removal by BECCS at a scale of 11.3 GtCO₂ yr⁻¹ in 2050, and noting that bioenergy without CCS can also achieve emissions reductions of up to several GtCO₂ yr⁻¹ when it is a low carbon energy source {2.6.1; 6.3.1}. Studies linking bioenergy to food security estimate an increase in the population at risk of hunger to up to 150 million people at this level of implementation {6.3.5}. The red hatched cells for desertification and land degradation indicate that while up to 15 million km² of additional land is required in 2100 in 2°C scenarios which will increase pressure for desertification and land degradation, the actual area affected by this additional pressure is not easily quantified {6.3.3; 6.3.4}.”); Swift M. J. & Anderson J. M. (1994) [Biodiversity and Ecosystem Function in Agricultural Systems](#), in *BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM FUNCTION* 99, Schulze E. D. & Mooney H. A. (eds.), 15–41 (“The

conversion of natural systems to intensive, arable monocropping reduces biodiversity in the plant, herbivore and decomposer subsystems. The isolation of biodiversity as a factor determining changes in ecosystem functioning is complicated, however, because each of these subsystems affects the others (Fig. 2.2) and also influences the physicochemical factors regulating soil processes. The response of the soil organism community to cultivations practices is varied (Figs. 2.6, 2.7), but in general agricultural soils are characterised by a lower species richness, including the disappearance of key functional groups.”); and Bauhus J., Kouki J., Paillet Y., Asbeck T., & Marchetti M. (2017) *How does the forest-based bioeconomy impact forest diversity?*, in *TOWARD A SUSTAINABLE EUROPEAN FOREST-BASED BIOECONOMY*, Winkel G. (ed.), European Forest Institute, 67–76, 69 (“Around 25% of forest-dwelling species depend on dead wood and senescent trees for at least a part of their lifecycle. . . . Large amounts of dead wood and senescent trees, as well as tree cavities, are typical of mature and over-mature stages of forest development and are typically found in higher quantities and qualities in unmanaged forests. Conversely, forest management tends to truncate successional forest development cycles and to eliminate such elements. Shorter rotation lengths are likely to have the same – amplified – impact on forest biodiversity.”).

¹⁴⁵ See Sierra Club (2017) *The Conventional Biomass Industry in California* (“[L]ike coal generation, solid fuel biomass generation releases criteria pollutants (including oxides of nitrogen (NO_x), sulfur oxides (SO_x), and fine particulate matter) that cause negative human health impacts, including asthma, heart disease, and premature death. In fact, biomass combustion is dirtier than coal generation with regards to particulate matter and NO_x. Biomass generation proponents state that solid fuel facilities reduce pollution as these plants filter out 99 percent of PM 2.5 pollution and 95 percent of black carbon emissions. However, this claim refers to the most technologically advanced plants. The majority of the existing solid fuel, conventional biomass incineration facilities in California were built in the late 1980s and are not based on the most advanced technology. Furthermore, as many as 75 percent of conventional biomass facilities across the United States have been found not to be compliant with public health laws.”); Arvesen A., et al. (2018) *Cooling aerosols and changes in albedo counteract warming from CO₂ and black carbon from forest bioenergy in Norway*, SCI. REP. 8(3299): 1–12, 8 (“For combustion plant sizes > 1 MW, assumed emission factor values for dust, CO, NO_x and SO₂ are in compliance with current air pollution regulations in Norway (combustion plant sizes < 1 MW are not subject to regulatory emission limits)¹². The fractions of PM₁₀ that are black carbon and organic carbon are assumed to be 4.3% and 17%, respectively, for all combustion plant size classes¹³. For biogenic CO₂, we employ a generic emission factor of 1.8 kg CO₂ dry kg⁻¹.”); Cai H. & Wang M. Q. (2014) *Estimation of Emission Factors of Particulate Black Carbon and Organic Carbon from Stationary, Mobile, and Non-point Sources in the United States for Incorporation into GREET*, Argonne National Laboratory, Technical Report ANL/ESD-14/6, 13, 31 (Table 15: Listing mean black carbon emissions from biomass-fired boilers as emitting 0.273 g/kWh compared with 0.009 g/kWh from coal-fired boilers; “For biomass-fired boilers, we relied on a source profile (ID 4704) with the highest quality rating in SPECIATE that was based on a study on source sampling of fine PM emissions from wood-fired industrial boilers by the National Risk Management Research Laboratory of the EPA (EPA 2014a).”); Pozzer A., Dominici F., Haines A., Witt C., Münzel T., & Lelieveld J. (2020) *Regional and global contributions of air pollution to risk of death from COVID-19*, CARDIOVASC. RES. 116(14): 2247–2253, 2251 (“Our results suggest that air pollution is an important cofactor increasing the risk of mortality from COVID-19. This provides extra motivation for combining ambitious policies to reduce air pollution with measures to control the transmission of COVID-19.”); and Li H., Xu X.-L., Dai D.-W., Huang Z.-Y., Ma Z., & Guan Y.-J. (2020) *Air pollution and temperature are associated with increased COVID-19 incidence: A time series study*, INT. J. INFECT. DIS. 97: 278–282, 278 (“First, a significant correlation was found between COVID-19 incidence and AQI in both Wuhan ($R^2 = 0.13, p < 0.05$) and XiaoGan ($R^2 = 0.223, p < 0.01$). Specifically, among four pollutants, COVID-19 incidence was prominently correlated with PM_{2.5} and NO₂ in both cities. In Wuhan, the tightest correlation was observed between NO₂ and COVID-19 incidence ($R^2 = 0.329, p < 0.01$). In XiaoGan, in addition to the PM_{2.5} ($R^2 = 0.117, p < 0.01$) and NO₂ ($R^2 = 0.015, p < 0.05$), a notable correlation was also observed between the PM₁₀ and COVID-19 incidence ($R^2 = 0.105, p < 0.05$). Moreover, temperature is the only meteorological parameter that constantly correlated well with COVID-19 incidence in both Wuhan and XiaoGan, but in an inverse correlation ($p < 0.05$).”).

¹⁴⁶ Globally, large-scale deployment of BECCS would decrease food and water security and could intensify social conflicts, especially in low- and middle-income countries. See Canadell J. G., et al. (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*,

Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 5-108 (“Deployment of BECCS at the scales envisioned by many 1.5–2.0°C mitigation scenarios could threaten biodiversity and require large land areas, competing with afforestation, reforestation and food security (Smith *et al.* 2018; Anderson and Peters 2016)”; Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (2019) [GLOBAL ASSESSMENT REPORT ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES](#), Brondizio E. S., Settele J., Díaz S., & Ngo H. T. (eds.), XXII (“[The] largescale deployment of intensive bioenergy plantations, including monocultures, replacing natural forests and subsistence farmlands, will likely have negative impacts on biodiversity and can threaten food and water security as well as local livelihoods, including by intensifying social conflict.”); and Hasegawa T., Sands R. D., Brunelle T., Cui Y., Frank S., Fujimori S., & Popp A. (2020) [Food security under high bioenergy demand toward long-term climate goals](#), CLIM. CHANGE 163: 1587–1601, 1598 (“Land-based mitigation options play an important role in the assessment of stringent climate mitigation policies (Popp *et al.* 2014b, 2017). Bioenergy should be in high demand because carbon is absorbed directly from the atmosphere (negative emission) when combined with carbon capture and storage. However, potential competition for land between food and bioenergy crop production is of concern. The large-scale use of bioenergy, to support stringent temperature ceilings of 2 or 1.5 °C by the end of this century, would change land dynamics, put pressure on land resources (Popp *et al.* 2014b), compete with food production, and increase the risk of hunger in middle- and low-income regions (Frank *et al.* 2017; Hasegawa *et al.* 2015a, 2018). The use of bioenergy to replace fossil fuels is addressed in other studies (e.g., Hasegawa *et al.* 2018; Bauer *et al.* 2018) but not in the context of food security. This study provides an in-depth analysis of the relationship between bioenergy and use of land for meeting food demand.”). High implementation of BECCS could increase the population at risk of hunger by up to 150 million people. See Intergovernmental Panel on Climate Change (2019) [Summary for Policymakers, in CLIMATE CHANGE AND LAND: AN IPCC SPECIAL REPORT ON CLIMATE CHANGE, DESERTIFICATION, LAND DEGRADATION, SUSTAINABLE LAND MANAGEMENT, FOOD SECURITY, AND GREENHOUSE GAS FLUXES IN TERRESTRIAL ECOSYSTEMS](#), Shukla P. R., *et al.* (eds.), 27 (“Impacts on adaptation, desertification, land degradation and food security are maximum potential impacts, assuming carbon dioxide removal by BECCS at a scale of 11.3 GtCO₂ yr⁻¹ in 2050, and noting that bioenergy without CCS can also achieve emissions reductions of up to several GtCO₂ yr⁻¹ when it is a low carbon energy source {2.6.1; 6.3.1}. Studies linking bioenergy to food security estimate an increase in the population at risk of hunger to up to 150 million people at this level of implementation {6.3.5}. The red hatched cells for desertification and land degradation indicate that while up to 15 million km² of additional land is required in 2100 in 2°C scenarios which will increase pressure for desertification and land degradation, the actual area affected by this additional pressure is not easily quantified {6.3.3; 6.3.4}.”).

¹⁴⁷ Bioenergy facilities have been linked with environmental injustice, specifically the wood pellet industry in the U.S. See Purifoy D. (5 October 2020) [How Europe’s Wood Pellet Appetite Worsens Environmental Racism in the South](#), SOUTHERLY (“From Northampton County to Alabama’s Black Belt, residents and activists say companies such as Enviva exploit mostly communities of color with promises to build up busted local economies with a “green energy” industry. Instead, communities hosting wood pellet facilities are not only further burdened by pollution and other local dangers, they are also entangled in yet another climate damaging trend — the destruction of biodiverse hardwood forests and the rise of monoculture tree plantations to produce energy that appears to pose climate threats similar to coal.”); Popkin G. (21 April 2021) [There’s a Booming Business in America’s Forests. Some Aren’t Happy About It.](#), THE NEW YORK TIMES (“Richie Harding, a pastor in Northampton County, took a dimmer view. He said he was incensed that Enviva had plopped its mill amid established neighborhoods. “Northampton County has a lot of land,” he said. “Why would you put it in the backyard of these people?” Pellet mills, which can emit volatile organic compounds and other hazardous air pollutants, are 50 percent more likely to be located near “environmental justice-designated” communities, defined as counties with above-average poverty levels and a population that’s at least 25 percent nonwhite, according to an analysis by the Dogwood Alliance, an environmental nonprofit based in Asheville. In November, the Mississippi Department of Environmental Quality fined Drax, the power company, \$2.5 million for air-quality violations at mills it operates there.”); Koester S. & Davis S. (2018) [Siting of Wood Pellet Production in Environmental Justice Communities in the Southeastern United States](#), ENVIRON. JUSTICE 11(2): 64–70, 70 (“By defining EJ communities as communities with high levels of poverty and large nonwhite populations, we showed that they are roughly 50% more likely than non-EJ communities to have a biomass pellet facility located in their community. In addition, North and South Carolina had wood pellet production facilities located exclusively in EJ communities. A contemporary instance of a biomass wood pellet production facility being placed in an EJ community is illustrated by our example of Richmond County, North Carolina, showing that residents’ right to EJ is being denied.

This research details the continued pattern of energy projects and development being sited in areas where communities are economically, politically, and socially marginalized.”); Grunald M. (26 March 2021) [The ‘Green Energy’ That Might Be Ruining the Planet](#), POLITICO MAGAZINE (“U.S. pellet mills have often been located in predominantly minority communities, which has added an environmental justice angle to the politics of biomass. A local activist named Belinda Joyner, who is Black, once confronted a Black state regulator about Enviva’s expansion of the Northampton mill. Joyner told the regulator his agency was ignoring a minority community’s complaints about truck traffic and dust and a debarker that rattled at night as if someone had left a quarter in the dryer. The regulator said he was sympathetic, but as long as Enviva complied with air quality laws, he had no choice but to issue the permit.”); and Anderson P. & Powell K. (2018) [Dirty Deception: How the Wood Biomass Industry Skirts the Clean Air Act](#), Environmental Integrity Project, 4–5 (“[Environmental Integrity Project’s] survey reveals that these facilities emit dangerous amounts of air pollution, and further finds that state agencies consistently fall well short of their duty to ensure that these facilities control their pollution to the levels required by law, frequently due to misleading information supplied by the industry. As a result, many large pellet mills have been allowed to emit air pollution, especially volatile organic compounds (VOCs) and hazardous air pollutants at levels well above legal limits for years at a time.”).

¹⁴⁸ Climate Watch, [US Greenhouse Gas Emissions](#) (last visited 27 June 2023).

¹⁴⁹ Piamonte C., Correal M., & Rihm A. (21 November 2022) [If we talk about climate change, we MUST talk about waste](#), Inter-American Development Bank (“In Latin America and the Caribbean (LAC), waste production continues to grow. Projections indicate that the region will produce 296 million tons of municipal solid waste by 2030, of which 52% is expected to be organic. Currently, LAC countries dispose of 56% of their waste in sanitary landfills – most of them without biogas capture systems – and 40% in inadequate disposal sites, while less than 4% of waste is valorized. This context not only increases the challenges for waste management in the region, but also poses a threat to methane mitigation.”),

¹⁵⁰ Climate Watch, [US Greenhouse Gas Emissions](#) (last visited 27 June 2023).

¹⁵¹ Climate Watch, [US Greenhouse Gas Emissions](#) (last visited 27 June 2023).

¹⁵² United States Environmental Protection Agency (21 April 2023) [Basic Information about Landfill Gas](#), Landfill Methane Outreach Program (“Municipal solid waste (MSW) landfills are the third-largest source of human-related methane emissions in the United States, accounting for approximately 14.3 percent of these emissions in 2021. The methane emissions from MSW landfills in 2021 were approximately equivalent to the greenhouse gas (GHG) emissions from nearly 23.1 million gasoline-powered passenger vehicles driven for one year or the CO₂ emissions from nearly 13.1 million homes’ energy use for one year. At the same time, methane emissions from MSW landfills represent a lost opportunity to capture and use a significant energy resource.”).

¹⁵³ Flerlage H., Velders G. J. M., & de Boer J. (2021) [A review of bottom-up and top-down emission estimates of hydrofluorocarbons \(HFCs\) in different parts of the world](#), CHEMOS. 283(131208): 1–16, 1 (“Hydrofluorocarbons (HFCs) are widespread alternatives for the ozone-depleting substances (ODSs) chlorofluorocarbons (CFCs) and hydrochlorofluorocarbons (HCFCs). They are used today in a variety of applications, mainly as refrigerants for cooling and air conditioning or as foam-blowing agents (Montzka et al., 2018).”).

¹⁵⁴ Flerlage H., Velders G. J. M., & de Boer J. (2021) [A review of bottom-up and top-down emission estimates of hydrofluorocarbons \(HFCs\) in different parts of the world](#), CHEMOS. 283(131208): 1–16, 2 (“HFCs do not deplete the ozone layer like chlorine- or bromine- containing analogues do (Ravishankara et al., 1994). Recent findings show an indirect depletion potential due to radiative forcing increasing tropospheric and stratospheric temperatures, which alters atmospheric circulation and accelerates the catalytic ozone destruction cycle (Hurwitz et al., 2015). While this effect has limited impact, HFCs being halocarbons, are potent greenhouse gases (Ramanathan, 1975). Global warming potentials (GWPs) express the effect of a substance on global warming relative to CO₂, based on the mass of the substance emitted. HFCs have GWPs of up to several thousands and thus significantly contribute to global radiative forcing (Montzka et al., 2015).”).

¹⁵⁵ Flerlage H., Velders G. J. M., & de Boer J. (2021) [A review of bottom-up and top-down emission estimates of hydrofluorocarbons \(HFCs\) in different parts of the world](#), CHEMOS. 283(131208): 1–16, 12 (“In Latin America and the Caribbean, 80% of HFC emissions are emitted by Argentina, Brazil and Mexico (CCAP and UNEP, 2016).”).

¹⁵⁶ Flerlage H., Velders G. J. M., & de Boer J. (2021) [A review of bottom-up and top-down emission estimates of hydrofluorocarbons \(HFCs\) in different parts of the world](#), CHEMOS. 283(131208): 1–16, 12 (“Emissions of HFC-134a according to government reports to the UNFCCC reached 3.9 Gg yr⁻¹ in 2015, while HFC-152a were reported to be 0 Gg yr⁻¹ in 2007–2015 (Minist'erio Da Ci'encia, Tecnologia E Inovaç'ao, 2017).”).

¹⁵⁷ Sustainable Energy for All (2021) [Chilling Prospects: Tracking Sustainable Cooling for All](#), 19 (“In Latin America and the Caribbean, the number of those at highest risk in six countries high-impact countries for access to sustainable cooling grew slightly from 47.6 million people in 2020, to 48.8 million people in 2021. “).

¹⁵⁸ Sustainable Energy for All (2021) [Chilling Prospects: Tracking Sustainable Cooling for All](#), 19 (“Of those at highest risk, the vast majority are the urban poor, which increased by 500,000 people compared to the previous year. Within the region, the most significant growth in the urban poor category was observed in Brazil (299,000 people) and Bolivia (55,000 people).”).

¹⁵⁹ Bayer E. (18 February 2021) [Consumers can transform Latin America's power systems: Here's how](#), INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (“By 2050, [two-thirds of the world's households](#) could have an AC unit. This means that AC stocks in Latin America and the Caribbean could [increase more than sixfold](#), putting a strain on transmission and local distribution grids. However, more energy efficient ACs could reduce the additional electricity system load, and the remaining load could be cycled to help avoid grid strain during peak hours.”).

¹⁶⁰ International Energy Agency (2018) [THE FUTURE OF COOLING: OPPORTUNITIES FOR ENERGY EFFICIENT AIR CONDITIONING](#); discussed in Bayer, E. (18 February 2021) [Consumers can transform Latin America's power systems: Here's how](#), INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (“By 2050, two-thirds of the world's households could have an AC unit. This means that AC stocks in Latin America and the Caribbean could increase more than sixfold, putting a strain on transmission and local distribution grids.”).

¹⁶¹ Yepez A. & Urteaga J.A. (20 April 2023) [Latin America and the Caribbean can mitigate climate change by tapping into its energy efficiency potential](#), Inter-American Development Bank (“The region's energy intensity, which means the amount of energy consumed per unit of gross domestic product, decreased at an average annual rate of [0.8%](#) from 2010 to 2018. Worldwide, energy intensity decreased at a rate of 2.1% per year, making Latin America and the Caribbean the region with the least improvement in this indicator.”).

¹⁶² Porras F., Walter A., Soriano G., & Ramirez A.D. (2023) [On the adoption of stricter energy efficiency standards for residential air conditioners: Case study Guayaquil, Ecuador](#), HELIYON 9(3): e13893, 1–17, 3 (“The average MEPS (continuous line) for LATAM countries shown in Table 1 is approximately 30% below the average MEPS in the main manufacturing regions. The UNEP Model Regulations are voluntary guidelines for governments in developing countries considering a regulatory framework that requires new room air conditioners to be clean and efficient, following a sustainable pathway [12]. Fig. 1 also shows the current gap between LATAM MEPS and the UNEP Model Regulations (dashed line). The comparison indicates that LATAM MEPS should be increased by 67% to meet UNEP guidelines.”).

¹⁶³ Yepez A. & Urteaga J.A. (20 April 2023) [Latin America and the Caribbean can mitigate climate change by tapping into its energy efficiency potential](#), Inter-American Development Bank (“According to Inter-American Development Bank estimates, the region has the potential to save at least 20% of its energy consumption just by using more efficient lighting, refrigeration and air conditioning equipment, and motors and compressors. These steps would mitigate approximately 470 MtCO₂e, based on an estimated emission factor for the region of 0.34 TCO₂/MWh.”).

¹⁶⁴ Flerlage H., Velders G. J. M., & de Boer J. (2021) [A review of bottom-up and top-down emission estimates of hydrofluorocarbons \(HFCs\) in different parts of the world](#), CHEMOS. 283(131208): 1–16, 10 (“The global distribution of HFC emissions is quite inhomogeneous. Canada, Japan, Australia, and Russia account for about 20% of HFC emissions reported from Annex I countries, while the majority (about 80%) stem from the US and the EU”).

¹⁶⁵ United States Environmental Protection Agency (30 May 2023) [Phaseout of Ozone-Depleting Substances \(ODS\)](#) (“In the United States, ozone-depleting substances (ODS) are regulated as class I or class II controlled substances. Class I substances, such as chlorofluorocarbons (CFCs) and halons, have a higher ozone depletion potential and have been phased out in the U.S.; with a few exceptions, this means no one can produce or import class I substances. Class II substances are all hydrochlorofluorocarbons (HCFCs, which are transitional substitutes for many class I substances. New production and import of most HCFCs were phased out as of 2020. The most common HCFC in use today is HCFC-22 or R-22, a refrigerant still used in existing air conditioners and refrigeration equipment.”).

¹⁶⁶ Baccini A., Walker W., Carvalho L., Farina M., Sulla-Menashe D., & Houghton R. A. (2017) [Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss](#), SCIENCE 358(6360): 230–234, 2–3 (“Our analysis reveals that degradation and disturbance account for 70, 81, and 46% of carbon losses, respectively, across tropical America, Africa, and Asia. For the tropics as a whole, D/D accounts for ~69% of total carbon losses. Although this percentage is higher than previous estimates (22, 23), D/D are scale-dependent phenomena that can only be measured and interpreted relative to the resolution of the sample grid (i.e., 21.4 ha in this study; fig. S7).”).

¹⁶⁷ Lovejoy T. E. & Nobre C. (2018) [Amazon’s Tipping Point](#), SCI. ADV. 4(2): eaat2340, 1 (“We believe that negative synergies between deforestation, climate change, and widespread use of fire indicate a tipping point for the Amazon system to flip to nonforest ecosystems in eastern, southern and central Amazonia at 20–25% deforestation.”). *See also* Wang S., Foster A., Lenz E. A., Kessler J. D., Stroeve J. C., Anderson L. O., Turetsky M., Betts R., Zou S., Liu W., Boos W. R., & Hausfather Z. (2023) [Mechanisms and Impacts of Earth System Tipping Elements](#), REV. GEOPHYS. 61(e2021RG000757): 1–81, 28 (“Ultimately, current research cannot eliminate the possibility that changes across the boreal zone due to a warming climate could act as a net positive climate feedback, thanks to the potential for permafrost thaw and wildfires to liberate the soil carbon that makes up the majority of stored carbon across this ecosystem. Consequently, boreal forest dieback and shifts represent one of the more potentially immediate and significant climate system tipping elements (Table 7).”).

¹⁶⁸ Lovejoy T. E. & Nobre C. (2018) [Amazon’s Tipping Point](#), SCI. ADV. 4(2): eaat2340, 1 (“We believe that negative synergies between deforestation, climate change, and widespread use of fire indicate a tipping point for the Amazon system to flip to nonforest ecosystems in eastern, southern and central Amazonia at 20–25% deforestation.”). *See also* Wang S., Foster A., Lenz E. A., Kessler J. D., Stroeve J. C., Anderson L. O., Turetsky M., Betts R., Zou S., Liu W., Boos W. R., & Hausfather Z. (2023) [Mechanisms and Impacts of Earth System Tipping Elements](#), REV. GEOPHYS. 61(e2021RG000757): 1–81, 28 (“Ultimately, current research cannot eliminate the possibility that changes across the boreal zone due to a warming climate could act as a net positive climate feedback, thanks to the potential for permafrost thaw and wildfires to liberate the soil carbon that makes up the majority of stored carbon across this ecosystem. Consequently, boreal forest dieback and shifts represent one of the more potentially immediate and significant climate system tipping elements (Table 7).”).

¹⁶⁹ Griscom B. W., *et al.* (2017) [Natural climate solutions](#), PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 114(44): 11645–11650, 11645 (“Better stewardship of land is needed to achieve the Paris Climate Agreement goal of holding warming to below 2 °C; however, confusion persists about the specific set of land stewardship options available and their mitigation potential. To address this, we identify and quantify “natural climate solutions” (NCS): 20 conservation, restoration, and improved land management actions that increase carbon storage and/or avoid greenhouse gas emissions across global forests, wetlands, grasslands, and agricultural lands. We find that the maximum potential of NCS—when constrained by food security, fiber security, and biodiversity conservation—is 23.8 petagrams of CO₂ equivalent (PgCO_{2e}) y⁻¹ (95% CI 20.3–37.4). This is ≥30% higher than prior estimates, which did not include the full range of options and safeguards considered here. About half of this maximum (11.3 PgCO_{2e} y⁻¹) represents cost-effective climate mitigation, assuming the social cost of CO₂ pollution is ≥100 USD MgCO_{2e}⁻¹ by 2030. Natural climate solutions can provide 37% of cost-effective CO₂ mitigation needed through 2030 for a >66% chance of holding

warming to below 2 °C. One-third of this cost-effective NCS mitigation can be delivered at or below 10 USD MgCO₂⁻¹. Most NCS actions—if effectively implemented—also offer water filtration, flood buffering, soil health, biodiversity habitat, and enhanced climate resilience. Work remains to better constrain uncertainty of NCS mitigation estimates. Nevertheless, existing knowledge reported here provides a robust basis for immediate global action to improve ecosystem stewardship as a major solution to climate change.”). *See also* Moomaw W. R., Masino S. A., & Faison E. K. (2019) [Intact Forests in the United States: Proforestation Mitigates Climate Change and Serves the Greatest Good](#), Perspective, FRONT. FOR. GLOB. CHANGE 2(27): 1–10, 1 (“Climate change and loss of biodiversity are widely recognized as the foremost environmental challenges of our time. Forests annually sequester large quantities of atmospheric carbon dioxide (CO₂), and store carbon above and below ground for long periods of time. Intact forests—largely free from human intervention except primarily for trails and hazard removals—are the most carbon-dense and biodiverse terrestrial ecosystems, with additional benefits to society and the economy. ... The recent *1.5 Degree Warming Report* by the Intergovernmental Panel on Climate Change identifies *reforestation* and *afforestation* as important strategies to increase negative emissions, but they face significant challenges: afforestation requires an enormous amount of additional land, and neither strategy can remove sufficient carbon by growing young trees during the critical next decade(s). In contrast, growing existing forests intact to their ecological potential—termed *proforestation*—is a more effective, immediate, and low-cost approach that could be mobilized across suitable forests of all types. Proforestation serves the greatest public good by maximizing co-benefits such as nature-based biological carbon sequestration and unparalleled ecosystem services such as biodiversity enhancement, water and air quality, flood and erosion control, public health benefits, low impact recreation, and scenic beauty.”); and World Wildlife Fund (2020) [LIVING PLANET REPORT 2020 – BENDING THE CURVE OF BIODIVERSITY LOSS](#), Almond R. E. A., Grooten M., & Petersen T. (eds.), 6 (“The global Living Planet Index continues to decline. It shows an average 68% decrease in population sizes of mammals, birds, amphibians, reptiles and fish between 1970 and 2016. ... It matters because biodiversity is fundamental to human life on Earth, and the evidence is unequivocal – it is being destroyed by us at a rate unprecedented in history. Since the industrial revolution, human activities have increasingly destroyed and degraded forests, grasslands, wetlands and other important ecosystems, threatening human well-being. Seventy-five per cent of the Earth’s ice-free land surface has already been significantly altered, most of the oceans are polluted, and more than 85% of the area of wetlands has been lost.”).

¹⁷⁰ Rockström J., Beringer T., Hole D., Griscom B., Mascia M. B., Folke C., & Creutzig F. (2021) [We Need Biosphere Stewardship That Protects Carbon Sinks and Builds Resilience](#), PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 118(38): e2115218115, 1–8, 2 (“Using the reduced complexity climate model MAGICC6 (“Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change Version 6”), we examined changes in global mean temperature up till now and in the future under the RCP2.6 emission scenario—the only emission pathway that aligns with the Paris agreement—but assumed that ecosystems on land had stopped absorbing CO₂ from 1900 onwards. In such a world, global temperatures would have risen much faster (Fig. 1C, red line). In fact, we would have already crossed the 1.5 °C threshold, demonstrating that terrestrial ecosystems have reduced warming by at least 0.4 °C since 1900.”).

¹⁷¹ Duffy K. A., Schwalm C. R., Arcus V. L., Koch G. W., Liang L. L., & Schipper L. A. (2021) [How close are we to the temperature tipping point of the terrestrial biosphere?](#), SCI. ADV. 7(3): eaay1052, 1–8, 1 (“The temperature dependence of global photosynthesis and respiration determine land carbon sink strength. While the land sink currently mitigates ~30% of anthropogenic carbon emissions, it is unclear whether this ecosystem service will persist and, more specifically, what hard temperature limits, if any, regulate carbon uptake. Here, we use the largest continuous carbon flux monitoring network to construct the first observationally derived temperature response curves for global land carbon uptake. We show that the mean temperature of the warmest quarter (3-month period) passed the thermal maximum for photosynthesis during the past decade. At higher temperatures, respiration rates continue to rise in contrast to sharply declining rates of photosynthesis. Under business-as-usual emissions, this divergence elicits a near halving of the land sink strength by as early as 2040.”). *See also* Hubau W., *et al.* (2020) [Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests](#), NATURE 579: 80–87, 85 (“In summary, our results indicate that although intact tropical forests remain major stores of carbon and are key centres of biodiversity¹¹, their ability to sequester additional carbon in trees is waning. In the 1990s intact tropical forests removed 17% of anthropogenic CO₂ emissions. This declined to an estimated 6% in the 2010s, because the pan-tropical weighted average per unit area sink strength declined by 33%, forest area decreased by 19% and anthropogenic CO₂ emissions increased by 46%. Although tropical forests are more immediately threatened by deforestation⁴⁶ and degradation⁴⁷, and the future

carbon balance will also depend on secondary forest dynamics⁴⁸ and forest restoration plans⁴⁹, our analyses show that they are also affected by atmospheric chemistry and climatic changes. Given that the intact tropical forest carbon sink is set to end sooner than even the most pessimistic climate driven vegetation models predict^{4,5}, our analyses suggest that climate change impacts in the tropics may become more severe than predicted. Furthermore, the carbon balance of intact tropical forests will only stabilize once CO₂ concentrations and the climate stabilizes.”); and Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-26 (“Based on model projections, under the intermediate scenario that stabilizes atmospheric CO₂ concentrations this century (SSP2-4.5), the rates of CO₂ taken up by the land and oceans are projected to decrease in the second half of the 21st century (*high confidence*). Under the very low and low GHG emissions scenarios (SSP1-1.9, SSP1-2.6), where CO₂ concentrations peak and decline during the 21st century, land and oceans begin to take up less carbon in response to declining atmospheric CO₂ concentrations (*high confidence*) and turn into a weak net source by 2100 under SSP1-1.9 (*medium confidence*). It is very unlikely that the combined global land and ocean sink will turn into a source by 2100 under scenarios without net negative emissions³² (SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)... Additional ecosystem responses to warming not yet fully included in climate models, such as CO₂ and CH₄ fluxes from wetlands, permafrost thaw and wildfires, would further increase concentrations of these gases in the atmosphere (*high confidence*).”).

¹⁷² Goldstein A., Noon M. L., Ledezma J. C., Roehrdanz P. R., Raghav S., McGreevey M., Stone C., Shrestha S., Golden Kroner R., Hole D., & Turner W. (2021) [IRRECOVERABLE CARBON: THE PLACES WE MUST PROTECT TO AVERT CLIMATE CATASTROPHE](#), Conservation International, 7 (“‘Irrecoverable carbon’ refers to the vast stores of carbon in nature that are vulnerable to release from human activity and, if lost, could not be restored by 2050 — when the world must reach net-zero emissions to avoid the worst impacts of climate change... There are high concentrations of irrecoverable carbon in the Amazon (31.5 Gt), the Congo Basin (8.1 Gt), and New Guinea (7.3 Gt). Other important irrecoverable carbon reserves are located in the Pacific Northwest of North America, the Valdivian forests of Chile, the mangroves and swamp forests of Guyana, the peatlands of Northern Scotland, Niger Delta’s mangroves, Cambodia’s Tonle Sap Lake, the Scandinavian and Siberian boreal forests, and the eucalyptus forest of Southeast Australia, among others.”). See also Goldstein A., et al. (2020) [Protecting irrecoverable carbon in Earth’s ecosystems](#), NAT. CLIM. CHANGE 10(4): 287–295; and Noon M. L., Goldstein A., Ledezma J. C., Roehrdanz P. R., Cook-Patton S. C., Spawn-Lee S. A., Wright T. M., Gonzalez-Roglich M., Hole D. G., Rockström J., & Turner W. R. (2021) [Mapping the irrecoverable carbon in Earth’s ecosystems](#), NAT. SUSTAIN. 5: 37–46.

¹⁷³ Goldstein A., Noon M. L., Ledezma J. C., Roehrdanz P. R., Raghav S., McGreevey M., Stone C., Shrestha S., Golden Kroner R., Hole D., & Turner W. (2021) [IRRECOVERABLE CARBON: THE PLACES WE MUST PROTECT TO AVERT CLIMATE CATASTROPHE](#), Conservation International, 7 (“‘Irrecoverable carbon’ refers to the vast stores of carbon in nature that are vulnerable to release from human activity and, if lost, could not be restored by 2050 — when the world must reach net-zero emissions to avoid the worst impacts of climate change... There are high concentrations of irrecoverable carbon in the Amazon (31.5 Gt), the Congo Basin (8.1 Gt), and New Guinea (7.3 Gt). Other important irrecoverable carbon reserves are located in the Pacific Northwest of North America, the Valdivian forests of Chile, the mangroves and swamp forests of Guyana, the peatlands of Northern Scotland, Niger Delta’s mangroves, Cambodia’s Tonle Sap Lake, the Scandinavian and Siberian boreal forests, and the eucalyptus forest of Southeast Australia, among others.”). See also Goldstein A., et al. (2020) [Protecting irrecoverable carbon in Earth’s ecosystems](#), NAT. CLIM. CHANGE 10(4): 287–295; and Noon M. L., Goldstein A., Ledezma J. C., Roehrdanz P. R., Cook-Patton S. C., Spawn-Lee S. A., Wright T. M., Gonzalez-Roglich M., Hole D. G., Rockström J., & Turner W. R. (2021) [Mapping the irrecoverable carbon in Earth’s ecosystems](#), NAT. SUSTAIN. 5: 37–46.

¹⁷⁴ Griscom B. W., et al. (2017) [Natural climate solutions](#), PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 114(44): 11645–11650, 11645 (“Better stewardship of land is needed to achieve the Paris Climate Agreement goal of holding warming to below 2 °C; however, confusion persists about the specific set of land stewardship options available and their mitigation potential. To address this, we identify and quantify “natural climate solutions” (NCS): 20 conservation, restoration, and improved land management actions that increase carbon storage and/or avoid greenhouse gas emissions across global forests, wetlands, grasslands, and agricultural lands. We find that the maximum potential of NCS—when constrained by food security, fiber security, and biodiversity conservation—is 23.8 petagrams of CO₂ equivalent

(PgCO_{2e}) y⁻¹ (95% CI 20.3–37.4). This is ≥30% higher than prior estimates, which did not include the full range of options and safeguards considered here. About half of this maximum (11.3 PgCO_{2e} y⁻¹) represents cost-effective climate mitigation, assuming the social cost of CO₂ pollution is ≥100 USD MgCO_{2e}⁻¹ by 2030. Natural climate solutions can provide 37% of cost-effective CO₂ mitigation needed through 2030 for a >66% chance of holding warming to below 2 °C. One-third of this cost-effective NCS mitigation can be delivered at or below 10 USD MgCO₂⁻¹. Most NCS actions—if effectively implemented—also offer water filtration, flood buffering, soil health, biodiversity habitat, and enhanced climate resilience. Work remains to better constrain uncertainty of NCS mitigation estimates. Nevertheless, existing knowledge reported here provides a robust basis for immediate global action to improve ecosystem stewardship as a major solution to climate change.”). *See also* Moomaw W. R., Masino S. A., & Faison E. K. (2019) [Intact Forests in the United States: Proforestation Mitigates Climate Change and Serves the Greatest Good](#), *Perspective*, *FRONT. FOR. GLOB. CHANGE* 2(27): 1–10, 1 (“Climate change and loss of biodiversity are widely recognized as the foremost environmental challenges of our time. Forests annually sequester large quantities of atmospheric carbon dioxide (CO₂), and store carbon above and below ground for long periods of time. Intact forests—largely free from human intervention except primarily for trails and hazard removals—are the most carbon-dense and biodiverse terrestrial ecosystems, with additional benefits to society and the economy. ... The recent *1.5 Degree Warming Report* by the Intergovernmental Panel on Climate Change identifies *reforestation* and *afforestation* as important strategies to increase negative emissions, but they face significant challenges: afforestation requires an enormous amount of additional land, and neither strategy can remove sufficient carbon by growing young trees during the critical next decade(s). In contrast, growing existing forests intact to their ecological potential—termed *proforestation*—is a more effective, immediate, and low-cost approach that could be mobilized across suitable forests of all types. Proforestation serves the greatest public good by maximizing co-benefits such as nature-based biological carbon sequestration and unparalleled ecosystem services such as biodiversity enhancement, water and air quality, flood and erosion control, public health benefits, low impact recreation, and scenic beauty.”); *and* World Wildlife Fund (2020) [Living Planet Report 2020 – Bending the curve of biodiversity loss](#), Almond R. E. A., Grooten M., & Petersen T. (eds.), 5 (“The global Living Planet Index continues to decline. It shows an average 68% decrease in population sizes of mammals, birds, amphibians, reptiles and fish between 1970 and 2016. ... It matters because biodiversity is fundamental to human life on Earth, and the evidence is unequivocal – it is being destroyed by us at a rate unprecedented in history. Since the industrial revolution, human activities have increasingly destroyed and degraded forests, grasslands, wetlands and other important ecosystems, threatening human well-being. Seventy-five per cent of the Earth’s ice-free land surface has already been significantly altered, most of the oceans are polluted, and more than 85% of the area of wetlands has been lost.”).

¹⁷⁵ Cuadros A. (4 January 2023) [Has the Amazon Reached Its ‘Tipping Point’?](#), *THE NEW YORK TIMES* (“For all the slashing and burning of recent years, the ecosystem still stores about 120 billion tons of carbon in its trunks, branches, vines and soil — the equivalent of about ten years of human emissions. If all of that carbon is released, it could warm the planet by as much as 0.3 degrees Celsius. According to the Princeton ecologist Stephen Pacala, this alone would probably make the Paris Agreement — the international accord to limit warming since preindustrial times to 2 degrees — “impossible to achieve.” Which, in turn, may mean that other climate tipping points are breached around the world. As the British scientist Tim Lenton put it to me, “The Amazon feeds back to everything.”).

¹⁷⁶ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuví N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) [Chapter 12: Central and South America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), *Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1693 (“**The positive feedback between climate change and land use change, particularly deforestation, is projected to increase the threat to the Amazon forest, resulting in the increase of fire occurrence, forest degradation (high confidence) and long-term loss of forest structure (medium confidence).** The combined effect of both impacts will lead to a long-term decrease in carbon stocks in forest biomass, compromising Amazonia’s role as a carbon sink, largely conditioned on the forest’s responses to elevated atmospheric CO₂ (*medium confidence*). The southern portion of the Amazon has become a net carbon source to the atmosphere in the past decade (*high confidence*).”). *See also* Gatti L. V., *et al.* (2021) [Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change](#), *NATURE* 595: 388–393, 389, 390 (“Vertically averaged ΔVP values, which are

proportional to surface flux, suggest that ALF-SE [southeastern Amazon] has the largest CO₂ emission to the atmosphere, followed by SAN-NE [northeastern Amazon]. By contrast, ΔVP values for the western sites RBA-SWC [southwestern-central Amazon] and TAB_TEF-NWC [northwestern-central Amazonia] indicate near-neutral C balance or C sinks.”; “Over the nine years studied (2010–2018), the FC_{NBE} value for ALF-SE [southeastern Amazon] indicates that it is a steadily increasing source [of carbon], at a rate of $0.036 \pm 0.015 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (Pearson’s correlation, $r = 0.68$, $P = 0.045$) (Extended Data Fig. 5a).”.

¹⁷⁷ World Meteorological Organization (2023) [STATE OF THE CLIMATE IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2022](#), No. 1322, 7 (“The 2022 mean temperature in LAC was between the 12th and 21st highest on record, depending on the data set used, close to the 1991–2020 average ($-0.06 \text{ }^{\circ}\text{C}$ to $0.10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) and $0.55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [$0.46 \text{ }^{\circ}\text{C}$ to $0.70 \text{ }^{\circ}\text{C}$] above the 1961–1990 average (Table 1). The annual mean temperature anomalies relative to 1991–2020 across the LAC region are shown in Figure 3 and Table 1 (see details regarding the data sets in the Data sets and methods section). Warming was less pronounced in the region in 2022 compared to 2021, and especially when compared to 2020 (which was one of the three warmest years on record). The 1991–2022 period shows the highest warmest trend (about $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ or higher per decade) since 1900 in the LAC region (compared with the previous 30-year periods of 1900–1930, 1931–1960, 1961–1990).”).

¹⁷⁸ Lovejoy T. E. & Nobre C. (2018) [Amazon’s Tipping Point](#), SCI. ADV. 4(2): eaat2340, 1 (“We believe that negative synergies between deforestation, climate change, and widespread use of fire indicate a tipping point for the Amazon system to flip to nonforest ecosystems in eastern, southern and central Amazonia at 20–25% deforestation.”). See also Hoegh-Guldberg O., et al. (2018) [Chapter 3: Impacts of 1.5 °C of Global Warming on Natural and Human Systems](#), in [GLOBAL WARMING OF 1.5 °C, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change](#), Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 3-263 (“Global warming of 3°C is projected to reduce the extent of tropical rainforest in Central America, with biomass being reduced by about 40%, which can lead to a large replacement of rainforest by savanna and grassland (Lyra et al., 2017). Overall, modelling studies (Huntingford et al., 2013; Nobre et al., 2016) and observational constraints (Cox et al., 2013) suggest that pronounced rainforest dieback may only be triggered at 3°C – 4°C (medium confidence), although pronounced biomass losses may occur at 1.5°C – 2°C of global warming.”).

¹⁷⁹ Taylor L. (5 September 2022) [The Amazon rainforest has already reached a crucial tipping point](#), NEW SCIENTIST (“Marlene Quintanilla at the Amazon Geo-Referenced Socio-Environmental Information Network (RAISG) and her colleagues, working in partnership with various groups, including the Coordinator of Indigenous Organizations of the Amazon River Basin, used forest coverage data to map how much of the Amazon was lost between 1985 and 2020 and also looked at forest density, rainfall patterns and carbon storage. ...The report finds that 33 per cent of the Amazon remains pristine and 41 per cent of areas have low degradation and could restore themselves. But 26 per cent of areas have been found to have gone too far to restore themselves: 20 per cent is lost entirely and 6 per cent is highly degraded and would need human support to be restored.”). See also Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) [Climate tipping points—too risky to bet against](#), Comment, NATURE, 575: 592–595, 593 (“Estimates of where an Amazon tipping point could lie range from 40% deforestation to just 30% forest-cover loss. About 17% has been lost since 1970. The rate of deforestation varies with changes in policy. Finding the tipping point requires models that include deforestation and climate change as interacting drivers, and that incorporate fire and climate feedbacks as interacting tipping mechanisms across scales.”).

¹⁸⁰ Douville H., et al. (2021) [Chapter 8: Water Cycle Changes](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change](#), Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 8-112 (“Both deforestation and drying are projected to increase by 2100, resulting in a worst-case scenario of up to a 50% loss in forest cover by 2050 (Soares-Filho et al., 2006; Boisier et al., 2015; Steege et al., 2015; Gomes et al., 2019).”).

¹⁸¹ Wang-Erlandsson L., et al. (2022) [A planetary boundary for green water](#), NAT. REV. EARTH ENVIRON. 3: 380–392, 380 (“Green water — terrestrial precipitation, evaporation and soil moisture — is fundamental to Earth system dynamics and is now extensively perturbed by human pressures at continental to planetary scales. However, green water lacks explicit consideration in the existing planetary boundaries framework that demarcates a global safe operating space for humanity. In this Perspective, we propose a green water planetary boundary and estimate its current

status. The green water planetary boundary can be represented by the percentage of ice-free land area on which root-zone soil moisture deviates from Holocene variability for any month of the year. Provisional estimates of departures from Holocene-like conditions, alongside evidence of widespread deterioration in Earth system functioning, indicate that the green water planetary boundary is already transgressed. Moving forward, research needs to address and account for the role of root-zone soil moisture for Earth system resilience in view of ecohydrological, hydroclimatic and sociohydrological interactions.”); *discussed in* Stockholm Resilience Center (26 April 2022) [Freshwater boundary exceeds safe limits](#) (“Now researchers have explored the water boundary in more detail. The authors argue that previous assessments did not sufficiently capture the role of green water and particularly soil moisture for ensuring the resilience of the biosphere, for securing land carbon sinks, and for regulating atmospheric circulation. “The Amazon rainforest depends on soil moisture for its survival. But there is evidence that parts of the Amazon are drying out. The forest is losing soil moisture as a result of climate change and deforestation,” says Arne Tobian, second author and PhD candidate at the Stockholm Resilience Centre and Potsdam Institute for Climate Impact Research. “These changes are potentially pushing the Amazon closer to a tipping point where large parts could switch from rainforest to savannah-like states,” he adds.”).

¹⁸² Boulton C. A., Lenton T. M., & Boers N. (2022) [Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s](#), NAT. CLIM. CHANG. 12(3): 271–78, 277 (“Other factors, including rising atmospheric temperatures in response to anthropogenic greenhouse gas emissions, may additionally have negative effects on Amazon resilience (and are contributing to the warming of northern tropical Atlantic SSTs; Fig. 6a). Furthermore, the rapid change in climate is triggering ecological changes but ecosystems are having difficulties in keeping pace. In particular, the replacement of drought-sensitive tree species by drought-resistant ones is happening slower than changes in (hydro)meteorological conditions⁵⁰, potentially reducing forest resilience further. In summary, we have revealed empirical evidence that the Amazon rainforest has been losing resilience since the early 2000s, risking dieback with profound implications for biodiversity, carbon storage and climate change at a global scale. We further provided empirical evidence suggesting that overall drier conditions, culminating in three severe drought events, combined with pronounced increases in human land-use activity in the Amazon, probably played a crucial role in the observed resilience loss. The amplified loss of Amazon resilience in areas closer to human land use suggests that reducing deforestation will not just protect the parts of the forest that are directly threatened but also benefit Amazon rainforest resilience over much larger spatial scales.”).

¹⁸³ Lenton T. M., Held H., Kriegler E., Hall J. W., Lucht W., Rahmstorf S., & Schellnhuber H. J. (2008) [Tipping elements in the Earth’s climate system](#), PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 105(6): 1786–1793, 1790 (“A large fraction of precipitation in the Amazon basin is recycled, and, therefore, simulations of Amazon deforestation typically generate 20–30% reductions in precipitation (78), lengthening of the dry season, and increases in summer temperatures (79) that would make it difficult for the forest to reestablish, and suggest the system may exhibit bistability.”). *See also* Staal A., Fetzer I., Wang-Erlandsson L., Bosmans J. H. C., Dekker S. C., van Nes E. H., Rockström J., & Tuinenburg O. A. (2020) [Hysteresis of tropical forests in the 21st century](#), NAT. COMMUN. 11(4978): 1–8, 5 (“Whether the Amazon in particular is an important global ‘tipping element’ in the Earth system is a question of great scientific and societal interest^{36,37}. Despite our incomplete understanding of Amazon tipping, it is generally considered to be true that the forest’s role in the hydrological cycle is so large that deforestation and/or climate change may trigger a tipping point^{2,36–38}. More recently, the possibility of fire-induced tipping has also been suggested^{5,6}. Although fire occurs at a local scale, a considerable portion of the Amazon would be susceptible to this kind of tipping; by accounting for the feedbacks at both local and regional scales, it becomes more likely that the Amazon is a tipping element. Although under the current climate a majority of the Amazon forest still appears resilient to disturbance (also see ref. 39), we show that this resilience may deteriorate as a result of redistributions of rainfall due to global climate change.”).

¹⁸⁴ Gatti L. V., *et al.* (2021) [Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change](#), NATURE 595(7867): 388–393, 388 (“Southeastern Amazonia, in particular, acts as a net carbon source (total carbon flux minus fire emissions) to the atmosphere. Over the past 40 years, eastern Amazonia has been subjected to more deforestation, warming and moisture stress than the western part, especially during the dry season... the intensification of the dry season and an increase in deforestation seem to promote ecosystem stress, increase in fire occurrence, and higher carbon emissions in the eastern Amazon. This is in line with recent studies that indicate an increase in tree mortality and a reduction in photosynthesis as a result of climatic changes across Amazonia.”). *See also* Brienen R. J. W., *et al.*

(2015) [Long-term decline of the Amazon carbon sink](#), NATURE 519(7543): 344–348, 344 (“While this analysis confirms that Amazon forests have acted as a long-term net biomass sink, we find a long-term decreasing trend of carbon accumulation. Rates of net increase in above-ground biomass declined by one-third during the past decade compared to the 1990s. This is a consequence of growth rate increases levelling off recently, while biomass mortality persistently increased throughout, leading to a shortening of carbon residence times.”).

¹⁸⁵ Clarke B., Barnes C., Rodrigues R., Zachariah M., Stewart S., Raju E., Baumgart N., Heinrich D., Libonati R., Santos D., Albuquerque R., Muniz Alves L., & Otto F. (2024) [Climate change, not El Niño, main driver of exceptional drought in highly vulnerable Amazon River Basin](#), World Weather Attribution, 3–4 (“Since June 2023, the Amazon River Basin (ARB) has received significantly below average rainfall. Initially, the northern half of the basin was most affected by this, but from September the entire basin has experienced a significant moisture deficit. ... As of January 2024, large parts of the ARB are in a state of exceptional meteorological, agricultural and ecological drought (WMO, 2016). ... The drought has caused the lowest water levels in 120 years, when measurements began, in many of the tributaries in the Amazon River (nature, 2023).”); 4–5 (“The ARB is extremely large, making up more than a third of the South American continent by land area, stretching from the high Andes in Peru and Colombia down to low-lying coastal regions of eastern Brazil, and is largely a tropical climate. Rainforest covers approximately 83% of the basin, and spatial variability of rainfall over the region is partly determined by feedbacks between the land surface and atmosphere (Paredes-Trejo et al., 2021).”); 34 (“The 2023 Amazon drought is frequently cited as the most extreme on the historical record.”).

¹⁸⁶ Clarke B., Barnes C., Rodrigues R., Zachariah M., Stewart S., Raju E., Baumgart N., Heinrich D., Libonati R., Santos D., Albuquerque R., Muniz Alves L., & Otto F. (2024) [Climate change, not El Niño, main driver of exceptional drought in highly vulnerable Amazon River Basin](#), World Weather Attribution, 4–5 (“Finally, while the rate of deforestation has decreased in the past year, multiple years of heightened deforestation previously have resulted in a less resilient and drier land surface (Rodrigues, 2023). Moreover, droughts in the northwestern Amazon such as this can be especially devastating to the forest and potentially accelerate a tipping point because the forest there is less resilient to rainfall variability than that in the eastern Amazon, which experiences more variability (Ciemer et al., 2019; Hirota et al., 2021).”). See also Armstrong McKay D. I. & Loriani S. (eds.) (2023) [Section 1: Earth systems tipping points](#), in [GLOBAL TIPPING POINTS REPORT 2023](#), Lenton T. M., et al. (eds.), 41 (“Recent CMIP6 models indicate that localised shifts in peripheral parts of the Amazon forest system are more likely than a large-scale tipping event (IPCC AR6 WG1 Ch5, 2021; Parry et al., 2022). However, the latter cannot be ruled out (Hirota et al., 2021) because several compounding and possibly synergistic disturbances (e.g. combining an extreme hot drought with forest fires) may play a role in reducing forest resilience, with greater resilience loss closer to human activities (Boulton et al., 2022). Such synergies are generally not considered in Earth system models (Willcock et al., 2023).”); 113 (“For example, if the system is perturbed by something like an extreme weather event (e.g. a drought in the Amazon rainforest) such that it causes tipping by pushing the system past the ability for restoring feedbacks to return the system back to the previous state, CSD will not occur.”).

¹⁸⁷ United States Congressional Research Service (2023) [U.S. Forest Carbon Data: In Brief](#), 2 (“Carbon flux is the net annual change in carbon stocks. The flux estimate for any given year (e.g., 2020) is the change between stock estimates for that year (2020) and the following year (2021). Negative flux values indicate more carbon was removed from the atmosphere and sequestered than was released in that year (e.g., net carbon sink); net negative flux is typically called *net sequestration* (or sometimes just *sequestration*). Positive flux values indicate more carbon was released than was sequestered in that year (e.g., *net carbon source*). According to the *Inventory*, U.S. forests were a net carbon sink in 2021, having sequestered 794 MMT CO₂ equivalents (or 216 MMT of carbon) that year (see **Figure 3** for net sequestration by MMT CO₂ equivalents, **Table 2** for flux data by MMT CO₂ equivalents, and **Table 3** for flux data by MMT of carbon). This total represents an offset of approximately 13% of the gross greenhouse gas emissions from the United States in 2021.”)

¹⁸⁸ Zhuang Y., Fu R., Santer B. D., Dickinson R. E., & Hall A. (2021) [Quantifying contributions of natural variability and anthropogenic forcings on increased fire weather risk over the western United States](#), EARTH ATMOS. PLANET. SCI. 118(45): e2111875118, 1–9, 7 (“Overall, we find that over the period 1979 to 2020, anthropogenic warming has contributed at least twice as much as natural variability to the rapid increase of fire weather risk. Our observational

analogue-based attribution approach complements the estimates we obtain from global climate model simulations (10, 16, 28). Both methods constrain the range of the true contribution of anthropogenic forcing to the observed increase of VPD over the WUS. We estimate this range to be 0.33 to 0.42 hPa/decade or 68 to 88% of the observed trend. We have shown here that VPD is a robust, physically meaningful proxy for fire risk. During two specific extreme events—the August Complex fire and the California Creek fire in 2020—VPD values exceeded the highest values observed previously for similar atmospheric circulation patterns. For the August Complex “Gigafire” in the WUS, anthropogenic warming likely explains 50% of the unprecedented high VPD anomalies in the month of the fire’s occurrence (August 2020). On the August 16, 2020 start date of the August Complex fire and the September 4, 2020 start date of the California Creek fire, anthropogenic forcing likely contributed 32 and 52%, respectively, to the unprecedented high VPD’ at the beginning of these two extreme fire events”).

¹⁸⁹ Natural Resources Canada (2022) [THE STATE OF CANADA’S FORESTS: ANNUAL REPORT 2022](#), 27 (“With almost 362 million hectares (ha), Canada ranks as the country with the third- largest forest area in the world. Much of this forest grows in the boreal zone. There, over 280 million hectares of forest are interspersed with lakes, wetlands and other ecosystem types. According to Canada’s National Deforestation Monitoring System, the forest area of Canada is stable, with less than half of 1% deforested since 1990.”).

¹⁹⁰ Fletcher R. (12 February 2019) [Canada’s forests actually emit more carbon than they absorb — despite what you’ve heard on Facebook](#), CBC NEWS (“That’s because our trees, in particular, have actually hurt our bottom line. For the past 15 years, they’ve been “more of a source than a sink,” said Dominique Blain, a director in the science and technology branch of Environment and Climate Change Canada. Canada’s managed forests were a net contributor of roughly 78 megatonnes of emissions in 2016, the most recent year on record.”).

¹⁹¹ Wieting J. (2019) [Hidden, ignored and growing: B.C.’s forest carbon emissions](#), Sierra Club British Columbia, 1 (“These massive and growing forest emissions are a result of destructive logging, pine beetle outbreaks and wildfires. B.C.’s forests stopped absorbing more carbon than they release in the early 2000s. Uncounted forest emissions are now often greater than the total amount of emissions that are actually counted.”).

¹⁹² Caesar L., Rahmstorf S., Robinson A., Feulner G., & Saba V. (2018) [Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation](#), NATURE 556: 191–196, 195 (“We have also defined an improved SST-based AMOC index, which is optimized in its regional and seasonal coverage to reconstruct AMOC changes. Analysis of an ensemble of CMIP5 model simulations confirms that this index can very well reconstruct the long-term trend of the AMOC. We calibrated the observed AMOC decline to be 3 ± 1 Sv (around 15%) since the mid-twentieth century, and reconstructed the evolution of the AMOC for the period 1870–2016. For recent decades, our reconstruction of the AMOC evolution agrees with the results of several earlier studies using different methods, suggesting that our AMOC index can also reproduce interdecadal variations. Our findings show that in recent years the AMOC appears to have reached a new record low, consistent with the record-low annual SST in the subpolar Atlantic (since observations began in 1880) reported by the National Oceanic and Atmospheric Administration for 2015. Surface temperature proxy data for the subpolar Atlantic suggest that “the AMOC weakness after 1975 is an unprecedented event in the past millennium”⁷. This is consistent with the coral nitrogen-15 data that led Sherwood et al.²⁸ to conclude that “the persistence of the warm, nutrient-rich regime since the early 1970s is largely unique in the context of the last approximately 1,800yr”. Although long-term natural variations cannot be ruled out entirely^{29,30}, the AMOC decline since the 1950s is very likely to be largely anthropogenic, given that it is a feature predicted by climate models in response to rising CO₂ levels. This declining trend is superimposed by shorter-term (interdecadal) natural variability”).

¹⁹³ Whitmarsh F., Zika J., & Czaja A. (2015) [Ocean heat uptake and the global surface temperature record](#), Briefing paper No. 14, Grantham Institute, 2 (“It is likely that changes in the ocean have contributed significantly to the pause. Due to its large mass and high heat capacity, the ocean absorbs a substantial amount of heat. It is estimated that the earth gained 274 ZJ of heat energy between 1971 and 2010, of which around 90% was taken up by the ocean (figure 3)28,ii. According to one estimate, the top 2000 m of the ocean took up 240 ZJ of heat energy between 1955 and 2010, but only increased in temperature by about 0.09°C due to its high heat capacity¹⁴. If the lower 10 km of the atmosphere were able to absorb this same quantity of heat it would warm by 36°C.”).

¹⁹⁴ United Nations (2022) [THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS REPORT 2022](#), 53 (“Sea levels have already risen faster than in any preceding century. Projections show that sea level could rise 30 to 60 centimetres by 2100, even if greenhouse gas emissions are sharply reduced and global warming is limited to well below 2 °C. A rising sea level would lead to more frequent and severe coastal flooding and erosion. Ocean warming will also continue with increasingly intense and frequent marine heatwaves, ocean acidification and reduced oxygen. About 70 to 90 per cent of warm-water coral reefs will disappear even if the 1.5 °C threshold is reached; they would die off completely at the 2 °C level. These impacts are expected to occur at least throughout the rest of this century, threatening marine ecosystems and the more than 3 billion people who rely on the ocean for their livelihoods.”).

¹⁹⁵ Subramaniam A., Yager P. L., Carpenter E. J., Mahaffey C., Bjorkman K., Cooley S., Kustka A. B., Montoya J. P., Sanudo-Wilhelmy S. A., Shipe R., & Capone D. G. (2008) [Amazon River enhances diazotrophy and carbon sequestration in the tropical North Atlantic Ocean](#), PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 105(30): 10460–10465, 10460 (“The fresh water discharged by large rivers such as the Amazon is transported hundreds to thousands of kilometers away from the coast by surface plumes. The nutrients delivered by these river plumes contribute to enhanced primary production in the ocean, and the sinking flux of this new production results in carbon sequestration. Here, we report that the Amazon River plume supports N₂ fixation far from the mouth and provides important pathways for sequestration of atmospheric CO₂ in the western tropical North Atlantic (WTNA). We calculate that the sinking of carbon fixed by diazotrophs in the plume sequesters 1.7 Tmol of C annually, in addition to the sequestration of 0.6 Tmol of C yr⁻¹ of the new production supported by NO₃ delivered by the river.”).

¹⁹⁶ Subramaniam A., Yager P. L., Carpenter E. J., Mahaffey C., Bjorkman K., Cooley S., Kustka A. B., Montoya J. P., Sanudo-Wilhelmy S. A., Shipe R., & Capone D. G. (2008) [Amazon River enhances diazotrophy and carbon sequestration in the tropical North Atlantic Ocean](#), PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 105(30): 10460–10465, 10460 (“More importantly, our simulations caution against extreme exploitation of rivers for its far-reaching consequences on climate.”).

¹⁹⁷ Brodeur J., Cannizzo Z., Cross J., Davis J., DeAngelo B., Harris J., Kinkade C., Peth J., Samek K., Schub A., Stedman S.-M., Theuerkauf S., Vaughan L., & Wenzel L. (2022) [NOAA Blue Carbon White Paper](#), National Oceanic and Atmospheric Administration, 1 (“While coastal blue carbon habitats have been shown to sequester up to ten times as much carbon per equivalent area as tropical forests (4), making them some of the most efficient natural carbon sinks in the world, they cover only a relatively small portion (<1%) of the Earth’s surface. In the United States, it is estimated that coastal blue carbon habitats sequester a net quantity of 4.8 million metric tons (MMT) of carbon dioxide annually...”).

¹⁹⁸ United States White House (2021) [Executive Order on Tackling the Climate Crisis at Home and Abroad](#), Briefing Room (“Sec. 216. Conserving Our Nation’s Lands and Waters. (a) The Secretary of the Interior, in consultation with the Secretary of Agriculture, the Secretary of Commerce, the Chair of the Council on Environmental Quality, and the heads of other relevant agencies, shall submit a report to the Task Force within 90 days of the date of this order recommending steps that the United States should take, working with State, local, Tribal, and territorial governments, agricultural and forest landowners, fishermen, and other key stakeholders, to achieve the goal of conserving at least 30 percent of our lands and waters by 2030.”).

¹⁹⁹ United States Environmental Protection Agency (2019) [INVENTORY OF U.S. GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND SINKS, 1990-2017](#).

²⁰⁰ Blue Carbon Canada, [Evaluating the Current and Future Capacity for Natural Climate Solutions in Canada’s Oceans](#) (last visited 7 July 2023).

²⁰¹ Issifu I., Alava J. J., Lam V. W. Y., & Sumaila U. R. (2022) [Impact of Ocean Warming, Overfishing and Mercury on European Fisheries: A Risk Assessment and Policy Solution Framework](#), FRONT. MAR. SCI. 8: 1–13, 2 (“A combination of climate-related stresses and widespread over-exploitation of fisheries reduces the scope for adaptation and increases risks of stock collapse (Allison et al., 2009). Overfishing makes marine fisheries production more

vulnerable to ocean warming by compromising the resilience of many marine species to climate change, and continued warming will hinder efforts to rebuild overfished populations (Free et al., 2019). It can also exacerbate the mercury levels in some fish species.”).

²⁰² National Oceanic and Atmospheric Administration Fisheries (2023) [STATUS OF STOCKS 2022: ANNUAL REPORT TO CONGRESS ON THE STATUS OF U.S. FISHERIES](#), 10 (“Incorporating environmental data into stock assessments also provides essential data for fisheries managers. Researchers studying Pacific cod in Alaska recently found that bottom temperatures of 3-6 degrees Celsius are ideal for young fish to survive to adulthood. Incorporating bottom temperature data into stock assessments has allowed better predictions of Pacific cod spawning and improved planning for fishing seasons. Studies on the East Coast yielded similar findings. By incorporating bottom temperatures into stock assessments, scientists recently discovered that “cold pools” were essential to the survival of young yellowtail flounder off southern New England and the Mid-Atlantic. These findings show that integrating environmental data into stock assessments provides more accurate estimates of current and future stock size, giving fishery managers better tools to set appropriate catch limits.”).

²⁰³ National Oceanic and Atmospheric Administration Fisheries (2023) [STATUS OF STOCKS 2022: ANNUAL REPORT TO CONGRESS ON THE STATUS OF U.S. FISHERIES](#), 3 (“NMFS manages 492 stocks or stock complexes in 45 fishery management plans. At the end of 2022, the overfishing list included 24 stocks, the overfished list included 48 stocks, and two stocks were rebuilt. One of those stocks is considered rebuilt based on changes to its reference points. Since 2000, 49 stocks have been rebuilt.”).

²⁰⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) [Summary for Policymakers](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-10 (“It is *virtually certain* that hot extremes (including heatwaves) have become more frequent and more intense across most land regions since the 1950s, while cold extremes (including cold waves) have become less frequent and less severe, with *high confidence* that human-induced climate change is the main driver[14] of these changes. Some recent hot extremes observed over the past decade would have been *extremely unlikely* to occur without human influence on the climate system. Marine heatwaves have approximately doubled in frequency since the 1980s (*high confidence*), and human influence has *very likely* contributed to most of them since at least 2006.”).

²⁰⁵ Cissé G., McLeman R., Adams H., Aldunce P., Bowen K., Campbell-Lendrum D., Clayton S., Ebi K. L., Hess J., Huang C., Liu Q., McGregor G., Semenza J., & Tirado M. C. (2022) [Chapter 7: Health, Wellbeing, and the Changing Structure of Communities](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1060 (“The global magnitude of climate-sensitive diseases was estimated in 2019 to be 39,503,684 deaths (69.9% of total annual deaths) and 1,530,630,442 DALYs (Vos et al., 2020). Of these, cardiovascular diseases (CVDs) comprised the largest proportion of climate-sensitive diseases (32.8% of deaths and 15.5% DALYs). The next largest category consists of respiratory diseases – with chronic respiratory disease contributing to 7% of deaths and 4.1% of DALYs and respiratory infection and tuberculosis contributing to 6.5% of deaths and 6% of DALYs.”).

²⁰⁶ V20 Finance Ministers (12 November 2022) [New Health Data Shows Unabated Climate Change Will Cause 3.4 Million Deaths Per Year by Century End](#), Press Release (“Unabated climate change will cause 3.4 million deaths per year by the end of the Century, new data presented to COP27 today shows. Health-related deaths of the over-65s will increase by 1,540%, and in India alone there will be 1 million additional heat-related deaths by 2090, if no action to limit warming is taken, the data shows.”).

²⁰⁷ Yglesias-González M., Palmeiro-Silva Y., Sergeeva M., Cortés S., Hurtado-Epstein A., Buss D. F., Hartinger S. M., & Red de Clima y Salud de América Latina y el Caribe (2022) [Code Red for Health response in Latin America and the Caribbean: Enhancing peoples' health through climate action](#), LANCET REG. HEALTH AM. 11(100248): 1–8, 3 (“Dengue cases have almost tripled from 2000-2009 (6.78 million) to 2010-2019 (16.52 million) and the

largest record of cases occurred in 2019.”); *citing* Pan American Health Organization & World Health Organization, Dengue, PLISA Health Information for the Americas (*last visited* 24 May 2023)

²⁰⁸ Colón-González F. J., Harris I., Osborn T. J., São Bernardo C. S., Peres C. A., Hunter P. R., Warren R., van Vuurene D., & Lake I. R. (2018) [Limiting global-mean temperature increase to 1.5–2 °C could reduce the incidence and spatial spread of dengue fever in Latin America](#), *PROC. NAT’L. ACAD. SCI.* 115(24): 6243–6248, 6244 (“The number of dengue cases for the 2050s period was, on average, 260% larger than the 1961–1990 baseline scenario with about 6.9 million extra cases per year”).

²⁰⁹ Rosenberg R., Lindsey N., Fischer M., Gregory C. J., Hinckley A. F., Mead P. S., Paz-Bailey G., Waterman S. H., Drexler N. A., Kersh G. J., Hooks H., Partridge S. K., Visser S. N., Beard C. B., & Petersen L. R. (2018) [Vital Signs: Trends in Reported Vectorborne Disease Cases — United States and Territories, 2004–2016](#), *MORB. MORTAL WKLY. REP.* 67(17): 496–501, 496 (“A total 642,602 cases were reported. The number of annual reports of tickborne bacterial and protozoan diseases more than doubled during this period, from >22,000 in 2004 to >48,000 in 2016. Lyme disease accounted for 82% of all tickborne disease reports during 2004–2016. The occurrence of mosquito borne diseases was marked by virus epidemics. Transmission in Puerto Rico, the U.S. Virgin Islands, and American Samoa accounted for most reports of dengue, chikungunya, and Zika virus diseases; West Nile virus was endemic, and periodically epidemic, in the continental United States.”).

²¹⁰ Canadian Institute for Climate Choices (2021) [THE HEALTH COST OF CLIMATE CHANGE: HOW CANADA CAN ADAPT, PREPARE, AND SAVE LIVES](#), III (“Warming temperatures from climate change are creating ideal conditions for the spread of the ticks that carry Lyme disease into many parts of Canada where they have never been seen. We project that, under a low-emissions future, additional cases of Lyme disease due to demographic change and climate change will rise to about 8,500 annually by mid-century and 9,900 by the end of the century, up from an average of about 600 cases per year.”).

²¹¹ Zhao Q., *et al.* (2021) [Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study](#), *LANCET PLAN. HEALTH* 5(7): E415–E425, E416 (“We found that 5 083 173 deaths were associated with non- optimal temperatures per year, accounting for 9.43% of all deaths and equating to 74 excess deaths per 100 000 residents.”).

²¹² Takahashi K., Honda Y., & Emori S. (2007) [Assessing Mortality Risk from Heat Stress due to Global Warming](#), *J. RISK RES.* 10(3): 339–354, 353 (“Assuming that no adaptation or acclimation takes place, when the rates of change of excess mortality due to heat stress are examined by country, the results of our calculations show increases of approximately 100% to 1000%.”).

²¹³ Zhao Q., *et al.* (2021) [Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study](#), *LANCET PLAN. HEALTH* 5(7): E415–E425, E418 (Table 1).

²¹⁴ Huang C., Barnett A. G., Wang X., Vaneckova P., FitzGerald G., & Tong S. (2011) [Projecting Future Heat-Related Mortality under Climate Change Scenarios: A Systematic Review](#), *ENVIRON. HEALTH PERSPECT.* 119(12): 1681–1690, 1683 (“In three cities in Canada, Doyon *et al.* (2008) projected a significant increase in temperature-related mortality in summer that was not offset by a significant but smaller estimated decrease in fall and winter mortality. Cheng *et al.* (2009b) projected that heat-related mortality in four Canadian cities would more than double by the 2050s and triple by the 2080s, and that cold-related mortality could decrease by 45–60% by the 2050s and by 60–70% by the 2080s.”).

²¹⁵ Shindell D., Zhang Y., Scott M., Ru M., Stark K., & Ebi K. L. (2020) [The Effects of Heat Exposure on Human Mortality Throughout the United States](#), *GEOHEALTH* 4(4): 1–11, 8 (“Finally, the World Health Organization projected increases in heat-related deaths in North America under a fairly high-warming scenario, with totals of 7,300 additional deaths in the 2030s and 16,000 in the 2050s relative to 1961–1990 without adaptation (World Health Organization, 2014). These increases are qualitatively similar to results obtained here, but difficult to compare quantitatively owing

to methodological differences. In particular, the World Health Organization study included only persons aged 65 and older, used the same ERF everywhere, and analyzed impacts in different years and over a larger area.”).

²¹⁶ Tuholske C., Caylor K., Funk C., Verdin A., Sweeney S., Grace K., Peterson P., & Evans T. (2021) [Global urban population exposure to extreme heat](#), PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 118(41): 1–9, 2 (“Global exposure increased 199% in 34 y, from 40 billion person-days in 1983 to 119 billion person-days in 2016, growing by 2.1 billion person-days/yr–1 (Fig. 1A). Population growth (Fig. 1B) and total urban warming (Fig. 1C) contributed 66% (1.5 billion person-days/yr–1) and 34% (0.7 billion person-days/yr–1) to the annual rate of increase in exposure, respectively. That is, total urban warming elevated the global annual rate of increase in exposure by 52% compared to urban population growth alone.”).

²¹⁷ Li D., Yuan J., & Kopp R. E. (2020) [Escalating global exposure to compound heat-humidity extremes with warming](#), ENVIRON. RES. LETT. 15(6): 1–11, 1 (“Maintaining the current population distribution, this exposure is projected to increase to 508 million with 1.5 °C of warming, 789 million with 2.0 °C of warming, and 1.22 billion with 3.0 °C of warming (similar to late-century warming projected based on current mitigation policies.”).

²¹⁸ Tuholske C., Caylor K., Funk C., Verdin A., Sweeney S., Grace K., Peterson P., & Evans T. (2021) [Global urban population exposure to extreme heat](#), PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 118(41): 1–9, Appendix (Table S2).

²¹⁹ Feron S., Cordero R. R., Damiani A., Llanillo P. J., Jorquera J., Sepulveda E., Asencio V., Laroze D., Labbe F., Carrasco J., & Torres G. (2018) [Observations and Projections of Heat Waves in South America](#), SCI. REP. 9(8173): 1–15, 12 (“Under the RCP4.5 scenario, by mid-century, the number of HWs per season (HWN) is expected to at least double in southern SA, while they may increase 5–10 times or more in the Atacama Desert and along the coastline of northern SA. Indeed, by mid-century HWN estimates are expected to range from less than 2 in southern SA to more than 3 in northern SA and the Atacama Desert.”).

²²⁰ Tuholske C., Caylor K., Funk C., Verdin A., Sweeney S., Grace K., Peterson P., & Evans T. (2021) [Global urban population exposure to extreme heat](#), PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 118(41): 1–9, Appendix (Table S2).

²²¹ First Street Foundation (2022) [THE SIXTH NATIONAL RISK ASSESSMENT: HAZARDOUS HEAT](#), 4 (“The results indicate that the incidence of extreme heat is growing across the country, both in absolute and relative terms. In absolute terms, the incidence of heat that exceeds the threshold of the National Weather Service’s (NWS) highest category for heat, called “Extreme Danger” (Heat Index above 125°F) is expected to impact about 8 million people this year, increasing to about 107 million people in 2053, an increase of 13 times over 30 years. This increase in “Extreme Danger Days” is concentrated in the middle of the country, in areas where there are no coastal influences to mitigate extreme temperatures.”).

²²² Parsons L. A., Jung J., Masuda Y. J., Vargas Zeppetello L. R., Wolff N. H., Kroeger T., Battisti D. S., & Spector J. T. (2021) [Tropical deforestation accelerates local warming and loss of safe outdoor working hours](#), ONE EARTH 4(12): 1730–1740, 1734 (“Our results indicate that recent tropical deforestation is associated with losses of >0.5 h per day of safe work time for \$2.8 million outdoor workers. To contextualize our findings, we compare these results with the findings from the 2019 Lancet Countdown on Health and Climate Change,²⁴ which reports that humid heat exposure in 2018 led to 133.6 billion potential global lost work hours (an increase of \$45 billion global lost work hours since 2000).

²²³ Parsons L. A., Jung J., Masuda Y. J., Vargas Zeppetello L. R., Wolff N. H., Kroeger T., Battisti D. S., & Spector J. T. (2021) [Tropical deforestation accelerates local warming and loss of safe outdoor working hours](#), ONE EARTH 4(12): 1730–1740, Supplemental Information, Figure 6.

²²⁴ Hartinger S. M., *et al.* (2023) [The 2022 South America report of The Lancet Countdown on health and climate change: trust the science. Now that we know, we must act](#), LANCET REG. HEALTH AM. 20(100470): 1–35, 24 (“In 2021, average potential income loss from heat-related labour capacity reduction represented 1.60% of national GDPs in SA, with Venezuela having the highest total potential loss as a proportion of GDP (10.6%) and Chile the lowest

(0.02%) (Fig. 8). Total potential income losses that year amounted to US\$22 billion (0.68% of the regional GDP). The highest potential income losses are estimated to occur in the construction and agriculture sectors, where the work demands more physical power, and where workers are the most exposed to the elements and have limited capacity to shelter. In 2021, the countries with the highest total losses were Brazil and Venezuela with US\$11.2 and US\$4.8 billion, respectively.”).

²²⁵ Environmental Protection Agency (2015) [CLIMATE CHANGE AND LABOR](#), 28 (“In 2100, over 1.8 billion labor hours across the workforce are projected to be lost due to unsuitable working conditions (95% confidence interval of 1.2-2.4 billion). These lost hours would be very costly, totalling over \$170 billion in lost wages in 2100 (95% confidence interval of \$110-\$220 billion”).

²²⁶ Rentschler J. & Leonova N. (2022) [AIR POLLUTION AND POVERTY: PM2.5 EXPOSURE IN 211 COUNTRIES AND TERRITORIES](#), Policy Research Working Paper 10005, World Bank, 1 (“This study contributes (i) updated global exposure estimates for the World Health Organizations’s 2021 revised fine particulate matter (PM2.5) thresholds, and (ii) estimates of the number of poor people exposed to unsafe PM2.5 concentrations. It shows that 7.28 billion people, or 94 percent of the world population, are directly exposed to unsafe average annual PM2.5 concentrations. Low- and middle-income countries account for 80 percent of people exposed to unsafe PM2.5 levels”).

²²⁷ Silva R. A., *et al.* (2018) [Future Global Mortality from Changes in Air Pollution Attributable to Climate Change](#), NAT. CLIM. CHANG. 7(9): 647–651, 650 (“We estimate 3,340 (–30,300 to 47,100) ozone-related deaths in 2030, relative to 2000 climate, and 43,600 (–195,000 to 237,000) in 2100 (14% of the increase in global ozone-related mortality). For PM2.5, we estimate 55,600 (–34,300 to 164,000) deaths in 2030 and 215,000 (–76,100 to 595,000) in 2100 (countering by 16% the global decrease in PM2.5-related mortality.”).

²²⁸ van der Wall E. E. (2015) [Air pollution: 6.6 million premature deaths in 2050!](#), NETH. HEART J. 23(12): 557–558, 557 (“Model projections based on a business-as-usual emission scenario indicate that the contribution of outdoor air pollution to premature mortality could double by 2050. The authors of the Nature paper foresee therefore that, if no further interventions are undertaken, the annual toll from polluted air may lead to 6.6 million premature deaths by 2050, with the biggest increase in Asia.”).

²²⁹ Glavinskas V. (4 May 2023) [A game-changing partnership takes on air pollution in Latin America and the Caribbean](#), ENVIRONMENTAL DEFENSE FUND (“Around 80% of people in Latin America live in cities. And because pollution in those cities is high, it means about 500 million people are breathing air that exceeds the World Health Organization’s guidelines for pollutants like nitrogen dioxide, soot and ground-level ozone”).

²³⁰ American Lung Association Ozone Pollution Trends (*last visited* 7 August 2023) (“Exposure to unhealthy levels of ozone air pollution makes breathing difficult for more Americans all across the country than any other single pollutant. In the years 2019, 2020 and 2021, some 103 million people lived in the 124 counties that earned an F for ozone. More than 30% of the nation’s population, including 23.6 million children, 15.4 million people age 65 or older, and millions in other groups at high risk of health harm, are exposed to high levels of ozone on enough days to earn the air they breathe a failing grade.”).

²³¹ Internal Displacement Monitoring Centre (2023) [2022 GLOBAL REPORT ON INTERNAL DISPLACEMENT](#), 11 (*see* Global figures at a glance, showing internal displacements in 2021: 38 million internal displacements (14.4m by conflict and violence, 23.7m by disasters)).

²³² Institute for Economics & Peace (2020) [ECOLOGICAL THREAT REGISTER 2020: UNDERSTANDING ECOLOGICAL THREATS, RESILIENCE AND PEACE](#), 7 (“One hundred and forty-one countries are exposed to at least one ecological threat, with 19 countries facing four or more threats. 6.4 billion people live in countries which are exposed to medium to high ecological threats. An estimated 1.2 billion people are at risk of displacement by 2050.”).

²³³ Internal Displacement Monitoring Centre (2023) [2022 GLOBAL REPORT ON INTERNAL DISPLACEMENT](#), 11 (see Global figures at a glance, showing internal displacements in 2021: The Americas (381,000 by conflict and violence, 1,659,000 by disasters)).

²³⁴ World Bank (2018) [Internal Climate Migration in Latin America](#), Groundswell Policy Note #3, 2 (“Latin America could see up to 10.6 million climate migrants by 2050.”).

²³⁵ Wing I. S., De Cian E., & Mistry M. N. (2021) [Global vulnerability of crop yields to climate change](#), J. ENVIRON. ECON. MANAG. 109(102462): 1–18, 17 (“Projecting climatically-driven changes in crop yields, by combining our estimated responses over the period 1981–2011 with temperature and precipitation fields from an ensemble of climate model simulations, we find substantial agreement among ESMs on crop yield declines of <10% by mid-century and <25% by century’s end especially for soybeans, maize, and winter wheat.”).

²³⁶ Banerjee O., Cicowiez M., Rios A. R., & De Lima C. Z. (2021) [Climate change impacts on agriculture in Latin America and the Caribbean: An application of the integrated economic-environmental modeling \(IEEM\) platform](#), IDB Working Paper Series No. IDB-WP-01289, Inter-American Development Bank, 17 (“The yield impacts derived from Prager et al. (2020) are as follows: by 2050, the simple average across all countries is -19.0 percent for bean, -17.2 percent for maize, -1.8 percent for rice, +14.2 percent for soybean, and -4.8 percent for wheat. These yield impacts are implemented as productivity shocks in IEEM and introduced linearly between 2021 and 2050 (see Figure 3.1). Together, these five crops represent between 0.7 (Barbados) and 89.5 (Paraguay) percent of the total cultivated area in the LAC countries modeled (see Figure 3.2).”).

²³⁷ Bárcena A., Samaniego J., Peres W., & Alatorre J. E. (2020) [THE CLIMATE EMERGENCY IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN: THE PATH AHEAD – RESIGNATION OR ACTION?](#), Economic Commission for Latin American and the Caribbean Books No. 160, 122 (“The Caribbean relies heavily on economic activities such as tourism and agriculture, which are particularly sensitive to climatic conditions (ECLAC, 2010). Agriculture generates a large number of jobs, and the rural population continues to constitute a substantial percentage of the total population (ECLAC/MINURVI/UN-HABITAT, 2016). It is therefore relevant that, in different climate scenarios, yields of cassava, banana, sweet potato and tomato plantations are predicted to fall by between 1% and 30% by 2050, with rice crop yields ranging from a 3% decrease to a 2% increase. Lower yields would have negative consequences in a number of areas, such as growth in output and investment in agriculture, the external sector, poverty reduction and food security (Clarke and others, 2013; ECLAC, 2015a).”).

²³⁸ Lesk C., Coffel E., Winter J., Ray D., Zscheischler J., Seneviratne S. I., & Horton R. (2021) [Stronger temperature–moisture couplings exacerbate the impact of climate warming on global crop yields](#), NAT. FOOD 2: 683–691, 686 (“We project that such heightened crop heat sensitivities due to changing temperature–moisture couplings will worsen the impacts of warming on maize and soy yields across most of the globe (Fig. 5a and Supplementary Fig. 2). In the multimodel median, these additional yield impacts ($\Delta\Delta Y$) amount to regional maize (soy) losses of 7% (9%) in the United States ...”). See also Climate Matters (20 September 2021) [Climate Change and Crops](#) (“Climate models show that in many areas, drought and heat will align more often in the future, worsening crop damages as the climate warms. The researchers estimate that U.S. yields may decline from current averages by 7% for corn and 9% for soybean after 2050.”).

²³⁹ Vergara W., Rios A. R., Paliza L. M. G., Gutman P., Isbell P., Suding P. H., & Samaniego J. (2013) [The climate and development challenge for Latin America and the Caribbean: options for climate-resilient, low-carbon development](#), Inter-American Development Bank, 13 (“Based on recent analysis and new estimates, the projected yearly economic damages in LAC caused by some of the major physical impacts associated with this likely rise of 2 °C over preindustrial levels are estimated to gradually increase and reach approximately \$ 100 billion annually by 2050—or approximately 2.2 percent of 2010 gross domestic product (GDP, \$4.6 trillion)”).

²⁴⁰ Smith A. B. (10 January 2023) [2022 U.S. billion-dollar weather and climate disasters in historical context](#), National Oceanic and Atmospheric Administration (“In broader context, the total cost of U.S. billion-dollar disasters over the last 5 years (2018–2022) is \$595.5 billion, with a 5-year annual cost average of \$119.1 billion, the latter of which is

nearly triple the 43-year inflation adjusted annual average cost. The U.S. billion-dollar disaster damage costs over the last 10-years (2013-2022) were also historically large: at least \$1.1 trillion from 152 separate billion-dollar events.”).

²⁴¹ Canadian Institute for Climate Choices (2023) [Tip of the Iceberg: Executive Summary](#), i (“Over the past five decades, the costs of weather-related disasters like floods, storms, and wildfires in Canada have risen from tens of millions of dollars to billions of dollars annually. Between 2010 and 2019, insured losses for catastrophic weather events totaled over \$18 billion, and the number of catastrophic events was over three times higher than in the 1980s.”).

²⁴² Deloitte (2022) [TURNING POINT: A NEW ECONOMIC CLIMATE IN THE UNITED STATES](#), 15 (“Climate damage to the US economy could cost \$14.5 trillion over the next 50 years”).

²⁴³ Kőmüves Z. (24 August 2021) [IPCC report: the macroeconomic impacts of climate action and inaction](#), Cambridge Econometrics (“These numbers mean alarmingly high damages even in a couple of decades, but due to the exponential shape of the damage function, losses can grow by up to 65% and 30% of GDP by 2100 in the two scenarios, respectively.”).

²⁴⁴ World Bank (2022) [CONSOLIDATING THE RECOVERY: SEIZING GREEN GROWTH OPPORTUNITIES](#), Semiannual Report for Latin America and the Caribbean, x (“Climate change poses important challenges to the region’s economies. On average, 1.7 percent of annual GDP has been lost in Latin American countries due to climate related disasters over the last two decades (CELAC, SRE, and Global Center on Adaptation 2021). An analysis of the impact of extreme weather events in the past two decades shows that eight Caribbean nations figure among the top twenty globally in losses as a percentage of GDP, and five in terms of deaths per capita.1”).

²⁴⁵ (6 March 2023) [Climate change could cost Latin America 16% of GDP this century, says Moody’s](#), REUTERS (“If no new policy action is taken, Moody’s foresees a steady deterioration in GDP, losing 10% by 2075 and ending the century down 16% as the region loses production capacity starting this year and losses mount at increasing rates.”); [discussing Coutino A. \(2023\) LATIN AMERICA UNDER THE RISK OF CLIMATE CHANGE](#), Moody’s.

²⁴⁶ Canada Office of the Parliamentary Budget Officer (2022) [Global greenhouse gas emissions and Canadian GDP](#), 4 (“We estimate that the 0.9-degree Celsius average increase in Canada’s surface temperature and 2.5 per cent average increase in precipitation (relative to the 1961-1990 reference levels) have lowered the level of Canadian real GDP in 2021 by 0.8 per cent”).

²⁴⁷ Office of Management and Budget (2022) [Chapter 3. Long-Term Budget Outlook](#), in [ANALYTICAL PERSPECTIVES: BUDGET OF THE U.S. GOVERNMENT FISCAL YEAR 2024](#), 33 (“In analysis by the Network for Greening the Financial System (NGFS) suggests that U.S. GDP will be nearly 2.5 percent lower by the middle of the century under current policies relative to a no-further-warming counterfactual, with losses accelerating in the second half of the century.”).

²⁴⁸ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuví N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) [Chapter 12: Central and South America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1698, 1700 (“The main climate impact drivers like extreme heat, drought, relative SLR [sea level rise], coastal flooding, erosion, marine heatwaves, ocean aridity (*high confidence*) and aridity, drought and wildfires will increase by midcentury (*medium confidence*) (Figure 12.6, WGI AR6 Table 12.6, Ranasinghe et al., 2021).”; “Warming and drier conditions are projected through the reduction of total annual precipitation, extreme precipitation and consecutive wet days and an increase in consecutive dry days (Chou et al., 2014). Heatwaves will increase in frequency and severity in places close to the equator like Colombia (Guo et al., 2018; Feron et al., 2019), with a decrease but strong wetting in coastal areas, pluvial and river flood and mean wind increase (Mora et al., 2014). Models project a *very likely* 2°C GWL [global warming level] increase in the intensity and frequency of hot extremes and decrease in the intensity and frequency of cold extremes. Nevertheless, models project inconsistent changes in the region for extreme precipitation (*low confidence*) (Figure 12.6; WGI AR6 Table 12.14) (Ranasinghe et al., 2021). The

main climate impact drivers in the region, like extreme heat, mean precipitation and coastal and oceanic drivers, will increase and snow, ice and permafrost will decrease with *high confidence* (WGI AR6 Table 12.6) (Ranasinghe et al., 2021).”).

²⁴⁹ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuvi N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) *Chapter 12: Central and South America*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY*, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1692–1693 (“Extreme precipitation events, which result in floods, landslides and droughts, are projected to intensify in magnitude and frequency due to climate change (*medium confidence*). Floods and landslides pose a risk to life and infrastructure; a 1.5°C increase would result in an increase of 100–200% in the population affected by floods in Colombia, Brazil and Argentina, 300% in Ecuador and 400% in Peru (*medium confidence*).”).

²⁵⁰ Mycoo M., Wairiu M., Campbell D., Duvat V., Golbuu Y., Maharaj S., Nalau J., Nunn P., Pinnegar J., & Warrick O. (2022) *Chapter 15: Small Islands*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY*, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 2050, 2052 (“Compared to larger landmasses, many climate change-driven impacts and risks are amplified for small islands. This is due largely to their boundedness (surrounded by ocean), their comparatively small land areas, and often their remoteness from more populated parts of the world, which restricts the global connectivity of islands. This is true on all types of islands (Figure 15.2). 15.3.1 Synthesis of Observed and Projected Changes in the Physical Basis There is increased evidence of warming in the small islands, particularly in the latter half of the 20th century (*high confidence*). The diversity of metrics and timescales used across studies makes it impossible to provide explicit comparisons; however, Table 15.1 provides a summary of observed changes. Some phenomena have no demonstrable trends in a region because of limited observed data, these include TC frequency in the northeastern Pacific and Indian oceans (Walsh et al., 2016); other phenomena are too variable to detect an overarching trend, including rainfall in regions where inter-annual and decadal variabilities such as the El Niño-Southern Oscillation, North Atlantic Oscillation, Pacific Decadal Variability, Atlantic Multidecadal Variability are dominant (Jones et al., 2015; McGree et al., 2019). There are also marked regional variations in the rates of SLR (Merrifield and Maltrud, 2011; Palanisamy et al., 2012; Esteban et al., 2019) and relative SLR (RSLR; that is, incorporating land movement). Various factors, including interannual and decadal sea level variations associated with low-frequency modulation of ENSO and the Pacific Decadal Oscillation (PDO) and vertical land motion contribute to both relative sea level variations and related uncertainties. Increased distant-source swell height from extra-tropical cyclones (ETCs) also contributes to ESLs (Mentaschi et al., 2017; Vitousek et al., 2017). Together, these stressors increase ESLs and their impacts, including coastal erosion and marine flooding and their impacts on both ecosystems and ecosystem services and human activities (Section 15.3.3.1 and Table 15.3). Like observed impacts, projected impacts include some high confidence assessments, which are distributed across a diversity of models, timescales and metrics. Generalised trends, and specific projections when available, are provided in Table 15.2. However, actual values and spatial distribution of precipitation changes remain uncertain as they are strongly model dependent (Paeth et al., 2017). Furthermore, the current capabilities of climate models, to adequately represent variability in climate drivers including ENSO, and the topography of small islands limit confidence in these future changes (Cai et al., 2015a; Harter et al., 2015; Guilyardi et al., 2016).”; Table 15.1).

²⁵¹ Mycoo M., Wairiu M., Campbell D., Duvat V., Golbuu Y., Maharaj S., Nalau J., Nunn P., Pinnegar J., & Warrick O. (2022) *Chapter 15: Small Islands*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY*, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 2045 (“A sense of urgency is prevalent among small islands in the combating of climate change and in adherence to the Paris Agreement to limit global warming to 1.5°C above pre-industrial levels. Small islands are increasingly affected by increases in temperature, the growing impacts of tropical cyclones (TCs), storm surges, droughts, changing precipitation patterns, sea level rise (SLR), coral bleaching and

invasive species, all of which are already detectable across both natural and human systems (very high confidence)”).

²⁵² Mycoo M., Wairiu M., Campbell D., Duvat V., Golbuu Y., Maharaj S., Nalau J., Nunn P., Pinnegar J., & Warrick O. (2022) *Chapter 15: Small Islands*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 2050, 2052 (“Most of the research that has been conducted on exposure and vulnerability from climate change demonstrates that factors including those that are geopolitical and political, environmental, socioeconomic and cultural together conspire to increase exposure and vulnerability of small islands (Box 15.1; Betzold, 2015; McCubbin et al., 2015; Duvat et al., 2017b; Otto et al., 2017; Weir et al., 2017; Taupo et al., 2018; Barclay et al., 2019; Hay et al., 2019a; Ratter et al., 2019; Salmon et al., 2019; Bordner et al., 2020; Douglass and Cooper, 2020; Duvat et al., 2020a). Additional pressures on coastal and marine environments, including overexploitation of natural resources, may further exacerbate possible impacts in the future (Bell et al., 2013; Pinnegar et al., 2019; Siegel et al., 2019). ... Furthermore, these factors exacerbate climate change-induced problems such as coastal flooding and erosion faced by small islands. These impacts continue to worsen, putting small islands at increasingly higher risk to the impacts of climate change (Box 15.1). There are multiple stressors that affect the vulnerability of small islands to climate change (McNamara et al., 2019).”).

²⁵³ Mycoo M., Wairiu M., Campbell D., Duvat V., Golbuu Y., Maharaj S., Nalau J., Nunn P., Pinnegar J., & Warrick O. (2022) *Chapter 15: Small Islands*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 2099 (“Agriculture and fisheries are heavily influenced by climate, which means a change in occurrence of TCs, air temperature, ocean temperature and/or rainfall can have considerable impacts on the production and availability of crops and seafood and therefore the health and welfare of island inhabitants. Projected impacts of climate change on agriculture and fisheries in some cases will enhance productivity, but in many cases could undermine food production, greatly exacerbating food insecurity challenges for human populations in small islands. Small islands mostly depend on rain-fed agriculture, which is likely to be affected in various ways by climate change, including loss of agricultural land through floods and droughts, and contamination of freshwater and soil through salt-water intrusion, warming temperatures leading to stresses of crops, and extreme events such as cyclones. In some islands, crops that have been traditionally part of people’s diet can no longer be cultivated due to such changes. For example, severe rainfall during planting seasons can damage seedlings, reduce growth and provide conditions that promote plant pests and diseases. Changes in the frequency and severity of TCs or droughts will pose challenges for many islands. For example, more pronounced dry seasons, warmer temperatures and greater evaporation could cause plant stress reducing productivity and harvests. The impacts of drought may hinder insects and animals from pollinating crops, trees and other vegetative food sources on tropical islands. For instance, many agroforestry crops are completely dependent on insect pollination, and it is, therefore, important to monitor and recognise how climate change is affecting the number and productivity of these insects. Coastal agroforest systems in small islands are important to national food security but rely on biodiversity (e.g., insects for pollination services). Biodiversity loss from traditional agroecosystems has been identified as one of the most serious threats to food and livelihood security in islands. Ecosystem-based adaptation practices and diversification of crop varieties are possible solutions.”).

²⁵⁴ Mycoo M., Wairiu M., Campbell D., Duvat V., Golbuu Y., Maharaj S., Nalau J., Nunn P., Pinnegar J., & Warrick O. (2022) *Chapter 15: Small Islands*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 2046 (“Reef island and coastal area habitability in small islands is expected to decrease because of increased temperature, extreme sea levels and degradation of buffering ecosystems, which will increase human exposure to sea-related hazards (high confidence). Climate and non-climate drivers of reduced habitability are context specific. On small islands, coastal land loss attributable to higher sea level, increased extreme precipitation and wave impacts and increased aridity have contributed to food and water insecurities that are

likely to become more acute in many places (high confidence). In the Caribbean, additional warming by 0.2°–1.0°C, could lead to a predominantly drier region (5–15% less rain than present day), a greater occurrence of droughts along with associated impacts on agricultural production and yield in the region. Crop suitability modelling on several commercially important crops grown in Jamaica found that even an increase of less than +1.5°C could result in a reduction in the range of crops that farmers may grow. Most Pacific Island Countries could experience $\geq 50\%$ declines in maximum fish catch potential by 2100 relative to 1980–2000 under both an RCP2.6 and RCP8.5 scenario {15.3.4.3, 15.3.4.4}.”).

²⁵⁵ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuvi N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) [Chapter 12: Central and South America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1691 (“**Central and South America (CSA) are highly exposed, vulnerable and strongly impacted by climate change, a situation amplified by inequality, poverty, population growth and high population density, land use change particularly deforestation with the consequent biodiversity loss, soil degradation, and high dependence of national and local economies on natural resources for the production of commodities (high confidence¹).** Profound economic, ethnic and social inequalities are exacerbated by climate change. High levels of widespread poverty, weak water governance, unequal access to safe water and sanitation services and lack of infrastructure and financing reduce adaptation capacity, increasing and creating new population vulnerabilities (*high confidence*)... **The scientific evidence since the IPCC’s Fifth Assessment Report (AR5) increased the confidence in the synergy among fire, land use change, particularly deforestation, and climate change, directly impacting human health, ecosystem functioning, forest structure, food security and the livelihoods of resource-dependent communities (medium confidence).** Regional increases in temperature, aridity and drought increased the frequency and intensity of fire. On average, people in the region were more exposed to high fire danger between 1 and 26 additional days depending on the sub-region for the years 2017–2020 compared to 2001–2004 (*high confidence*).”).

²⁵⁶ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuvi N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) [Chapter 12: Central and South America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1722–1723 (Table 12.6).

²⁵⁷ United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (2020) [NATURAL DISASTERS IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN, 2000-2019](#), 2 (“Latin America and the Caribbean (LAC) is the second most disaster-prone region in the world 152 million affected by 1,205 disasters (2000-2019)*”).

²⁵⁸ Herring S., Hoell A., Christidis N., & Stott P. (2023) [EXPLAINING EXTREME EVENTS FROM A CLIMATE PERSPECTIVE](#), American Meteorological Society.

²⁵⁹ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) [Summary for Policymakers](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-10 (“It is *virtually certain* that hot extremes (including heatwaves) have become more frequent and more intense across most land regions since the 1950s, while cold extremes (including cold waves) have become less frequent and less severe, with *high confidence* that human-induced climate change is the main driver[14] of these changes. Some recent hot extremes observed over the past decade would have been *extremely unlikely* to occur without human influence on the climate system. Marine heatwaves have approximately doubled in frequency since the 1980s (*high confidence*), and human influence has *very likely* contributed to most of them since at least 2006.”). See also Kotz M., Wenz L., & Levermann A. (2021) [Footprint of greenhouse forcing in daily temperature variability](#), PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 118(32): e2103294118, 1–8, 1 (“Assessing historical changes to daily temperature variability in comparison with those from state-of-the-art climate

models, we show that variability has changed with distinct global patterns over the past 65 years, changes which are attributable to rising concentrations of greenhouse gases. If these rises continue, temperature variability is projected to increase by up to 100% at low latitudes and decrease by 40% at northern high latitudes by the end of the century.”).

²⁶⁰ Fischer E. M., Sippel S., & Knutti R. (2021) [Increasing probability of record-shattering climate extremes](#), NAT. CLIM. CHANGE 11: 689–685, 689 (“Here, we show models project not only more intense extremes but also events that break previous records by much larger margins. These record-shattering extremes, nearly impossible in the absence of warming, are likely to occur in the coming decades. We demonstrate that their probability of occurrence depends on warming rate, rather than global warming level, and is thus pathway-dependent. In high-emission scenarios, week-long heat extremes that break records by three or more standard deviations are two to seven times more probable in 2021–2050 and three to 21 times more probable in 2051–2080, compared to the last three decades. In 2051–2080, such events are estimated to occur about every 6–37 years somewhere in the northern midlatitudes.”).

²⁶¹ Balch J. K., Abatzoglou J. T., Joseph M. B., Koontz M. J., Mahood A. L., McGlinchy J., Cattau M. E., & Williams A. P. (2022) [Warming weakens the night-time barrier to global fire](#), NATURE 602: 442–448, 442 (“Night-time provides a critical window for slowing or extinguishing fires owing to the lower temperature and the lower vapour pressure deficit (VPD). However, fire danger is most often assessed based on daytime conditions^{1,2}, capturing what promotes fire spread rather than what impedes fire. Although it is well appreciated that changing daytime weather conditions are exacerbating fire, potential changes in night-time conditions—and their associated role as fire reducers—are less understood. Here we show that night-time fire intensity has increased, which is linked to hotter and drier nights. Our findings are based on global satellite observations of daytime and night-time fire detections and corresponding hourly climate data, from which we determine landcover-specific thresholds of VPD (VPD_t), below which fire detections are very rare (less than 95 per cent modelled chance). Globally, daily minimum VPD increased by 25 per cent from 1979 to 2020. Across burnable lands, the annual number of flammable night-time hours—when VPD exceeds VPD_t—increased by 110 hours, allowing five additional nights when flammability never ceases. Across nearly one-fifth of burnable lands, flammable nights increased by at least one week across this period. Globally, night fires have become 7.2 per cent more intense from 2003 to 2020, measured via a satellite record. These results reinforce the lack of night-time relief that wildfire suppression teams have experienced in recent years. We expect that continued night-time warming owing to anthropogenic climate change will promote more intense, longer-lasting and larger fires.”); discussed in Dickie G. (19 July 2022) [Steamy nights in European heatwave worsen health and fire risks – experts](#), REUTERS.

²⁶² Hicke J. A., Lucatello S., Mortsch L. D., Dawson J., Domínguez Aguilar M., Enquist C. A. F., Gilmore E. A., Gutzler D. S., Harper S., Holsman K., Jewett E. B., Kohler T. A., & Miller K. (2022) [Chapter 14: North America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1931 (“Without limiting warming to 1.5°C, key risks to North America are expected to intensify rapidly by mid-century (high confidence). These risks will result in irreversible changes to ecosystems, mounting damages to infrastructure and housing, stress on economic sectors, disruption of livelihoods, and issues with mental and physical health, leisure and safety. Immediate, widespread and coordinated implementation of adaptation measures aimed at reducing risks and focused on equity have the greatest potential to maintain and improve the quality of life for North Americans, ensure sustainable livelihoods and protect the long-term biodiversity, and ecological and economic productivity, in North America (high confidence). Enhanced sharing of resources and tools for adaptation across economic, social, cultural and national entities enables more effective short- and long-term responses to climate change. {14.2, 14.4, 14.5, 14.6, 14.7}”).

²⁶³ George Washington University (2018) [ASCERTAINMENT OF THE ESTIMATED EXCESS MORTALITY FROM HURRICANE MARÍA IN PUERTO RICO](#), Milken Institute School of Public Health, 9 (“Results from the preferred statistical model, shown below, estimate that excess mortality due to Hurricane María using the displacement scenario is estimated at 1,271 excess deaths in September and October (95% CI: 1,154-1,383), 2,098 excess deaths from September to December (95% CI: 1,872-2,315), and, 2,975 (95% CI: 2,658-3,290) excess deaths for the total study period of September 2017 through February 2018.”).

²⁶⁴ Deloitte (2022) [TURNING POINT: A NEW ECONOMIC CLIMATE IN THE UNITED STATES](#), 6 (“If global average warming reaches around 3°C by century’s end, Deloitte’s analysis indicates that economic damages would grow and compound, affecting every industry and region in the country. Failing to take sufficient action could result in economic losses to the US economy of \$14.5 trillion (in present-value terms¹¹) over the next 50 years. In this climate-damaged future, the economy would lose nearly 4% of GDP¹²—\$1.5 trillion in 2070 alone.”).

²⁶⁵ National Oceanic and Atmospheric Administration Fisheries (19 August 2021) [Social Indicators for Coastal Communities](#) (Table: Environmental Justice in Commercial Fishing Communities).

²⁶⁶ See Jina A. (2021) [Climate Change and the U.S. Economic Future](#), U.S. Energy & Climate Roadmap: Policy Insight, Energy Policy Institute of Chicago, 17 (“The aggregate picture masks substantial local differences in these impacts. Figure 6 shows damages at the county level as a proportion of that county’s income level in 2080-2099 under a high emissions scenario. As expected, the colder, more northerly parts of the United States have much lower damages than the rest of the country. In southern, coastal states, meanwhile, there is an overall high negative impact, as they experience higher temperatures and exposure to enhanced coastal damages from storms and sea level rise. ... The pattern of damages in Figure 6 also reveals another potential impact of climate change: an increase in inequality across the country. Figure 7 ranks counties by income level, and then plots damages in groups that gather together income deciles from poorest to wealthiest. The pattern of damages is strongly correlated with income levels, and the poorest counties suffer the largest damages. Indeed, the poorest third of counties are projected to experience damages of between 2 and 20 percent of county income under a high emissions scenario. This aspect of climate impacts in the United States has the potential to substantially widen the income gap between rich and poor parts of the country, saddling those areas that may already have fewer resources to adapt with larger damages.”); and Sawyer D., Ness R., Lee C., & Miller S. (2022) [DAMAGE CONTROL: REDUCING THE COSTS OF CLIMATE IMPACTS IN CANADA](#), Canadian Climate Institute, 60–61 (“Low-income households will see the largest reductions in real household income. While high-income households lose more income in absolute terms, the share of real income lost by low-income households is higher. By mid-century, the lowest-income households are projected to face income losses, relative to the reference case, of 5.8 per cent under high-emissions and 4.8 per cent under the low-emissions scenario (Figure 11). This compares to losses of 4 per cent and 3.2 per cent for the highest-income households in the same period. By the end of the century, the impacts on real household income cut deep into affordability. Low-income households face real income cuts on average of 23 per cent in the high-emissions scenario, and 12 per cent under low-emissions. Even the median group faces significant income losses of 9 to 19 per cent under low- and high-emissions scenarios, respectively.⁹ The disproportionate losses for low-income households are driven by lower baseline levels of income, resulting in the same dollar amount of lost income comprising a higher share of total income lost compared to high-income households. As well, there is a higher share of income coming from low-income employment in the service sector that is impacted heavily by damages to infrastructure and supply chain disruptions. Finally, the lower-income groups tend to spend more of their income on transportation services and housing, both of which are highly climate-sensitive. Other equity-deserving groups, such as Indigenous people, racialized people, recent immigrants, and women, are disproportionately represented in low-income groups (Statistics Canada 2021; Statistics Canada 2022).¹⁰ Therefore, climate change impacts risk exacerbating inequality across multiple dimensions.”).

²⁶⁷ Hicke J. A., Lucatello S., Mortsch L. D., Dawson J., Domínguez Aguilar M., Enquist C. A. F., Gilmore E. A., Gutzler D. S., Harper S., Holsman K., Jewett E. B., Kohler T. A., & Miller K. (2022) [Chapter 14: North America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1932 (“**Climate hazards are projected to intensify further across North America (very high confidence)**. Heatwaves over land and in the ocean, as well as wildfire activity, will intensify; subarctic snowpack, glacial mass and sea ice will decline (virtually certain); and sea level rise will increase at geographically differential rates (virtually certain). Humidity-enhanced heat stress, aridification and extreme precipitation events that lead to severe flooding, erosion, debris flows and ultimately loss of ecosystem function, life and property are projected to intensify (high confidence). {14.2}”).

²⁶⁸ United States Office of Management and Budget (2022) [FEDERAL BUDGET EXPOSURE TO CLIMATE RISKS](#), 277 (“The Office of Management and Budget (OMB) assessments found that the Federal Government could spend between an additional \$25 billion to \$128 billion annually due to just six climate-related financial risks included in this report—disaster relief, flood insurance, crop insurance, healthcare expenditures, wildland fire suppression spending, and flood risk at Federal facilities – and considering only a limited scope of total potential damages to those programs. Table 21-1 summarizes quantified annual estimated expenditures of these assessed programs (in 2020\$) in projected ranges to mid- and late-century. Many other risks to the Federal budget are apparent but have not yet been quantified, such as the risks to national security, changes to ecosystems, and infrastructure expenditures which can each have wide-ranging and diffuse effects to the budget”).

²⁶⁹ International Monetary Fund (2022) [WORLD ECONOMIC OUTLOOK: COUNTERING THE COST-OF-LIVING CRISIS](#), 71 (“Decades of procrastination have transformed what could have been a smooth transition to a more carbon-neutral society into what will likely be a more challenging one. By the end of the decade, the global economy needs to emit 25 percent less greenhouse gases than in 2022 to have a fighting chance to reach the goals set in Paris in 2015 and avert catastrophic climate disruptions. Because the energy transition needed to accomplish this has to be rapid, it is bound to involve some costs in the next few years. While there is little consensus on the expected near-term macroeconomic consequences of climate change policies, this chapter’s central message is that if the right measures are implemented immediately and phased in gradually over the next eight years, the costs will remain manageable and are dwarfed by the innumerable long-term costs of inaction. Different assumptions regarding the speed at which electricity generation can transition toward low-carbon technologies put these costs somewhere between 0.15 and 0.25 percentage point of GDP growth and an additional 0.1 to 0.4 percentage point of inflation a year with respect to the baseline, if budget-neutral policies are assumed. To avoid amplifying these costs, it is important that both climate and monetary policies be credible. Stop-and-go policies and further procrastinating on the grounds that “now is not the time” will only exacerbate the toll.”).

²⁷⁰ Trust S., Joshi S., Lenton T., & Oliver J. (2023) [THE EMPEROR’S NEW CLIMATE SCENARIOS: LIMITATIONS AND ASSUMPTIONS OF COMMONLY USED CLIMATE-CHANGE SCENARIOS IN FINANCIAL SERVICES](#), Institute and Faculty of Actuaries & University of Exeter, 3 (“Dr Sarah Ivory University of Edinburgh There is a problem with the current climate-scenario modelling which means it does not accurately depict the future we know is coming, or the financial implications of this. Climate scenario users in financial services have two pathways forward. To spend all of your time understanding why existing models are wrong and tweaking them is equivalent to rearranging deck chairs on the Titanic. To build new models which get political buy-in on climate action is equivalent to launching the life boats. It still won’t save all of us, but it’s the best option we have.”).

²⁷¹ Trust S., Joshi S., Lenton T., & Oliver J. (2023) [THE EMPEROR’S NEW CLIMATE SCENARIOS: LIMITATIONS AND ASSUMPTIONS OF COMMONLY USED CLIMATE-CHANGE SCENARIOS IN FINANCIAL SERVICES](#), Institute and Faculty of Actuaries & University of Exeter, 6 (“There is a disconnect between climate science and the economic models that underpin financial services climate-scenario modelling, where model parsimony has cost us real-world efficacy. Real-world impacts of climate change, such as the impact of tipping points (both positive and negative, transition and physical-risk related), sea-level rise and involuntary mass migration, are largely excluded from the damage functions of public reference climate-change economic models. Some models implausibly show the hot-house world to be economically positive, whereas others estimate a 65% GDP loss or a 50–60% downside to existing financial assets if climate change is not mitigated, stating these are likely to be conservative estimates.”).

²⁷² Morrison A. (3 July 2023) [Climate scenario models in financial services significantly underestimate climate risk](#), UNIVERSITY OF EXETER (“This severely limits the usefulness of the models to business leaders and policy makers, who may reasonably believe these models effectively capture risk levels, unaware that many of the most severe climate impacts have not been considered.”); *discussing* Trust S., Joshi S., Lenton T., & Oliver J. (2023) [THE EMPEROR’S NEW CLIMATE SCENARIOS: LIMITATIONS AND ASSUMPTIONS OF COMMONLY USED CLIMATE-CHANGE SCENARIOS IN FINANCIAL SERVICES](#), Institute and Faculty of Actuaries & University of Exeter.

²⁷³ Kőműves Z. (24 August 2021) [IPCC report: the macroeconomic impacts of climate action and inaction](#), CAMBRIDGE ECONOMETRICS (“These large damage estimates are still likely to understate the true losses, since our

method is based on the observed relationship between temperature and economic output, and we focus only on the impacts of gradual warming on productivity. They do not account for tipping points or other unprecedented changes in the climate system. Given the high uncertainty around increasing climate sensitivity in the future and carbon-cycle feedbacks it is near impossible to get accurate estimates. Natural factors are not the only uncertainty to account for. Escalating climate impacts could bring disruption of value chains, trade, and geopolitical crises as well.”).

²⁷⁴ World Meteorological Organization (22 May 2023) [Economic costs of weather-related disasters soars but early warnings save lives](#), Press Release 22052023 (“Over sixty percent of economic losses due to weather-, climate- and water-related disasters were reported for developed economies. However, the economic losses were equivalent to less than 0.1% of the gross domestic product (GDP) in respective economies in more than four fifths of these disasters. No disasters were reported with economic losses greater than 3.5% of the respective GDPs. In Least Developed Countries, 7% of disasters for which economic losses were reported had an impact equivalent to more than 5% of the respective GDPs, with several disasters causing economic losses up to nearly 30%. In Small Island Developing States, 20% of disasters with reported economic losses led to an impact equivalent to more than 5% of the respective GDPs, with some disasters causing economic losses above 100%.”); *discussing* World Meteorological Organization (2023) [ATLAS OF MORTALITY AND ECONOMIC LOSSES FROM WEATHER, CLIMATE AND WATER-RELATED HAZARDS](#).

²⁷⁵ World Bank Group (2022) [A Roadmap for Climate Action in Latin America and the Caribbean 2021 - 2025](#), 1 (“In rankings of the impacts of extreme weather events from 2000 to 2019, five Caribbean nations figure among the top 20 globally in terms of fatalities per capita, while in terms of economic losses as a share of GDP eight of the top 20 countries are in the Caribbean”).

²⁷⁶ World Meteorological Organization (22 May 2023) [Economic costs of weather-related disasters soars but early warnings save lives](#), Press Release 22052023 (“North America, Central America and Caribbean: A reported 2 107 weather-, climate- and water-related resulted in 77 454 deaths and US\$ 2.0 trillion in economic losses.”); *discussing* World Meteorological Organization (2023) [ATLAS OF MORTALITY AND ECONOMIC LOSSES FROM WEATHER, CLIMATE AND WATER-RELATED HAZARDS](#).

²⁷⁷ Vergara W., Rios A. R., Paliza L. M. G., Gutman P., Isbell P., Suding P. H., & Samaniego J. (2013) [The climate and development challenge for Latin America and the Caribbean: options for climate-resilient, low-carbon development](#), Inter-American Development Bank, 14 (“Based on recent analysis and new estimates, the projected yearly economic damages in LAC caused by some of the major physical impacts associated with this likely rise of 2 ° C over pre industrial levels are estimated to gradually increase and reach approximately \$100 billion annually by 2050 or approximately 2.2 percent of 2010 gross domestic product (GDP, \$4.6 trillion)”).

²⁷⁸ World Bank Group (2022) [A ROADMAP FOR CLIMATE ACTION IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2021-2025](#), 1 (“In Latin America and the Caribbean (LAC) the rapidly changing climate is increasing the frequency and intensity of extreme weather-related events. The year 2020 saw the most catastrophic fire season over the Pantanal region and a record number of storms during the Atlantic cyclone season. Eta and Iota, two category 4 hurricanes, affected more than 8 million people in Central America, causing tens of billions of dollars in damage. In Honduras, annual average losses due to climate-related shocks are estimated at 2.3 percent of gross domestic product (GDP). In rankings of the impacts of extreme weather events from 2000 to 2019, five Caribbean nations figure among the top 20 globally in terms of fatalities per capita, while in terms of economic losses as a share of GDP eight of the top 20 countries are in the Caribbean.1 Extreme precipitation events, which result in floods and landslides, are projected to intensify in magnitude and frequency due to climate change, with a 1.5o C increase in mean global temperature projected to result in an increase of up to 200 percent in the population affected by floods in Colombia, Brazil, and Argentina; 300 percent in Ecuador; and 400 percent in Peru.2 Climate shocks reduce the income of the poorest 40 percent by more than double the average of the LAC population and could push an estimated 2.4–5.8 million people in the region into extreme poverty by 2030.3”).

²⁷⁹ Barcena A., Samaniego J., Wilson P., & Alatorre J. E. (2020) [THE CLIMATE EMERGENCY IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN: THE PATH AHEAD – RESIGNATION OR ACTION?](#), Economic Commission for Latin American and the Caribbean, 122 (“The Caribbean relies heavily on economic activities such as tourism and agriculture, which are

particularly sensitive to climatic conditions (ECLAC, 2010). Agriculture generates a large number of jobs, and the rural population continues to constitute a substantial percentage of the total population (ECLAC/MINURVI/UN-HABITAT, 2016). It is therefore relevant that, in different climate scenarios, yields of cassava, banana, sweet potato and tomato plantations are predicted to fall by between 1% and 30% by 2050, with rice crop yields ranging from a 3% decrease to a 2% increase. Lower yields would have negative consequences in a number of areas, such as growth in output and investment in agriculture, the external sector, poverty reduction and food security (Clarke and others, 2013; ECLAC, 2015a).”).

²⁸⁰ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuvi N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) *Chapter 12: Central and South America*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegria A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1732 (“In several regions of CSA, water scarcity is a serious challenge to local livelihoods and economic activities. Regions that are (seasonally) dry, partly with large populations and increasing water demand, exhibit particularly significant water stress. These include the Dry Corridor in CA, coastal areas of Peru (SWS) and northern Chile (SWS), the Bolivian-Peruvian Altiplano (NWS, SAM), the Dry Andes of Central Chile (SWS), Western Argentina and Chaco in northwestern Paraguay (SES) and Sertão in northeastern Brazil (NES) (high confidence) (Kummu et al., 2016; Mekonnen and Hoekstra, 2016; Schoolmeester et al., 2018). In NWS and SWS, downstream areas are increasingly affected by decreasing and unreliable river runoff due to rapid glacier shrinkage (high confidence) (Table SM12.6; Carey et al., 2014; Drenkhan et al., 2015; Buytaert et al., 2017). Many regions in CSA rely heavily on hydroelectric energy, and as a result of rising energy demand, hydropower capacity is constantly being extended (Schoolmeester et al., 2018). Worldwide, SA features the second-fastest growth rate, with about 5.2 GW additional annual capacity installed in 2019 (IHA, 2020). This development requires additional water storage options, which entail the construction of large dams and reservoirs with important social-ecological implications. River fragmentation and corresponding loss of habitat connectivity due to dam constructions have been described for, for example, the NSA, SAM, NES and SES (high confidence) (Grill et al., 2015; Anderson et al., 2018a), with important implications for freshwater biota, such as fish migration (medium confidence) (Pelicice et al., 2015; Herrera-R et al., 2020). Furthermore, examples in, for instance, NWS (Carey et al., 2012; Duarte-Abadía et al., 2015; Hommes and Boelens, 2018) and SWS (Muñoz et al., 2019b) showcase unresolved water-related conflicts between local villagers, peasant communities, hydropower operators and governmental institutions in a context of distrust and lack of water governance (high confidence)”).

²⁸¹ Deloitte (2022) *TURNING POINT: A NEW ECONOMIC CLIMATE IN THE UNITED STATES*, 17 (“The losses to the US would rapidly increase and compound as temperatures continue to rise. The US economy would be smaller and less productive, and there would be fewer job opportunities. Over the next 50 years, nearly 900,000 job opportunities would disappear on average, every year, due to climate damages. In 2070 alone, insufficient climate action would result in more than 2 million fewer jobs across the US.”).

²⁸² Sawyer D., Ness R., Lee C., & Miller S. (2022) *DAMAGE CONTROL: REDUCING THE COSTS OF CLIMATE IMPACTS IN CANADA*, Canadian Climate Institute, 60 (“Low-income households will see the largest reductions in real household income. While high-income households lose more income in absolute terms, the share of real income lost by low-income households is higher. By mid-century, the lowest-income households are projected to face income losses, relative to the reference case, of 5.8 per cent under high-emissions and 4.8 per cent under the low-emissions scenario (Figure 11). This compares to losses of 4 per cent and 3.2 per cent for the highest-income in the same period. By the end of the century, the impacts on real household income cut deep into affordability. Low-income households face real income cuts on average of 23 per cent in the high-emissions scenario, and 12 per cent under low-emissions. Even the median group faces significant income losses of 9 to 19 percent”).

²⁸³ See generally Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Fund for Agricultural Development, Pan American Health Organization, United Nations International Children’s Emergency Fund, & World Food Programme (2023) *REGIONAL OVERVIEW OF FOOD SECURITY AND NUTRITION – LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2022: TOWARDS IMPROVING AFFORDABILITY OF HEALTHY DIETS*.

²⁸⁴ Hartinger S. M., et al. (2023) [The 2022 South America report of The Lancet Countdown on health and climate change: trust the science. Now that we know, we must act](#), LANCET REG. HEALTH AM. 20(100470): 1–35, 6 (“The region hosts most of the LAC population (66%) and of roughly 6% of the global population.”).

²⁸⁵ Hartinger S. M., et al. (2023) [The 2022 South America report of The Lancet Countdown on health and climate change: trust the science. Now that we know, we must act](#), LANCET REG. HEALTH AM. 20(100470): 1–35, 2 (“Of particular concern in SA, where 168.7 million people are affected by moderate or severe food insecurity, climate change will put additional pressure on food systems. The changing environmental conditions, including more intense and lengthy droughts, extreme weather events, higher temperatures, and increased atmospheric CO₂ concentrations, affect the growth, yield, and nutritional content of several crops, including four staple crops (wheat, rice, maize, and soybean). In 2021, the duration of the growth season of these four crops followed a downward trend, exposing potential threats to crop yields. The average duration of the growing season for spring wheat, winter wheat, maize, soybean, and rice had decreased by 2.5%, 2.2%, 1.6%, 1.3% and 0.4%, respectively, compared to a 1981–2010 baseline (indicator 1.4). These impacts threaten the livelihoods of people depending on the agricultural sector and, ultimately, pose an acute menace to food security in the region.”).

²⁸⁶ Hartinger S. M., et al. (2023) [The 2022 South America report of The Lancet Countdown on health and climate change: trust the science. Now that we know, we must act](#), LANCET REG. HEALTH AM. 20(100470): 1–35, 2 (“Of particular concern in SA, where 168.7 million people are affected by moderate or severe food insecurity, climate change will put additional pressure on food systems. The changing environmental conditions, including more intense and lengthy droughts, extreme weather events, higher temperatures, and increased atmospheric CO₂ concentrations, affect the growth, yield, and nutritional content of several crops, including four staple crops (wheat, rice, maize, and soybean). In 2021, the duration of the growth season of these four crops followed a downward trend, exposing potential threats to crop yields. The average duration of the growing season for spring wheat, winter wheat, maize, soybean, and rice had decreased by 2.5%, 2.2%, 1.6%, 1.3% and 0.4%, respectively, compared to a 1981–2010 baseline (indicator 1.4). These impacts threaten the livelihoods of people depending on the agricultural sector and, ultimately, pose an acute menace to food security in the region.”).

²⁸⁷ Mycoo M., Wairiu M., Campbell D., Duvat V., Golbuu Y., Maharaj S., Nalau J., Nunn P., Pinnegar J., & Warrick O. (2022) [Chapter 15: Small Islands](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change](#), Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 2058–2060 (“SLR undermines the long-term persistence of freshwater-dependent ecosystems on islands (Goodman et al., 2012) and is one of the greatest threats to the goods and services these environments provide (Box 16.1; Mitsch and Hernandez, 2013). Hoegh-Guldberg et al. (2019) posit that as sea level rises, managing the risk of salinisation of freshwater resources will become increasingly important. On Roi-Namur, Marshall Islands, Storlazzi et al. (2018) found that the availability of freshwater is impacted by the compounding effect of SLR and coastal flooding. In other Pacific atolls, Terry and Chui (2012) showed that freshwater resources could be significantly affected by a 0.40-m SLR. Similar impacts are anticipated for some Caribbean countries (Stennett-Brown et al., 2017). Such changes in SLR could increase salinity in estuarine and aquifer water, affecting ground and surface water resources for drinking and irrigation water (Mycoo, 2018a) across the region (high confidence). SLR also affects groundwater quality (Bailey et al., 2016), salinity (Gingerich et al., 2017) and water-table height (Masterson et al., 2014).”).

²⁸⁸ Mycoo M., Wairiu M., Campbell D., Duvat V., Golbuu Y., Maharaj S., Nalau J., Nunn P., Pinnegar J., & Warrick O. (2022) [Chapter 15: Small Islands](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change](#), Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 2065 (“Climate change impacts on freshwater systems frequently exacerbate existing pressure, especially in locations already experiencing water scarcity (Section 15.3.3.2 and Cross-Chapter Box INTERREG in Chapter 16; Schewe et al., 2014; Holding et al., 2016; Karnauskas et al., 2016), making water security a key risk (KR4 in Figure 15.5) in small islands. Small islands are usually environments where demand

for resources related to socioeconomic factors such as population growth, urbanisation and tourism already place increasing pressure on limited freshwater resources. In many small islands, water demand already exceeds supply. For example, in the Caribbean, Barbados is utilising close to 100% of its available water resources and St. Lucia has a water supply deficit of approximately 35% (Cashman, 2014)... The Caribbean and Pacific regions have historically been affected by severe droughts (Peters, 2015; FAO, 2016; Barkey and Bailey, 2017; Paeniu et al., 2017; Trotman et al., 2017; Anshuka et al., 2018) with significant physical impacts and negative socioeconomic outcomes. Water quality is affected by drought as well as water availability. The El Niño related 2015–2016 drought in Vanuatu led to reliance on small amounts of contaminated water left at the bottom of household tanks (Iese et al., 2021a). The highest land disturbance percentages have coincided with major droughts in Cuba (de Beurs et al., 2019). Drought has been shown to have an impact on rainwater harvesting in the Pacific (Quigley et al., 2016) and Caribbean (Aladenola et al., 2016), especially in rural areas where connections to centralised public water supply have been difficult. Increasing trends in drought are apparent in the Caribbean (Herrera and Ault, 2017) although trends in the western Pacific are not statistically significant (McGree et al., 2016).”).

²⁸⁹ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuvi N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) *Chapter 12: Central and South America*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY*, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1712 (“Despite the observed increase in rainfall in the region, between 2014 and 2016 Brazil endured a water crisis that affected the population and economy of major capital cities in the SES region (Blunden and Arndt, 2014; Nobre et al., 2016a). Extremely long dry spells have become more frequent in southeastern Brazil, affecting 40 million people and the economies in cities such as Rio de Janeiro, São Paulo and Belo Horizonte, which are the industrial centres of the country (medium confidence: medium evidence, medium agreement) (PBMC, 2014; Nobre et al., 2016a; Cunningham et al., 2017; Marengo et al., 2017, 2020b; Lima and Magaña Rueda, 2018).”). See also Nobre C. A., et al. (2016) *Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015*, J. WATER RES. PROTECT. 8(2): 562–262, 259 (“Mean discharge in the summer (Nov–Mar) of 2014 was 17.9 m³/s and in 2015 it was 24.0 m³/s, far below the average summer discharge, 59.8 m³/s (70.0% and 60%, respectively), for the period 1930–2013. The 1953/54 rainfall deficit prompted construction of the Cantareira Reservoir system [19]. After this, longer-term planning by regional governments has fallen short, and many residents are already enduring sporadic water cutoffs, some lasting for many days. The Cantareira reservoir system reached critical conditions in early 2015. Storage levels were only 5% of its 1.3 billion m³ capacity in January 2015 and 15% at the end of the rainy season in March 2015.”).

²⁹⁰ Vicedo-Cabrera A. M., et al. (2021) *The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change*, NAT. CLIM. CHANG. 11: 492–500, Supplementary Materials (Supplementary Table 4).

²⁹¹ Hartinger S. M., et al. (2023) *The 2022 South America report of The Lancet Countdown on health and climate change: trust the science. Now that we know, we must act*, LANCET REG. HEALTH AM. 20(100470): 1–35, 2 (“The changing environmental conditions are also affecting the geographical distribution of infectious diseases. The region is endemic for dengue, which is responsible for a high burden of disease and frequent epidemic cycles across the region. The climate suitability for dengue transmission reached its highest level in recent years, with an increase of 35.3% in 2012–2021 compared to the 1951–1960 baseline (indicator 1.3). Estimated fitness for dengue transmission between 1951 and 2021 increased over time in all countries where the mosquito is found (except Argentina and Suriname). Adding to climate-related pressures, urbanisation, and mobility in countries such as Brazil and Peru have increased dengue spread to higher latitudes and less populated areas. Climate change can also lead to viral sharing among previously geographically isolated wildlife species, leading to cross-species transmission and disease emergence. Compounding the increase in dengue risk posed by climate changes, temperate Southern Cone countries are highly vulnerable to severe dengue outcomes, mainly driven by rapid urbanisation. Argentina and Uruguay experienced increased vulnerability between 1990 and 2019 (indicator 2.3).”).

²⁹² Yglesias-González M., Palmeiro-Silva Y., Sergeeva M., Cortés S., Hurtado-Epstein A., Buss D. F., Hartinger S. M., & Red de Clima y Salud de América Latina y el Caribe (2022) *Code Red for Health response in Latin America*

[and the Caribbean: Enhancing peoples' health through climate action](#), LANCET REG. HEALTH AM. 11(100248): 1–8, 3 (“Dengue cases have almost tripled from 2000-2009 (6.78 million) to 2010-2019 (16.52 million) and the largest record of cases occurred in 2019.”); citing Pan American Health Organization & World Health Organization, [Dengue](#), PLISA Health Information for the Americas (last visited 24 May 2023).

²⁹³ Kephart J. L., Avila-Palencia I., Bilal U., Gouveia N., Caiaffa W. T., & Diez Roux A. V. (2021) [COVID-19, Ambient Air Pollution, and Environmental Health Inequities in Latin American Cities](#), J. URBAN HEALTH. 98(3): 428–432, 428 (“High levels of air pollution in many Latin American cities in the past may have primed many residents for more severe infection and mortality from COVID-19 by contributing to the development of chronic diseases. Many of the chronic diseases associated with long-term, cumulative exposure to air pollution appear to be correlated with a higher vulnerability to severe COVID-19 outcomes, including hospitalization, need for critical care, and death [^{1,2}]. A recent study in the USA reported that a long-term increase of only 1 µg/m³ PM_{2.5} was associated with an 8% increase in COVID-19 death rate [³]. In addition to cumulative exposures, it is plausible that short-term air pollution exposures interact with SARS-CoV-2 infection itself [⁴], possibly via their effects on inflammation-related processes. However, the effect of immediate changes in air pollution on COVID-19-related mortality is yet to be tested.”).

²⁹⁴ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuví N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) [Chapter 12: Central and South America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1722 (Table 12.6).

²⁹⁵ World Bank (2015) [INDIGENOUS LATIN AMERICA IN THE TWENTY-FIRST CENTURY: THE FIRST DECADE](#), 9 (“The number of indigenous persons living in poverty has fallen, but the gap separating them from other Latin Americans has either remained stagnant or widened. Poverty, in fact, afflicts 43 percent of the indigenous population in the region—more than twice the proportion of non-indigenous people—while 24 percent of all indigenous people live in extreme poverty, 2.7 times more than the proportion of non-indigenous people.”).

²⁹⁶ United Nations Department of Economic and Social Affairs – Indigenous Peoples, [Climate Change](#) (last visited 11 July 2023) (“Indigenous peoples are among the first to face the direct consequences of climate change, due to their dependence upon, and close relationship, with the environment and its resources. Climate change exacerbates the difficulties already faced by indigenous communities including political and economic marginalization, loss of land and resources, human rights violations, discrimination and unemployment. ... Climate change poses threats and dangers to the survival of indigenous communities worldwide, even though indigenous peoples contribute the least to greenhouse emissions. In fact, indigenous peoples are vital to, and active in, the many ecosystems that inhabit their lands and territories and may therefore help enhance the resilience of these ecosystems. In addition, indigenous peoples interpret and react to the impacts of climate change in creative ways, drawing on traditional knowledge and other technologies to find solutions which may help society at large to cope with impending changes.”). See also Human Rights Council (30 April 2012) [Expert Mechanism on the Rights of Indigenous Peoples: Study on the role of languages and culture in the promotion and protection of the rights and identity of indigenous peoples](#), United Nations General Assembly, Fifth session, A/HRC/EMRIP/2012/3, 16 (“As the Independent Expert in the field of cultural rights has noted, protecting cultures can be challenging “especially in societies where people feel that their cultural heritage is under threat, due in particular to the dynamism or dominance of other cultures, globalization and development processes and/or the dominant position of corporate actors in the field of culture and leisure.”⁶³ Moreover, loss of lands, territories and resources can limit the ability of indigenous cultures to adapt organically. Because of these changes and obstacles, there must be a conscious effort to maintain traditional values and instil cultural strength, pride and dignity.”).

²⁹⁷ See Riehl A. (26 November 2018) [The impact of climate change on language loss](#), THE CONVERSATION (“While approximately 7,000 languages are spoken in the world today, [only about half are expected to survive](#) this century. A number of factors contribute to this loss: increasing globalization, which pushes countries and individuals to shift to national or international languages for economic reasons; lack of support for regional languages in educational systems

and mass media; persecution of minority linguistic groups by governments and disruption of communities during war and emigration. ... One stressor that may be the tipping point for some communities is [climate change](#). Many small linguistic communities are located on islands and coastlines vulnerable to hurricanes and a rise in sea levels. Other communities are settled on lands where increases in temperature and fluctuations in precipitation can threaten traditional farming and fishing practices. These changes will force communities to relocate, creating [climate change refugees](#). The resultant dispersal of people will lead to the splintering of linguistic communities and increased contact with other languages. These changes will place additional pressures on languages that are already struggling to survive.”); and Sustainability for All (15 May 2023) [The Silent Death Of The World’s Languages, Another Consequence Of Climate Change](#), ACCIONA (“The reasons why [indigenous languages](#) are disappearing do not strictly obey linguistic processes such as the (non) transmission between generations, political conflicts or lack of legal recognition. The **climate crisis** is also a determining factor. Many small **linguistic communities are located on islands or coasts** which are vulnerable to hurricanes or **rising sea levels**. Other communities are settled in lands where rising temperatures and rainfall fluctuations can threaten traditional farming and fishing practices. These changes oblige the communities to relocate, creating **climate change refugees**. The catastrophes caused 23.7 million internal displacements in 2021, most of which were due to meteorological phenomena. The resulting migration of people causes linguistic communities to fragment and greater contact with other languages. These changes have repercussions on minority languages, which were already struggling to survive.”).

²⁹⁸ See generally Economic Commission for Latin America and the Caribbean (2014) [GUARANTEEING INDIGENOUS PEOPLE’S RIGHTS IN LATIN AMERICA: PROGRESS IN THE LAST DECADE AND REMAINING CHALLENGES](#), United Nations.

²⁹⁹ International Labour Office (2017) [INDIGENOUS PEOPLES AND CLIMATE CHANGE: FROM VICTIMS TO CHANGE AGENTS THROUGH DECENT WORK](#), 7 (“It is important to highlight that the risks that climate change poses for indigenous peoples differ from the risks that it poses for other groups in society, including the poor (in their entirety). This is because indigenous peoples share six characteristics that, in combination, are not present in any other group. Thus they are especially vulnerable to the direct impacts of climate change; to the impacts of environmental destruction that leads to climate change; and to mitigation and adaptation measures. First, indigenous peoples are among the poorest of the poor, the stratum most vulnerable to climate change. Second, they depend on renewable natural resources most at risk to climate variability and extremes for their economic activities and livelihoods. Third, they live in geographical regions and ecosystems that are most exposed to the impacts of climate change, while also sharing a complex cultural relationship with such ecosystems. Fourth, high levels of exposure and vulnerability to climate change force indigenous peoples to migrate, which in most cases is not a solution and can instead exacerbate social and economic vulnerabilities. Fifth, gender inequality, a key factor in the deprivation suffered by indigenous women, is magnified by climate change. Sixth, and lastly, many indigenous communities continue to face exclusion from decision-making processes, often lacking recognition and institutional support. This limits their access to remedies, increases their vulnerability to climate change, undermines their ability to mitigate and adapt to climate change, and consequently poses a threat to the advances made in securing their rights.”).

³⁰⁰ Hagen I., Huggel C., Ramajo L., Chacón N., Ometto J. P., Postigo J. C., & Castellanos E. J. (2022) [Climate change-related risks and adaptation potential in Central and South America during the 21st century](#), ENV. RES. LETT. 17(3): 1–26, 4 (“Indigenous communities often lack access to infrastructure and public service systems, as well as territorial autonomy and self-determination, and are often forced to occupy climate risk prone areas such as low-lying coastlines, steep slopes and floodplains (González [2015](#), World Bank Group [2015](#)).”).

³⁰¹ Sobrevila C. (2008) [THE ROLE OF INDIGENOUS PEOPLES IN BIODIVERSITY CONSERVATION: THE NATURAL BUT OFTEN FORGOTTEN PARTNERS](#), World Bank, xi–xii, 3 (“Many or most of the world’s major centers of biodiversity coincide with areas occupied or controlled by Indigenous Peoples. Traditional Indigenous Territories encompass up to 22 percent of the world’s land surface and they coincide with areas that hold 80 percent of the planet’s biodiversity. Also, the greatest diversity of indigenous groups coincides with the world’s largest tropical forest wilderness areas in the Americas (including Amazon), Africa, and Asia, and 11 percent of world forest lands are legally owned by Indigenous Peoples and communities. This convergence of biodiversity-significant areas and indigenous territories presents an enormous opportunity to expand efforts to conserve biodiversity beyond parks, which tend to benefit from most of the funding for biodiversity conservation.”). See also Oswald-Spring Ú. (2022) [The Impact of Climate Change](#)

on the Gender Security of Indigenous Women in Latin America, in ENVIRONMENT, CLIMATE, AND SOCIAL JUSTICE, Madhanagopal D., Beer C. T., Nikku B. R., & Pelsler A. J. (eds.), 117 (“with a global representation of only 5%, indigenous people protect 80% of the biodiversity on the planet. Women are especially active in environmental care and ecosystem restoration. However, the dominant mindset in the North American political scenario has prioritized military security over environmental conflicts. Their reference object was the state. The values at risk are sovereignty and territorial integrity, reducing interest in people and nature. Gender security focuses on women, indigenous and vulnerable groups, analysing gender relations, equity, and empowerment to overcome the patriarchal worldview and institutions represented by transnational corporations, churches, and authoritarian governments. Latin America, especially Central America and Mexico (Mesoamerica), are highly affected by climate change. Indigenous women are also the poorest in the whole region. They have a limited capacity for adaptation and little governmental support. They often live in abrupt mountain regions or have migrated into unsafe slums of megacities.”; “The global indigenous population of approximately 300 million people is composed of about 5,000 distinct indigenous cultures worldwide, living in every climate from the Arctic Circle to the tropical rain forests. Although Indigenous Peoples make up only 4 percent of the world’s population, they represent 95 percent of the world’s cultural diversity.”).

³⁰² See Ramos E. P., & Dias K. M. (2021) *Gender, Migration, Climate Change and Disasters in Latin America and the Caribbean*, UN Women; and Revelo L. A. (2022) *Women’s Autonomy and Gender Equality at the Centre of Climate Action in Latin America and the Caribbean*, UN Women.

³⁰³ See Ramos E. P., & Dias K. M. (2021) *Gender, Migration, Climate Change and Disasters in Latin America and the Caribbean*, UN Women; and Revelo L. A. (2022) *Women’s Autonomy and Gender Equality at the Centre of Climate Action in Latin America and the Caribbean*, UN Women.

³⁰⁴ Boyer A. E., Meijer S. S., & Gilligan M. (2020) *ADVANCING GENDER IN THE ENVIRONMENT: EXPLORING THE TRIPLE NEXUS OF GENDER INEQUALITY, STATE FRAGILITY, AND CLIMATE VULNERABILITY*, International Union for Conservation of Nature & United States Agency for International Development, 21 (“Research highlights another devastating gender-related issue in the aftermath of disasters, particularly those that lead to displacement and economic loss, and increased instances of domestic and sexual violence.⁹⁸ Social stress due to loss of resources, unemployment, and livelihoods in a post-disaster context can strain household power dynamics and increase instances of intimate partner violence (IPV).⁹⁹ Women and girls, members of the LGBT community, and people who do not conform with societal gender norms report increased instances of sexual violence and GBV in post-disaster contexts in emergency shelters that are overcrowded, unsafe, unfamiliar, and lack privacy.^{100, 101} Additionally, when aid workers who are not sensitized to gender issues, or where emergency shelters do not provide adequate resources, there is a risk of exacerbating gender inequalities, as evidenced by instances where LGBT people were turned away or arrested for trying to access emergency shelters in disaster situations.¹⁰²”). See also Ramos E. P., & Dias K. M. (2021) *Gender, Migration, Climate Change and Disasters in Latin America and the Caribbean*, UN Women; Revelo L. A. (2022) *Women’s Autonomy and Gender Equality at the Centre of Climate Action in Latin America and the Caribbean*, UN Women; and Felisi E. (27 June 2021) *Gender and Sexual Minorities: The Invisible Victims of Climate Change*, REPORTOUT.

³⁰⁵ Renshaw N., Adoo-Kissi-Debrah R., Kumar A., Massawudu Musah L., & Burson J. (2022) *A healthy future for children and adolescents*, THE LANCET 400(10358): 1100–1101, 1100 (“Today, over 90% of children breathe dangerously polluted air, and in low-income and middle-income countries this figure is 98%.”); citing World Health Organization (2021) *WHO GLOBAL AIR QUALITY GUIDELINES: PARTICULATE MATTER (PM_{2.5} AND PM₁₀), OZONE, NITROGEN DIOXIDE, SULFUR DIOXIDE AND CARBON MONOXIDE*.

³⁰⁶ World Health Organization (2018) *AIR POLLUTION AND CHILD HEALTH: PRESCRIBING CLEAN AIR*, 5, 12–13 (“• Some 543 000 deaths in children under 5 years and 52 000 deaths in children aged 5–15 years were attributed to the joint effects of ambient and household air pollution in 2016. • Together, household air pollution from cooking and ambient air pollution cause more than 50% of acute lower respiratory tract infection (ALRI) in children under 5 years in LMICs. • Of the total number of deaths attributable to the joint effects of household and ambient air pollution worldwide in 2016, 9% were in children.”; “There is strong evidence that exposure to ambient air pollution can negatively affect children’s mental and motor development.... There is robust evidence that exposure to air pollution damages children’s lung function and impedes their lung function growth, even at lower levels of exposure. Studies

have found compelling evidence that prenatal exposure to air pollution is associated with impairment of lung development and lung function in childhood. Conversely, there is evidence that children experience better lung function growth in areas in which ambient air quality has improved.... There is substantial evidence that exposure to ambient air pollution increases the risk of children for developing asthma and that breathing pollutants exacerbates childhood asthma as well.”).

³⁰⁷ United Nations International Children’s Emergency Fund (2 December 2022) [9 Out Of 10 Children in Latin America and The Caribbean are Exposed to at Least Two Climate and Environmental Shocks](#) (“The Children’s Climate Risk Index (CCRI) reveals that in Latin America and the Caribbean: 55 million children are exposed to water scarcity; 60 million children are exposed to cyclones; 85 million children are exposed to Zika; 115 million children are exposed to Dengue; 45 million children are exposed to heatwaves; 105 million children are exposed to air pollution. While nearly every child around the world is at risk from at least one of these climate and environmental hazards, the data reveal the worst affected countries face multiple and often overlapping shocks that threaten to erode development progress and deepen child deprivations.”).

³⁰⁸ United Nations International Children’s Emergency Fund (2022) [THE COLDEST YEAR OF THE REST OF THEIR LIVES: PROTECTING CHILDREN FROM THE ESCALATING IMPACTS OF HEATWAVES](#), 24 (“There are deep and terrible effects of failing to limit global heating to 1.7 degrees. Although exposure to high heatwave duration is expected to increase in both emission scenarios, the difference in projections between low and very high emission scenarios means that by 2050, over 370 million more children will be exposed to high heatwave duration under the very high emission scenario.”).

³⁰⁹ Cissé G., McLeman R., Adams H., Aldunce P., Bowen K., Campbell-Lendrum D., Clayton S., Ebi K. L., Hess J., Huang C., Liu Q., McGregor G., Semenza J., & Tirado M. C. (2022) [Chapter 7: Health, Wellbeing, and the Changing Structure of Communities](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1053 (“Older adults (generally defined as persons aged 65 and older) are disproportionately vulnerable to the health impacts associated with climate change and weather extremes.”).

³¹⁰ Hartinger S. M., et al. (2023) [The 2022 South America report of The Lancet Countdown on health and climate change: trust the science. Now that we know, we must act](#), LANCET REG. HEALTH AM. 20(100470): 1–35, 2 (“In the last ten years, the more frequent and intense heatwaves have increasingly put the health and survival of children under one year old and adults above 65 years at risk. On average, children <1 year were exposed to 2.35 million more person-days of heatwaves each year, and adults above 65 years exposed to 12.3 million more person-days, as compared to a 1996–2005 baseline (indicator 1.1.1).”).

³¹¹ Hartinger S. M., et al. (2023) [The 2022 South America report of The Lancet Countdown on health and climate change: trust the science. Now that we know, we must act](#), LANCET REG. HEALTH AM. 20(100470): 1–35, 2 (“In the last ten years, the more frequent and intense heatwaves have increasingly put the health and survival of children under one year old and adults above 65 years at risk. On average, children <1 year were exposed to 2.35 million more person-days of heatwaves each year, and adults above 65 years exposed to 12.3 million more person-days, as compared to a 1996–2005 baseline (indicator 1.1.1).”).

³¹² Hartinger S. M., et al. (2023) [The 2022 South America report of The Lancet Countdown on health and climate change: trust the science. Now that we know, we must act](#), LANCET REG. HEALTH AM. 20(100470): 1–35, 2 (“Since the year 2000, the estimated number of heat-related deaths has increased continuously among people over 65 in almost all countries.”).

³¹³ Hartinger S. M., et al. (2023) [The 2022 South America report of The Lancet Countdown on health and climate change: trust the science. Now that we know, we must act](#), LANCET REG. HEALTH AM. 20(100470): 1–35, 8 (“Indicator 1.1.2: heat-related mortality—headline finding: the estimated number of heat-related deaths has increased, on average, by 160% in the 2017–2021 period compared to the 2000–2004 period.”).

³¹⁴ Bryant N., Stone R., Connelly C., & Boerner K. (2022) *The Impact of Climate Change: Why Older Adults are Vulnerable*, LeadingAge LTSS Center, University of Massachusetts Boston, 4 (“Researchers have examined how several aspects of climate change—including extreme heat or cold, poor air quality, and extreme weather disasters—affect the health of older Americans. For example, heat waves, hurricanes, and flooding are all associated with higher risk of hospitalization and higher mortality rates for people 65 and older, compared to people under the age of 65. In addition, older adults may be at increased risk for: → The psychological health effects of weather events. → Negative physical and mental health outcomes resulting from air pollution, wildfires, and droughts. → Disruption of services due to forced evacuations. These interruptions can worsen preexisting conditions for people with chronic illness.”).

³¹⁵ World Bank (2022) *CONSOLIDATING THE RECOVERY: SEIZING GREEN GROWTH OPPORTUNITIES*, Latin America and the Caribbean Semiannual Report, 29 (“All in all, the combined effects of climate change in LAC are projected to push between 2.4 million and 5.8 million people into extreme poverty by 2030 (Jafino et al. 2020), mostly due to health-related effects—the increasing prevalence of child stunting, vector-borne diseases, and diarrhea—resulting from lack of access to safe water and sanitation, excessive heat, and more frequent droughts and floods (figure 2.5).”).

³¹⁶ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuví N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) *Chapter 12: Central and South America*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY*, *Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1746 (“In IPCC’s Third Assessment Report (TAR), AR4 and AR5, WGII recognised higher risks associated with poor living conditions, substandard housing, inadequate services, location of hazardous sites stemming from a lack of alternatives and the need to work more seriously on strengthening governance structures involving residents and community organisations, among others (Wilbanks et al., 2007; Revi et al., 2014). The AR5 CSA chapter stated that poverty levels remained high (45% for CA and 30% for SA in 2010) despite years of sustained economic growth. Poor and vulnerable groups are disproportionately affected in negative ways by climate change (Section 8.2.1.4; Section 8.2.2.3; SR15 Section 5.2 and Section 5.2.1, Roy et al., 2018) due to physical exposure derived from their place of residence or work, illiteracy, low income and skills, political and institutional marginalisation tied to a lack of recognition of informal settlements and employment, poor access to good-quality services and infrastructure, resources and information and other factors (very high confidence) (UN-Habitat, 2018; SR15 Sections 5.2.1, 5.6.2, 5.6.3, 5.6.4, Roy et al., 2018).”).

³¹⁷ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuví N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) *Chapter 12: Central and South America*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY*, *Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1765.

³¹⁸ Kumari Rigaud K., de Sherbinin A., Jones B., Bergmann J., Clement V., Ober K., Schewe J., Adamo S., McCusker B., Heuser S., & Midgley A. (2018) *GROUNDSWELL: PREPARING FOR INTERNAL CLIMATE MIGRATION*, The World Bank, xxi (“Under all three scenarios in this report, there is an upward trend of internal climate migration in SubSaharan Africa, South Asia, and Latin America by 2050. In the worst-case or “pessimistic” scenario, the number of internal climate migrants could reach more than 143 million (around 86 million in Sub-Saharan Africa, 40 million in South Asia, and 17 million in Latin America) by 2050 (Figure 1). The poorest people and the poorest countries are the hardest hit. ... Across all scenarios, climate change is a growing driver of internal migration. Climate change impacts (crop failure, water stress, sea level rise) increase the probability of migration under distress, creating growing challenges for human development and planning. Vulnerable people have the fewest opportunities to adapt locally or to move away from risk and, when moving, often do so as a last resort. Others, even more vulnerable, will be unable to move, trapped in increasingly unviable areas. Internal climate migration will intensify over the next several decades and could accelerate after 2050 under the pessimistic scenario due to stronger climate impacts combined with steep population growth in many regions.”).

³¹⁹ World Bank (2018) [Internal Climate Migration in Latin America](#), Groundswell Policy Note #3, 4 (Table 1).

³²⁰ World Bank (2018) [Internal Climate Migration in Latin America](#), Groundswell Policy Note #3, 6 (“Lower global emissions reduce climate pressure on ecosystems and livelihoods and broaden the opportunities for people to stay in place or move under better circumstances. In Latin America, under the more climate-friendly scenario, there would be up to 87 percent less climate migrants—with numbers reduced from a high of 17.1 million under the pessimistic reference scenario to 2.2–9.4 million under this scenario.”).

³²¹ Center for Puerto Rican Studies (2018) [New Estimates: 135,000+ Post-Maria Puerto Ricans Relocated to Stateside](#), Centro DS2018-01, 1 (“Based on school enrollment data, we estimate that more than 135,000 Puerto Ricans relocated to the United States six months after Hurricane Maria landed in Puerto Rico. Prior estimates of the magnitude of this exodus are based on movement of passenger or projections based on recent migration trends from Puerto Rico to the United States.”).

³²² Cantor D. J. (2018) [CROSS-BORDER DISPLACEMENT, CLIMATE CHANGE, AND DISASTERS: LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN](#), United Nations High Commissioner for Refugees, 22 (“At the regional level, including in the Americas, there are several regional integration processes that have developed agreements that either allow for free movement based on supranational forms of ‘citizenship’ of the pertinent entity (i.e. erasing national boundaries between member States) or allow for favourable migration treatment between member States. They may offer a legal basis for international movement by persons affected by a disaster. Nonetheless, given their close ties to national laws and policies in the pertinent blocs, they will be addressed further in relation to each of the regions in turn.⁹⁶”).

³²³ See for example Campa A. (21 May 2022) [Climate Migrants Lack a Clear Path to Asylum in the US](#), INSIDE CLIMATE NEWS; and Limoges B. (24 April 2021) [‘I’m trapped here’: Haitian asylum seekers languish in Mexico](#), AL JAZEERA.

³²⁴ Gemenne F., Zickgraf C., Hut E., & Castillo Betancourt T. (2021) [Forced displacement related to the impacts of climate change and disasters](#), Reference Paper for the 70th Anniversary of the 1951 Refugee Convention, Prepared for the United Nations High Commissioner for Refugees, 5 (“Throughout the 1990s, public debates were dominated by an alarmist narrative claiming that the world should prepare for millions of ‘climate refugees’ in the coming decade. This narrative geared policy debates in two directions. First, the regular use of the expression ‘climate refugees’ led many experts or organisations to point out that the term was a misnomer because the 1951 Geneva Convention made no mention of environmental phenomena as a basis for international protection needs. This absence of an explicit reference to environmental factors in existing legal instruments³ prompted many initiatives to create an international legal status for ‘climate refugees’: resolutions were voted in parliaments, expert groups were set up, and lawyers debated whether this new status should be created through a new convention or an amendment to the Geneva Convention (Gemenne 2015). For many activists, politicians and civil society organisations, this lack of international status was the key reason why policies were blind to the environmental drivers of human mobility, and therefore the first priority. It soon appeared that such a status in international law was not just a political no-go area, but also a response that would not meet the needs of the displaced, as most were internally displaced and therefore ineligible to an international status (McAdam 2011). In spite of this, an international status for ‘climate refugees’ continues to be a key demand of many prominent activists, parliamentarians and civil society organisations, such as the Parliamentary Assembly of the Council of Europe, who insist this would be the most appropriate way to protect the displaced. Others, however, argue that persons who are suddenly displaced due to climate or disasters qualify for international protection and that there is no need for a new category (UNHCR 2018)”).

³²⁵ United Nations High Commissioner for Refugees (2022) [Climate Change, Displacement and Human Rights](#), 1 (“The climate crisis is already amplifying vulnerability and driving displacement, which impacts a broad array of human rights, including the rights to education, adequate standard of living and health of those displaced. Highly climate vulnerable countries host 40% of refugees and are home to 70% of people internally displaced by conflict or violence. While these populations are often highly exposed and vulnerable to climate-related shocks, they have fewer resources and support to adapt to an increasingly hostile environment. This raises concerns about the right to equality

and non-discrimination. At the same time, human mobility can protect people and their human rights. This may be through well-prepared and timely emergency evacuations, assisting communities to plan for relocation to safer settlement areas as a measure of last resort, or facilitating safe, orderly and regular migration through regular pathways to prevent displacement from occurring. The freedom and capacity to move is part of upholding human rights and can contribute to climate change adaptation. Extreme weather, which is becoming more frequent and intense with climate change, greatly impacts displaced persons. Recent floods in Sudan were some of the worst observed in decades. Alganaa refugee camp in Sudan’s White Nile State was submerged by flood waters in November 2021, leaving 35,000 South Sudanese refugees in need of urgent assistance.”). *See also* United States White House (2021) [REPORT ON THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON MIGRATION](#), 7 (“Extreme weather events⁹ and conflict are the top two drivers of forced displacement globally, together responsible for the annual movement of nearly 30 million people from their homes.¹⁰ There is a strong correlation between countries and regions most vulnerable to climate change and those that are fragile and/or experiencing conflict or violence. Climate-related impacts may further stress vulnerable communities, increasing the risk of conflict and displacement in the absence of effective prevention efforts, and vice versa. Climate-related impacts also pose an increased risk to marginalized communities displaced by conflict related to the impacts of climate change. This risk is more acute in regions with weak governance and dispute resolution infrastructure, and in growing peri-urban areas where many migrants are heading. Climate change can cause or exacerbate resource scarcity, which may drive conflict directly as well as induce migration of populations in vulnerable situations attempting to secure safety or livelihoods elsewhere.¹¹ Moreover, changes to biodiversity have strong intersections with climate change that also can affect migration, and threaten food and economic security.¹² The subsequent movement of large numbers of people, by force or by choice, brings new groups into contact with one another, potentially shifting power balances, causing further resource scarcity, or igniting tensions between previously separated groups. ¹³ Where climate-related migrations occur within or near population centers, or in locations important for political or economic stability, such as within many nations’ coastal zones, the destabilizing forces associated with climate change may result in outsized affects overall.”).

³²⁶ Alvarez J. A., Arena M., Brousseau A., Faruqee H., Corugedo E. W. F., Guajardo J., Peraza G., & Yopez J. (2022) [Regional Spillovers from the Venezuelan Crisis: Migration Flows and Their Impact on Latin America and the Caribbean](#), International Monetary Fund Departmental Papers, 4 (“The destination and composition of Venezuela’s migrant flows changed as the crisis intensified. Most migrants have settled in other Latin American countries, while some have migrated to other regions, mainly to the United States and Spain. Colombia has received the largest number of migrants, totaling 2.5 million or about 5 percent of the Colombian population in August 2022.¹⁴ Chile, Ecuador, and Peru have also received sizable flows, with the combined number of migrants exceeding 2 million (more than 3 percent of the local population on average).”).

³²⁷ *See* International Crisis Group (2022) [HARD TIMES IN A SAFE HAVEN: PROTECTING VENEZUELAN MIGRANTS IN COLOMBIA](#), Latin America Report No. 94.

³²⁸ Global Witness (2022) [DECADE OF DEFIANCE: TEN YEARS OF REPORTING LAND AND ENVIRONMENTAL ACTIVISM WORLDWIDE](#), 16 (“Global Witness started reporting on the killings of Land and Environmental Defenders in 2012.³¹ Since then, 1733 defenders have been killed trying to protect their land and resources: that’s an average of one defender killed approximately every two days over ten years.”).

³²⁹ Global Witness (2022) [DECADE OF DEFIANCE: TEN YEARS OF REPORTING LAND AND ENVIRONMENTAL ACTIVISM WORLDWIDE](#), 23–26 (“In Brazil, where 342 defenders have been killed over the last decade, the Gini index (the most widely used indicator of inequality) of land ownership distribution is 0.73, placing Brazil among the countries with the greatest land inequality in the world. Research has shown that inequality is greater in the states with highest agricultural commodity production, such as in Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Bahia and in the MATOPIBA region (which comprises the Cerrado biome areas of the states of Maranhão, Tocantins, Piauí and Bahia). Attacks against defenders are also high in these states according to Global Witness data. For example, in Mato Grosso, nine farm workers were tortured and killed in 2017 by hired assassins in an area of illegal deforestation.⁵⁹ The same study also points out that 10% of the largest properties occupy 73% of the agricultural area of Brazil. In all Brazilian states, the 10% of the largest properties own more than 50% of the area. In six states and MATOPIBA, the 10% of the largest properties own more than 70% of the area.⁶⁰ 44 of the 342 defenders killed in Brazil over the last decade were

protesting against agribusiness. Colombia has the highest concentration of landholdings in Latin America, with the largest 1% of landholdings concentrated over 81% of land, leaving only 19% of land distributed among the remaining 99% of farms.⁶¹”).

³³⁰ Glazebrook T. & Opoku E. (2018) [Defending the Defenders: Environmental Protectors, Climate Change and Human Rights](#), ETHICS ENVIRON. 23(2): 83–109.

³³¹ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuvi N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) [Chapter 12: Central and South America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1693 (“**The most widely reported obstacle to adaptation in terrestrial, freshwater, ocean and coastal ecosystems is financing (high confidence)**). There is also a significant gap in identifying limits to adaptation and weak institutional capacity for implementation. This hinders the development of comprehensive adaptation programmes, even under adequate funding.”).

³³² Climate & Clean Air Coalition & United Nations Environment Programme (2018) [INTEGRATED ASSESSMENT OF SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN](#).

³³³ Clean Air Task Force, [Oil and Gas Mitigation Program](#) (last visited 13 June 2023) (“Venting is even more harmful than flaring, since methane warms the climate so powerfully, and VOC and toxic pollutants are released unabated. Venting of this gas should be prohibited in all cases as an absolutely unnecessary source of harmful air pollution. There are numerous lowcost (and usually profitable) ways to utilize natural gas from oil wells. Flaring should be a last resort: only in the most extreme cases should oil producers be allowed to flare gas, and it should be strictly a temporary measure. Rules prohibiting venting of natural gas can easily reduce emissions by 95%.”).

³³⁴ These include precision farming using variable rate technology and nitrogen inhibitors to suppress microbial activity that produces N₂O: Balafoutis A., Beck B., Fountas S., Vangeyte J., van der Wal T., Soto I., Gómez-Barbero M., Barnes A., & Eory V. (2017) [Precision Agriculture Technologies Positively Contributing to GHG Emissions Mitigation, Farm Productivity and Economics](#), SUSTAINABILITY 9(8): 1339, 1–28, 9 (“Tekin (2010) estimated that VRNA can increase wheat production between 1% and 10% offering savings in nitrogen fertilisation between 4% and 37%.”).

³³⁵ Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) [Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe—results from the GAINS model](#), ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 1–21, 16–17 (“An additional almost 10 percent of baseline emissions in 2050 could be removed at a marginal cost below 20 €/t CO₂eq by implementing proper waste and wastewater handling in China, India and the rest of South-East Asia. This would likely come with considerable co-benefits in the form of reduced air and water pollution.”).

³³⁶ United States Climate Alliance (2018) [FROM SLCP CHALLENGE TO ACTION: A ROADMAP FOR REDUCING SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS TO MEET THE GOALS OF THE PARIS AGREEMENT](#), 15 (“Significant opportunities for reducing methane emissions from landfills and capturing value can be seized by reducing food loss and waste, diverting organic waste to beneficial uses, and improving landfill management. These and other actions collectively could reduce methane emissions from waste by an estimated 40-50 percent by 2030 (Appendix A). Such efforts could add value in our states by reducing emissions of volatile organic compounds and toxic air contaminants from landfills, recovering healthy food for human consumption in food insecure communities, supporting healthy soils and agriculture, generating clean energy and displacing fossil fuel consumption, and providing economic opportunities across these diverse sectors. Many of these benefits will accrue in low-income and disadvantaged communities.”). See also Geyik Ö., Hadjidakou M., & Bryan B. A. (2022) Climate-friendly and nutrition-sensitive interventions can close the global dietary nutrient gap while reducing GHG emissions, Nat. Food. 4: 61–73, 61 (“Here, we estimate the non-CO₂ greenhouse gas emissions resulting from closing the world’s dietary nutrient gap—that between country-level

nutrient supply and population requirements—for energy, protein, iron, zinc, vitamin A, vitamin B12 and folate under five climate-friendly intervention scenarios in 2030. We show that improving crop and livestock productivity and halving food loss and waste can close the nutrient gap with up to 42% lower emissions (3.03 Gt CO₂eq yr⁻¹) compared with business-as-usual supply patterns with a persistent nutrient gap (5.48 Gt CO₂eq yr⁻¹).”).

³³⁷ In the U.S. alone, natural gas stoves emit 28.1 Gg of methane a year, among other climate pollutants that are hazardous to the environment and human health: *see* Lebel E. D., Finnegan C. J., Ouyang Z., & Jackson R. B. (2022) [Methane and NO_x Emissions from Natural Gas Stoves, Cooktops, and Ovens in Residential Homes](#), ENVIRON. SCI. TECHNOL. 56(4): 2529–2539, 2529 (“Natural gas stoves in >40 million U.S. residences release methane (CH₄)—a potent greenhouse gas—through post-meter leaks and incomplete combustion. We quantified methane released in 53 homes during all phases of stove use: steady-state-off (appliance not in use), steady-state-on (during combustion), and transitory periods of ignition and extinguishment. We estimated that natural gas stoves emit 0.8–1.3% of the gas they use as unburned methane and that total U.S. stove emissions are 28.1 [95% confidence interval: 18.5, 41.2] Gg CH₄ year⁻¹. More than three-quarters of methane emissions we measured originated during steady-state-off. Using a 20-year timeframe for methane, annual methane emissions from all gas stoves in U.S. homes have a climate impact comparable to the annual carbon dioxide emissions of 500 000 cars. In addition to methane emissions, co-emitted health-damaging air pollutants such as nitrogen oxides (NO_x) are released into home air and can trigger respiratory diseases. In 32 homes, we measured NO_x (NO and NO₂) emissions and found them to be linearly related to the amount of natural gas burned ($r^2 = 0.76$; $p \ll 0.01$). Emissions averaged 21.7 [20.5, 22.9] ng NO_x J⁻¹, comprised of 7.8 [7.1, 8.4] ng NO₂ J⁻¹ and 14.0 [12.8, 15.1] ng NO J⁻¹. Our data suggest that families who don’t use their range hoods or who have poor ventilation can surpass the 1-h national standard of NO₂ (100 ppb) within a few minutes of stove usage, particularly in smaller kitchens.”).

³³⁸ Climate & Clean Air Coalition & United Nations Environment Programme (2018) [INTEGRATED ASSESSMENT OF SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN](#), 111 (Table 3.2).

³³⁹ Climate & Clean Air Coalition & United Nations Environment Programme (2018) [INTEGRATED ASSESSMENT OF SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN](#), 111 (Table 3.2).

³⁴⁰ Climate & Clean Air Coalition & United Nations Environment Programme (2018) [INTEGRATED ASSESSMENT OF SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN](#), 111 (Table 3.2).

³⁴¹ Deloitte, [How Canada can decarbonize by 2050](#) (last visited 28 June 2023) (“Model for a net-zero future in Canada”; “New regulations that limit methane emissions from fugitive sources—like the drilling, extraction, and transportation process—will be applied in the near term to the oil and gas sector.”). *See also* Clune R., Corb L., Glazener W., Henderson K., Pinner D., Walter D. (May 2022), [NAVIGATING AMERICA’S NET-ZERO FRONTIER: A GUIDE FOR BUSINESS LEADERS](#), 3 (“To reach net zero, our analysis shows that at least 60 percent of the natural gas that’s now being used would need to be replaced by zero-carbon energy sources, primarily in the power, manufacturing, chemicals, and buildings sectors. And methane emissions from venting and from fugitive leaks in oil and gas production would need to be curbed by nearly 80 percent by 2030.”).

³⁴² Deloitte, [How Canada can decarbonize by 2050](#) (last visited 28 June 2023) (“Model for a net-zero future in Canada”; “Just 7 percent of our energy is supplied by non-hydro renewables. Diversifying supply chains for materials vital to renewable infrastructure could increase the usage of renewables. Biogenic, low-carbon fuel innovations could be used in transport sectors where electricity isn’t viable”; “Model for a net-zero future in Canada” Figure); (“Small modular reactors are promising for powering remote communities and off-grid industrial projects. At scale, however, modular reactors are currently unproven. Deploying them could involve lower initial capital costs compared with their large-reactor counterparts.”).

³⁴³ Clune R., Corb L., Glazener W., Henderson K., Pinner D., & Walter D. (2022) [NAVIGATING AMERICA’S NET-ZERO FRONTIER: A GUIDE FOR BUSINESS LEADERS](#), McKinsey Sustainability, 6 (Exhibit 4).

³⁴⁴ Deloitte, [How Canada can decarbonize by 2050](#) (last visited 28 June 2023) (“Model for a net-zero future in Canada”; “As an alternative fuel, hydrogen is plentiful, non-toxic, efficient, and safe. Clean hydrogen could boost the resilience of Canada’s energy sector through various applications in the industrial sector, transportation, and buildings. New technologies can be scaled to create fresh market demand for low-carbon hydrogen, and to decarbonize those sectors that cannot yet be fully electrified. Support for hydrogen end-use technologies could provide resource-based provinces the opportunity to lead the transition to a low-carbon future.”).

³⁴⁵ Environment and Climate Change Canada (2017) [STRATEGY ON SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS – 2017](#), 7–9 (Figure 1; “Regulatory measures to address wood-burning appliances are limited at both federal and provincial/territorial levels. Some provinces regulate the sale of new wood-burning appliances, while some municipalities have by-laws relating to residential wood combustion, including emission standards, bans on certain types of appliances, or restrictions on the use of wood-burning appliances during smog days. Measures to address emissions from existing sources are limited to wood stove change-out programs or rebates for certain new appliances in some provinces and territories.”).

³⁴⁶ Clune R., Corb L., Glazener W., Henderson K., Pinner D., & Walter D. (2022) [NAVIGATING AMERICA’S NET-ZERO FRONTIER: A GUIDE FOR BUSINESS LEADERS](#), McKinsey Sustainability, 3 (“To reach net zero, our analysis shows that at least 60 percent of the natural gas that’s now being used would need to be replaced by zero-carbon energy sources, primarily in the power, manufacturing, chemicals, and buildings sectors. And methane emissions from venting and from fugitive leaks in oil and gas production would need to be curbed by nearly 80 percent by 2030.”).

³⁴⁷ Clune R., Corb L., Glazener W., Henderson K., Pinner D., & Walter D. (2022) [NAVIGATING AMERICA’S NET-ZERO FRONTIER: A GUIDE FOR BUSINESS LEADERS](#), McKinsey Sustainability, 6–7 (Renewable power. In a net-zero scenario, the country’s energy system would be reconfigured. Indeed, the United States has set a target to create a “carbon-pollution-free power sector by 2035.”⁵ Energy consumption would shift away from fossil fuels, which provide 90 percent of primary energy today, and toward renewables, which would produce just over 75 percent of primary energy in 2050. This shift would result in more than 35 percent of the emissions reduction that is needed in 2025 and more than onequarter of the reduction in 2030. To expand the use of renewable power, the United States would install 40 gigawatts per year of renewable capacity in 2025. By 2030, the installation rate for renewables would reach 100 gigawatts per year, three times what it is now, as utilities tap the best solar resources from Texas to California and wind resources in the Midwest. Utilities would also build out power grids and modernize them with flexibility resources including storage and dispatchable low-carbon power (for example, gas power plants with carbon capture, utilization, and storage) to prevent interruptions in electricity supply. Makers of renewable-electricity and storage equipment would expand production capacity to meet this demand, supporting \$300 billion of capital investment per year by 2025.”). *See also* Tai H., Samandari H., Pachthod D., Polymeneas E., Bolano A., Prat M. P., & Lodesani F. (2022) [THE ENERGY TRANSITION: A REGION-BY-REGION AGENDA FOR NEAR-TERM ACTION](#), 48 (“However, the current trajectory is not at the pace and scale the global pathway requires to limit warming to 1.5°C. There are six high-priority measures that could be taken to help the United States embark on a more orderly energy transition. . . Securing access to adequate land with high load factors for the deployment of renewables.”).

³⁴⁸ Deloitte, [How Canada can decarbonize by 2050](#) (last visited 28 June 2023) (“Model for a net-zero future in Canada”; “Loss of carbon contained in soils and terrestrial systems—primarily due to land-use change— perpetuates the accumulation of carbon in the atmosphere at the same time as it limits the inherent ability of ecosystems to withdraw that same carbon when necessary. Decisive action in the short term can restore lost and degraded habitats, as well as protect the longevity of ecological functions and ecosystem services. With a commitment to long-term funding, protected areas can be properly stewarded. Indigenous knowledge and practices in sustainable land and resource management can also be applied to achieve a net-zero future. There is much to be learnt from Indigenous practices in sustainable resource management; from traditions that dictate taking from the land only what’s needed, and only what nature can replace.”). *See also* Robertson G. P., Hamilton S. K., Paustian K., & Smith P. (2022) [Land-based Climate Solutions for the United States](#), *GLOB. CHANGE BIOL.* 28: 4912–4919, 4913 (“Efforts to curb emissions of CO₂ and other greenhouse gases (GHGs) have fallen well short of those needed to meet the international goal of limiting warming to 1.5 or even 2°C by the end of the century (IPCC, 2018). Consequently, we now face an urgent need for negative emissions technologies (NETs) capable of removing GHGs from the atmosphere. NETs fall into

three broad categories (Field & Mach, 2017): improved ecosystem stewardship or nature-based solutions, whereby more carbon is stored in ecosystems via practices like reforestation and afforestation, conservation agriculture, and wetland restoration; biological carbon capture with geologic storage as in bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) and ocean fertilization; and non-biological technologies such as enhanced rock weathering and direct air capture. Several NETs, including conservation agriculture and bioenergy, can also contribute to GHG avoidance by substituting renewable inputs for fossil fuel use.”); and Fargione J. E., *et al.* (2018) [Natural Climate Solutions for the United States](#), *SCI. ADV.* 4(11): 1–14, 1 (“Natural climate solutions (NCS), a portfolio of discrete land stewardship options, are the most mature approaches available for carbon conservation and uptake compared to nascent carbon capture technologies and could complement increases in zero-carbon energy production and energy efficiency to achieve needed climate change mitigation.”).

³⁴⁹ Deloitte, [How Canada can decarbonize by 2050](#) (last visited 28 June 2023) (“Model for a net-zero future in Canada”; “CCUS is the process of capturing carbon dioxide emissions at sources like power plants, cement-production facilities, manufacturing operations, and oil sands, and either reusing or storing it so it will not enter the atmosphere. With five large-scale commercial projects now in operation, Canada has the second-largest CCUS capacity in the world. Most CCUS technologies, however, are still in the early stages of development. They would benefit from scaled demonstration and continued innovation to refine the technology and manage costs.”).

³⁵⁰ Robertson G. P., Hamilton S. K., Paustian K., & Smith P. (2022) [Land-based Climate Solutions for the United States](#), *GLOB. CHANGE BIOL.* 28: 4912–4919, 4913 (“Efforts to curb emissions of CO₂ and other greenhouse gases (GHGs) have fallen well short of those needed to meet the international goal of limiting warming to 1.5 or even 2°C by the end of the century (IPCC, 2018). Consequently, we now face an urgent need for negative emissions technologies (NETs) capable of removing GHGs from the atmosphere. NETs fall into three broad categories (Field & Mach, 2017): improved ecosystem stewardship or nature-based solutions, whereby more carbon is stored in ecosystems via practices like reforestation and afforestation, conservation agriculture, and wetland restoration; biological carbon capture with geologic storage as in bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) and ocean fertilization; and non-biological technologies such as enhanced rock weathering and direct air capture. Several NETs, including conservation agriculture and bioenergy, can also contribute to GHG avoidance by substituting renewable inputs for fossil fuel use.”).

³⁵¹ Robertson G. P., Hamilton S. K., Paustian K., & Smith P. (2022) [Land-based Climate Solutions for the United States](#), *GLOB. CHANGE BIOL.* 28: 4912–4919, 4913 (“Efforts to curb emissions of CO₂ and other greenhouse gases (GHGs) have fallen well short of those needed to meet the international goal of limiting warming to 1.5 or even 2°C by the end of the century (IPCC, 2018). Consequently, we now face an urgent need for negative emissions technologies (NETs) capable of removing GHGs from the atmosphere. NETs fall into three broad categories (Field & Mach, 2017): improved ecosystem stewardship or nature-based solutions, whereby more carbon is stored in ecosystems via practices like reforestation and afforestation, conservation agriculture, and wetland restoration; biological carbon capture with geologic storage as in bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) and ocean fertilization; and non-biological technologies such as enhanced rock weathering and direct air capture. Several NETs, including conservation agriculture and bioenergy, can also contribute to GHG avoidance by substituting renewable inputs for fossil fuel use.”). See also Deloitte, [How Canada can decarbonize by 2050](#) (last visited 28 June 2023) (“Model for a net-zero future in Canada”; (“An area in which Canada is an emerging world leader, clean DAC is contingent on the scale and progress of advancements in this technology. Since DAC consumes energy, its economic and environmental viability depends its proximity to renewable energy sources.”).

³⁵² Clune R., Corb L., Glazener W., Henderson K., Pinner D., & Walter D. (2022) [NAVIGATING AMERICA’S NET-ZERO FRONTIER: A GUIDE FOR BUSINESS LEADERS](#), McKinsey Sustainability, 6 (Exhibit 4).

³⁵³ Nisbet-Jones P. B. R., Fernandez J. M., Fisher R. E., France J. L., Lowry D., Waltham D. A., Woolley Maisch C. A., & Nisbet E. G. (2021) [Is the destruction or removal of atmospheric methane a worthwhile option?](#), *PHILOS. TRANS. R. SOC. A* 380(2215): 1–12, 5 (“Methane is relatively difficult to oxidize compared to other hydrocarbons. The major destruction options include (i) thermal-catalytic oxidation, which is typically with metal catalysts; (ii) photocatalytic oxidation; (iii) biological uptake by aerobic methanotrophic bacteria or their bio-engineered methane-oxidising enzymes and (iv) removal by uptake on zeolites or porous polymers, with the added benefit of not emitting CO₂

waste.”). See also Ming T., Li W., Yuan Q., Davies P., de Richter R., Peng C., Deng Q., Yuan Y., Caillol S., & Zhou N. (2022) [Perspectives on removal of atmospheric methane](#), *ADV. APPL. ENER.* 5(100086): 1–9, 1 (“This article reviews proposed methods for atmospheric methane removal at a climatically significant scale. These methods include enhancement of natural hydroxyl and chlorine sinks, photocatalysis in solar updraft towers, zeolite catalyst in direct air capture devices, and methanotrophic bacteria.”).

³⁵⁴ Deloitte, [How Canada can decarbonize by 2050](#) (last visited 28 June 2023) (“Model for a net-zero future in Canada”; “Canada must invest more in technologies that improve energy efficiencies for transportation, buildings, industrial, and agricultural and forestry operations. Near-term investment in sustainable retrofits for buildings and homes will be needed to improve that resilience to climate events. Policies to incentivize both residential and commercial retrofits can be accelerated and expanded to encourage the widespread adoption of technology that improves energy efficiencies in buildings.”; “Canada must invest more in technologies that improve energy efficiencies for transportation, buildings, industrial, and agricultural and forestry operations. Policies to incentivize both eco-friendly retrofits can be expanded to accelerate the adoption of technology that improves energy efficiencies in buildings.”). See also Clune R., Corb L., Glazener W., Henderson K., Pinner D., & Walter D. (2022) [NAVIGATING AMERICA’S NET-ZERO FRONTIER: A GUIDE FOR BUSINESS LEADERS](#), McKinsey Sustainability, 2 (“Reducing emissions from existing facilities and infrastructure is a major part of the decarbonization agenda. Much of the necessary reduction can come from retrofitting emissions-intensive assets, such as chemical, manufacturing, and power plants, through electrification, the use of low-emissions energy sources (such as hydrogen and biofuels), and carbon capture.”).

³⁵⁵ Clune R., Corb L., Glazener W., Henderson K., Pinner D., & Walter D. (2022) [NAVIGATING AMERICA’S NET-ZERO FRONTIER: A GUIDE FOR BUSINESS LEADERS](#), McKinsey Sustainability, 2 (“Reducing emissions from existing facilities and infrastructure is a major part of the decarbonization agenda. Much of the necessary reduction can come from retrofitting emissions-intensive assets, such as chemical, manufacturing, and power plants, through electrification, the use of low-emissions energy sources (such as hydrogen and biofuels), and carbon capture.”).

³⁵⁶ Clune R., Corb L., Glazener W., Henderson K., Pinner D., & Walter D. (2022) [NAVIGATING AMERICA’S NET-ZERO FRONTIER: A GUIDE FOR BUSINESS LEADERS](#), McKinsey Sustainability, 10 (“As mentioned earlier, hundreds of US-based companies have set net-zero targets for themselves. Many of these targets apply to the emissions from not only their own operations but also their suppliers and the use of their products. Similarly, the White House issued an executive order in December 2021, calling for the federal government to buy zeroemissions goods and services in categories ranging from electricity to vehicles to building materials. Commitments such as these could put pressure on businesses to decarbonize, even if they themselves have not yet set emissions targets (Exhibit 7).”).

³⁵⁷ Deloitte, [How Canada can decarbonize by 2050](#) (last visited 28 June 2023) (“Model for a net-zero future in Canada”; “Turning electricity into a major source of power will require more infrastructure support and investment, like expanding and modernizing electricity grids to make widespread electric vehicle use affordable. Increased investments in electric buses and rail could encourage cleaner-energy transit systems.”).

³⁵⁸ Clune R., Corb L., Glazener W., Henderson K., Pinner D., & Walter D. (2022) [NAVIGATING AMERICA’S NET-ZERO FRONTIER: A GUIDE FOR BUSINESS LEADERS](#), McKinsey Sustainability, 5–6, 12 (“Some changes will be possible only if other entities also make changes; for example, mass uptake of electric vehicles depends significantly on the utility sector expanding grid capacity to support charging networks. In these cases, companies may find it helpful to join other organizations in addressing shared needs, such as the need for industrial-scale networks in hydrogen production and distribution.”).

³⁵⁹ Environment and Climate Change Canada (2017) [STRATEGY ON SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS – 2017](#), 8 (“Based on an assessment of current measures related to black carbon emissions, key mitigation gaps for black carbon include existing on- and off-road mobile diesel sources, stationary diesel engines and wood-burning appliances. In the case of on- and off- road mobile diesel sources, current federal regulatory measures focus on fuels as well as new vehicles and engines. These have and will continue to result in black carbon emission reductions as fleets turn over. However, due to the long lifetimes of diesel vehicles, turnover of the in-use fleet is slow, and fleets are still dominated

by engines pre-dating the most recent emissions standards. Although some provinces and territories have implemented measures focusing on existing vehicles, on- and off- road diesel vehicles and engines continue to be Canada’s largest source of black carbon emissions.”).

³⁶⁰ Balafoutis A., Beck B., Fountas S., Vangeyte J., van der Wal T., Soto I., Gómez-Barbero M., Barnes A., & Eory V. (2017) *Precision Agriculture Technologies Positively Contributing to GHG Emissions Mitigation, Farm Productivity and Economics*, SUSTAINABILITY 9(8): 1339, 1–28, 9 (“Tekin (2010) estimated that VRNA can increase wheat production between 1% and 10% offering savings in nitrogen fertilisation between 4% and 37%.”). See also Butler A. H., Daniel J. S., Portmann R. W., Ravishankara A. R., Young P. J., Fahey D. W., & Rosenlof K. H. (2016) *Diverse policy implications for future ozone and surface UV in a changing climate*, ENV. RES. LETT. 11(6): 064017, 1–7, 4 (“A key point is that if the world were to achieve reductions of CO₂ and CH₄ concentrations to RCP 2.6 levels, N₂O mitigation would become important to avoid exacerbation of both climate change and ozone layer depletion.”).

³⁶¹ Deloitte, *How Canada can decarbonize by 2050* (last visited 28 June 2023) (“Model for a net-zero future in Canada”; “Canada must invest more in technologies that improve energy efficiencies for transportation, buildings, industrial, and agricultural and forestry operations.”). See also Clune R., Corb L., Glazener W., Henderson K., Pinner D., & Walter D. (2022) *NAVIGATING AMERICA’S NET-ZERO FRONTIER: A GUIDE FOR BUSINESS LEADERS*, McKinsey Sustainability, 6 (Exhibit 4).

³⁶² Pérez-Domínguez I., del Prado A., Mittenzwei K., Hristov J., Frank S., Tabeau A., Witzke P., Havlik P., van Meijl H., Lynch J., Stehfest E., Pardo G., Barreiro-Hurle J., Koopman J. F. L., & Sanz-Sánchez M. J. (2021) *Short- and Long-term Warming Effects of Methane May Affect the Cost-effectiveness of Mitigation Policies and Benefits of Low-meat Diets*, NAT. FOOD 2: 970–980, 970 (“Methane’s short atmospheric life has important implications for the design of global climate change mitigation policies in agriculture. Three different agricultural economic models are used to explore how short- and long-term warming effects of methane can affect the cost-effectiveness of mitigation policies and dietary transitions. Results show that the choice of a particular metric for methane’s warming potential is key to determine optimal mitigation options, with metrics based on shorter-term impacts leading to greater overall emission reduction. Also, the promotion of low-meat diets is more effective at reducing greenhouse gas emissions compared to carbon pricing when mitigation policies are based on metrics that reflect methane’s long-term behaviour. A combination of stringent mitigation measures and dietary changes could achieve substantial emission reduction levels, helping reverse the contribution of agriculture to global warming.”).

³⁶³ Environment and Climate Change Canada (2017) *STRATEGY ON SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS – 2017*, 10 (“Forthcoming federal, provincial and territorial measures under development to address oil and gas sources will address the largest mitigation gap for this SLCP. The key remaining mitigation gaps for methane are for municipal solid waste landfills and agriculture sources (enteric fermentation in particular).”).

³⁶⁴ Lin J., Khanna N., Liu X., Wang W., Gordon J., & Dai F. (2022) *Opportunities to Tackle Short-lived Climate Pollutants and Other Greenhouse Gases for China*, SCI. TOTAL ENVIRON. 842(156842): 1–17, 11 (“Outside of the energy sector, the United States has also seen some federal and state action in reducing methane emissions from landfills. In 2010, the California Air Resources Board adopted a rule requiring methane controls on all landfills with >450 tons of waste in place, restricting flares, and requiring ongoing monitoring and reporting mandates for all landfills (California Air Resources Board, 2021a). California’s 2015 SLCP Bill (SB-1383) also included quantitative goals for diverting organic waste from landfills to reduce methane emissions (California Senate, 2016b).”).

³⁶⁵ Environment and Climate Change Canada (2017) *STRATEGY ON SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS – 2017*, 10 (“Forthcoming federal, provincial and territorial measures under development to address oil and gas sources will address the largest mitigation gap for this SLCP. The key remaining mitigation gaps for methane are for municipal solid waste landfills and agriculture sources (enteric fermentation in particular).”).

³⁶⁶ Lin J., Khanna N., Liu X., Wang W., Gordon J., & Dai F. (2022) *Opportunities to Tackle Short-lived Climate Pollutants and Other Greenhouse Gases for China*, SCI. TOTAL ENVIRON. 842 (156842): 1–17, 11 (“Outside of the energy sector, the United States has also seen some federal and state action in reducing methane emissions from

landfills. In 2010, the California Air Resources Board adopted a rule requiring methane controls on all landfills with >450 tons of waste in place, restricting flares, and requiring ongoing monitoring and reporting mandates for all landfills (California Air Resources Board, 2021a).”).

³⁶⁷ Moomaw W. R., Masino S. A., & Faison E. K. (2019) *Intact Forests in the United States: Proforestation Mitigates Climate Change and Serves the Greatest Good*, FRONT. FOR. GLOB. CHANGE 2(27): 1–10, 1 (“The recent 1.5 Degree Warming Report by the Intergovernmental Panel on Climate Change identifies reforestation and afforestation as important strategies to increase negative emissions, but they face significant challenges: afforestation requires an enormous amount of additional land, and neither strategy can remove sufficient carbon by growing young trees during the critical next decade(s). In contrast, growing existing forests intact to their ecological potential—termed proforestation—is a more effective, immediate, and low-cost approach that could be mobilized across suitable forests of all types. Proforestation serves the greatest public good by maximizing co-benefits such as nature-based biological carbon sequestration and unparalleled ecosystem services such as biodiversity enhancement, water and air quality, flood and erosion control, public health benefits, low impact recreation, and scenic beauty.”).

³⁶⁸ Penniman L. (2021) *Black Gold*, in [ALL WE CAN SAVE: TRUTH, COURAGE, AND SOLUTIONS FOR THE CLIMATE CRISIS](#), Johnson A. E. & Wilkinson K. K. (eds.), One World, 305 (“Our ancestral practices are bolstered by Western science and listed among the most substantive solutions to global warming, per Project Drawdown’s analysis....”).

³⁶⁹ Sobrevilla C. (2008) [THE ROLE OF INDIGENOUS PEOPLE IN BIODIVERSITY CONSERVATION: THE NATURAL BUT OFTEN FORGOTTEN PARTNERS](#), World Bank, xii (“Traditional Indigenous Territories encompass up to 22 percent of the world’s land surface and they coincide with areas that hold 80 percent of the planet’s biodiversity. Also, the greatest diversity of indigenous groups coincides with the world’s largest tropical forest wilderness areas in the Americas (including Amazon), Africa, and Asia, and 11 percent of world forest lands are legally owned by Indigenous Peoples and communities. This convergence of biodiversity-significant areas and indigenous territories presents an enormous opportunity to expand efforts to conserve biodiversity beyond parks, which tend to benefit from most of the funding for biodiversity conservation”). See also United Nations Department of Economic and Social Affairs (2021) [STATE OF THE WORLD’S INDIGENOUS PEOPLES: RIGHTS TO LANDS, TERRITORIES AND RESOURCES](#), ST/ESA/375, 163 (“According to a World Bank report, traditional indigenous territories constitute up to 22 per cent of the world’s land surface.⁵⁴⁰ A recent report maintains that indigenous peoples and local communities customarily claim and manage more than 50 per cent of the world’s land but legally own just 10 per cent, which means that at least 40 per cent of the world’s land — around 5 billion hectares — remains unprotected and vulnerable to commercial pressures, including land-grabbing by powerful entities such as Governments and corporations, as well as environmental destruction.”).

³⁷⁰ Veit P., Gibbs D., & Reytar K. (6 January 2023) [Indigenous Forests Are Some of the Amazon’s Last Carbon Sinks](#), WORLD RESOURCES INSTITUTE (“Our analysis of carbon emissions and removals finds that Indigenous forests in all nine Amazonian countries were net carbon sinks between 2001 and 2021, collectively emitting an average of 120 million tonnes of CO₂e per year and removing 460 million tonnes CO₂/year, making them a net sink of 340 million tonnes of CO₂e/year.⁴ However, the relative magnitudes of emissions and removals — known as carbon fluxes — varied greatly between countries.”).

³⁷¹ Stevens C., Winterbottom R., Springer J., & Raytar K. (2014) [SECURING RIGHTS, COMBATING CLIMATE CHANGE](#), World Resources Institute & Rights and Resources Initiative, 10 (“There is strong evidence that strengthening community forest rights is associated with healthy forests. For example, a recent study measured carbon in 30 community forests over three to four years, covering Guinea Bissau, India, Mali, Nepal, Papua New Guinea, Senegal, and Tanzania. The 30 community forests showed an overall average increase in forest carbon storage of 4.9 tonnes per hectare per year.¹⁶ In three forests, total carbon stock decreased due to illegal clear-cutting for cropland by non-community members.¹⁷ A separate analysis of 80 forests in 10 countries across Latin America, East Africa, and South Asia found that community forest management is associated with high levels of carbon storage.¹⁸”). See also Rights and Resources Initiative (2015) [WHO OWNS THE WORLD’S LAND? A GLOBAL BASELINE OF FORMALLY RECOGNIZED INDIGENOUS AND COMMUNITY LAND RIGHTS](#), 22 (“The success of policies to mitigate climate change and promote forest restoration also hinge on secure community tenure. Comparative global research has found that legal forest rights for Indigenous Peoples and local communities and government protection of those rights tend to lower

deforestation and carbon emissions, whereas deforestation rates tend to be higher where communities' land rights are not secure.192"); and United Nations Department of Economic and Social Affairs (2021) [STATE OF THE WORLD'S INDIGENOUS PEOPLES: RIGHTS TO LANDS, TERRITORIES AND RESOURCES](#), ST/ESA/375, 27 ("Recognizing indigenous rights to lands, territories and resources can contribute to political stability, economic growth and sustainable development at the broader global level. Acknowledgement of such rights carries environmental benefits. It has been noted that recognizing the rights of indigenous peoples to lands, territories and resources promotes the protection of ecosystems, waterways, biological diversity, and the general maintenance of natural resources.92 Respect for such rights can actually contribute to the reduction of carbon emissions from deforestation. Studies point to lower deforestation in forests that are inhabited by indigenous peoples and in which their relevant rights are recognized.93 Evidence of the relationship between indigenous peoples and their lands, territories and resources suggests that acknowledgement of and respect for indigenous rights in this regard would likely be conducive to promoting the Sustainable Development Goals.94").

³⁷² Stevens C., Winterbottom R., Springer J., & Raytar K. (2014) [SECURING RIGHTS, COMBATING CLIMATE CHANGE](#), World Resources Institute & Rights and Resources Initiative, 27 ("These findings are supported by a WRI deforestation analysis for the Brazilian Amazon. From 2000 to 2012, forest loss was only 0.6 percent inside Indigenous Lands compared with 7.0 percent outside. (See Figure 4.) Figure 5 shows a section of the Brazilian Amazon under intense deforestation pressure. Forest loss between 2000 and 2012 is clustered close to, but rarely inside, the borders of Indigenous Lands.").

³⁷³ Stevens C., Winterbottom R., Springer J., & Raytar K. (2014) [SECURING RIGHTS, COMBATING CLIMATE CHANGE](#), World Resources Institute & Rights and Resources Initiative, 29 ("The Brazilian government generally protects Indigenous Peoples' forest rights, but Indigenous Peoples often forcefully defend their own forest by expelling loggers, ranchers, and other intruders.67 Indigenous Lands are the only areas of the Amazon with roads cutting across them that have not succumbed to deforestation.68 The roads do not always go around Indigenous Lands, but the deforestation does. As a result, community forests in the Brazilian Amazon tend to be relatively carbon-rich, containing 36 percent more carbon per hectare than areas of the Brazilian Amazon outside Indigenous Lands (see Figure 4).69 WRI analysis of deforestation and carbon stock found that 27 times more CO2 emissions were produced outside Indigenous Lands than inside from 2000 to 2012. Forest cover loss of 22.5 million hectares in the Brazilian Amazon outside Indigenous Lands resulted in 8.7 billion tonnes of CO2 emitted during those years. In the same period, 311 million tonnes of CO2 emissions were produced from deforestation of about 677,000 hectares of forest on Indigenous Lands.").

³⁷⁴ Stevens C., Winterbottom R., Springer J., & Raytar K. (2014) [SECURING RIGHTS, COMBATING CLIMATE CHANGE](#), World Resources Institute & Rights and Resources Initiative, 29 ("Brazil's Indigenous Lands therefore play a significant role in keeping CO2 emissions from the atmosphere. One estimate suggests that Indigenous Lands and government-protected areas in the Brazilian Amazon could prevent 27.2 million hectares of deforestation by 2050, an area slightly larger than the United Kingdom. If the carbon in this large forest area were emitted as CO2, it would amount to approximately 12 billion tonnes of CO2 70—the equivalent of about three years' worth of CO2 emissions from all Latin American and Caribbean countries.71").

³⁷⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change (2019) [Summary for Policymakers](#), in [THE OCEAN AND CRYOSPHERE IN A CHANGING CLIMATE](#), *Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., et al. (eds.), SPM-30 ("Restoration of vegetated coastal ecosystems, such as mangroves, tidal marshes and seagrass meadows (coastal 'blue carbon' ecosystems), could provide climate change mitigation through increased carbon uptake and storage of around 0.5% of current global emissions annually (*medium confidence*). Improved protection and management can reduce carbon emissions from these ecosystems.").

³⁷⁶ Soares M. O., Bezerra L. E. A., Copertino M., Lopes B. D., de Souza Barros K. V., Rocha-Barreira C. A., Maia R. C., Beloto N., & Cotovicz Jr. L. C. (2022) [Blue Carbon Ecosystems in Brazil: Overview and an Urgent Call for Conservation and Restoration](#), *FRONT. MAR. SCI.* 9: 1–16, 1 ("While terrestrial ecosystems have been the focus of nature-based solutions, the role of coastal and marine ecosystems remains unaccounted for in several national emission inventories and not included in the National Determined Contributions (NDC) ([Duarte, 2017](#)). Over the last decade,

ocean and terrestrial ecosystems have sequestered approximately 52% of anthropogenic CO₂ emissions, with average rates of approximately 2.5 ± 0.6 and 3.4 ± 0.9 GtC year⁻¹, respectively (Friendlingstein et al., 2019). However, some processes and ecosystems, such as coastal areas, are not fully accounted for in the global carbon budget. The CO₂ that is captured from the atmosphere and sequestered in coastal and marine environments, mostly vegetated ecosystems such as mangroves, salt marshes, and seagrass meadows, is collectively known as blue carbon (BC) and consists of both organic and inorganic forms (Nellemann et al., 2009).”).

³⁷⁷ National Oceanic and Atmospheric Administration, [Coastal Blue Carbon](#) (last visited 15 June 2023) (“Current studies suggest that mangroves and coastal wetlands annually sequester carbon at a rate ten times greater than mature tropical forests. They also store three to five times more carbon per equivalent area than tropical forests. Most coastal blue carbon is stored in the soil, not in above-ground plant materials as with tropical forests.”).

³⁷⁸ Chatting M., Al-Maslamani I., Walton M., Skov M. W., Kennedy H., Husrevoglu Y. S., & Le Vay L. (2022) [Future Mangrove Carbon Storage Under Climate Change and Deforestation](#), FRONT. MAR. SCI. 9: 1–14, 7 (“Our projections showed that, globally, increases in total C stocks (biomass + soil) induced by climate change would exceed emissions from mangrove deforestation between 2012 and 2095 (Table 3). Under a “business as usual” climate scenario these net gains represent an increase of $7.05 \pm 7.89\%$ (SSP245) or $7.71 \pm 9.47\%$ under a high-end scenario (SSP585) of present day global total C stocks. Total global losses from mangrove deforestation from 2012 to 2095 (Table 1) were estimated to be $61.4 \pm 10.1\%$ (SSP245) or $55.6 \pm 9.1\%$ (SSP585) of the potential gains in C stocks due to climate change. In contrast, CSR were forecast to decline by $2.60 \pm 3.57\%$ under scenario SSP245 and by $6.44 \pm 3.63\%$ under scenario SSP585 (Table 1).”).

³⁷⁹ The Economist Group (8 November 2021) [Checking in on ocean-based climate solutions](#), ECONOMIST IMPACT, 5–6 (“The potential of the ocean for accelerating decarbonisation, however, merits increased priority in the global climate-change discourse. The High-Level Panel for a Sustainable Ocean Economy (HLP), a multilateral group comprising representatives from 14 oceanic countries, estimates that by 2050 ocean-based climate mitigation and carbon storage options could make up 21% of the emissions reductions needed to limit global warming to 1.5°C. Put differently, this equates to more than all current global emissions from coal-fired power plants worldwide.”).

³⁸⁰ United Nations Framework Convention on Climate Change, [What is REDD+](#) (last visited 18 July 2023) (“‘REDD’ stands for ‘Reducing emissions from deforestation and forest degradation in developing countries. The ‘+’ stands for additional forest-related activities that protect the climate, namely sustainable management of forests and the conservation and enhancement of forest carbon stocks.”).

³⁸¹ United Nations Framework Convention on Climate Change, [What is REDD+](#) (last visited 18 July 2023) (“The REDD+ Success Story... The UN Climate Change secretariat has been undertaking REDD+ technical assessments for 10 years. In total, 60 developing countries have reported REDD+ activities to the UN Climate Change secretariat. As a result of REDD+ activities, 14 of these countries reported a reduction of almost 11 billion tons of carbon dioxide, almost twice the amount of net greenhouse gas emissions from the United States in 2021, and are now eligible to seek results-based finance.”).

³⁸² United Nations-REDD Programme, [REDD+ MRV and results-based payments](#) (last visited 18 July 2023) (“In this context, the COP affirmed that the progression of developing country Parties towards results-based actions occurs in the context of the provision of adequate and predictable support for all phases of REDD+ implementation. The COP also reaffirmed that results-based finance provided to developing country Parties for the full implementation of REDD+ may come from a variety of sources, public and private, bilateral and multilateral, including alternative sources.”).

³⁸³ United Nations-REDD Programme, [Lima REDD+ Information Hub](#) (last visited 18 July 2023) (See table column title “Entity paying for results” to review groups that are financing results of REDD+ projects).

³⁸⁴ United Nations-REDD Programme (2013) [GUIDELINES ON FREE, PRIOR AND INFORMED CONSENT](#), Food and Agriculture Organization, United Nations Development Programme, & United Nations Environment Program, 11

(“Consistent with international law, States are required to recognize and carry out their duties and obligations to give effect to the requirement of FPIC as applicable to indigenous peoples; and recognizing the right of forest-dependent communities to effectively participate in the governance of their nations, at a minimum States are required to consult forest-dependent communities in good faith regarding matters that affect them *with a view to agreement*. Appreciating that international law, jurisprudence and State practice is still in its infancy with respect to *expressly* recognizing and requiring an affirmative obligation to secure FPIC from all forest-dependent communities, a blanket application of FPIC is not required for all forest-dependent communities... States should evaluate the circumstances and nature of the forest-dependent community in question, on a case by case basis, through among others a rights-based analysis, and secure FPIC from communities that share common characteristics with indigenous peoples and whose underlying substantive rights are significantly implicated.”).

³⁸⁵ Barletti J. P. S., Vigil N. H., & Larson A. M. (2023) [Safeguards at a glance: Are voluntary standards supporting community land, resource and carbon rights?](#), Center for International Forestry Research & International Center for Research in Agroforestry, 2 (“Critics and grassroots sceptics (e.g. the ‘No rights, no REDD’ movement) centred on two key issues: the potential restrictions in communities’ access to forests and forest resources – including potential land grabbing associated with REDD+ as a new source of income – and the attribution of carbon rights that would allow for the commercialization of emission reductions (Corbera et al. 2011; Patel et al. 2013).”).

³⁸⁶ Barletti J. P. S., Vigil N. H., & Larson A. M. (2023) [Safeguards at a glance: Are voluntary standards supporting community land, resource and carbon rights?](#), Center for International Forestry Research & International Center for Research in Agroforestry, 4 (“Physical and/or economic displacement is to be “avoided” rather than prohibited and, in most cases, displacements are only considered as such if they involve formally recognized communities. Most standards require compensation or restitution for resettlement that improves or at least restores livelihood levels, although not all require consultations with the affected groups to inform or guide these processes, which, for IPs, infringes upon UNDRIP-recognized rights to self-determination.”).

³⁸⁷ Barletti J. P. S., Vigil N. H., & Larson A. M. (2023) [Safeguards at a glance: Are voluntary standards supporting community land, resource and carbon rights?](#), Center for International Forestry Research & International Center for Research in Agroforestry, 4 (“Scheba and Rakotonarivo (2016) report REDD+-related land-use conflicts in Tanzania as part of the wider REDD+ effort. Raftopoulos (2016) reports on one REDD+ project that led to the enclosure of common forests, sparking conflicts between and within villages over land ownership and access; this followed an announcement that community compensation would depend on the area of forest protected (see Ngendakumana et al. (2013) for a similar case in Cameroon). In this context, Beymer-Farris et al. (2012) reveal how punitive conservation efforts have been supported by a discourse that portrays Indigenous Peoples as recent migrants that destroy forests, reflecting a complex and contested history regarding both indigeneity and migration.”). See also Bezner Kerr R., Hasegawa T., Lasco R., Bhatt I., Deryng D., Farrell A., Gurney-Smith H., Ju H., Lluch-Cota S., Meza F., Nelson G., Neufeldt H., & Thornton P. (2022) [Chapter 5: Food, Fibre, and Other Ecosystem Products](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), *Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 5-757 (Table 5.8 Challenges and solutions for REDD+).

³⁸⁸ Barletti J. P. S., Vigil N. H., & Larson A. M. (2023) [Safeguards at a glance: Are voluntary standards supporting community land, resource and carbon rights?](#), Center for International Forestry Research & International Center for Research in Agroforestry, 2 (“Critics and grassroots sceptics (e.g. the ‘No rights, no REDD’ movement) centred on two key issues: the potential restrictions in communities’ access to forests and forest resources – including potential land grabbing associated with REDD+ as a new source of income – and the attribution of carbon rights that would allow for the commercialization of emission reductions (Corbera et al. 2011; Patel et al. 2013).”).

³⁸⁹ Barletti J. P. S., Vigil N. H., & Larson A. M. (2023) [Safeguards at a glance: Are voluntary standards supporting community land, resource and carbon rights?](#), Center for International Forestry Research & International Center for Research in Agroforestry, 1 (“Despite mention of the UN Declaration on the Rights of Indigenous Peoples (UNDRIP) in UNFCCC decisions regarding REDD+, including the Cancun safeguards, initiatives have not placed importance on

the wide scope of rights it recognizes; if respect for UNDRIP were more central – with specific requirements and indicators to monitor progress – standards could catalyse a rights-responsive transformation in climate actions.”). See also United Nations-REDD Programme (2013) [GUIDELINES ON FREE, PRIOR AND INFORMED CONSENT](#), Food and Agriculture Organization, United Nations Development Programme, & United Nations Environment Program, 15 (“Further, in the context of REDD+, although the term ‘FPIC’ is not expressly referred to in the Cancun Agreements or in the Appendix on REDD+ safeguards, FPIC is addressed indirectly because the text ‘note[s]’ that the General Assembly has adopted UNDRIP (which itself sets out the principle of FPIC). Securing FPIC is a means to meet the Cancun Agreements’ requirement of countries to promote and support ‘respect for the knowledge and rights of indigenous peoples and members of local communities’ and to ensure ‘the full and effective participation of relevant stakeholders, inter alia, indigenous peoples and local communities.’”).

³⁹⁰ See World Meteorological Organization (2023) [STATE OF THE CLIMATE IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2022](#), No. 1322, 16 (“A large area centred around the central-northern part of Argentina, southern Bolivia, central Chile, and most of Paraguay and Uruguay experienced record-breaking temperatures during two consecutive heatwaves in late November and early December 2022. In Chile, forest fires caused significant damage to the flora and fauna after the burning of the Chilean Palm, a species native to the Valparaíso region.⁵⁸ In the Bolivian Amazon, during the heatwave from 25 to 30 November, the city of Cobija recorded 37.7 °C on 28 November (the mean monthly maximum is 30.8 °C).⁵⁹”); and World Meteorological Organization (2022) [STATE OF THE CLIMATE IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2021](#), No. 1295, 20 (“Heatwaves were reported in many parts of the LAC region. In Argentina, several locations recorded 6–8 days in a row with heatwave conditions. An all-time temperature record was set in Cipolletti (43.8 °C) and Maquinchao (38.9 °C) on 22 January.⁵⁵ In west-central Brazil, in August 2021, exceptionally high temperatures were reported⁵⁶ over several days. For example, in Cuiabá, in the state of Mato Grosso, maximum temperatures reached 41 °C on 24 and 25 August (about 7 °C above normal), accompanied by critically low humidity levels, mainly in the central regions (relative humidity of approximately 8%–11%). On 21 September, Aragarças/Goiás reached 43.0 °C, the highest value for September at this station (the previous highest value was 41.5 °C on 14 September 2019). In Chile, up to 18 heatwave episodes during the year affected different regions of the country.⁵⁷ Some of them were very intense, including those that affected the Santiago region from 11 to 13 April (with a maximum temperature of 31.4 °C), and Valdivia from 2 to 5 February (37.3 °C) and then from 7 to 10 February (35.1 °C). On 27 February, Puerto Williams, Chile (considered the southern-most town in the world), registered its highest temperature on record, since 1961, of 26.1 °C (the previous record being 26.0 °C on 22 December 1984).⁵⁸ In Paraguay, a heatwave occurred from 18 to 20 September, with temperatures reaching 38.2 °C in Pedro Juan Caballero. In Peru, on 13 April, Jepelacio (northern Amazonia) reached 34.2 °C (the previous highest temperature was 33.6 °C on 23 November 2016).”).

³⁹¹ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuví N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) [Chapter 12: Central and South America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1708 (Table 12.2).

³⁹² World Weather Attribution (21 December 2022) [Climate change made record breaking early season heat in Argentina and Paraguay about 60 times more likely](#) (“The 2022 heatwave has led to large-scale power outages, wildfires and, in combination with the ongoing drought, poor harvests. It is estimated to have led to an increase in heat-related deaths, with the impacts unequally distributed across In different cities and municipalities across South America, people living in some areas – often poorer neighbourhoods – experience higher temperatures than others, as they lack green space, adequate thermal insulation from heat, electricity, shade, and water which can be lifelines during heatwaves.... We find that human-caused climate change made the event about 60 times more likely. Alternatively, a heatwave with a similar probability would be about 1.4°C less hot in a world that had not been warmed by human activities.”); *discussing* Rivera J. A., *et al.* (2022) [CLIMATE CHANGE MADE RECORD BREAKING EARLY SEASON HEAT IN ARGENTINA AND PARAGUAY ABOUT 60 TIMES MORE LIKELY](#), World Weather Attribution.

³⁹³ World Meteorological Organization (2023) [STATE OF THE CLIMATE IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2022](#), No. 1322, 17 (“The prolonged dry conditions associated with high temperatures led to record wildfires in January and February in Argentina and Paraguay. There was an increase of 283% and 258%, respectively, in the number of hotspots detected when compared to the 2001–2021 average.⁶¹ From January to March 2022, wildfire emissions were the highest in the last 20 years in Paraguay and northern Argentina.”).

³⁹⁴ World Weather Attribution (21 December 2022) [Climate change made record breaking early season heat in Argentina and Paraguay about 60 times more likely](#) (“With future global warming, heatwaves like this will become even more common and hotter. If global mean temperatures rise an additional 8°C, to a total warming of 2°C, a heatwave as hot as this one would be about 4 times more likely than it is now, while a heatwave that happens approximately once in 20 years would be 0.7-1.2°C hotter than this one.”); *discussing* Rivera J. A., *et al.* (2022) [CLIMATE CHANGE MADE RECORD BREAKING EARLY SEASON HEAT IN ARGENTINA AND PARAGUAY ABOUT 60 TIMES MORE LIKELY](#), World Weather Attribution.

³⁹⁵ United States Environmental Protection Agency (1 August 2022) [Climate Change Indicators: Heat Waves](#) (Figure 1).

³⁹⁶ Government of Canada (24 January 2022) [Extreme heat events: Overview](#) (“Many places in Canada face extreme heat events, often called “heat waves.” These events involve high temperatures and high humidity. A changing climate can mean longer and more intense heat events that can be dangerous for your health. Heat events frequently cause death. Heat wave tragedies have killed more than: ... 595 people in British Columbia (2021).”)

³⁹⁷ White R. H., *et al.* (2023) [The unprecedented Pacific Northwest heatwave of June 2021](#), NAT. COMMUN. 14(727): 1–20, 1 (“In late June 2021 a heatwave of unprecedented magnitude impacted the Pacific Northwest region of Canada and the United States. Many locations broke all time maximum temperature records by more than 5 °C, and the Canadian national temperature record was broken by 4.6 °C, with a new record temperature of 49.6 °C. Here, we provide a comprehensive summary of this event and its impacts. Upstream diabatic heating played a key role in the magnitude of this anomaly. Weather forecasts provided advanced notice of the event, while sub-seasonal forecasts showed an increased likelihood of a heat extreme with lead times of 10-20 days. The impacts of this event were catastrophic, including hundreds of attributable deaths across the Pacific Northwest, mass mortalities of marine life, reduced crop and fruit yields, river flooding from rapid snow and glacier melt, and a substantial increase in wildfires—the latter contributing to landslides in the months following. These impacts provide examples we can learn from and a vivid depiction of how climate change can be so devastating.”).

³⁹⁸ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) [Summary for Policymakers](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), SPM-10 (“It is *virtually certain* that hot extremes (including heatwaves) have become more frequent and more intense across most land regions since the 1950s, while cold extremes (including cold waves) have become less frequent and less severe, with *high confidence* that human-induced climate change is the main driver^[14] of these changes. Some recent hot extremes observed over the past decade would have been *extremely unlikely* to occur without human influence on the climate system. Marine heatwaves have approximately doubled in frequency since the 1980s (*high confidence*), and human influence has *very likely* contributed to most of them since at least 2006.”). *See also* Kotz M., Wenz L., & Levermann A. (2021) [Footprint of greenhouse forcing in daily temperature variability](#), PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 118(32): 1–8, 1 (“Assessing historical changes to daily temperature variability in comparison with those from state-of-the-art climate models, we show that variability has changed with distinct global patterns over the past 65 years, changes which are attributable to rising concentrations of greenhouse gases. If these rises continue, temperature variability is projected to increase by up to 100% at low latitudes and decrease by 40% at northern high latitudes by the end of the century.”).

³⁹⁹ World Weather Attribution (21 December 2022) [Climate change made record breaking early season heat in Argentina and Paraguay about 60 times more likely](#) (“The 2022 heatwave has led to large-scale power outages, wildfires and, in combination with the ongoing drought, poor harvests. It is estimated to have led to an increase in heat-related deaths, with the impacts unequally distributed across In different cities and municipalities across South

America, people living in some areas – often poorer neighbourhoods – experience higher temperatures than others, as they lack green space, adequate thermal insulation from heat, electricity, shade, and water which can be lifelines during heatwaves.... We find that human-caused climate change made the event about 60 times more likely. Alternatively, a heatwave with a similar probability would be about 1.4°C less hot in a world that had not been warmed by human activities.”); *discussing* Rivera J. A., *et al.* (2022) [CLIMATE CHANGE MADE RECORD BREAKING EARLY SEASON HEAT IN ARGENTINA AND PARAGUAY ABOUT 60 TIMES MORE LIKELY](#), World Weather Attribution.

⁴⁰⁰ Hartinger S. M., *et al.* (2023) [The 2022 South America report of The Lancet Countdown on health and climate change: trust the science. Now that we know, we must act](#), LANCET REG. HEALTH AM. 20(100470): 1–35, 20 (“Population exposure to wildfire danger has increased in the past decade driven by the high temperatures and increased incidence of drought in many areas, making wildfire occurrence and spread more likely, and hampering control efforts. This is particularly relevant in SA, which faces a dangerous interplay between intentional human-made wildfires -more closely linked to land use changes and deforestation, as in the Amazon, the Pantanal, and El Chaco - as well as climate-driven ones, such as the 2022's wildfire in Argentina, and Paraguay. Regionally, the population exposure to very high or extremely high wildfire danger in SA has increased in nine of out 12 countries, with a regional average increase of seven more days in 2018–2021 compared to the baseline. However, the number of exposure days across countries vary, Uruguay, Paraguay saw an increase of 3-4 exposure days, vs Argentina and Chile 14–20 days of exposure (indicator 1.2)”).

⁴⁰¹ World Meteorological Organization (2022) [STATE OF THE CLIMATE IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2021](#), No. 1295, 14 (“The 2021 Atlantic hurricane season was very active, with 21 named storms – well above the 1981–2010 average of 14 – including seven hurricanes, of which four were major hurricanes. With about US\$ 80 billion in damage (much of which occurred in the United States of America, associated with Hurricane Ida), it was also one of the costliest seasons. It was the sixth consecutive above-normal Atlantic hurricane season and the seventh consecutive year with a named storm forming before the official start to the season on 1 June (Tropical Storm Ana formed on 22 May). On 30 June, Tropical Storm Elsa (later Hurricane Elsa) became the earliest fifth named storm on record. Hurricane Elsa would become the first hurricane of the season on 2 July, and affected several territories in the Caribbean, including Barbados, Saint Lucia, Saint Vincent and the Grenadines, Martinique, the Dominican Republic, Haiti, Jamaica, the Cayman Islands and Cuba, before moving into Florida/United States.^{26”}).

⁴⁰² World Meteorological Organization (2022) [STATE OF THE CLIMATE IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2021](#), No. 1295, 14 (“The 2021 Atlantic hurricane season was very active, with 21 named storms – well above the 1981–2010 average of 14 – including seven hurricanes, of which four were major hurricanes. With about US\$ 80 billion in damage (much of which occurred in the United States of America, associated with Hurricane Ida), it was also one of the costliest seasons. It was the sixth consecutive above-normal Atlantic hurricane season and the seventh consecutive year with a named storm forming before the official start to the season on 1 June (Tropical Storm Ana formed on 22 May). On 30 June, Tropical Storm Elsa (later Hurricane Elsa) became the earliest fifth named storm on record. Hurricane Elsa would become the first hurricane of the season on 2 July, and affected several territories in the Caribbean, including Barbados, Saint Lucia, Saint Vincent and the Grenadines, Martinique, the Dominican Republic, Haiti, Jamaica, the Cayman Islands and Cuba, before moving into Florida/United States.^{26”}).

⁴⁰³ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuví N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) [Chapter 12: Central and South America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), *Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1751 (“The most common climatic drivers include tropical storms and hurricanes, heavy rains, floods and droughts. Positive climatic conditions also can facilitate migration. Peru, Colombia and Guatemala are among the countries with the largest average displacements caused by hydro-meteorological causes; Brazil had 295,000 people displaced because of disasters in 2019.... Hurricanes have been seen as positive triggers for international migration in CA. The highlands of Peru see different patterns, including daily circular migration to combine the scarce income from agricultural production with urban income, rather than abandoning farm land.” (citations omitted)).

⁴⁰⁴ Smith A. B. (24 January 2022) [2021 U.S. billion-dollar weather and climate disasters in historical context](#), Beyond the Data, CLIMATE.GOV (“In broader context, the total cost of U.S. billion-dollar disasters over the last 5 years (2017–2021) is \$742.1 billion, with a 5-year annual cost average of \$148.4 billion, both of which are new records and nearly triple the 42-year inflation adjusted annual average cost. The U.S. billion-dollar disaster damage costs over the last 10-years (2012–2021) were also historically large: at least \$1.0 trillion from 142 separate billion-dollar events. It is concerning that 2021 was another year in a series of years where we had a high frequency, a high cost, and large diversity of extreme events that affect people's lives and livelihoods—concerning because it hints that the extremely high activity of recent years is becoming the new normal. 2021 (red line) marks the seventh consecutive year (2015–21) in which 10 or more separate billion-dollar disaster events have impacted the U.S. The 1980–2021 annual average (black line) is 7.4 events (CPI-adjusted); the annual average for the most recent 5 years (2017–2021) is 17.2 events (CPI-adjusted).”).

⁴⁰⁵ George Washington University (2018) [ASCERTAINMENT OF THE ESTIMATED EXCESS MORTALITY FROM HURRICANE MARÍA IN PUERTO RICO](#), Milken Institute School of Public Health, 9 (“Results from the preferred statistical model, shown below, estimate that excess mortality due to Hurricane María using the displacement scenario is estimated at 1,271 excess deaths in September and October (95% CI: 1,154–1,383), 2,098 excess deaths from September to December (95% CI: 1,872–2,315), and, 2,975 (95% CI: 2,658–3,290) excess deaths for the total study period of September 2017 through February 2018.”). See also Rodríguez-Madera S. L., Varas-Díaz N., Padilla M., Grove K., Rivera-Bustelo K., Ramos J., Contreras-Ramírez V., Rivera-Rodríguez S., Vargas-Molina R., & Santini J. (2021) [The impact of Hurricane Maria on Puerto Rico's health system: post-disaster perceptions and experiences of health care providers and administrators](#), GLOB. HEALTH RES. POLICY 6(44): 2 (“The published literature addressing the effects of Hurricane Maria on the Island has exposed the severe vulnerabilities of its health care system [15–19], including lethal gaps in access to medication by patients with chronic diseases (e.g., renal disease, diabetes, respiratory diseases) [11, 20–24] and the interruption of life-sustaining treatments (e.g., dialysis, chemotherapy) [3, 15, 16]. In fact, these failures were partly responsible for the more than 3000 deaths ascribed to the natural disaster [25].”).

⁴⁰⁶ Cangialosi J. P., Latto A. S., & Berg R. (2021) [Tropical Cyclone Report: Hurricane Irma](#), National Oceanic and Atmospheric Administration National Hurricane Center, 16 (“Estimates from FEMA indicate that 25% of buildings were destroyed, 65% were significantly damaged, and 90% of houses sustained some damage. Approximately 75% of the residents in the Keys evacuated before Irma.”).

⁴⁰⁷ Insurance Bureau of Canada (19 October 2022) [Hurricane Fiona causes \\$660 million in insured damage](#) (“Hurricane Fiona is estimated to have caused \$660 million in insured damage, according to initial estimates from Catastrophe Indices and Quantification Inc. (CatIQ).”).

⁴⁰⁸ United States Office of Management and Budget (2022) [FEDERAL BUDGET EXPOSURE TO CLIMATE RISKS](#), 280 (“Based on methodology modifications to update results from CBO (2016), 37,38 OMB estimates that annual Federal spending increases on coastal disaster response spending are projected to range from \$4–\$32 billion (2020 USD) annually,³⁹ with a mean of \$15 billion, in 2050.⁴⁰ By 2075 these annual increases due to projected hurricane frequency reach \$22–\$94 billion (2020\$), with a mean increase of \$50 billion. The method for developing these estimates takes into consideration the increased frequency of hurricanes impacting U.S. coastal areas as well as growth in coastal development and real GDP.”).

⁴⁰⁹ World Meteorological Organization (2022) [STATE OF THE CLIMATE IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2021](#), No. 1295, 10–11 (“Rainfall in central Mexico was around 40%–60% above normal, while north-west Mexico and Baja California recorded rainfall around 20% below normal (Figure 4a). In the north Atlantic coast and over the Yucatán peninsula, Guatemala and El Salvador, rainfall anomalies ranged from 50% below normal to 20% above normal (Figure 4b). Below normal rainfall was recorded in Belize and Nicaragua, while Costa Rica and much of Panama recorded above-normal rainfall. In the Caribbean region, below-normal rainfall was recorded in Cuba, the Dominican Republic and the small Caribbean islands (Figure 4c). For example, in much of Guadeloupe, annual rainfall was 10%–50% below normal. In South America (Figure 4d), rainfall anomalies of between 20% and 60% below normal were recorded over the central and southern regions of Chile, and 30% to 50% below normal over the south-

western Andes of Peru. Below-normal rainfall was dominant over the Paraná–La Plata Basin in south-eastern Brazil, northern Argentina, Paraguay and Uruguay, suggesting a late onset and weak South American Monsoon. Below-normal rainfall conditions dominated the semiarid region of north-east Brazil and the Caribbean coast of the Bolivarian Republic of Venezuela. Conversely, the western side of Colombia, central Amazonia, French Guyana, Suriname and Guyana recorded above-normal rainfall for the year. Some of the observed rainfall patterns were in line with the typical rainfall patterns associated with La Niña conditions.”).

⁴¹⁰ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuvi N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) *Chapter 12: Central and South America*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY*, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1708 (“Observed precipitation reduction in the Cerrado region impacted main water supply reservoirs for important cities in the Brazilian central region, leading to a water crisis in 2016/2017 (Government of Brazil, 2020) and affecting hydropower energy generation (Ribeiro Neto et al., 2016).”).

⁴¹¹ Internal Displacement Monitoring Centre (2020) *2020 GLOBAL REPORT ON INTERNAL DISPLACEMENT*, 52 (“Floods triggered the majority of the 1.5 million disaster displacements recorded in the Americas in 2019, as rivers burst their banks and forced whole communities to flee (see Figure 16). Wildfires also displaced significant numbers of people in the US and Mexico, and burned large tracts of Amazon rainforest in Brazil and Bolivia. Indigenous communities may well have been displaced by the Amazon fires, but information was hard to come by.”).

⁴¹² World Bank Group (2022) *A ROADMAP FOR CLIMATE ACTION IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2021-2025*, 2 (“Without concerted climate action, by 2050 over 17 million people in LAC could be forced to move to escape slow onset climate impacts,10 swelling migration to cities and potentially increasing urban population growth by up to 10 percent. This would increase the load on basic services in the poorest urban neighborhoods most exposed to flooding, landslides and other climate impacts that are becoming increasingly frequent and severe. At the same time, endemic and emerging climate-sensitive infectious diseases are projected to increase over the coming decades through the expanded distribution of vectors.”).

⁴¹³ World Meteorological Organization (2023) *STATE OF THE CLIMATE IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2022*, No. 1322, 9 (“Rainfall in central and eastern Mexico was around 40%–60% below normal, while in north-west Mexico and the Yucatán Peninsula, rainfall was 40% above normal (Figure 6a). Baja California recorded precipitation that was around 20% below normal in the extreme south, and around 10% to 20% above normal in the rest of the region. In most of Central America, except for some locations in Guatemala, precipitation was between 10% and 40% above normal”).

⁴¹⁴ United States Environmental Protection Agency (2021) *Climate Change Indicators: Heavy Precipitation*, 6 (“EPA has determined that the time series in [Figure 1](#) has an increasing trend of approximately 0.5 percentage points per decade ($p < 0.001$) and the time series in [Figure 2](#) has an increasing trend of approximately 0.2 percentage points per decade ($p = 0.007$). Both of these trends were calculated by ordinary least-squares regression, which is a common statistical technique for identifying a first-order trend, and both trends are statistically significant to a 95-percent confidence level.”).

⁴¹⁵ Gillett N. P., Cannon A. J., Malinina E., Schnorbus M., Anslow F., Sun Q., Kirchmeier-Young M., Zwiens F., Seiler C., Zhang X., Flato G., Wan H., Li G., & Castellan A. (2022) *Human influence on the 2021 British Columbia floods*, WEATHER CLIM. EXTREM. 36(100441): 1–13, 1 (“A strong atmospheric river made landfall in southwestern British Columbia, Canada on November 14th, 2021, bringing two days of intense precipitation to the region. The resulting floods and [landslides](#) led to the loss of at least five lives, cut Vancouver off entirely from the rest of Canada by road and rail, and made this the costliest natural disaster in the province's history. Here we show that when characterised in terms of storm-averaged water vapour transport, the variable typically used to characterise the intensity of atmospheric rivers, westerly atmospheric river events of this magnitude are approximately one in ten year events in the current climate of this region, and that such events have been made at least 60% more likely by the effects

of human-induced climate change. Characterised in terms of the associated two-day precipitation, the event is substantially more extreme, approximately a one in fifty to one in a hundred year event, and the probability of events at least this large has been increased by a best estimate of 45% by human-induced climate change. The effects of this precipitation on [streamflow](#) were exacerbated by already wet conditions preceding the event, and by rising temperatures during the event that led to significant snowmelt, which led to streamflow maxima exceeding estimated one in a hundred year events in several basins in the region. Based on a large ensemble of simulations with a hydrological model which integrates the effects of multiple climatic drivers, we find that the probability of such extreme streamflow events in October to December has been increased by human-induced climate change by a best estimate of 120–330%. Together these results demonstrate the substantial human influence on this compound extreme event, and help motivate efforts to increase resiliency in the face of more frequent events of this kind in the future.”).

⁴¹⁶ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuvi N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) [Chapter 12: Central and South America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1698 (“Of the 47 million Central Americans in 2015, 40% lived in rural areas, with Belize being the least urbanised (54% rural) and Costa Rica the most (21% rural); 10.5 million lived in the Dry Corridor region, an area recently exposed to severe droughts that have resulted in 3.5 million people in need of humanitarian assistance.”) (citations omitted). See also Food and Agriculture Organization of the United Nations (2016) [Dry Corridor Central America: Situation Report](#), 1 (“The Dry Corridor in Central America, in particular Guatemala, Honduras and El Salvador, is experiencing one of the worst droughts of the last ten years with over 3.5 million in need of humanitarian assistance.”).

⁴¹⁷ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuvi N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) [Chapter 12: Central and South America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1699 (“In 2019, the region [Dry Corridor in South America] entered its fifth consecutive drought year, with 1.4 million people in need of food aid. Seasonal-scale droughts are projected to lengthen by 12–30%, intensify by 17–42% and increase in frequency by 21–42% in RCP4.5 and RCP8.5 scenarios by the end of the century.”) (citations omitted).

⁴¹⁸ World Meteorological Organization (2023) [STATE OF THE CLIMATE IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2022](#), No. 1322, 15, 16 (“Drought affected several countries in the LAC region during 2022. In Central America, Costa Rica reported unusually dry conditions, mainly along the southern Caribbean coast (with associated meteorological drought conditions).⁴² In Mexico, the north-east states of Nuevo León and Tamaulipas were the most affected by drought in 2022. According to the Drought Monitor,⁴³ around 30% of Mexico experienced moderate to extreme drought during the whole of 2022, which is in agreement with the Integrated Drought Index (IDI) maps presented in Figure 9. By May 2022, about 56 % of Mexico was affected by moderate to exceptional drought.”; “Drought affected Puerto Rico, and by mid-June, 68% of the territory was experiencing a moderate to severe drought; this was the largest area of drought for the island in the 23-year US Drought Monitor (USDM) record.”).

⁴¹⁹ World Meteorological Organization (2023) [STATE OF THE CLIMATE IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2022](#), No. 1322, 15 (“In Mexico, the north-east states of Nuevo León and Tamaulipas were the most affected by drought in 2022. According to the Drought Monitor,⁴³ around 30% of Mexico experienced moderate to extreme drought during the whole of 2022, which is in agreement with the Integrated Drought Index (IDI) maps presented in Figure 9. By May 2022, about 56 % of Mexico was affected by moderate to exceptional drought.”).

⁴²⁰ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuvi N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) [Chapter 12: Central and South America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), Contribution of Working Group

II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1704, 1706 (“Exposure of the Brazilian Amazon to severe to extreme drought has increased from 8% in 2004/2005 to 16% in 2009/2010 and 16% in 2015/2016 (Anderson et al., 2018b); a similar trend is reported in other regions (Table 12.3). During the extreme drought of 2015/2016 in the Amazonian forests, 10% or more of the area showed negative anomalies of the minimum cumulative water deficit (Anderson et al., 2018b). This extreme drought also caused an increase in the occurrence and spread of fires in the basin (*medium confidence: medium evidence, high agreement*) (Arago et al., 2018; Lima et al., 2018; Silva Junior et al., 2019; Bilbao et al., 2020). Exposure to anomalous fires in ecosystems such as savannahs, which are more fire-prone, increases the exposure and vulnerability of adjacent forest ecosystems not adapted to fire, such as seasonally flooded forests (Bilbao et al., 2020; Flores and Holmgren, 2021).”; “Droughts in 2009/2010 and 2015/2016 increased tree mortality rate in Amazon forests (Doughty et al., 2015; Feldpausch et al., 2016; Anderson et al., 2018b), while productivity showed no consistent change; some authors reported a drop in productivity (Feldpausch et al., 2016), while others found no significant changes (Brienen et al., 2015; Doughty et al., 2015). Nevertheless, the combined effect of increasing tree mortality with variations in growth results in a long-term decrease in C stocks in forest biomass, compromising the role of these forests as a C sink (*high confidence*) (Brienen et al., 2015; Rammig, 2020; Sullivan et al., 2020) (Figure 12.9). Under the RCP8.5 scenario for 2070, drought will increase the conversion of rainforest to savannah (*medium confidence: medium evidence, high agreement*) (Anadón et al., 2014; Olivares et al., 2015; Sampaio et al., 2019). The transformation of rainforest into savannah will bring forth biodiversity loss and alterations in ecosystem functions and services (*medium confidence: medium evidence, high agreement*) (Anadón et al., 2014; Olivares et al., 2015; Sampaio et al., 2019). In the Amazon basin, the synergistic effects of deforestation, fire, expansion of the agricultural frontier, infrastructure development, extractive activities, climate change and extreme events may exacerbate the risk of savannisation (*medium confidence: medium evidence, high agreement*) (Nobre et al., 2016b; Bebbington et al., 2019; Sampaio et al., 2019; Rammig, 2020).”).

⁴²¹ World Meteorological Organization (2023) [STATE OF THE CLIMATE IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2022](#), No. 1322, 15–16 (“Drought also affected the west coast of subtropical South America, including Chile, where the last year with above average rainfall was 2006.51 The year 2022 was the fourth-driest year on record for Chile, which is experiencing a 14-year-long megadrought, the region’s longest and most severe drought in more than 1 000 years.”).

⁴²² Desbureaux S. & Rodella A. S. (2019) [DROUGHT IN THE CITY: THE ECONOMIC IMPACT OF WATER SCARCITY IN LATIN AMERICAN METROPOLITAN AREAS](#), WORLD DEV. 114: 13–27, 18–19 (“Generating electricity is highly water intensive (Fthenakis & Kim, 2010) and several examples over the last years have highlighted the threat water scarcity can represent for electricity provision in the region.⁷ When excessive rainfall is followed by floods or [landslides](#), large wet shocks might also cause an increase in power outages because of the damages on infrastructures. We use enterprise surveys to explore the link between droughts and the occurrence of water outages for firms.”).

⁴²³ Desbureaux S. & Rodella A. S. (2019) [Drought in the City: The Economic Impact Of Water Scarcity In Latin American Metropolitan Areas](#), WORLD DEV. 114: 13–27, 25 (“There are several reasons to expect such a negative impact of droughts on cities’ economies. Hydropower still generates more than 50 percent of electricity in Latin America (Al-mulali, Fereidouni, & Lee, 2014). Generally speaking, water is one of the principal inputs to generate electricity, even beyond hydropower.² Consequently, [water scarcity](#) can lead to electric shutdowns as was recently seen in India or in Brazil.³ Using Enterprise Surveys for 22 Latin American and Caribbean Countries, we highlight that droughts significantly increase [power outages](#) for firms.”) See also O’Malley I. (13 March 2023) [Scientists Confirm Global Floods and Droughts Worsened by Climate Change](#), PBS (“Water stress is expected to significantly affect poor, disenfranchised communities as well as ecosystems that have been underfunded and exploited. For example, the United Nations has said that Somalia is experiencing its longest and most severe drought, an event that has caused the deaths of millions of livestock and widespread hunger. Venezuela, a country that has faced years of political and economic crises, resorted to nationwide power cuts during April 2016 as a result of the drought conditions affecting water levels of the Guri Dam.”).

⁴²⁴ Gillespie P. & Gilbert J. (12 April 2023) [Argentina's Epic Drought Is Pushing Economic Crisis to New Extremes](#), BLOOMBERG; and Sigal L. & Raszewski E. (9 March 2023) [Argentina's 'unprecedented' drought pummels farmers and economy](#), REUTERS.

⁴²⁵ Souza Gomes M., Fonseca de Albuquerque Cavalcanti I., & Muller G. V. (2021) [2019/2020 Drought Impacts on South America and Atmospheric and Oceanic Influences](#), WEATHER CLIM. EXTREMES 34(100404): 1–13, 2–3 (“Soybean was the most affected crop in Rio Grande do Sul, with yield losses above 70% in some areas and from 57 to 40% in other areas compared to previous year's yields. Maize losses were the greatest in the state of Santa Catarina, reaching 43% in some localities, and 15% in the state of Parana, compared to previous year's yields.”; “Loss caused by the 2019–2020 drought in the agricultural and cattle ranching sector were estimated at US\$ 546 million, mainly because of soybean failure, but also because of decreased yields in maize and sorghum (MAGyP, 2020).”).

⁴²⁶ Gonzalez P., Breshears D. D., Brooks K. M., Brown H. E., Elias E. H., Gunasekara A., Huntly N., Maldonado J. K., Mantua N. J., Margolis H. G., McAfee S., Middleton B. R., & Udall B. H. (2018) [Chapter 25: Southwest](#), in [IMPACTS, RISKS, AND ADAPTATION IN THE UNITED STATES: FOURTH NATIONAL CLIMATE ASSESSMENT](#), Vol. II, Reidmiller D. R., Avery C. W., Easterling D. R., Kunkel K. E., Lewis K. L. M., Maycock T. K., & Stewart B. C. (eds.), U.S. Global Change Research Program, 1101–1184, 1111–1112 (“Higher temperatures intensified the recent severe drought in California and are amplifying drought in the Colorado River Basin. In California, the higher temperatures intensified the 2011–2016 drought, 14,56,97,98,99 which had been initiated by years of low precipitation, 57,58 causing water shortages to ecosystems, cities, farms, and energy generators. In addition, above-freezing temperatures through the winter of 2014–2015 led to the lowest snowpack in California (referred to as a warm snow drought) on record. 47,55,98,100 Through increased temperature, climate change may have accounted for one-tenth to one-fifth of the reduced soil moisture from 2012 to 2014 during the recent California drought. 14”).

⁴²⁷ Szeto K., Zhang X., White R. E., & Brimelow J. (2016) [The 2015 Extreme Drought in Western Canada](#), BULL. AM. METEOROL. SOC. 97(12): S42–S46, S42 (“Although drought is common over western Canada (Bonsal et al. 2011), the drought that affected the area during the spring and summer of 2015 (Fig. 9.1a) was unusual in terms of its severity, extent, and impacts. British Columbia (B.C.) and Alberta were the most severely affected provinces. Vast areas in southern B.C. were assigned the highest possible (Level-4) drought rating by the B.C. government, several extreme-low streamflow advisories, and extreme wildfire risk ratings. Stringent water restrictions were in place by the end of June (AFCC 2016). In Alberta, conditions were even drier, and the Alberta government declared the province an Agricultural Disaster Area by early August. The extreme dry and warm conditions also created one of the most active and longest wildfire seasons for western Canada, and some rivers ran at their lowest recorded flows since measurements began 80 to 100 years ago (CMOS 2016). The extreme heat and dryness the region experienced in 2015 have raised concerns as to whether or not anthropogenic climate change (ACC) has increased the risk of extreme droughts in the area; this is the question we attempt to address in this paper.”).

⁴²⁸ World Meteorological Organization (2023) [STATE OF THE CLIMATE IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2022](#), No. 1322, 11 (“The sea level in the Latin America and Caribbean region has increased at a higher rate than the global mean in the South Atlantic and the subtropical North Atlantic, and at a lower rate than the global mean in the eastern Pacific over the last three decades. 14 Sea-level rise threatens a large portion of the Latin American and Caribbean population who live in coastal areas by contaminating freshwater aquifers, eroding shorelines, inundating low-lying areas, and increasing the risks of storm surges. 15 High-precision satellite altimetry data covering the period from January 1993 to June 2022 indicate that during this period, the rates of sea-level change on the Atlantic side of South America were higher than those on the Pacific side (Figure 8 (right) and Table 2). 16 In the South American Pacific region, the rate of change was 2.21 mm ± 0.1 mm per year, and along the west coast of Mexico and Central America, it was 1.92 mm ± 0.1 mm per year, both lower than the global average of 3.37 mm ± 0.32 mm per year during this period. The sea level on the Pacific side of South America is highly influenced by ENSO, and smaller increases are observed during La Niña. Along the Atlantic coast of South America, south of the equator, the rate of change from January 1993 to June 2022, 3.66 mm ± 0.1 mm per year, was higher than the global average. A comparable rate was also observed in the subtropical North Atlantic and the Gulf of Mexico (3.60 mm ± 0.1 mm per year). In the tropical North Atlantic, around Central America and the southern Caribbean, the rate was 3.23 mm ± 0.1 mm per year during this period (Figure 8 (left) and Table 2).”).

⁴²⁹ World Meteorological Organization (2023) [STATE OF THE CLIMATE IN LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN 2022](#), No. 1322, 11 (“In 2022, the global mean sea level (GMSL) continued to rise. The average GMSL rise is estimated to be 3.4 mm ± 0.3 mm per year over the 30 years (1993–2022) of the satellite altimeter record; however, the rate doubled between the first decade of the record (1993–2002) and the last (2013–2022), during which the rate exceeded 4 mm per year.”).

⁴³⁰ Fleming E., Payne J., Sweet W., Craghan M., Haines J., Hart J. F., Stiller H., & Sutton-Grier A. (2018) [Chapter 8: Coastal Effects](#), in [IMPACTS, RISKS, AND ADAPTATION IN THE UNITED STATES: FOURTH NATIONAL CLIMATE ASSESSMENT](#), Vol. II, Reidmiller D. R., Avery C. W., Easterling D. R., Kunkel K. E., Lewis K. L. M., Maycock T. K., & Stewart B. C. (eds.), U.S. Global Change Research Program, 322–352, 327 (“Although storms, floods, and erosion have always been hazards, in combination with rising sea levels they now threaten approximately \$1 trillion in national wealth held in coastal real estate (Figure 8.1)²⁵ and the continued viability of coastal communities that depend on coastal water, land, and other resources for economic health and cultural integrity (Ch. 15: Tribes, KM 1 and 2). The effects of the coastal risks posed by a changing climate already are and will continue to be experienced in both intersecting and distinct ways, and coastal areas are already beginning to take actions to address and ameliorate these risks (Figure 8.2).”).

⁴³¹ Ford J. D., Couture N., Bell T., & Clark D. G. (2017) [Climate change and Canada’s north coast: research trends, progress, and future directions](#), ENVIRON. REV. 26: 82–92, 83 (“Inhabited primarily by Indigenous populations living in small remote communities, Canada’s northern coastline is vast, representing more than 70% of all Canadian coasts. The north coast is a “hotspot” for climate change, with the region experiencing some of the most rapid climate change anywhere globally, and projected future climate changes for the region will continue to be significant (Larsen and Anisimov 2014). Many communities have a high sensitivity to climate change as they are situated on lowlying coasts, they have infrastructure built on permafrost, they have economies strongly linked to natural resources, they have a high dependence on land-based harvesting activities, and they experience socio-economic disadvantages (AMAP 2011; Arctic Council 2013; Lemmen et al. 2008; Mason and Agan 2015). In light of the risks posed by climate change, adaptation is emerging as an important component of climate policy in northern Canada, and encompasses a variety of strategies, actions, and behaviors that make households, communities, and economic sectors more resilient to climate change (J.D. Ford et al., in press; Labbé et al. 2017).”).

⁴³² National Oceanic and Atmospheric Administration (2020) [OCEAN, COASTAL, AND GREAT LAKES ACIDIFICATION RESEARCH PLAN: 2020-2029](#), Jewett E. B., Osborne E. B., Arzayus K. M., Osgood K., DeAngelo B. J., & Mintz J. M. (eds.), 38 (“Given the inherent vulnerability of the Arctic’s simple food web, OA introduces a significant addition- al risk factor to ecosystems already experiencing multiple stressors.”).

⁴³³ Fisheries and Oceans Canada Centre of Expertise on the State of the Oceans (2012) [CANADA’S STATE OF THE OCEANS REPORT, 2012](#), 10 (“Canada’s cold coastal waters may be particularly prone to acidification due to the natural occurrence of undersaturated waters at shallow depths (Pacific coast), or large freshwater input (Arctic coast). Freshwater input from runoff and ice melt reduces the ocean’s capacity to buffer against changes in pH. Runoff may also contain organic matter from land which can also increase acidification.”)

⁴³⁴ Fisheries and Oceans Canada Centre of Expertise on the State of the Oceans (2012) [CANADA’S STATE OF THE OCEANS REPORT, 2012](#), 11 (“ In summer along the west coast of Canada, acidic water from depths of 100 to 200 metres upwells onto the continental shelf and into the ocean surface layer. This upwelling water is acidic due to a high concentration of dissolved inorganic carbon. However, the exposure of the continental shelf to this water is expected to be intermittent since the uptake of CO₂ by phytoplankton and outgassing of CO₂ to the atmosphere remove the excess dissolved inorganic carbon. Nonetheless the combination of undersaturated water at relatively shallow depths and winds that favour upwelling make the British Columbia shelf particularly vulnerable. Over the last century, the depth below which the aragonitic shells of saturation depth or horizon (Ω) — has become shallower by, typically, a 30-50 metres. In the Northeast Pacific Ocean, the saturation horizon is naturally shallow – as little as 100 metres below the surface. Scientists expect the saturation depth to become shallower as global atmospheric CO₂ concentrations increase over the coming century, putting organisms close to the surface at risk from ocean acidification.”).

⁴³⁵ Hoegh-Guldberg O., *et al.* (2018) [Chapter 3: Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems](#), in [GLOBAL WARMING OF 1.5 °C](#), *Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 3-263 (“**Ocean ecosystems are already experiencing large-scale changes, and critical thresholds are expected to be reached at 1.5°C and higher levels of global warming (high confidence)**). In the transition to 1.5°C of warming, changes to water temperatures are expected to drive some species (e.g., plankton, fish) to relocate to higher latitudes and cause novel ecosystems to assemble (*high confidence*). Other ecosystems (e.g., kelp forests, coral reefs) are relatively less able to move, however, and are projected to experience high rates of mortality and loss (*very high confidence*). For example, multiple lines of evidence indicate that the majority (70–90%) of warm water (tropical) coral reefs that exist today will disappear even if global warming is constrained to 1.5°C (*very high confidence*). {3.4.4, Box 3.4} **Current ecosystem services from the ocean are expected to be reduced at 1.5°C of global warming, with losses being even greater at 2°C of global warming (high confidence)**. The risks of declining ocean productivity, shifts of species to higher latitudes, damage to ecosystems (e.g., coral reefs, and mangroves, seagrass and other wetland ecosystems), loss of fisheries productivity (at low latitudes), and changes to ocean chemistry (e.g., acidification, hypoxia and dead zones) are projected to be substantially lower when global warming is limited to 1.5°C (*high confidence*). {3.4.4, Box 3.4}”)

⁴³⁶ Harvey F. (1 August 2013) [Caribbean Has Lost 80% of its Coral Reef Cover in Recent Years](#), THE GUARDIAN (“The Catlin scientific survey will undertake the most comprehensive survey yet of the state of the region’s reefs, starting in Belize and moving on to Mexico, Anguilla, Barbuda, St Lucia, Turks & Caicos, Florida and Bermuda. The Catlin scientists said the state of the regions’ reefs would act as an early warning of problems besetting all of the world’s coral. As much as 80% of Caribbean coral is reckoned to have been lost in recent years, but the survey should give a more accurate picture of where the losses have had most effect and on the causes.”).

⁴³⁷ Wiener J. (4 September 2021) [Food Security Should Open the Conversation About Biodiversity for Coral Reef-Dependent Countries](#), IUCN CROSSROADS (“Our very survival, especially those of us from Small Island Developing States (SIDS), is directly linked to the health of our reefs; writes Jean Wiener of Fondation pour la Protection de la Biodiversité Marine (FoProBiM) (Haiti), an IUCN Member organisation. As global citizens, we understand the ecosystemic value of our coral reefs. This fraction of our ocean floor supports 25% of our ocean’s marine life, providing food security for most of the world and supporting the livelihoods for coastal populations.”).

⁴³⁸ National Oceanic and Atmospheric Administration (20 January 2023) [How do coral reefs protect lives and property?](#), NATIONAL OCEAN SERVICE (“The coral reef structure buffers shorelines against waves, storms, and floods, helping to prevent loss of life, property damage, and erosion. When reefs are damaged or destroyed, the absence of this natural barrier can increase the damage to coastal communities from normal wave action and violent storms.”).

⁴³⁹ United States Environmental Protection Agency (11 May 2023) [Basic Information about Coral Reefs](#) (“Coral reefs are among the most biologically diverse and valuable ecosystems on Earth. An estimated 25 percent of all marine life, including over 4,000 species of fish, are dependent on coral reefs at some point in their life cycle. An estimated 1 billion people worldwide benefit from the many ecosystem services coral reefs provide including food, coastal protection, and income from tourism and fisheries. Healthy coral reefs provide: Habitat, feeding, spawning, and nursery grounds for over 1 million aquatic species, including commercially harvested fish species. Food for people living near coral reefs, especially on small islands. Recreation and tourism opportunities, such as fishing, scuba diving, and snorkeling, which contribute billions of dollars to local economies. Protection of coastal infrastructure and prevention of loss of life from storms, tsunamis, floods, and erosion. Sources of new medicines that can be used to treat diseases and other health problems. All of the services provided by coral reefs translate into tremendous economic worth. By one estimate, the total net benefit per year of the world’s coral reefs is \$29.8 billion. Tourism and recreation account for \$9.6 billion of this amount, coastal protection for \$9.0 billion, fisheries for \$5.7 billion, and biodiversity, representing the dependence of many different marine species on the reef structure, for \$5.5 billion (Cesar, Burke and Pet-Soede, 2003).”).

⁴⁴⁰ United Nations Environment Programme (2018) [Coral reefs: We continue to take more than we give](#) (“The value of a single hectare of coral reef in terms of tourism, shoreline protection and fisheries is, on average, \$130,000 per

year, and as much as \$1.25 million where the tourism sector is large. Travel and tourism, much of it dependent on reefs, contribute a third of the GDP in the Caribbean for example, and as much as 80 percent in the Maldives.”).

⁴⁴¹ United Nations Environment Programme (2018) [Coral reefs: We continue to take more than we give](#) (“Coral reef ecosystems provide society with resources and services worth \$375 billion per year. They house 25 percent of all marine life, feeding hundreds of millions of people; they enable discovery of new pharmaceuticals and provide work and income through the tourism and fisheries industries.”).

⁴⁴² Climate Adaption Science Centers (27 January 2022) [Coastal Erosion: Coastal Erosion is More Severe Under Climate Change](#), United States Geographical Survey (“Detailed Description - More storms and higher seas from climate change create more winds, waves, and floods, leading to coastal erosion. Hurricanes can wash away sandy barrier islands, leaving coastlines and islands unprotected from future storm surges.”).

⁴⁴³ Barragán Muñoz J. M. (2020) [Progress of coastal management in Latin America and the Caribbean](#), OCEAN COAST. MANAG. 184(105009): 1–13, 1 (“From an environmental, social and economic point of view, coastal areas in LAC are of key importance. Ecosystems such as mangroves, coral reefs and lagoons that are of particular interest for the conservation of biodiversity are located in coastal marine areas (Elbers, 2011; FAO, 2012; UNEP WCMC, 2016). From a demographic point of view, population concentration in cities within coastal zones has increased dramatically. Between 1945 and 2014 the number of Cities and Coastal Agglomerations (CCA) in LACs has gone from 42 to 420 (Barragán and De Andrés, 2016). During the same period, the population of these CACs has risen from 20 to 180 million (only 140 million people live in cities in the remaining interior territory”).

⁴⁴⁴ The World Bank (14 April 2014) [Promoting Climate Change Action in Latin America and the Caribbean](#) (“Within LAC, the Bank continues to provide technical and financial support geared toward scaling up climate change mitigation and adaptation actions and leveraging co-benefits. On mitigation, countries utilize sector actions, including energy, waste, transport, forestry, agriculture, and sustainable use of resources in urban area. Adaptation offers myriad opportunities to enhance resilience to climate change impacts through (i) natural disaster preparedness; (ii) enhanced technologies and sector capacities to mitigate risks of extreme weather and hydrology change in agriculture, forestry, fisheries, transport, and energy; and (iii) new financial products to boost resilience.”).

⁴⁴⁵ Oppenheimer M., Glavovic B. C., Hinkel J., van de Wal R., Magnan A. K., Abd-Elgawad A., Cai R., Cifuentes-Jara M., DeConto R. M., Ghosh T., Hay J., Isla F., Marzeion B., Meyssignac B., & Sebesvari Z. (2019) [Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities](#), in [THE OCEAN AND CRYOSPHERE IN A CHANGING CLIMATE](#), *Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Masson-Delmotte V., Zhai P., Tignor M., Poloczanska E., Mintenbeck K., Alegría A., Nicolai M., Okem A., Petzold J., Rama B., & Weyer N. M. (eds.), 323 (“Global mean sea level (GMSL) is rising (virtually certain¹) and accelerating (high confidence²). The sum of glacier and ice sheet contributions is now the dominant source of GMSL rise (very high confidence). GMSL from tide gauges and altimetry observations increased from 1.4 mm yr⁻¹ over the period 1901–1990 to 2.1 mm yr⁻¹ over the period 1970–2015 to 3.2 mm yr⁻¹ over the period 1993–2015 to 3.6 mm yr⁻¹ over the period 2006–2015 (high confidence). The dominant cause of GMSL rise since 1970 is anthropogenic forcing (high confidence). {4.2.2.1.1, 4.2.2.2}”).

⁴⁴⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) [Summary for Policymakers](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-14 (“Heating of the climate system has caused global mean sea level rise through ice loss on land and thermal expansion from ocean warming. Thermal expansion explained 50% of sea level rise during 1971–2018, while ice loss from glaciers contributed 22%, ice sheets 20% and changes in land water storage 8%. The rate of ice sheet loss increased by a factor of four between 1992–1999 and 2010–2019. Together, ice sheet and glacier mass loss were the dominant contributors to global mean sea level rise during 2006–2018. (high confidence).”).

⁴⁴⁷ United Nations (14 February 2023) [Secretary-General’s remarks to the Security Council Debate on “Sea-level Rise: Implications for International Peace and Security](#), Statements (“The danger is especially acute for nearly 900

million people who live in coastal zones at low elevations — that’s one out of ten people on earth. Some coastlines have already seen triple the average rate of sea-level rise.”).

⁴⁴⁸ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuví N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) [Chapter 12: Central and South America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), *Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1691, 1714 (“Global warming has caused glacier loss in the Andes from 30% to more than 50% of their area since the 1980s. Glacier retreat, temperature increase and precipitation variability, together with land use changes, have affected ecosystems, water resources and livelihoods through landslides and flood disasters (*very high confidence*). In several areas of the Andes, flood and landslide disasters have increased, and water availability and quality and soil erosion have been affected by both climatic and non-climatic factors (*high confidence*).”; “The glaciers of the southern Andes (including the SWS and SSA regions) show the highest glacier mass loss rates worldwide (*high confidence*) contributing to SLR (Jacob et al., 2012; Gardner et al., 2013; Dussailant et al., 2018; Braun et al., 2019; Zemp et al., 2019). Since 1985, the glacier area loss in the sub-region is in a range of 20 up to 60% (Braun et al., 2019; Reinthaler et al., 2019b).”).

⁴⁴⁹ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuví N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) [Chapter 12: Central and South America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), *Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1712 (“In Argentina, projected changes in the hydrology of Andean rivers associated with glacier retreat are predicted to have negative impacts on the region’s fruit production (*low evidence, medium agreement*) (Barros et al., 2015).”).

⁴⁵⁰ Castellanos E., Lemos M. F., Astigarraga L., Chacón N., Cuví N., Huggel C., Miranda L., Moncassim Vale M., Ometto J. P., Peri P. L., Postigo J. C., Ramajo L., Roco L., & Rusticucci M. (2022) [Chapter 12: Central and South America](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY](#), *Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), 1718 (“Patagonian ice fields in SA are the largest bodies of ice outside of Antarctica in the Southern Hemisphere. They are losing volume due partly to rapid changes in their outlet glaciers, which end up in lakes or the ocean, becoming the largest contributors to eustatic SLR in the world per unit area (Foresta et al., 2018; Moragues et al., 2019; Zemp et al., 2019). Most calving glaciers in the southern Patagonia ice field retreated during the last century (*high confidence*). Upsala glacier retreat generated slope instability, and a landslide movement destroyed the western edge in 2013. The Upsala Argentina Lake has become potentially unstable and may generate new landslides (Moragues et al., 2019). The climate effect on the summer stratification of piedmont lakes is another issue in connection with glacier dynamics (Isla et al., 2010). Between 41° and 56° South latitude, the absolute glacier area loss was 5450 km² (19%) in the last approximately 150 years, with an annual area reduction increase of 0.25% yr⁻¹ for the period 2005– 2016 (Meier et al., 2018). The small glaciers in the northern part of the Northern Patagonian Ice Field had over all periods the highest rates of 0.92% a⁻¹. In this sub-region, increased melting of ice is leading to changes in the structure and functioning of river ecosystems and in freshwater inputs to coastal marine ecosystems (*medium confidence: low evidence, high agreement*) (Aguayo et al., 2019). In addition, in the case of coastal areas, the importance of tides and rising sea levels in the behaviour of river floods has been demonstrated (Jal.n- Rojas et al., 2018).”).

⁴⁵¹ Oppenheimer M., Glavovic B. C., Hinkel J., van de Wal R., Maignan A. K., Abd-Elgawad A., Cai R., Cifuentes-Jara M., DeConto R. M., Ghosh T., Hay J., Isla F., Marzeion B., Meyssignac B., & Sebesvari Z. (2019) [Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities](#), in [THE OCEAN AND CRYOSPHERE IN A CHANGING CLIMATE](#), *Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Masson-Delmotte V., Zhai P., Tignor M., Poloczanska E., Mintenbeck K., Alegría A., Nicolai M., Okem A.,

Petzold J., Rama B., & Weyer N. M. (eds.), 323 (“Non-climatic anthropogenic drivers, including recent and historical demographic and settlement trends and anthropogenic subsidence, have played an important role in increasing low-lying coastal communities’ exposure and vulnerability to SLR and extreme sea level (ESL) events (very high confidence). In coastal deltas, for example, these drivers have altered freshwater and sediment availability (high confidence). In low-lying coastal areas more broadly, human-induced changes can be rapid and modify coastlines over short periods of time, outpacing the effects of SLR (high confidence). Adaptation can be undertaken in the short-to medium-term by targeting local drivers of exposure and vulnerability, notwithstanding uncertainty about local SLR impacts in coming decades and beyond (high confidence). {4.2.2.4, 4.3.1, 4.3.2.2, 4.3.2.3} Coastal ecosystems are already impacted by the combination of SLR, other climate-related ocean changes, and adverse effects from human activities on ocean and land (high confidence). Attributing such impacts to SLR, however, remains challenging due to the influence of other climate-related and non-climatic drivers such as infrastructure development and human-induced habitat degradation (high confidence). Coastal ecosystems, including saltmarshes, mangroves, vegetated dunes and sandy beaches, can build vertically and expand laterally in response to SLR, though this capacity varies across sites (high confidence). These ecosystems provide important services that include coastal protection and habitat for diverse biota. However, as a consequence of human actions that fragment wetland habitats and restrict landward migration, coastal ecosystems progressively lose their ability to adapt to climate-induced changes and provide ecosystem services, including acting as protective barriers (high confidence). {4.3.2.3}”).

⁴⁵² Hu A., Xu Y., Tebaldi C., Washington W. M., & Ramanathan V. (2013) *Mitigation of short-lived climate pollutants slows sea-level rise*, NAT. CLIM. CHANGE 3: 730–734, 732 (“In comparison with the BAU case, mitigation of SLCPs can reduce the SLR_{full} rate by about 18% (from 1.1 cm yr⁻¹ to about 0.9 cm yr⁻¹), and the SLR_{ther} rate by about 48% (from 0.29 cm yr⁻¹ to 0.15 cm yr⁻¹), with negligible effect from CO₂ reduction before 2050. By 2100, however, CO₂ mitigation can reduce the SLR_{full} rate by about 24% (from 2.1 to 1.6 cm yr⁻¹), and the SLR_{ther} rate_{SEP} by about 25% (from 0.4 to 0.3 cm yr⁻¹). The SLCP mitigation would contribute about 24% of the SLR_{full} rate reduction, and 54% of the SLR_{ther} rate at 2100. With mitigation of both SLCPs and CO₂, the projected SLR rate is reduced by close to 50% for SLR_{full}, and 67% for SLR_{ther} by 2100.”).

Manual sobre la Reducción del Metano: La Mejor Estrategia para Frenar el Calentamiento en la Década de 2030

Nota Informativa del IGSD
En colaboración con CEDHA en su versión en español

13 de septiembre de 2022



Institute for Governance &
Sustainable Development



Centro de Derechos Humanos y Ambiente
(Center for Human Rights & Environment)

Cita Sugerida

Institute for Governance & Sustainable Development (2022) *Manual sobre la Reducción del Metano: La Mejor Estrategia para Frenar el Calentamiento Global en la Década de 2030*.

Autores Principales

Richard “Tad” Ferris, Gabrielle Dreyfus, y Durwood Zaelke.

Autores Colaboradores

Trina Chiemi, Valerie Fajardo, Caitlan Frederick, Erika Gerstenberger, Romina Picolotti, Connor Schiff, Xiaopu Sun, y Jon Turner.

Reconocimientos

Agradecemos a Laura Bloomer, Ken Alex, Gil Damon, Daniel Taillant, y a todos los lectores por sus comentarios que nos ayudan a seguir actualizando y mejorando este *Manual*.

**Institute for Governance & Sustainable Development
y Centro de Derechos Humanos y Ambiente**

A menos que se indique lo contrario, todo el contenido del *Manual sobre la Reducción del Metano* posee una licencia Creative Commons, la cual permite la reutilización no comercial de su contenido con la adecuada atribución.

Copyright © 2022 Institute for Governance & Sustainable Development y
Centro de Derechos Humanos y Ambiente.*

* La traducción al español del presente documento fue realizada por María Candela Conforti, Traductora Pública Oficial de Inglés/Español, contacto: mcctranslations@hotmail.com.

Acerca del Institute for Governance & Sustainable Development

La misión de la IGSD es aumentar la resiliencia acelerando las medidas de mitigación del cambio climático para frenar el calentamiento a corto plazo y las retroalimentaciones climáticas que se refuerzan a sí mismas, evitar puntos críticos de inflexión catastróficos para el clima y la sociedad y limitar la temperatura mundial a 1,5 °C,—o al menos mantener controlado este límite de seguridad respecto de dicha temperatura.

Las últimas investigaciones del IGSD muestran que la descarbonización por sí sola **no basta para frenar el calentamiento a corto plazo** y mantenernos por debajo de 1,5 °C o incluso del límite más peligroso de 2 °C. También concluyen que la estrategia más rápida y eficaz es combinar los esfuerzos acelerados para reducir a cero las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) de la descarbonización del sistema energético, *con* el *sprint* para reducir rápidamente los supercontaminantes climáticos distintos del CO₂ y proteger los sumideros de carbono. Los supercontaminantes climáticos incluyen cuatro contaminantes climáticos de vida corta (CCVC)—metano (CH₄), hollín negro, ozono troposférico (O₃) e hidrofluorocarbonos (HFC)—así como el óxido nitroso (N₂O) de vida más larga.

Combinar el *sprint* de la mitigación rápida con los esfuerzos acelerados de la descarbonización ayudaría a abordar las cuestiones éticas de la equidad intra e intergeneracional, concediendo a las sociedades el tiempo que necesitan para adaptarse urgentemente a los cambios inevitables y crear resiliencia. Los últimos datos científicos sugieren que la ventana para superar el límite de seguridad de 1,5 °C podría cerrarse tan pronto como a principios de la década de 2030, por lo que esta es la década decisiva para actuar con rapidez para frenar el calentamiento. La teoría de la acción del IGSD se basa en la urgencia de responder rápida y eficazmente para evitar daños irreversibles en el sistema climático con consecuencias catastróficas para todos.

La forma más rápida de reducir el calentamiento a corto plazo en la próxima década es reducir los CCVC. Dado que sólo duran en la atmósfera por un plazo que va de días a 15 años; su reducción evitará el 90% del calentamiento previsto en una década. Las estrategias dirigidas a reducir los CCVC pueden evitar cuatro veces más calentamiento en 2050 que las dirigidas únicamente al CO₂. La reducción de los HFC puede evitar casi 0,1 °C de calentamiento para el 2050 y hasta 0,5 °C a finales de siglo. El calendario inicial de reducción progresiva de la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal abarcará alrededor del 90% de este objetivo. Los esfuerzos paralelos para mejorar la eficiencia energética de los aparatos de aire acondicionado y otros aparatos de refrigeración durante la eliminación progresiva de los HFC pueden duplicar los beneficios climáticos en 2050. La reducción de las emisiones de metano puede evitar casi 0,3 °C en la década de 2040, con la posibilidad de evitar un calentamiento significativo gracias a las tecnologías emergentes para eliminar el metano atmosférico más rápidamente que su ciclo natural.

Al combinar el *sprint* de mitigación rápida con los esfuerzos acelerados para lograr la descarbonización se reduciría a la mitad la tasa de calentamiento global de 2030 a 2050, se frenaría el ritmo de calentamiento una o dos décadas antes que mediante la descarbonización por sí sola, y se haría posible que el mundo mantuviera controlado el límite de seguridad de 1,5 °C. También se **reduciría en dos tercios la tasa de calentamiento del Ártico**. Esto ayudaría a frenar las retroalimentaciones climáticas que se refuerzan a sí mismas en el Ártico, y así evitar, o al menos retrasar, la serie de puntos críticos de inflexión proyectados si se superasen los 1,5 °C. Reducir los riesgos climáticos y no sobrepasar los límites para lograr la adaptación es fundamental para aumentar la resiliencia.

El enfoque del IGSD para una mitigación rápida abarca los ámbitos de la ciencia, el derecho, la política y la financiación climática. El IGSD trabaja a escala mundial, regional, nacional y subnacional.

Acerca del Centro de Derechos Humanos y Ambiente

El Centro de Derechos Humanos y Ambiente (CEDHA), creado en 1999 en Argentina, y constituido en los Estados Unidos en 2015, es una organización no gubernamental sin fines de lucro cuyo objetivo es construir una relación más armoniosa entre el ambiente y las personas. Su trabajo se centra en mejorar el acceso a la justicia de víctimas de violaciones de derechos humanos como consecuencia de la degradación ambiental o a causa de la gestión no sustentable de los recursos naturales, y prevenir futuras violaciones. Para ello impulsa la generación de políticas públicas que promuevan el desarrollo social y ambientalmente sustentable e incluyente a través de la participación comunitaria, el litigio de interés público, el fortalecimiento de instituciones democráticas y la capacitación de actores clave.

Hace más de dos décadas que CEDHA trabaja para proteger y para defender a personas y comunidades afectadas por la degradación ambiental y para promover políticas públicas sustentables, basadas en la ciencia y orientadas a la protección de los derechos humanos.

Las actividades programáticas de CEDHA incluyen iniciativas para asistir a revertir el cambio climático y promover una transición energética justa. CEDHA focaliza sus esfuerzos en reducir emisiones de Contaminantes Climáticos de Corta Vida tales como el carbón negro, el metano y los HFCs, con el fin de bajar la tasa de calentamiento global y evitar sobrepasar puntos de no retorno. CEDHA ha sido una de las organizaciones pioneras en promover la protección de glaciares blancos, glaciares de roca y el ambiente periglacial por su valor como reservas hídricas y reguladores de cuencas. Asimismo nuestro equipo trabaja para abordar los impactos sociales y ambientales del de la minería incluyendo gas y petróleo, para reducir las emisiones de carbono en la producción de ladrillos, promover la transición energética justa incluyendo en el triángulo de litio y fortalecer la responsabilidad legal empresaria en materia de derechos humanos y cambio climático.

Nuestra labor transcurre a nivel local e internacional, y ha sido reconocida por nuestros colegas y por organizaciones internacionales, tales como el Sierra Club quien otorgó a CEDHA su más distinguido premio internacional (el Earth Care Award) y por el prestigioso premio global el Sophie Prize, otorgado a Romina Picolotti, co-fundadora de CEDHA por su labor única en la promoción de los derechos humanos y la protección del ambiente.

Manual sobre la Reducción del Metano: La Mejor Estrategia para Frenar el Calentamiento en la Década de 2030

13 de Septiembre de 2022

Tabla de Contenidos

Resumen Ejecutivo.....	1
1. Introducción	5
2. La necesidad de actuar con rapidez: Ganar el <i>sprint</i> hasta el 2030 es fundamental para evitar una catástrofe climática.....	11
A. El impacto actual sobre el clima es malo, y lo peor está por venir: el riesgo de ciclos de retroalimentaciones que se refuerzan a sí mismas y puntos críticos de inflexión	11
B. Reducir la quema de combustibles fósiles es esencial, pero no frena el calentamiento a corto plazo.....	12
3. Reducir las emisiones de metano es la mejor manera de frenar el cambio climático a corto plazo.....	13
A. Aplicar todas las medidas disponibles de mitigación del metano es la única forma plausible de limitar el calentamiento en los próximos 20 años	13
B. Fuentes antropogénicas de las emisiones globales de metano	15
<i>i. El sector de la producción de energía representa alrededor del 35% de las emisiones atmosféricas de metano.....</i>	<i>16</i>
<i>ii. El sector de la agricultura representa alrededor del 40% de las emisiones antropogénicas de metano</i>	<i>17</i>
<i>iii. El sector de los residuos representa alrededor del 20% de las emisiones antropogénicas de metano</i>	<i>17</i>
4. Existen tecnologías para reducir casi la mitad de las emisiones antropogénicas de metano procedentes de los sectores de la producción de energía, los residuos y la agricultura	18
A. Sector de la producción de energía	19
B. Sector de la agricultura	21
C. Sector de los residuos.....	25
5. Fuentes naturales de metano e investigaciones emergentes sobre la eliminación del metano atmosférico y la prevención de su formación.....	26
6. Los principales países emisores están aplicando y deben reforzar las medidas de mitigación del metano.....	27
A. Estados Unidos.....	28
B. Unión Europea	31
C. Canadá.....	34
D. México	35

E. India	36
F. China.....	37
G. Brasil.....	39
H. Irak	39
7. La colaboración internacional es fundamental para combatir las emisiones de metano...40	
<i>i. Organizaciones e iniciativas cuasi-gubernamentales</i>	<i>40</i>
<i>ii. Iniciativas de calificación del desempeño</i>	<i>43</i>
8. Los sistemas de monitoreo añaden transparencia y responsabilidad44	
9. Crear una estrategia de responsabilidad y cumplimiento utilizando sistemas sólidos de monitoreo de las emisiones46	
10. Los esfuerzos internacionales, incluido el Compromiso Mundial sobre el Metano, están catalizando otras acciones bilaterales y multilaterales para frenar el metano47	
A. El Compromiso Mundial sobre el Metano y el Pacto Climático de Glasgow	48
B. Medidas relativas al metano en virtud del Protocolo de Gotemburgo del Convenio sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia	49
C. Declaración Conjunta de Glasgow de Estados Unidos y China para Reforzar la Acción Climática en la década de 2020	51
D. Un Acuerdo Mundial sobre el Metano para Abordar la Emergencia Climática y Promover la Paz y la Seguridad.....	51
<i>i. El Protocolo Montreal brinda inspiración y un modelo para el acuerdo mundial sobre el metano.....</i>	<i>52</i>
<i>ii. Ya existen las bases científicas, políticas y técnicas para la negociación de un acuerdo mundial sobre el metano inspirado en el Protocolo de Montreal</i>	<i>53</i>
<i>iii. La creación y el fortalecimiento de las organizaciones necesarias para apoyar un acuerdo mundial sobre el metano pueden y deben comenzar inmediatamente en el marco de la CCAC.....</i>	<i>54</i>
<i>iv. Basándose en las sólidas bases científicas, técnicas y políticas existentes y de las organizaciones de la CCAC, las negociaciones de un acuerdo mundial sobre el metano deberían comenzar a nivel de los Jefes de Estado</i>	<i>55</i>
11. Las organizaciones financieras y filantrópicas pueden proporcionar un apoyo financiero fundamental para alcanzar objetivos y acciones ambiciosas contra el metano.....55	
A. El Fondo Fiduciario para la Resiliencia y la Sostenibilidad	56
B. El Grupo del Banco Mundial	58
C. Una estrategia de financiación mundial para hacer frente a la crisis climática	59
12. Conclusión	60
Referencias	61

Tabla de Recuadros, Figuras y Cuadros

Recuadro 1.	Contribución del metano al calentamiento actual.....	5
Recuadro 2.	Retroalimentaciones autorreforzantes y puntos críticos de inflexión	9
Recuadro 3.	Métricas de tiempo y temperatura del metano: utilizar el PCG ₂₀ es bueno, ¿medir la temperatura es aún mejor!	10
Recuadro 4.	Los gobiernos subnacionales demuestran su liderazgo en la mitigación del metano	30
Recuadro 5.	Riesgos y beneficios climáticos limitados del cambio al hidrógeno	34
Figura 1.	Contribuciones al calentamiento observado en 2010–2019 en relación con 1850–1900....	7
Figura 2.	Reducciones del Metano comparadas con las respuestas de la temperatura media global en superficie a los cambios en las emisiones relacionadas con los combustibles fósiles (CO ₂ + SO ₂).....	13
Figura 3.	Respuesta de la temperatura a la reducción del metano entre 2020 y 2050 basada en niveles de mitigación coherentes con escenarios de 1,5 °C	14
Figura 4.	Emisiones medias de metano para 2008–17 en MtCH ₄ por año para 18 regiones continentales.....	15
Figura 5.	Emisiones indicativas de referencia en 2030 y potencial de mitigación de las medidas técnicas y adicionales coherentes con una trayectoria de 15 °C.....	16
Cuadro 1.	Valores de PCG para el metano de los informes del IPCC	10
Cuadro 2.	Medidas de control de las emisiones por sector	18
Cuadro 3.	Principales tecnologías emergentes de mitigación para el metano procedente del ganado, su aplicabilidad y principales limitaciones en los distintos sistemas, reducción relativa de emisiones, impacto en el desempeño animal, potencial de mitigación global estimado, incluidas las limitaciones para su adopción, y calendario y nivel de confianza en su disponibilidad comercial	23

Resumen Ejecutivo

El *Manual sobre la Reducción del Metano* del IGSD brinda claridad a los responsables de políticas sobre las bases científicas de la mitigación del metano y explica las razones por las que es necesario emprender acciones urgentes; presenta las oportunidades de mitigación actuales y emergentes por cada sector; los esfuerzos nacionales, regionales e internacionales que pueden servir de base para la acción mundial de emergencia sobre el metano y enumera las iniciativas de financiación para garantizar el apoyo destinado a su rápida reducción. Este *Manual sobre el Metano* proporciona un razonamiento científico y político para que los responsables de políticas puedan lograr reducciones “grandes, rápidas y sostenidas” de las emisiones de metano que son necesarias para retrasar el calentamiento global a corto plazo¹ y limitar el riesgo de activar los puntos críticos de inflexión. El *Manual sobre el Metano* también justifica la necesidad de investigación y desarrollo de tecnologías para eliminar el metano de la atmósfera a gran escala.

El metano es un gas superpotente que calienta el planeta—una tonelada de gas metano tiene un poder de calentamiento 80 veces mayor que una tonelada de emisiones de dióxido de carbono en un período de 20 años. Si bien el metano es el foco del presente *Manual*, retrasar el calentamiento en el corto plazo también requiere profundas reducciones de otros “contaminantes climáticos de corta vida” (CCVC) similarmente potentes—como el hollín de carbono negro, los hidrofluorocarbonos (utilizados principalmente como refrigerantes) y el ozono troposférico, que son supercontaminantes climáticos con una vida media en la atmósfera inferior a 15 años². Una reducción drástica de estos supercontaminantes también reducirá la acumulación de calor en los océanos que de otro modo seguirían contribuyendo al calentamiento por décadas o siglos, mucho después del ciclo de vida del contaminante en cuestión³.

Si bien disminuir las emisiones de CO₂ a largo plazo seguirá siendo importante, reducir los supercontaminantes climáticos puede frenar el calentamiento una o dos décadas antes que las estrategias enfocadas exclusivamente en el CO₂, evitar entre dos y cinco veces más calentamiento que las reducciones de CO₂ en 2050⁴, disminuir el calentamiento previsto en el Ártico en dos tercios y la tasa de calentamiento global a la mitad⁵.

Los mensajes principales son:

- La contaminación por metano ya ha causado 0,51 °C de los 1,06 °C de calentamiento total observado (2010-2019) en comparación con la era preindustrial⁶. El calentamiento provocado por el metano seguirá aumentando si las emisiones de metano continúan creciendo, con un aumento del 30% de las emisiones antropogénicas previstas para 2050 según los escenarios de políticas actuales⁷. Las concentraciones atmosféricas de metano batieron récords en 2020 y 2021 con la tasa de aumento más rápida desde que se iniciaron los registros en 1983; los datos preliminares muestran que el metano superó las 1.900 partes por billón (ppb) por primera vez en septiembre de 2021 (
- **Recuadro 1**)⁸.
- Si no se toman medidas rápidas para frenar el calentamiento, es probable que sobrepasemos el “límite de seguridad” de 1,5 °C al menos temporalmente a finales de esta década⁹, con una probabilidad del 50-50 de que al menos durante el año 2026 se superen los 1,5 °C y una

probabilidad del 10% de que la media en los cinco años comprendidos entre 2022 y 2026 se supere este umbral¹⁰.

- Sobrepasar el límite de 1,5 °C aumenta el riesgo de que las retroalimentaciones que se refuerzan a sí mismas aceleren aún más el aumento de las temperaturas y desencadenen una cascada de puntos críticos de inflexión irreversibles en el sistema climático (**Recuadro 2**)¹¹.
- Más de 3.000 millones de personas viven en contextos vulnerables. Los impactos del calentamiento por encima de 1,5 °C suponen riesgos muy elevados e impactos potencialmente irreversibles para sistemas humanos y naturales únicos y amenazados, y aumentan el riesgo de fenómenos meteorológicos extremos¹².
- La *Evaluación Global del Metano* del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC, por sus siglas en inglés) confirma que la reducción de las emisiones de metano es la estrategia más rápida para evitar que el mundo se estrelle contra la barrera de 1,5°C¹³. Aplicar todas las medidas de mitigación del metano en esta década es la única forma conocida de evitar casi 0,3 °C de calentamiento para la década de 2040 y frenar el calentamiento en un 30%¹⁴. El *Sexto Informe de Evaluación (IE6)* del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) confirma que “una reducción grande, rápida y sostenida de las emisiones de metano” es clave para limitar el calentamiento a corto y largo plazo¹⁵.
 - El Grupo de Trabajo III (WGIII, por sus siglas en inglés) del IE6 concluye además que “[l]as reducciones drásticas de las emisiones de GEI para 2030 y 2040, en particular las reducciones de las emisiones de metano, disminuyen el calentamiento máximo, reducen la probabilidad de sobrepasar los límites de calentamiento y conducen a una menor dependencia de emisiones netas negativas de CO₂ para revertir el calentamiento en la segunda mitad del siglo..... Debido a la corta vida del CH₄ en la atmósfera, la reducción drástica prevista de las emisiones de CH₄ hasta que se alcancen emisiones netas de CO₂ iguales a cero en las vías de mitigación modelizadas reduce efectivamente el pico de calentamiento global (*nivel de confianza alto*)”¹⁶.
 - Para limitar el calentamiento a 1,5 °C sin sobrepaso o con un sobrepaso limitado, es necesario reducir las emisiones mundiales de metano de origen humano en un 34% en 2030 y en un 44% en 2040 con respecto a los niveles previstos para 2019, además de reducir las emisiones mundiales de CO₂ a la mitad en 2030 y en un 80% en 2040, así como reducir drásticamente otros contaminantes climáticos de vida corta y el óxido nitroso¹⁷.
- Existe tecnología para reducir el 45% de las emisiones antropogénicas de metano para 2030 procedentes de la producción de energía, la agricultura y los desechos (**Cuadro 2**)¹⁸. Las medidas dirigidas específicamente a las fuentes de metano son esenciales, ya que las acciones de descarbonización más generales sólo pueden lograr el 30% de las reducciones de metano necesarias¹⁹.
 - Aproximadamente el 60% de las medidas específicas disponibles tienen costos de mitigación bajos (definidos como inferiores a 21 dólares por tonelada de CO₂e para un Potencial de Calentamiento Global a 100 años (PCG₁₀₀) y a 7 dólares por tonelada de CO₂e para un Potencial de Calentamiento Global a 20 años (PCG₂₀), y algo más del

- 50% de ellas tienen costos negativos, es decir, que las medidas se amortizan por sí solas²⁰.
- En la producción de energía, el mayor potencial de mitigación se encuentra en el sector del petróleo y el gas²¹. En el sector de los residuos, la reducción y gestión de los residuos sólidos es el más prometedor²². Y en la agricultura, las medidas para reducir las emisiones de metano del ganado podrían tener el mayor impacto²³.
 - La mitigación del metano también puede apoyar la creación de puestos de trabajo geográficamente diversos y bien remunerados²⁴.
- La aplicación exitosa del *Compromiso Mundial sobre el Metano* reduciría el calentamiento en al menos 0,2 °C para 2050²⁵ y mantendría al planeta en una trayectoria coherente con el objetivo de no superar los 1,5 °C, según la *Evaluación Global del Metano*²⁶. El despliegue de todas las medidas disponibles y adicionales podría conducir a una reducción del 45% por debajo de los niveles de 2030 para alcanzar casi 0,3 °C de calentamiento evitado en la década de 2040²⁷.
 - La reducción del metano también aumenta la resiliencia y promueve la justicia ambiental²⁸. Al frenar el calentamiento a corto plazo y reducir los riesgos asociados, la mitigación del metano proporciona a las comunidades vulnerables al cambio climático más tiempo para adaptarse, mientras también disminuye la carga de adaptación de las mismas²⁹. Además, como el metano se oxida en la atmósfera para formar ozono troposférico (también conocido como smog fotoquímico), las reducciones de metano reducen el daño ocasionado a la salud de la población y a los cultivos, apoyando la seguridad alimentaria³⁰.
 - Para estabilizar el clima, es esencial para lograr emisiones netas de CO₂ iguales a cero acelerando la transición hacia energías limpias. Además, durante el tiempo que dure una transición justa hacia una economía neta igual a cero, es esencial detener las fugas de metano para frenar el calentamiento y proteger la salud de las comunidades locales y la seguridad alimentaria³¹.
 - La transición para dejar de producir combustibles fósiles no sólo reducirá el CO₂, sino también las emisiones de aerosoles refrigerantes. Los aerosoles refrigerantes se coemiten con el CO₂ cuando se queman combustibles fósiles que contienen azufre, como el carbón y el gasoil. A diferencia del CO₂, que permanece en la atmósfera durante décadas o siglos, estos aerosoles refrigerantes desaparecen de la atmósfera en cuestión de días o meses. La pérdida de este efecto de enfriamiento contrarrestará las reducciones del calentamiento procedentes de la descarbonización hasta 2050 aproximadamente, e incluso acelerará el calentamiento durante la primera década o más³².
 - Por lo tanto, reducir el metano y otros contaminantes climáticos de vida corta también es clave para contrarrestar este aumento de la tasa de calentamiento a corto plazo³³.
 - Del total de emisiones globales de metano (550-594 millones de toneladas métricas de metano, Mt CH₄ año⁻¹), entre el 50% y el 65% provienen de fuentes antropogénicas (336-376 Mt CH₄ año⁻¹) en tres sectores principales: producción de energía, agricultura y residuos³⁴. La producción de energía representa alrededor del 35% de las emisiones antropogénicas de

metano³⁵, la agricultura alrededor del 40%³⁶ y los residuos alrededor del 20%³⁷, con la quema de biomasa y los biocombustibles como fuentes menores.

- Alrededor del 35-50% de las emisiones globales de metano provienen de fuentes naturales³⁸. Estas fuentes naturales incluyen los humedales tropicales, las turberas y el permafrost ártico, todos los cuales se están calentando y parecen estar aumentando las emisiones como parte de las retroalimentaciones del ciclo clima-carbono que se refuerzan a sí mismas³⁹. Además de frenar la tasa de calentamiento para reducir las fuentes naturales de emisiones de metano, se está investigando la eliminación del metano atmosférico⁴⁰.
- Muchos gobiernos nacionales y subnacionales (incluidos los principales países emisores de metano y organizaciones regionales), así como iniciativas y asociaciones internacionales, ya están aplicando medidas obligatorias y voluntarias de mitigación del metano. Estos esfuerzos nacionales e iniciativas ascendentes refuerzan y expanden la acción y el liderazgo nacionales en materia de mitigación.
- Ya existen sistemas para medir y controlar las emisiones de metano y otros están en fase de desarrollo. Los sistemas satelitales están aumentando rápidamente nuestra comprensión sobre las principales fuentes emisoras, incluido un pequeño número de “ultraemisores” responsables del 8-12% de las emisiones globales de metano del sector del petróleo y el gas⁴¹. Estos sistemas de vigilancia, junto con una estrategia de responsabilidad y cumplimiento, serán esenciales para garantizar que el mundo se dirija en una trayectoria que garantice la máxima reducción de las emisiones de metano. Esto incluye fomentar el uso de métricas que reflejen mejor el impacto de las estrategias en la temperatura global para alcanzar el objetivo de 1,5 °C, como por ejemplo el potencial de calentamiento global a 20 años (PCG₂₀) para el metano y otros contaminantes climáticos de vida corta (

-
- Recuadro 3)⁴².
- Se necesitan fondos y financiación para apoyar a los gobiernos y organizaciones comprometidos con la rápida reducción del metano y la gobernanza asociada. Esto incluye la financiación disponible a través de instrumentos como el nuevo Fondo Fiduciario para la Resiliencia y la Sostenibilidad (FFRS) del Fondo Monetario Internacional (FMI) (véase la **Sección 11**).
- La acción multilateral para reducir rápidamente las emisiones de metano es fundamental. El metano es un gas de efecto invernadero bien mezclado, y su mitigación por parte de todos los países y territorios es el mejor medio para lograr reducciones rápidas y efectivas de las emisiones de metano. El *Compromiso Mundial sobre el Metano*, que establece el objetivo colectivo de reducir las emisiones mundiales de metano al menos un 30 % de aquí a 2030 con respecto a los niveles de 2020 es un paso importante para mantener el límite de seguridad de 1,5 °C a nuestro alcance⁴³. No obstante, una fuerte acción y liderazgo a nivel nacional que no incluyan a determinados países y no garanticen la responsabilidad y el apoyo a los compromisos de mitigación del metano pueden no ser suficientes para lograr las reducciones de metano a la velocidad y escala necesarias con el fin de evitar impactos climáticos potencialmente catastróficos. Por lo tanto, los gobiernos deben basarse en el *Compromiso* o en acuerdos paralelos como la *Declaración Conjunta de Glasgow de Estados Unidos y China para Reforzar la Acción Climática en la Década de 2020* con el objeto de abrir la puerta a un acuerdo mundial sobre el metano. Esto incluye actuar de inmediato para exigir una tasa de emisiones de metano progresivamente más baja a los proveedores de “gas metano de sustitución” en respuesta a los cambios en el abastecimiento a medida que se reduce la disponibilidad de gas ruso.

1. Introducción

Acabar con la dependencia de los combustibles fósiles, incluido el gas fósil, mediante el cambio a energías limpias es esencial para proteger el clima y garantizar la paz y la seguridad. Pero durante el tiempo que se necesita para cambiar el sistema energético mundial hacia energías limpias, también es esencial reducir las emisiones de metano lo antes posible para hacer frente a la emergencia climática.

El metano (CH₄) es un gas superpotente que calienta el planeta, con un poder de calentamiento más de 80 veces superior al del dióxido de carbono en 20 años. Tal como ilustró recientemente el Financial Times, “[s]i pensamos que las emisiones de los combustibles fósiles están poniendo al mundo a hervir lentamente, el metano es un soplete que nos está cocinando hoy”⁴⁴. El metano es también uno de los principales precursores del ozono troposférico, un contaminante atmosférico responsable de millones de muertes prematuras, de pérdidas de cosechas por un valor de miles de millones de dólares al año⁴⁵ y del debilitamiento de los sumideros de carbono⁴⁶. Abordar la contaminación por metano frenará el calentamiento global, mejorará la salud, generará empleo, aumentará la seguridad alimentaria e incrementará las inversiones en los países en desarrollo. Más de 180 países hacen referencia directa a la mitigación del metano en sus contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés)⁴⁷. En septiembre de 2022, 120 países y la Unión Europea se adhirieron al *Compromiso Mundial sobre el Metano*⁴⁸, que establece el objetivo colectivo de reducir las emisiones mundiales de metano al menos un 30 % de aquí a 2030 con respecto a los niveles de 2020, los cuales representan aproximadamente el 70% de la economía mundial y el 45% de las emisiones antropogénicas de metano⁴⁹.

La contaminación por metano ya ha causado 0,51 °C del calentamiento total observado entre 2010 y 2019 de 1,06 °C (0,88-1,21 °C), en comparación con la era preindustrial (

Recuadro 1)⁵⁰. Y el calentamiento aumentará aún más si las emisiones de metano siguen creciendo. Las concentraciones atmosféricas de metano batieron récords en 2020 con la tasa de aumento más rápida desde que se iniciaron los registros en 1983⁵¹. Los datos preliminares muestran que el metano superó las 1.900 partes por billón (ppb) por primera vez en septiembre de 2021⁵². Tal como se señala en el anuncio conjunto de Estados Unidos y la UE en el marco del *Compromiso Mundial sobre el Metano*, “el metano es un potente gas de efecto invernadero [GEI] y, según el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, es responsable de aproximadamente la mitad del aumento neto de 1,0 °C de la temperatura media mundial desde la era preindustrial⁵³.”

Recuadro 1. Contribución del metano al calentamiento actual

Según la Figura SPM.2c del IE6, la contaminación por metano causó 0,51 °C (0,29-0,84 °C) de calentamiento en el período de 2010-2019 en relación con 1850-1900, y el CO₂ causó 0,79 °C (0,52-1,25 °C) de calentamiento. El calentamiento antropogénico neto total actual era de aproximadamente 1,07 °C (0,8 a 1,3 °C) hasta 2019. Mientras que las emisiones de gases de efecto invernadero y de aerosoles de carbono negro contribuyen a un calentamiento de aproximadamente 1,8 °C, alrededor de 0,7 °C de este calentamiento está actualmente enmascarado debido al efecto refrigerante de los aerosoles reflectantes que se emiten principalmente junto con el CO₂ durante la combustión de carbón y gasoil. Este calentamiento neto evaluado de 1,07 °C está muy próximo al calentamiento observado de 1,06 °C (0,88 a 1,21 °C) según la Figura SPM.2a del IE6, adaptada en la **Figura 1**. Si se consideran únicamente las emisiones de gases de efecto invernadero y se excluyen otros contaminantes climáticos, como los aerosoles y los precursores de gases de efecto invernadero, el metano contribuye en torno al 30% del forzamiento radiativo antropogénico (aproximadamente 1,2 de 3,8 Watts por metro cuadrado, Wm⁻²). El forzamiento radiativo del metano basado en las emisiones es de 1,2 (0,90 a 1,51) Wm⁻² y tiene en cuenta el efecto directo de las emisiones de metano. También tiene en cuenta el forzamiento

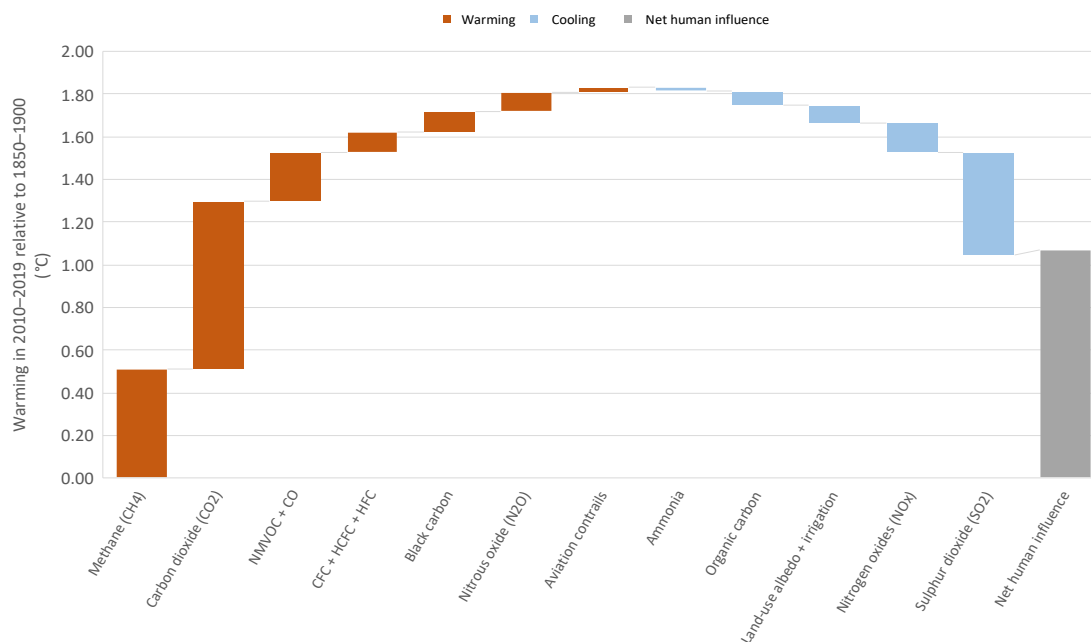
positivo indirecto derivado de la contribución de las emisiones de metano al aumento del ozono troposférico de fondo y del vapor de agua estratosférico⁵⁴.

Reducir las emisiones de metano es la mejor y más rápida estrategia para frenar el calentamiento y mantener 1,5 °C a nuestro alcance⁵⁵. La *Evaluación Global del Metano* de la Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), dirigida por el Dr. Drew Shindell, concluye que las medidas de mitigación actualmente disponibles podrían reducir las emisiones de metano causadas por el hombre en un 45% para 2030, en comparación con los niveles previstos para 2030 sin introducción de cambios de la práctica actual (en inglés, *business as usual*), y evitar un calentamiento de casi 0,3 °C para la década de 2040⁵⁶.

Una mitigación rápida y enérgica del metano es fundamental porque la ventana para reducir el calentamiento lo suficiente como para frenar las retroalimentaciones que se refuerzan a sí mismas y evitar los puntos críticos de inflexión puede cerrarse a finales de esta década⁵⁷. Muchas de estas retroalimentaciones están mostrando signos de activación, y hay pruebas de que nos estamos acercando o ya hemos cruzado múltiples puntos críticos de inflexión climáticos⁵⁸. Se prevé que se produzcan seis puntos críticos de inflexión climáticos entre 1 °C de calentamiento y los 1,5 °C de calentamiento previstos para finales de la década, y otros once puntos críticos de inflexión entre 1,5 °C y 2 °C⁵⁹. Las interacciones de efecto dominó entre estos sistemas plantean el riesgo de desencadenar una cascada mundial de puntos críticos de inflexión⁶⁰. Además, es posible que se produzcan puntos críticos de inflexión aún no descubiertos debido a las limitaciones de los modelos actuales y a su exclusión en estos modelos de procesos, incluidos los relacionados con retroalimentaciones biogeoquímicas tales como el deshielo del permafrost⁶¹.

Descarbonizar el sistema energético y lograr emisiones netas de CO₂ iguales a cero es crucial para estabilizar el clima y mantener las temperaturas por debajo de 1,5 °C a finales de este siglo⁶². Sin embargo, la eliminación gradual de los combustibles fósiles que emiten CO₂, como el carbón y el gasoil, también detiene las emisiones de aerosoles refrigerantes coemitidos, como el dióxido de azufre (SO₂)⁶³. A diferencia del CO₂, que permanece en la atmósfera durante décadas o siglos, estos aerosoles refrigerantes desaparecen de la atmósfera en cuestión de días o meses. La pérdida de este efecto refrigerante contrarrestará las reducciones del calentamiento derivadas de la descarbonización hasta aproximadamente 2050 y *probablemente incluso acelerará el calentamiento durante la primera década o más*⁶⁴. Tanto la *Evaluación Global del Metano* como el *Sexto Informe de Evaluación* (IE6) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) destacan que “una reducción grande, rápida y sostenida del metano” es clave para contrarrestar este aumento del calentamiento en las próximas décadas⁶⁵. Además, el IE6 concluye que la reducción de las emisiones de metano es clave para reducir eficazmente el pico de calentamiento y disminuir los costos del cambio climático a corto plazo, limitando la probabilidad de sobrepasar el umbral de 1,5 °C⁶⁶.

Figura 1. Contribuciones al calentamiento observado en 2010–2019 en relación con 1850–1900



Adaptado del *Resumen para Responsables de Políticas*, del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2021) en *CAMBIO CLIMÁTICO 2021: BASES FÍSICAS, Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Masson-Delmotte V., y otros (eds.), Datos de la Figura SPM.2 (v20210809). Véase también [NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis](#) (2021).

Además de provocar el calentamiento del planeta, el metano es también un importante precursor del ozono troposférico⁶⁷, que está relacionado con una importante morbilidad y mortalidad humanas⁶⁸ de tipo respiratorio y cardiovascular y con daños a los cultivos agrícolas (estimados en 63.000 millones de dólares anuales sólo en Asia Oriental)⁶⁹. Los daños causados a las plantas por el aumento del ozono troposférico pueden reducir su capacidad de absorción de carbono y anular en parte el efecto de fertilización por carbono derivado del aumento de las concentraciones de CO₂, con un efecto potencialmente significativo sobre el forzamiento radiativo indirecto⁷⁰. Un estudio reciente ha estimado en un 35% la contribución del metano a la carga actual de ozono troposférico⁷¹. Es probable que el metano desempeñe un papel más importante en la formación de ozono troposférico a medida que disminuyan las emisiones de otros precursores debido a los controles de la contaminación atmosférica⁷². La reducción de las emisiones mundiales de metano en un 45% para 2030 evitaría 255.000 muertes prematuras, 775.000 visitas hospitalarias relacionadas con el asma, 73.000 millones de horas de trabajo perdidas por el calor extremo y 26 millones de toneladas de pérdidas de cultivos en todo el mundo⁷³. Eliminar todas las emisiones antropogénicas de metano podría evitar 690.000 muertes prematuras al año en 2050⁷⁴. Cada tonelada de metano reducida genera 4.300 dólares en beneficios para la salud, la productividad y otros⁷⁵. Además, las estrategias de mitigación del metano proporcionan mayores reducciones de costos y ganancias derivadas de la eficiencia en el sector privado, crean empleo, estimulan la innovación tecnológica y ayudan a reducir la vulnerabilidad climática de las comunidades más desfavorecidas.

El *Compromiso Mundial sobre el Metano* se lanzó formalmente a nivel de Jefes de Estado en el segmento de alto nivel de la 26ª Conferencia de las Partes (COP26) el 2 de noviembre de 2021⁷⁶. Anteriormente, Estados Unidos y la Unión Europea anunciaron este *Compromiso* en el Foro de las

Principales Economías el 17 de septiembre de 2021⁷⁷. El mismo compromete a los gobiernos a un objetivo colectivo mundial de reducción de las emisiones mundiales de metano en al menos un 30% con respecto a los niveles de 2020 para 2030. Los signatarios también se comprometen a avanzar hacia el uso de las metodologías de inventario de buenas prácticas del IPCC de más alto nivel para cuantificar las emisiones de metano, con especial atención a las fuentes de altas emisiones.

La aplicación con éxito del *Compromiso Mundial sobre el Metano* reduciría el calentamiento en al menos 0,2 °C para 2050⁷⁸ y mantendría al planeta en una trayectoria coherente con el mantenimiento dentro de los 1,5 °C, según la *Evaluación Global del Metano*⁷⁹. El despliegue de todas las medidas disponibles y adicionales podría conducir a una reducción del 45% por debajo de los niveles de 2030 para alcanzar casi 0,3 °C de calentamiento evitado en la década de 2040⁸⁰.

El *Compromiso* marca la primera vez que los Jefes de Estado se comprometen a actuar con rapidez para reducir los supercontaminantes climáticos y alcanzar el objetivo de 1,5 °C de temperatura del Acuerdo de París. Este documento inicial crea conciencia sobre la oportunidad y la urgencia de frenar el calentamiento reduciendo el metano. También identifica los sectores implicados y el nivel de ambición necesario. Los gobiernos deben basarse en el *Compromiso* para abrir la puerta a un acuerdo mundial sobre el metano, que incluya actuar de inmediato para exigir una tasa de emisiones de metano progresivamente más baja a los proveedores de “gas metano de sustitución” en respuesta a los cambios en el abastecimiento a medida que se reduce la disponibilidad de gas ruso. Reducir el metano es nuestra mejor oportunidad para frenar rápidamente el calentamiento y evitar puntos críticos de inflexión que desencadenarían un calentamiento global devastador y harían mucho más difícil evitar una amenaza existencial para un planeta Tierra habitable⁸¹.

Aunque el presente *Manual* se centra en el metano, un contaminante climático de vida corta (CCVC), la reducción drástica de otros CCVC igualmente potentes—incluyendo el hollín o carbono negro, los hidrofluorocarbonos (HFC) y el ozono troposférico (del que el metano es uno de los principales precursores)—también es crucial para frenar el calentamiento a corto plazo⁸². Estas reducciones disminuirán la acumulación de calor en el océano que, de otro modo, seguiría contribuyendo al calentamiento durante décadas o siglos, mucho después de la vida útil del contaminante⁸³.

Recuadro 2. Retroalimentaciones autorreforzantes y puntos críticos de inflexión

El IE6 define una *retroalimentación climática* como “Interacción en la que una perturbación en una magnitud *climática* causa un cambio en una segunda magnitud, y el cambio en esta conduce, en última instancia, a un cambio añadido en la primera magnitud”. Los ejemplos de retroalimentación climática del IE6 incluyen la retroalimentación del ciclo del carbono, a la retroalimentación de las nubes y la retroalimentación hielo-albedo, entre otros. El IE6 define un *punto de inflexión* como “Nivel de cambio en las propiedades de los sistemas más allá del cual el sistema se reorganiza, generalmente de forma abrupta, y no vuelve al estado inicial incluso aunque se reduzca el efecto de los causantes del cambio⁸⁴⁾”. Algunas retroalimentaciones, como la retroalimentación hielo-albedo, se autorrefuerzan cuando el calentamiento inicial reduce el volumen y la extensión del hielo marino reflectante del Ártico en verano y expone la superficie más oscura del océano que absorbe más calor, calentando aún más y reduciendo el hielo marino. Los elementos clave del sistema climático tienen puntos críticos de inflexión que, una vez sobrepasados, obligan al sistema a cambiar, aunque este cambio pueda tardar cientos de años en producirse por completo, como en el caso del deshielo de la capa de hielo de Groenlandia⁸⁵⁾. Otros sistemas pueden inclinarse bruscamente. Un ejemplo sería el cambio de la biosfera terrestre de un sumidero neto de CO₂ a una fuente neta de CO₂ a medida que el calentamiento aumenta las tasas de respiración y disminuye las tasas de fotosíntesis⁸⁶⁾.

Para consultar un debate más completo de las retroalimentaciones y puntos críticos de inflexión y las soluciones para una rápida mitigación, véase Institute for Governance & Sustainable Development (2022) [THE NEED FOR FAST NEAR-TERM CLIMATE MITIGATION TO SLOW FEEDBACKS AND TIPPING POINTS: Critical Role of Short-lived Super Climate Pollutants in the Climate Emergency](#).

Recuadro 3. Métricas de tiempo y temperatura del metano: utilizar el PCG₂₀ es bueno, medir la temperatura es aún mejor!

Reducir los riesgos asociados con la aceleración del calentamiento exige estrategias de mitigación, como la reducción de las emisiones de metano, que pueden frenar el calentamiento a corto plazo. Evaluar cómo afectan las estrategias al calentamiento a corto plazo requiere considerar las emisiones individuales por contaminante en unidades de masa, tal como exigen las directrices de información de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y recomiendan los científicos en materia climática⁸⁷. También es necesario tener en cuenta las coemisiones por fuente, ya que las políticas actúan sobre las fuentes y no sobre los contaminantes individuales.

Una opción ideal para evaluar el impacto sobre la temperatura es convertir las emisiones por fuente, en términos de contaminante y coemisiones en impactos sobre la temperatura, utilizando herramientas como la [Herramienta de Evaluación de los Beneficios Ambientales y Sociales de la Reducción del Metano](#) o la [Herramienta para Medir la Trayectoria de la Temperatura de la CCAC](#). Alternativamente, cuando se comparan los impactos climáticos de los contaminantes climáticos de vida corta como el metano, utilizar el potencial de calentamiento global a 20 años (PCG₂₀) capta mejor el impacto del calentamiento a corto plazo que el PCG a 100 años (PCG₁₀₀), además de estar más alineado con el alcance del objetivo de 1,5 °C⁸⁸. Aunque la CMNUCC exige actualmente el uso de la métrica PCG₁₀₀ al notificar emisiones o absorciones agregadas, que infravalora sistemáticamente el impacto climático del metano, las Partes notificantes pueden utilizar además otras métricas, como el PCG₂₀ o los potenciales absolutos de temperatura⁸⁹. El IE6 ha actualizado las métricas para el metano de la siguiente manera: PCG₂₀ es 81,2 y PCG₁₀₀ es 27,9⁹⁰. La **Cuadro 1** a continuación resume los valores de PCG para el metano de los informes del IPCC.

Cuadro 1. Valores de PCG para el metano de los informes del IPCC

		IE6	IE5		IE4	TIE	SIE
Metano (CH ₄)	PCG ₂₀	81,2	84	86*	72	62	56
	PCG ₁₀₀	27,9	28	34*	25	23	21
Fósil CH ₄	PCG ₂₀	82,5 ± 25,8	85		--	--	--
	PCG ₁₀₀	29,8 ± 11	30		--	--	--
No-fósil CH ₄	PCG ₂₀	80,8 ± 25,8	--		--	--	--
	PCG ₁₀₀	27,2 ± 11	--		--	--	--

*con retroalimentación del ciclo de carbono. Todo el metano evaluado por el IE6 incluye la retroalimentación del ciclo de carbono.

IE6 = 2021 [Sexto Informe de Evaluación WGI](#) (Cuadro 7.SM.7; Cuadro 7.15); **IE5** = 2013 [Quinto Informe de Evaluación WGI](#) (Cuadro 8.A.1; Tabla 8.7); **IE4** = 2007 [Cuarto Informe de Evaluación](#) (Cuadro 2.14); **TIE** = 2001 [Tercer Informe de Evaluación](#) (Cuadro 6.7); **SIE** = 1995 [Segundo Informe de Evaluación](#) (Cuadro 2.9).

La mayoría de las métricas agregadas están diseñadas para compararse con el CO₂ de larga vida. Las métricas como la equivalencia de CO₂ en términos de PCG y PCG* se basan en relaciones matemáticas que pretenden hacer que CCVC como el metano sean comparables al impacto de calentamiento a largo plazo de las emisiones de CO₂⁹¹. Estas métricas agregadas suelen ignorar los contaminantes coemitidos con importantes impactos climáticos a corto plazo, como los aerosoles refrigerantes. La métrica PCG* intenta tomar en cuenta la vida más corta del metano diferenciando las emisiones históricas de los cambios en la tasa de emisiones⁹². Una de las críticas a este enfoque es que básicamente “excluye” las emisiones históricas, de modo que cuando es aplicada a la escala de emisores de metano regionales o individuales, las fuentes con emisiones históricas elevadas pueden acusar un PCG* negativo reduciendo su tasa de emisiones. Este ocurre incluso si sus emisiones en un año determinado son equivalentes a las de una nueva fuente sin emisiones históricas. Esto ha llevado a un uso incorrecto de estas métricas para afirmar que algunos sectores con grandes emisiones históricas y tasas de emisiones actuales estables o decrecientes han contribuido en menor medida al calentamiento global⁹³.

Por estas razones, el presente *Manual sobre el Metano* se basa en la convención de la [Evaluación Global del Metano](#) del PNUMA/CCAC al utilizar las métricas basadas en la masa, tales como el millón de toneladas métricas del metano (MtCH₄), y el impacto en la temperatura en lugar de las métricas de PCG.

2. La necesidad de actuar con rapidez: Ganar el *sprint* hasta el 2030 es fundamental para evitar una catástrofe climática

Cada aumento del calentamiento cuenta⁹⁴. Ya estamos viviendo una situación de emergencia climática, con fenómenos extremos que se producen antes de lo previsto y con mayor gravedad. A medida que el ritmo de calentamiento se acelere, los récords de fenómenos extremos serán cada vez más frecuentes y peligrosos⁹⁵. Tenemos como mucho hasta el final de esta década, y probablemente menos, para frenar drásticamente el calentamiento global o enfrentarnos a una amenaza existencial para un planeta Tierra habitable. El mundo podría llegar al límite de seguridad de 1,5 °C en 2030 debido al aumento de las emisiones, al descenso de la contaminación atmosférica por partículas que desenmascara el calentamiento existente y a la variabilidad natural del clima⁹⁶.

La rapidez debe convertirse en un factor clave en la selección de las soluciones climáticas, con el fin de limitar rápidamente el calentamiento, frenar las retroalimentaciones que se refuerzan a sí mismas, evitar los puntos críticos de inflexión y proteger a las personas y los ecosistemas más vulnerables. Por lo tanto, necesitamos “soluciones climáticas rápidas”, es decir, medidas —incluidas las normas— que puedan empezar a aplicarse inicialmente en un plazo de dos a tres años, sustancialmente en un plazo de cinco a diez años y producir una respuesta climática en una o dos décadas⁹⁷. Estas estrategias también son fundamentales para aumentar la resiliencia, otorgando a las comunidades más tiempo para adaptarse al calentamiento global y reduciendo la cantidad de adaptación necesaria⁹⁸.

La comunidad científica no ha comunicado adecuadamente la necesidad de actuar con rapidez. Tal como señalaron Yangyang Xu, V. Ramanathan David Victor en su Comentario de la publicación *Nature*⁹⁹,

“[El Informe Especial del IPCC sobre 1,5 °C] subestima otro hecho alarmante: el calentamiento global se está acelerando. Tres tendencias —el aumento de las emisiones, la disminución de la contaminación atmosférica [que está reduciendo rápidamente las partículas de sulfato reflectantes que enmascaran el calentamiento] y los ciclos climáticos naturales— se combinarán en los próximos 20 años para hacer que el cambio climático sea más rápido y furioso de lo previsto. En nuestra opinión, es muy probable que superemos el nivel de 1,5 °C en 2030, y no en 2040 como se prevé en el informe especial La comunidad que elaboran modelos climáticos no se ha ocupado lo suficiente de los cambios rápidos que más preocupan a los responsables de políticas, prefiriendo centrarse en tendencias y equilibrios a más largo plazo”.

A. El impacto actual sobre el clima es malo, y lo peor está por venir: el riesgo de ciclos de retroalimentaciones que se refuerzan a sí mismas y puntos críticos de inflexión

El calentamiento rápido a corto plazo amenaza con acelerar un círculo vicioso —de retroalimentaciones que se refuerzan a sí mismas donde el planeta comienza a calentarse en un escenario de “Tierra invernadero”. Estos mecanismos de retroalimentación podrían desencadenar una cascada de puntos críticos de inflexión en efecto dominó en el Ártico y en otros lugares, muchos de ellos irreversibles y potencialmente catastróficos¹⁰⁰. Esto podría conducir a un calentamiento incontrolable, convirtiéndose en la fuerza dominante que regulará el sistema climático¹⁰¹.

Un prestigioso grupo de científicos sobre clima, en su Comentario de 2019 de la publicación de *Nature* titulada *Climate Tipping Points—Too Risky to Bet Against*, explican que “la emergencia más clara se presentaría si nos aproximáramos a una cascada global de puntos críticos de inflexión” y que dichos “efectos en cascada puedan tornarse comunes”¹⁰².

Los datos de la última revisión de las retroalimentaciones y los puntos críticos de inflexión sugieren que ya nos encontramos en un estado de emergencia planetaria en el que tanto el riesgo como la urgencia de la emergencia son agudos. Con un calentamiento de aproximadamente 1,1 °C, existe un riesgo no desdeñable de que ya se hayan superado uno o varios puntos críticos de inflexión relativos a la criosfera¹⁰³. Las mejores estimaciones indican que los umbrales críticos para la capa de hielo de Groenlandia, la capa de hielo de la Antártida occidental, los corales de aguas cálidas y el deshielo abrupto del permafrost se producen en torno a ~1,5 °C. Limitar el calentamiento por debajo de 2 °C y la duración del calentamiento por encima de 1,5 °C puede evitar el colapso de los mantos de hielo¹⁰⁴. El deshielo del manto de hielo de Groenlandia es el factor que más contribuye al aumento del nivel del mar¹⁰⁵, y ya se ha previsto que perderá 110 trillones de toneladas de hielo para finales de siglo, lo que elevaría el nivel del mar en casi 30 centímetros¹⁰⁶. Retrasar la acción aumenta el riesgo de cruzar uno o más umbrales de temperatura¹⁰⁷ y somete al planeta a fenómenos meteorológicos y climáticos extremos que suponen una amenaza existencial para la civilización¹⁰⁸.

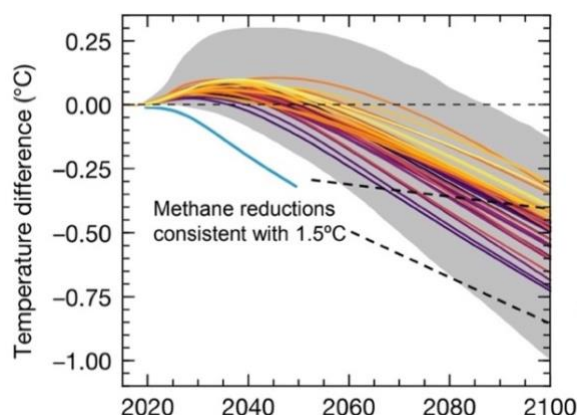
B. Reducir la quema de combustibles fósiles es esencial, pero no frena el calentamiento a corto plazo

Descarbonizar el sistema energético y lograr emisiones netas de CO₂ iguales a cero es fundamental para estabilizar el clima y mantener las temperaturas por debajo de 1,5 °C a finales de este siglo, pero reducir el CO₂ por sí solo no basta para alcanzar este objetivo¹⁰⁹. De hecho, reducir la quema de combustibles fósiles como el carbón y el gasoil también reduce los aerosoles refrigerantes coemitidos, principalmente en forma de sulfatos y nitratos. Los aerosoles refrigerantes coemitidos son partículas reflectantes que actualmente enmascaran un calentamiento de aproximadamente 0,5 C¹¹⁰. Mientras que el CO₂ acumulado en la atmósfera seguirá provocando calentamiento durante décadas o siglos, estos aerosoles refrigerantes se desprenden de la atmósfera en cuestión de días o meses, y este desenmascaramiento de los aerosoles servirá para compensar las reducciones del calentamiento derivadas de la descarbonización hasta aproximadamente 2050 e incluso añadirá calentamiento durante la primera década o más **Figura 2**)¹¹¹. Incluso sin tener en cuenta el calentamiento derivado de la reducción de los aerosoles refrigerantes, alcanzar el máximo de emisiones de CO₂ en 2030 y la neutralidad de carbono en la década de 2060 sólo evitaría un calentamiento de 0,1C en 2050¹¹², aunque los beneficios de esta estrategia se acumularán rápidamente desde 2060 hasta finales de siglo.

El IE6 confirma que la transición de los combustibles fósiles a las energías limpias está desenmascarando un calentamiento oculto de hasta 0,5 °C que anula los beneficios de enfriamiento de la descarbonización hasta 2050 aproximadamente, lo que subraya la importancia de reducir los supercontaminantes climáticos distintos del CO₂:

“La mitigación sostenida del metano, dondequiera que se produzca, se destaca como una opción que combina ganancias a corto y largo plazo en la temperatura de la superficie (*nivel de confianza alto*) y conduce a beneficios en la calidad del aire mediante la reducción de los niveles de ozono en superficie a nivel global (*nivel de confianza alto*).... La mitigación adicional [del metano] y [del carbono negro] contribuiría a compensar el calentamiento adicional asociado a las reducciones [del dióxido de azufre] que acompañarían a la descarbonización (*nivel de confianza alto*)”¹¹³.

Figura 2. Reducciones del Metano comparadas con las respuestas de la temperatura media global en superficie a los cambios en las emisiones relacionadas con los combustibles fósiles ($CO_2 + SO_2$)



Fuente: Shindell D. (25 de mayo de 2021) *Benefits and Costs of Methane Mitigation*, Presentación en la Reunión del Grupo de Trabajo de la CCAC. *Updating Figure 3d* de Shindell D. y Smith C. J. (2019) *Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels*, NATURE 573: 408–411.

3. Reducir las emisiones de metano es la mejor manera de frenar el cambio climático a corto plazo

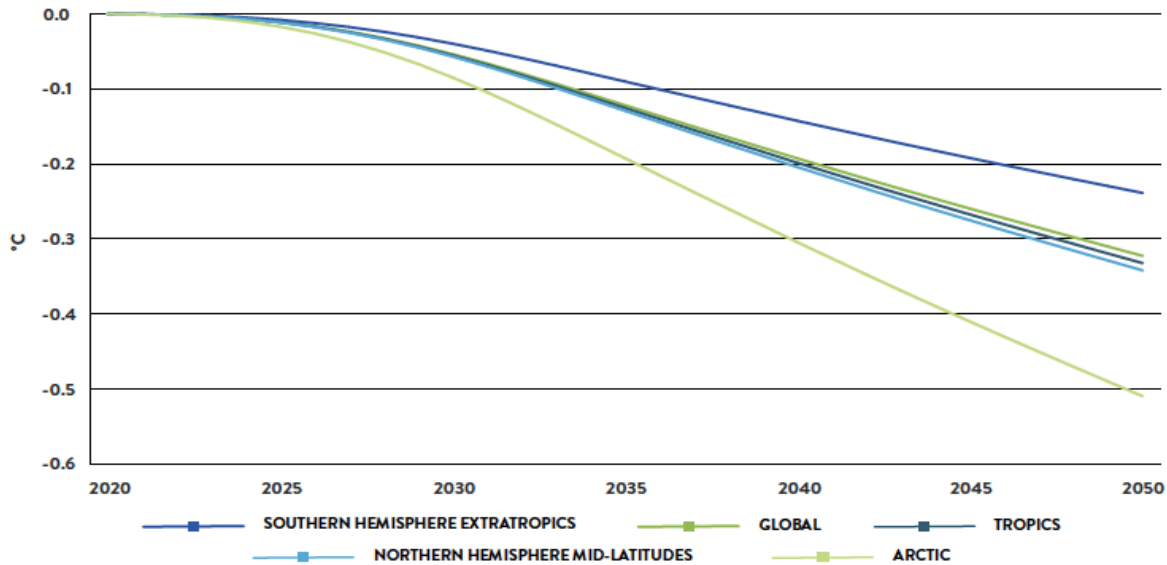
La *Evaluación Global del Metano* confirma que reducir las emisiones de metano es la estrategia más rápida para limitar el calentamiento durante los próximos 20 años¹¹⁴. Llevar a cabo todas las medidas de mitigación del metano en esta década es la única forma conocida de evitar casi 0,3 °C de calentamiento para la década de 2040 y frenar el calentamiento en un 30%¹¹⁵. El IE6 confirma que “una reducción grande, rápida y sostenida del metano” es clave para limitar el calentamiento a corto y largo plazo¹¹⁶. Además, el informe más reciente del IPCC sobre soluciones climáticas, elaborado por el Grupo de Trabajo III (IE6 del WGIII), refuerza la idea de que la reducción drástica y rápida de las emisiones de metano es esencial para limitar el calentamiento a corto plazo y evitar que el calentamiento máximo supere los 1,5 °C¹¹⁷. Para limitar el calentamiento a 1,5 °C sin sobrepasar o sobrepasando muy poco el límite, es necesario reducir las emisiones un 34% por debajo de los niveles de 2019 en 2030 y un 44% por debajo de los niveles de 2019 en 2040¹¹⁸.

A. Aplicar todas las medidas disponibles de mitigación del metano es la única forma plausible de limitar el calentamiento en los próximos 20 años

La *Evaluación Global del Metano* estima que las estrategias para reducir las emisiones de metano en un 40–45% para el 2030 podrían evitar aproximadamente 0,3 °C para la década de 2040, y 0,5 °C en el Ártico para 2050, un 60% más que la media global (**Figura 3**)¹¹⁹. Esto es coherente con el IE6, que confirmó que la reducción del metano (en un 35% o más) junto con otros CCVC podría frenar el calentamiento global en 0,2 °C (0,1-0,4 °C) en 2040¹²⁰. Los niveles actuales de emisión de metano sitúan las temperaturas medias mundiales en una trayectoria que superará el límite de seguridad de 1,5 °C, y las emisiones antropogénicas de metano representan aproximadamente un tercio del aumento de la temperatura¹²¹. La *Evaluación Integrada del Carbono Negro y el Ozono Troposférico* de 2011 calcula que la plena aplicación de medidas dirigidas al metano y al carbono negro podría reducir la tasa de calentamiento global a la mitad y reducir el calentamiento del Ártico en dos tercios¹²². La implementación de todas las medidas de mitigación del metano disponibles reduciría la tasa de calentamiento global en un 30% a mediados de siglo¹²³. Si se eliminaran todas las emisiones

antropogénicas de metano, los niveles de este gas en superficie podrían descender por debajo de los niveles preindustriales en 15 años¹²⁴.

Figura 3. Respuesta de la temperatura a la reducción del metano entre 2020 y 2050 basada en niveles de mitigación coherentes con escenarios de 1,5 °C

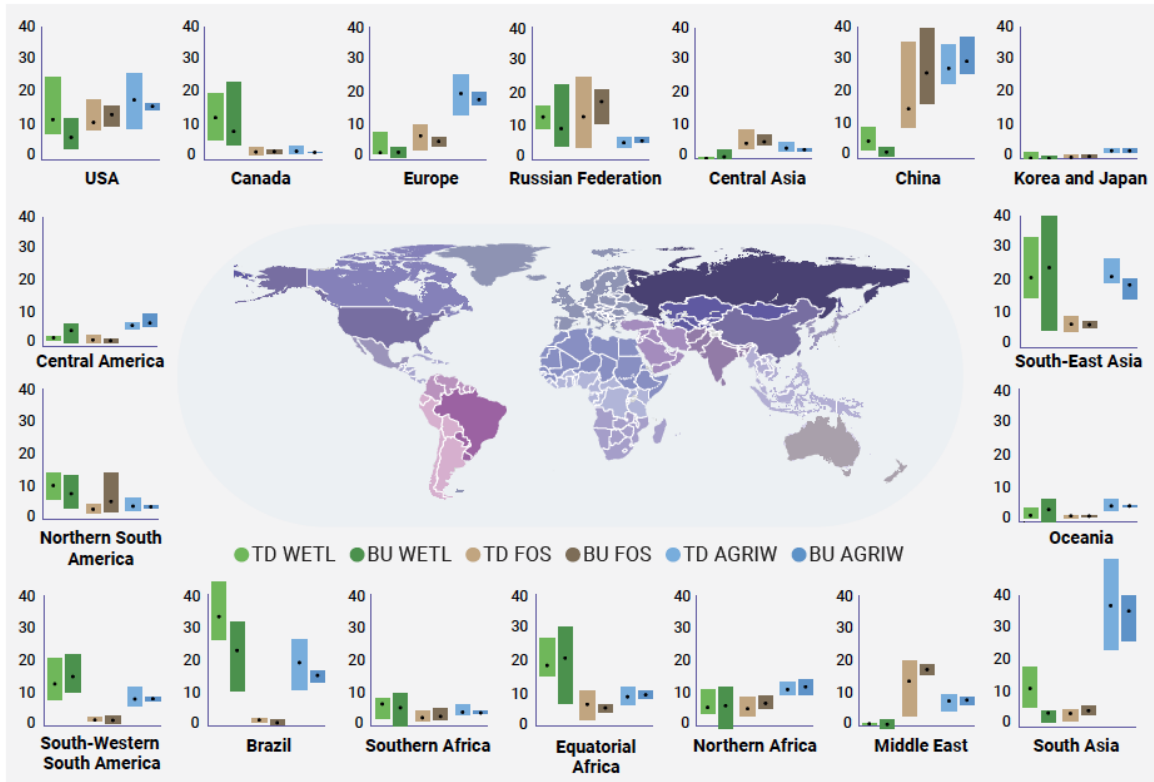


Fuente: Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Coalición Clima y Aire Limpio (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, Figura 5.1. Nota: Además de las respuestas medias globales, se proporcionan valores para las zonas extratropicales del hemisferio sur (90–28 °S), los trópicos (28 °S–28 °N), y las latitudes medias del hemisferio norte (28–60 °N) y el Ártico (60–90 °N).

Una reducción rápida de las emisiones de metano también podría reducir el riesgo de deshielo del hielo marino del Ártico durante el verano¹²⁵. Si el hielo marino del Ártico en verano desapareciera durante los meses de sol, como podría ocurrir ya a mediados de siglo¹²⁶, se produciría un calentamiento equivalente a 1.000 billones de toneladas de CO₂¹²⁷.

En resumen, debido a la larga vida del CO₂ y al desenmascaramiento del calentamiento asociado a la descarbonización, reducir el metano junto con el resto de los CCVC es la única forma plausible de limitar el calentamiento en los próximos 20 años¹²⁸.

Figura 4. Emisiones medias de metano para 2008–17 en MtCH₄ por año para 18 regiones



continentales

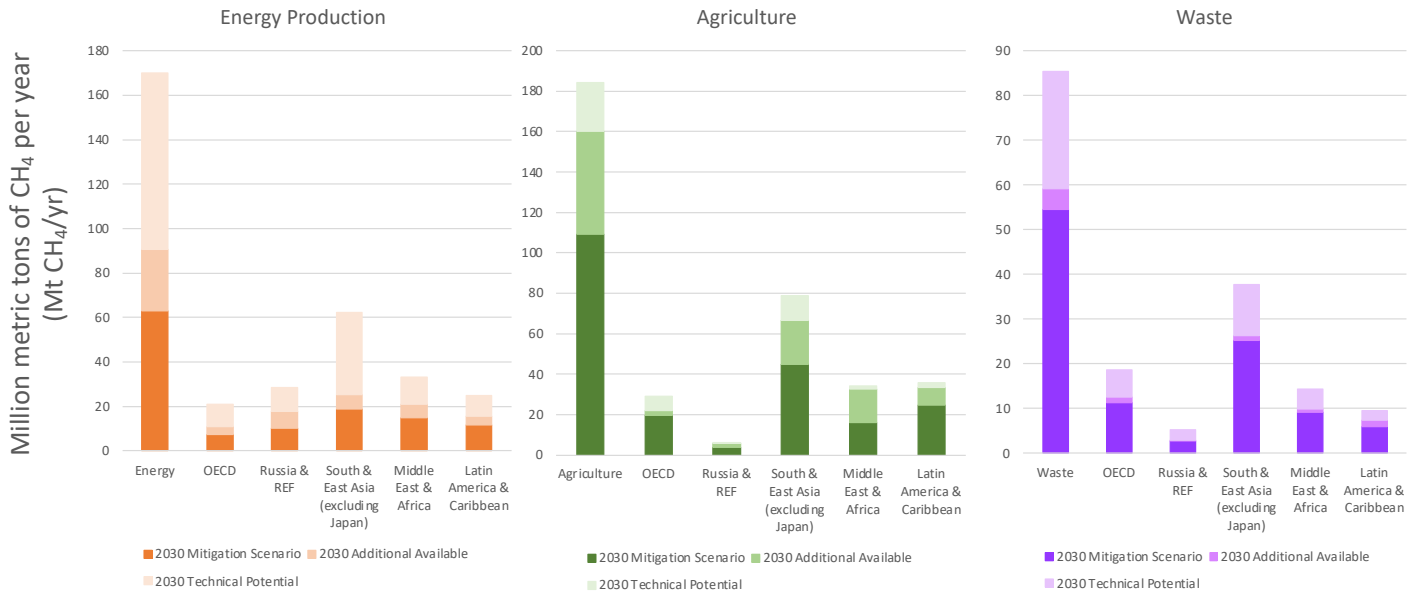
Fuente: Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2021) *INFORME SOBRE LA BRECHA DE EMISIONES 2021: LA CALEFACCION ESTÁ ENCENDIDA – UN MUNDO DE PROMESAS AÚN POR CUMPLIRSE*, Figura 6.1. *Nota:* Se muestran las emisiones de tres categorías principales: humedales (WETL), combustibles fósiles (FOS) y agricultura y residuos (AGRIW). Las barras de colores representan el intervalo mínimo y máximo de las estimaciones disponibles a partir de los enfoques descendente (TD) y ascendente (BU). Los puntos negros muestran la media de cada enfoque (basada en la serie de datos Sauniois et al. 2020). Los colores del mapa indican únicamente las regiones.

B. Fuentes antropogénicas de las emisiones globales de metano

La actividad humana es responsable de aproximadamente el 60% (las estimaciones oscilan entre el 50 y el 65%) del total de las emisiones globales de metano¹²⁹. Tres sectores son los principales responsables de la generación antropogénica de emisiones de metano: la producción de energía (~35%), la agricultura (~40%) y los residuos (~20%), con diferencias regionales e incertezas en las estimaciones que se muestran en la **Figura 4**¹³⁰. En comparación, la quema de biomasa y los biocombustibles son fuentes menores¹³¹. Las medidas de mitigación actualmente disponibles podrían reducir las emisiones de estos sectores en unas 180 millones de toneladas métricas de metano al año (Mt/año), aproximadamente un 45%, para 2030 (**Figura 5**). De esas reducciones, unas 75 Mt (aproximadamente el 60%) podrían reducirse sin costo o con un costo bajo (menos de 600 dólares por tonelada de metano reducida, o unos 21 dólares por tonelada de CO₂ equivalente utilizando un potencial de calentamiento global a 100 años de 28) (

Recuadro 3)¹³². Aunque las emisiones antropogénicas son probablemente la causa principal del aumento de los niveles de metano en la atmósfera durante las últimas dos décadas, las fuentes naturales de metano parecen estar aumentando las emisiones como parte de las retroalimentaciones de los humedales y el permafrost¹³³. Se están llevando a cabo importantes investigaciones sobre la eliminación del metano de la atmósfera, como se explica en la **Sección 5**.

Figura 5. Emisiones indicativas de referencia en 2030 y potencial de mitigación de las medidas técnicas y adicionales coherentes con una trayectoria de 15 °C



Fuente: 2030 Business As Usual Scenarios (limited climate policy; SSP3-7.0) adaptado de Fujimori S., Hasegawa T., Masui T., Takahashi K., Silva Herran D., Dai H., Hijioka Y. & Kainuma M. (2017) *SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways*, GLOB. ENVIRON. CHANGE 42: 268–283. Los potenciales técnicos en 2030 son adaptados de la reducción máxima en: Agencia de Protección Ambiental (2019) *Non-CO₂ Greenhouse Gas Emission Projections and Mitigation: 2010-2050*. Las medidas adicionales son la diferencia entre los potenciales técnicos y el escenario de mitigación coherente de 1,5 °C (SSP1-1.9) de van Vuuren D. P., et al. (2017) *Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm*, GLOB. ENVIRON. CHANGE 42: 237–250.

i. *El sector de la producción de energía representa alrededor del 35% de las emisiones atmosféricas de metano*

Alrededor del 35% de las emisiones antropogénicas de metano proceden de actividades de producción de energía relacionadas con el petróleo, el gas y el carbón¹³⁴. Las emisiones en 2020 se estiman en cerca de 130 MtCH₄ a nivel mundial, de las cuales unas 80 MtCH₄ proceden del petróleo y el gas y 40 Mt del carbón, y la Agencia Internacional de la Energía (AIE) calculó un aumento del 5% de estas emisiones en 2021¹³⁵. Cada combustible es responsable de aproximadamente un tercio de las emisiones de metano asociadas con la producción de energía¹³⁶. La mayor parte de las emisiones del petróleo y el gas proceden de la extracción en tierra, seguida de actividades posteriores como el refinado y la distribución¹³⁷. Estas emisiones incluyen tanto las fugas accidentales como el venteo intencional de metano. Si se tienen en cuenta estas fugas y las emisiones fugitivas (gas que se escapa durante el proceso de perforación, extracción y transporte)¹³⁸, las emisiones de metano del sector de la producción de energía son aproximadamente un 70% superiores a las de los datos comunicados¹³⁹.

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que estas estimaciones excluyen las emisiones probablemente significativas de las minas de carbón abandonadas y de los pozos de petróleo y gas¹⁴⁰.

El metano se produce de forma natural en las minas de carbón. De ahí que deban adoptarse numerosas medidas, incluidas las mencionadas en la **Sección 6**, para garantizar la seguridad de los trabajadores. Las emisiones proceden de minas subterráneas activas, minas abandonadas que siguen filtrando metano y algunas minas de superficie¹⁴¹. Un análisis reciente de las emisiones de las minas de carbón de Australia, incluidas las minas de superficie, reveló que las emisiones de metano se habían subestimado considerablemente en los informes oficiales¹⁴². A pesar de la disminución de la producción de carbón, se prevé que el metano procedente del carbón siga siendo un foco importante de los esfuerzos de mitigación, ya que, en ausencia de intervención, las emisiones de las minas abandonadas aumentarán a medida que se abandonen más minas¹⁴³. La AIE estima que las emisiones de metano de las minas de carbón en funcionamiento en 2020 tuvieron un mayor impacto a corto plazo sobre el clima que las emisiones combinadas de CO₂ de la Unión Europea, y que la generación de electricidad a partir del carbón tendría que reducirse en un 75% de aquí a 2030 para limitar el calentamiento a 1,5 °C¹⁴⁴. Además, las olas de calor extremo y el cambio para sustituir el gas ruso en Europa están haciendo que la demanda de carbón en 2022 vaya camino de alcanzar el récord anual de 2013 y de establecer un nuevo máximo histórico en 2023¹⁴⁵.

ii. El sector de la agricultura representa alrededor del 40% de las emisiones antropogénicas de metano

La agricultura representa en torno al 40% de las emisiones antropogénicas, y las emisiones antropogénicas suponen el 60% de las emisiones totales de metano. Estas emisiones agrícolas proceden principalmente de la ganadería y el cultivo del arroz¹⁴⁶. La mayor contribución dentro de la agricultura procede del ganado vacuno, ovino y otros rumiantes que generan metano a través de sus procesos de digestión (fermentación entérica)¹⁴⁷, siendo el ganado vacuno responsable del 77% de estas emisiones¹⁴⁸. Las prácticas actuales de gestión del estiércol, especialmente en el caso del ganado porcino y vacuno, también liberan metano¹⁴⁹. Las emisiones en 2020 se estiman en aproximadamente 117 MtCH₄ procedentes de la ganadería y la gestión del estiércol¹⁵⁰.

Los campos inundados utilizados para el cultivo de arroz son otra fuente importante de metano, especialmente en regiones con una elevada producción de arroz¹⁵¹. En Asia, el cultivo de arroz aporta alrededor del 20% de las emisiones de metano de la región¹⁵². Se calcula que en 2020 el cultivo mundial de arroz emitió aproximadamente 30 MtCH₄¹⁵³.

iii. El sector de los residuos representa alrededor del 20% de las emisiones antropogénicas de metano

Del 60% de las emisiones mundiales de metano procedentes de fuentes antropogénicas, aproximadamente el 20% de estas emisiones antropogénicas procede del sector de los residuos¹⁵⁴. Este sector incluye tanto los vertederos como el tratamiento de aguas residuales. La descomposición de los residuos orgánicos produce metano. Las emisiones del sector de los residuos en 2017 se estimaron en aproximadamente 68 MtCH₄¹⁵⁵. Sin embargo, es probable que los métodos tradicionales sigan subestimando las emisiones de los vertederos. Un reciente estudio multisatélite reveló que las emisiones de metano a nivel de ciudad en Buenos Aires, Delhi, Lahore y Mumbai eran entre 1,4 y 2,6 veces mayores con respecto a lo estimado, y que las emisiones de los vertederos contribuían a entre el 6 y el 50% de dichas emisiones¹⁵⁶.

En la actualidad, se calcula que se generan anualmente 2.000 millones de toneladas métricas de residuos sólidos urbanos en todo el mundo, y se espera que esta cantidad aumente un 70% hasta alcanzar los 3.400 millones de toneladas en 2050¹⁵⁷.

4. Existen tecnologías para reducir casi la mitad de las emisiones antropogénicas de metano procedentes de los sectores de la producción de energía, los residuos y la agricultura

Según la CCAC, las medidas actualmente disponibles podrían reducir las emisiones antropogénicas de metano procedentes de los sectores de producción de energía, residuos y agricultura en un 45% para 2030¹⁵⁸. Las medidas dirigidas específicamente a las fuentes de metano son esenciales, ya que las medidas de descarbonización más amplias sólo pueden lograr el 30% de las reducciones de metano necesarias¹⁵⁹. Aproximadamente el 60% de las medidas específicas disponibles tienen bajos costos de mitigación (menos de 21 dólares por tonelada de CO_{2e} para un PCG₁₀₀ y 7 dólares por tonelada de CO_{2e} para un PCG₂₀), y algo más del 50% de ellas tienen costos negativos, es decir, que las medidas se amortizan por sí solas¹⁶⁰. La mitigación del metano también puede crear puestos de trabajo geográficamente diversos y bien remunerados¹⁶¹.

El **Cuadro 2** resume las medidas técnicas y adicionales de control de las emisiones de metano por sectores. Existen muchas recopilaciones de soluciones y costos basados en la tecnología, como los informes del [Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados](#), la [Agencia Internacional de la Energía](#), la [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos](#), [McKinsey](#) y otros¹⁶². Varios grupos rastrean y evalúan enfoques novedosos e innovadores, como la recopilación de la [Fundación Solar Impulse](#) de más de 1.000 soluciones eficientes, limpias y rentables para el medio ambiente¹⁶³.

Cuadro 2. Medidas de control de las emisiones por sector

Controles Técnicos		
Combustibles Fósiles	Residuos	Agricultura
Petróleo y gas: detección y reparación de fugas (LDAR) de manera ascendente y descendente.	Residuos sólidos municipales: compostaje; separación en la fuente con reciclado/reutilización; sin vertido de residuos orgánicos; uso de biocoberturas; tratamiento con recuperación de energía o recolección de gas de vertedero.	Ganado vacuno, ovino y otros rumiantes mediante la fermentación entérica: cambio en la alimentación y suplementos; cría para mejorar la productividad y la salud/fertilidad de los animales.
Petróleo y gas: captura de purgas; recuperación y utilización del gas venteado con unidades de recuperación de vapores y émbolos de pozo; instalación de antorchas.	Residuos sólidos industriales: reciclado y tratamiento con recuperación de energía; sin vertido de residuos orgánicos.	Rumiantes y porcinos mediante la gestión del estiércol: tratamiento en digestores de biogás; reducción del tiempo de almacenamiento del estiércol; mejora de la cobertura del almacenamiento del estiércol; mejora de los sistemas de alojamiento y corrales; acidificación del estiércol.
Petróleo y gas por dispositivos existentes: sustituir las bombas de gas a presión y los controladores por sistemas eléctricos o de aire; sustituir los dispositivos neumáticos accionados a gas y los motores de gasolina o gasoil	Aguas residuales residenciales: mejora del tratamiento primario para convertirlo en tratamiento anaerobio secundario/terciario con recuperación y utilización de biogás. Plantas de tratamiento de	Cultivo de arroz: Mejora del manejo del agua o el arroz de humedal de inundación/drenaje alternativo; siembra húmeda directa; adición de fosfoyeso y sulfato para inhibir la

por motores eléctricos; sustituir anticipadamente los dispositivos por versiones de menor liberación; sustituir las juntas o varillas de los compresores; tapar los pozos no utilizados.	aguas residuales en lugar de letrinas y eliminación.	metanogénesis; compostaje de paja de arroz; uso de híbridos alternativos.
Minería de carbón: desgasificación previa a la extracción; oxidación del metano del aire con ventilación mejorada. Inundación de minas abandonadas.	Aguas residuales industriales: mejora del tratamiento para realizarlo en dos etapas, es decir, un tratamiento anaeróbico con recuperación de biogás seguido de un tratamiento aeróbico.	Quema de los residuos agrícolas: aplicación y cumplimiento de las prohibiciones existentes.
Cambios de Comportamiento y Tecnológicos		
Combustibles Fósiles	Residuos	Agricultura
Cambio de combustibles fósiles por renovables/nucleares.	Reducción del desperdicio de alimentos.	Reducción de la pérdida de cosechas y del desperdicio de alimentos.
Gestión de la demanda energética.		Cambio en la dieta.
Mejora de la eficiencia energética.		
Fijación de precios de las emisiones.	Fijación de precios de las emisiones.	Fijación de precios de las emisiones.

Adaptado del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Coalición Clima y Aire Limpio (2021) GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS, 107 (Cuadro 4.1 Medidas de control de las emisiones incluidas en al menos uno de los análisis de mitigación).

A. Sector de la producción de energía

El mayor potencial para mitigar las emisiones de metano procedentes de la producción de energía se encuentra en el sector del petróleo y el gas, donde el potencial de mitigación es de 29-57 MtCH₄/año¹⁶⁴. La AIE identificó vías para lograr reducciones del 75% en el sector de la producción de energía, tal como se requiere en la Hoja de Ruta de la AIE para lograr Emisiones netas cero para 2050¹⁶⁵, con un 40-50% de las medidas sin costo neto a los precios medios del gas de los últimos cinco años; casi todas las opciones de mitigación de las operaciones de petróleo y gas en todo el mundo podrían aplicarse sin costo neto a los precios de 2021¹⁶⁶. Si se hubieran capturado y comercializado las fugas de metano de las operaciones con combustibles fósiles en 2021, los 180 billones de metros cúbicos adicionales de gas habrían sido equivalentes a todo el gas utilizado en el sector eléctrico europeo y habrían aliviado considerablemente la presión sobre los precios¹⁶⁷. La AIE calcula que si todos los países alcanzaran una intensidad de emisiones de metano (emisiones por unidad de producción) similar a la de Noruega, las emisiones de metano procedentes de las operaciones de petróleo y gas se reducirían en más de un 90%¹⁶⁸.

Las medidas para hacer frente a las fugas¹⁶⁹ y reducir la quema en antorcha y el venteo¹⁷⁰ de metano son fundamentales para reducir las emisiones en el sector del petróleo y el gas¹⁷¹. Estas medidas incluyen la intensificación de los programas de detección y reparación de fugas (LDAR, por sus siglas en inglés) y la sustitución de los dispositivos con fugas y los equipos más antiguos por equipos modernos de bajas emisiones¹⁷². La *Clean Air Task Force* (CATF, por sus siglas en inglés) afirma que prohibir el venteo de gas natural en los pozos petrolíferos puede reducir las emisiones en un 95%¹⁷³. La Asociación Mundial para la Reducción de la Quema de Gas del Banco Mundial calcula que en 2021 se desperdiciaron 144 billones de metros cúbicos (bmc) de gas, una cantidad que si se capturara, podría abastecer de energía a toda la región de África subsahariana¹⁷⁴. Según un análisis de Ceres y la CATF, en 2020, los 100 principales productores de petróleo y gas de Estados Unidos

contribuyeron al 74% de las emisiones de metano y al 77% de las emisiones de GEI notificadas, encabezados por Hilcorp Energy, Exxon Mobil, Occidental Petroleum y ConocoPhillips¹⁷⁵. Este análisis confirmó que las operaciones de equipos relacionados con la quema en antorcha y el venteo son un factor determinante en la intensidad de las emisiones, ya que los controladores neumáticos representan el 62% de las emisiones de metano notificadas y la quema en antorcha y el venteo de gas representan el 58% del total de emisiones de GEI notificadas en la cuenca de Williston¹⁷⁶.

La reducción de las emisiones fugitivas de metano y contaminantes atmosféricos asociados es también una cuestión de justicia ambiental. Por ejemplo, más de 18 millones de personas en Estados Unidos viven a menos de una milla de pozos y son grupos desproporcionadamente marginados; también se ha constatado que el desempleo cerca de los pozos es de 4 a 12 veces superior a la media nacional¹⁷⁷. Los esfuerzos para el taponamiento y desmantelamiento de los millones de pozos de petróleo y gas abandonados e inactivos reducirían aún más las emisiones al tiempo que crearían puestos de trabajo, incluso en las zonas más afectadas por la transición energética¹⁷⁸.

Para reducir las emisiones de metano del sector del petróleo y el gas, es fundamental actualizar y mejorar el monitoreo de las emisiones de metano para identificar los puntos calientes y los superemisores. Esto es especialmente importante si se tiene en cuenta que es probable que las emisiones de metano de este sector sean significativamente superiores a las estimadas actualmente, sobre todo cuando las estimaciones se basan en métodos de inventario que utilizan factores de emisión¹⁷⁹. Un estudio aéreo de la cuenca del Pérmico, en Nuevo México, estimó emisiones 6,5 veces superiores a las de un inventario basado en factores de emisión¹⁸⁰. Nuevos datos obtenidos por satélite revelaron una cantidad significativa de fugas de metano procedentes de las mayores minas de carbón de Australia, lo que hace temer una “gran subestimación en la información facilitada sobre las emisiones de metano en el inventario nacional”¹⁸¹. Los satélites también han observado más de 1.800 “ultraemisores” entre 2019 y 2020, principalmente asociados con el sector de producción de petróleo y gas, con una contribución total de emisiones equivalente al 8 al 12% (alrededor de 8 millones de toneladas métricas de metano por año) de las emisiones mundiales de metano de producción de petróleo y gas¹⁸². Teniendo en cuenta las observaciones por satélite y las intensidades de las emisiones a escala, la AIE calcula que las emisiones del sector energético fueron un 70% superiores a las comunicadas oficialmente¹⁸³. Investigadores del Rocky Mountain Institute (RMI, por sus siglas en inglés), la Universidad de Stanford, la Universidad de Calgary y Koomey Analytics desarrollaron la herramienta *Oil and Climate Index Plus* (OCI+) que determinó que los yacimientos de petróleo y gas más perjudiciales para el clima se encontraban en el yacimiento ruso de Astrakhanskoye, en la cuenca sur del Caspio de Turkmenistán y en la cuenca estadounidense de Permian, en Texas¹⁸⁴. Las actividades de monitoreo del metano se tratan con más detalle en la **Sección 8**.

Además de las reducciones en el sector del petróleo y el gas, las medidas para reducir las emisiones de la minería de carbón pueden proporcionar una mitigación de 12-25 MtCH₄/año¹⁸⁵. La AIE calcula que la eliminación del cuartil de minas de carbón en funcionamiento con peores resultados eliminaría unas 25 MtCH₄¹⁸⁶. Los principales métodos para reducir las emisiones de las minas de carbón subterráneas activas son la oxidación del metano del aire de ventilación y la recuperación y utilización del metano mediante la desgasificación previa a la explotación¹⁸⁷. Aunque el metano puede recuperarse antes de que comiencen las operaciones mineras, el metano expulsado de las minas (metano del aire de ventilación) es diluido y, por lo tanto, más caro de utilizar¹⁸⁸. Además, dado que las minas abandonadas siguen filtrando metano, la CCAC recomienda la inundación de las minas de carbón abandonadas para eliminar estas emisiones¹⁸⁹. En algunas situaciones, el metano de las minas abandonadas puede recuperarse y utilizarse antes de que se produzca la inundación¹⁹⁰.

La reducción de las emisiones de metano procedentes del sector de la producción de energía tiene importantes beneficios climáticos y económicos. La transición a las energías renovables y el tratamiento del metano procedente de instalaciones de combustibles fósiles abandonadas¹⁹¹ son esenciales para reducir las emisiones de metano en las próximas décadas¹⁹².

B. Sector de la agricultura

El sector agrícola puede proporcionar una mitigación de 4-42 MtCH₄/año procedentes del subsector ganadero y de 6-9 MtCH₄/año procedentes del cultivo del arroz¹⁹³. Las medidas para reducir las emisiones del ganado comprenden mejorar la alimentación y la gestión del estiércol en las granjas y reducir el metano generado por unidad de productividad animal, al tiempo que se reduce el número de cabezas de ganado (**Cuadro 3**). Se están desarrollando planes de cría y nuevas tecnologías, incluidos aditivos para piensos y estiércol, para mejorar la salud y la productividad del ganado, gestionar la fermentación entérica y reducir las emisiones procedentes del estiércol¹⁹⁴. El éxito de estas estrategias debe considerarse tanto en términos de reducción del metano como de los impactos medioambientales relacionados con el uso de la tierra y los fertilizantes para piensos y las emisiones asociadas¹⁹⁵, así como de los posibles incentivos perversos hacia la consolidación e industrialización continua de los sectores cárnico y lácteo¹⁹⁶.

Dos aditivos alimentarios prometedores que han demostrado reducir las emisiones entéricas de metano son las algas marinas, concretamente un tipo de alga roja (*Asparagopsis taxiformis*), y el inhibidor de metano 3-nitrooxipropanol (3-NOP, comercializado como Bovaer®). Además, se ha demostrado que algunos inoculantes bacterianos diseñados para mejorar el crecimiento y el rendimiento de las plantas disminuyen la producción de metano cuando se utilizan en el ensilado del ganado, y se están realizando estudios adicionales para verificar este efecto¹⁹⁷. Los científicos siguen comprobando que la inclusión de algas marinas en la dieta del ganado puede reducir significativamente las emisiones de metano¹⁹⁸. En mayo de 2022, el Departamento de Alimentos y Agricultura de California aprobó el uso comercial del aditivo de algas marinas Brominata, de Blue Ocean Barns, como ayuda digestiva para el ganado lechero¹⁹⁹. Esta fue la primera vez que un organismo regulador de Estados Unidos aprobaba el uso de algas marinas para la digestión del ganado. Los aditivos de algas se enfrentan a problemas de escala, ya que la *Asparagopsis* aún no se ha cultivado en laboratorio; sin embargo, los esfuerzos de empresas, como Rumin8, están avanzando en el aislamiento de los compuestos bioactivos que suprimen la metanogénesis en el ganado²⁰⁰. En septiembre de 2021, Brasil y Chile concedieron la autorización de comercialización a Bovaer® para su uso en rumiantes²⁰¹. Tras la aprobación en febrero de 2022, se espera que el aditivo para piensos Bovaer® salga al mercado en la Unión Europea en el transcurso de ese año, con programas piloto a gran escala previstos²⁰². Un estudio de 2021 dirigido por Princeton y Cornell recomienda realizar estudios plurianuales sobre Bovaer® y las algas rojas para observar los efectos sostenidos, incluidos los efectos potencialmente negativos para el ganado y la salud humana (es decir, las concentraciones de bromoformo en las algas rojas), la eficiencia y los flujos de producción de los aditivos²⁰³. A pesar de ello, los productos de ganado alimentado con algas rojas ya se venden en los supermercados suecos²⁰⁴.

Los aditivos para el estiércol, como el biocarbón (carbono negro producido a partir de la pirólisis de biomasa), los ácidos, la paja o la tecnología SOP basada en sulfato cálcico dihidratado (yeso) pueden reducir las emisiones de metano y otros contaminantes como el amoníaco²⁰⁵. Las emisiones de estiércol también pueden abordarse mediante la digestión anaeróbica —una tecnología que convierte los residuos orgánicos en biogás y digestato rico en nutrientes que puede utilizarse para la aplicación

de fertilizantes²⁰⁶— y opciones de gestión alternativas (es decir, la separación de los lodos en componentes sólidos y líquidos, y la retirada rápida del estiércol de los establos), pero deben evaluarse en función de las características de la explotación²⁰⁷. La promoción de productos de biogás de digestión anaeróbica debe evaluarse en función de las preocupaciones en materia de justicia climática y medioambiental, que implican un posible aumento de los olores y la contaminación, así como su relación con la ampliación de las infraestructuras de combustibles fósiles²⁰⁸. Además, las instalaciones de producción de biogás tienden a tener altos índices de pérdida de metano debido a un diseño, gestión y mantenimiento deficientes, según un estudio reciente²⁰⁹. Otra preocupación que suscita la aplicación de estas medidas a través de regulaciones es que puedan producirse “fugas” de emisiones de metano en regiones vecinas donde las restricciones a las operaciones ganaderas puedan ser menos estrictas (por ejemplo, en escenarios en los que los rebaños de California se trasladen a otros estados con normativas lácteas más laxas)²¹⁰.

Reducir la intensidad de metano por unidad de productividad del ganado puede limitar las emisiones de metano al requerir menos ganado para producir la misma cantidad de leche o carne²¹¹. La mejora de la digestibilidad de los piensos, la gestión del pastoreo, las estrategias de cría y los sistemas forrajeros pueden aumentar la eficiencia de los animales²¹². Al mejorar la digestibilidad de los piensos reduciendo la lignina, las vacas pueden consumir más pienso y producir más leche/carne, reduciendo las emisiones de metano por producto²¹³. La cría y selección de genes que aumenten la productividad y reduzcan las emisiones es otra estrategia que los ganaderos pueden adaptar a sus necesidades²¹⁴. Esta investigación tiene un enfoque limitado y es cada vez más selectiva. En Japón actualmente se estudia el ganado negro para determinar las características metabólicas que producen metano y cómo suprimirlo en esta raza concreta²¹⁵. Garantizar niveles elevados de salud animal reduce la necesidad de sustituir animales enfermos y poco productivos (lo que disminuye la intensidad de las emisiones de metano)²¹⁶ y, en algunos casos, reduce directamente las emisiones de metano²¹⁷. Estas soluciones podrían tener repercusiones significativas para los países de África y los países en desarrollo con menor productividad ganadera²¹⁸.

Disminuir el número de cabezas de ganado es otra estrategia para reducir el metano, especialmente cuando aumenta la productividad²¹⁹. Un cambio hacia un menor consumo de carne, especialmente en regiones con un consumo de carne superior a la media, es un ejemplo de cambio de comportamiento que reduciría las emisiones de metano procedentes del ganado al disminuir el número de cabezas y las emisiones asociadas al uso de la tierra, junto con beneficios colaterales para la salud²²⁰.

Los investigadores también están estudiando otras estrategias innovadoras, como una vacuna antimetano para el ganado²²¹. Sin embargo, hasta la fecha las vacunas sólo han demostrado efectos a corto plazo, y podría llevar décadas desarrollar vacunas más permanentes que mitiguen el metano²²².

Cuadro 3. Principales tecnologías emergentes de mitigación para el metano procedente del ganado, su aplicabilidad y principales limitaciones en los distintos sistemas, reducción relativa de emisiones, impacto en el desempeño animal, potencial de mitigación global estimado, incluidas las limitaciones para su adopción, y calendario y nivel de confianza en su disponibilidad comercial

Tecnología	Aplicabilidad	Limitación Principal	Reducción Relativa de Emisiones [†]	Impacto en el desempeño animal	Potencial de Mitigación en 2050 [‡]	Disponibilidad Comercial General [§]
Modificación del Rumen						
Inhibidores de CH ₄ ^{a,b}		costo, aprobación regulatoria	30%	Efecto nulo/limitado ^b	0,8	2025 (<i>alta</i>)
		costo	20–30%		5–8	2030 (<i>media</i>)
Vacuna para el CH ₄ ^a		“Investigación y Desarrollo sostenidos, servicios veterinarios, costo” ^b	30% (asumido) ^a	--	11–28	2050 (<i>media</i>)
Sumidero de electrones de nitrato ^b		Efecto sobre las emisiones de óxido nítrico entérico y del estiércol, costo, posibles efectos negativos sobre la salud animal	15%	Efecto neutro: menor ingesta & mayor rendimiento lácteo	No evaluado	--
Algas marinas ^a		“Producción a escala mundial, costo, toxicología, regulación y aceptación en el mercado” ^a	20–50%	desconocido ^b	0,5–1	2030 (<i>pruebas insuficientes para determinar el nivel de confianza</i>)
					1–10	
Formulación de la Dieta						
Forrajes tánicos ^b		Efecto sobre el CH ₄ del estiércol, disminución de la palatabilidad y del consumo de pienso	10%	Efecto nulo/limitado ^b	No evaluado	--
Inclusión de aceites/semillas oleaginosas y grasas ^b		Efecto sobre el CH ₄ del estiércol, costo, efecto sobre las emisiones anteriores	14–15%	Efecto negativo (altos niveles de inclusión) ^b	No evaluado	--
Disminución de la relación forraje-concentrado en la dieta ^b		Riesgo de enfermedades, competencia entre pienso y alimento	9% (intensidad)	Efecto positivo: mayor aumento de peso & rendimiento lácteo ^b	No evaluado	--
Gestión de Animales y Piensos						
Aumento del nivel de alimentación ^b		Efecto sobre el CH ₄ del estiércol	17% (intensidad)	Efecto positivo: mayor aumento de peso & digestibilidad ^b	No evaluado	--
Disminución de la madurez de la hierba ^b		Efecto sobre el N ₂ O del estiércol	13% (intensidad)	Efecto positivo: aumento del rendimiento lácteo & digestibilidad ^b	No evaluado	--
Cría con bajas emisiones ^b		Programa de cría	1% anual, 15% máximo	Efecto positivo limitado ^b	2–9	Ovino: 2030 (<i>alta</i>) Vacuno: 2035 (<i>media</i>)



Sistemas Feedlot y Mixtos



Sistemas de Pastoreo

* sistemas de pastoreo
intensivo^a† absoluto salvo indicación
contraria‡ en Mt CH₄ año⁻¹
§ nivel de confianza

Adaptado de ^a Reisinger A., Clark H., Cowie A. L., Emmet-Booth J., Gonzalez Fischer C., Herrero M., Howden M. y Leahy S. (2021) *How necessary and feasible are reductions of methane emissions from livestock to support stringent temperature goals?*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 20200452; y

^b Arndt C., y otros (2022) *Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5 °C target by 2030 but not 2050*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 119(20): e2111294119. La reducción relativa de emisiones se evalúan como CH₄ por unidad de ingesta de materia seca del pienso, g kg⁻¹.

En el caso de los arrozales, la mejora de la gestión del agua, la alternancia entre inundación y drenaje del arroz de humedal, la siembra directa y la mejora del rendimiento pueden reducir mucho las emisiones²²³. La principal estrategia de mitigación consiste en reducir el tiempo de inundación de los campos²²⁴, pero hay que tener en cuenta el aumento de las emisiones de óxido nitroso (N₂O)—otro potente gas de efecto invernadero—²²⁵. Los expertos estiman que la alternancia entre el humedecimiento y el secado de los campos (frente a la inundación continua durante la temporada de cultivo) podría reducir las emisiones de metano hasta en un 48%²²⁶. El aumento del rendimiento puede mejorarse mediante la mejora genética de los cultivos (para seleccionar las especies más productivas) y las modificaciones del biocarbón²²⁷, así como la mecanización de lo que de otro modo sería un trabajo manual²²⁸. Searchinger y otros (2021) estiman que por cada 1% de aumento en el rendimiento del arroz, las emisiones de metano se reducen en un 1%²²⁹. Además de ofrecer mitigación del metano, el cultivo selectivo de arroz también puede brindar beneficios adaptativos, como el aumento de la productividad en zonas que se enfrentarán a peores condiciones de sequía en un clima cambiante²³⁰. Algunas estrategias descritas anteriormente pueden ser elegibles para recibir beneficios a través de programas regulatorios establecidos, como el Protocolo de Compensación de Cumplimiento de la Junta de Recursos del Aire de California²³¹.

Una amplia variedad de investigaciones innovadoras busca reducir las emisiones de metano del sector agrícola. Ejemplos exitosos de investigación en pequeños ensayos o basados en las enseñanzas Indígenas²³² que pueden reducir las emisiones de metano son, entre otros: la agricultura regenerativa (por ejemplo, silvopastura, agroecología²³³ y pastoreo solar²³⁴); aplicación de escarabajos peloteros²³⁵ o lombrices (vermifiltración)²³⁶ al estiércol vacuno; uso de levadura de cerveza para suprimir el metano entérico al tiempo que se promueve el crecimiento animal²³⁷; modificación genética de la levadura para inhibir la actividad metanogénica en el rumen²³⁸; el uso de Crispr, o tecnología de edición genética, para cultivar microbios del suelo en laboratorios con el fin de comprender mejor las interacciones del suelo que producen metano en los arrozales²³⁹; el uso del metano capturado como alimento para peces²⁴⁰; el uso de electricidad para convertir los residuos ganaderos en abono²⁴¹ y la introducción de determinados aditivos y procesos en las lagunas de tratamiento del estiércol²⁴². Estas soluciones, excluyendo las que tienen su origen en prácticas Indígenas, están aún en pañales y todavía no se han evaluado formalmente. No obstante, se trata de posibilidades interesantes para el futuro de la reducción del metano en la agricultura.

Como se describe en la **Sección 8** sobre sistemas de monitoreo (incluida la integración de satélites y datos), la mejora de los sistemas de monitoreo de los sectores agrícolas será fundamental para evaluar el impacto de estos métodos innovadores. Por ejemplo, las emisiones de metano procedentes del ganado se han observado por primera vez en el valle californiano de San Joaquín a través de GHGSat²⁴³. Además, los algoritmos de aprendizaje automático son cada vez más rápidos a la hora de

estimar las emisiones de GEI (incluido el N₂O, que hasta ahora era difícil de cuantificar) a partir de interacciones complejas en el suelo²⁴⁴. Seguir mejorando los sistemas de observación del metano, especialmente en sectores difíciles de cuantificar como la agricultura, será esencial en los esfuerzos de monitoreo una vez que se hayan implementado estas soluciones. Véanse, en la **Sección 8**, ejemplos de herramientas de observación aérea, lanzadas o a punto de lanzarse, que pueden ser especialmente pertinentes para monitorear el metano procedente de la agricultura.

C. Sector de los residuos

El sector de los residuos puede proporcionar una mitigación de 29-36 MtCH₄/año²⁴⁵. La mitigación de los residuos sólidos constituye la mayor parte del potencial de reducción de este sector²⁴⁶. Los operadores de vertederos pueden capturar y convertir en energía el metano emitido por los vertederos existentes²⁴⁷. La recolección del gas de vertedero requiere la construcción de equipos costosos (pozos de extracción y tuberías en el interior del vertedero)²⁴⁸ y un funcionamiento continuado; sin embargo, la producción de un producto de biogás apto para el uso energético reporta beneficios económicos²⁴⁹. En su caso, McKinsey estima que la máxima oportunidad técnica para la inclusión de tecnología de captura puede conducir a una reducción de 4,50Mt CH₄/año en 2030²⁵⁰. Como alternativa a la combustión, la cual puede contribuir a la contaminación atmosférica, el gas de vertedero puede generar electricidad mediante pilas de combustible²⁵¹. Además, están surgiendo mejoras en la captura del gas metano de los vertederos para optimizar dicha captura minimizando las necesidades de infraestructuras y la frecuente intervención humana²⁵². Esta tecnología debe evaluarse en función de cada vertedero, ya que las necesidades de infraestructura pueden hacer que el desarrollo de la captura de gas de vertedero sea más costoso.

Los alimentos desechados y otros residuos orgánicos liberan metano al descomponerse en los vertederos en condiciones de poco oxígeno (anaeróbicas). La desviación de residuos orgánicos de los vertederos puede reducir significativamente las emisiones de metano²⁵³. Los programas para reducir el desperdicio de alimentos pueden disminuir las emisiones de metano tanto del sector de los residuos como del agrícola²⁵⁴. Esto puede incluir la promoción de estrategias para gestionar la exposición al calor extremo y aumentar el acceso a la refrigeración por parte de los productores agrícolas a pequeña escala con el fin de reducir el desperdicio de alimentos debido al adelanto de las cosechas provocado por un clima más cálido²⁵⁵. En el caso de los residuos orgánicos ya presentes en un vertedero, las cubiertas biológicamente activas o biocubiertas, compuestas por residuos verdes/compost, limitan las emisiones de metano estimulando la oxidación microbiana del metano²⁵⁶. Los índices de oxidación del metano varían en función del tipo de vertedero, la ubicación y la composición/espesor de la biocubierta, pero el uso de cubiertas biológicas puede dar resultados impresionantes: los estudios han arrojado mejoras de más del 60%, y en algunos casos de casi el 80%²⁵⁷, en la oxidación del metano²⁵⁸. Las cubiertas biológicas pueden utilizarse en vertederos inactivos como tecnología de control de las emisiones de metano restantes tras el cierre²⁵⁹. Debido a su costo relativamente bajo (en comparación con la recolección de gases de vertedero), a su sencilla aplicabilidad técnica²⁶⁰ y a su posible vida útil de 6-7 años con una disminución limitada de su rendimiento²⁶¹, pueden ser una solución para reducir las emisiones de metano en vertederos explotados en países de ingresos bajos con una capacidad de gestión limitada²⁶². Las cubiertas biológicas también han demostrado su eficacia en jurisdicciones desarrolladas, como Dinamarca, donde se emplea simultáneamente la tecnología de captura de gases de vertedero para optimizar la reducción de metano²⁶³. También se ha comprobado que las medidas de mitigación de olores están relacionadas con la reducción de las emisiones de metano²⁶⁴. Si se combinan con una mejor gestión de los vertederos, estas medidas podrían reducir las emisiones de los vertederos de Estados Unidos en un 50% para 2030²⁶⁵.

La teledetección aérea es una opción probada para el monitoreo del metano en vertederos que tiene más probabilidades de cuantificar con precisión las emisiones que son difíciles de captar en los modelos tradicionales. En particular, la teledetección aérea es más flexible con respecto a los cambios de infraestructura de los vertederos y puede identificar tendencias importantes en las emisiones que podrían conducir a nuevas estrategias de mitigación²⁶⁶. Datos recientes obtenidos por satélite han revelado que las emisiones de los vertederos de Buenos Aires, Delhi, Lahore y Mumbai han sido subestimados en los cálculos habituales de los inventarios de emisiones²⁶⁷. Las estimaciones y el monitoreo de las emisiones de metano de los vertederos también podrían mejorarse al incorporar los factores específicos a cada sitio y las cualidades de la cubierta del suelo en las estimaciones de los modelos²⁶⁸.

En el caso de las aguas residuales, McKinsey calcula que las medidas de mitigación podrían reducir las emisiones en un 27% para 2030 y en un 77% para 2050²⁶⁹. Los métodos para lograr esta reducción de las emisiones incluyen la mejora del tratamiento de las aguas residuales mediante la modernización de los procesos, las infraestructuras y la tecnología²⁷⁰.

5. Fuentes naturales de metano e investigaciones emergentes sobre la eliminación del metano atmosférico y la prevención de su formación

Las fuentes naturales de metano representan aproximadamente el 40% (35-50%) de las emisiones e incluyen los humedales y otros sistemas de agua dulce, el deshielo del permafrost, las filtraciones geológicas, los animales salvajes y las fuentes oceánicas, incluidos los hidratos de metano del fondo marino²⁷¹. Se prevé que algunas de estas fuentes naturales aumenten y actúen como retroalimentadores autorreforzantes del calentamiento provocado por el hombre. Mientras que la retroalimentación del metano del permafrost está bien establecida, aunque mal delimitada²⁷², se han sugerido nuevas retroalimentaciones para explicar la reciente aceleración de la concentración atmosférica de metano. Se trata de una combinación de retroalimentaciones positivas reforzadas debidas a las interacciones entre la temperatura de la superficie, las emisiones de los humedales y los incendios forestales, así como a la reducción de la eliminación de metano a través de retroalimentaciones negativas de radicales hidroxilos²⁷³. Además, según estudios recientes, las fuentes de los humedales tropicales podrían explicar más del 80% del rápido aumento de las concentraciones atmosféricas de metano entre 2010 y 2019, lo que podría ser el resultado de una retroalimentación entre el calentamiento y la fuerza del dipolo del Océano Índico y las precipitaciones sobre África Oriental²⁷⁴. Sin embargo, el informe del Grupo de Trabajo I del IPCC (IE6 del WGI) otorga un *nivel de confianza bajo* a la tendencia multidecadal del dipolo del Océano Índico debido a la escasez de datos anteriores a la década de 1960²⁷⁵.

Otra preocupación es el riesgo de que el calentamiento de las aguas oceánicas desestabilice los hidratos de metano del fondo marino. Tal desestabilización se produjo probablemente en la costa de Guinea hace 125.000 años, durante el anterior período interglacial, y los registros de los núcleos de hielo sugieren que se liberó a la atmósfera una cantidad suficiente de metano como para afectar a las concentraciones de CO₂ y CH₄²⁷⁶. Con un Ártico que se calienta rápidamente, el lecho marino poco profundo de la plataforma ártica de Siberia Oriental plantea importantes preocupaciones debido a su potencial para acelerar otros impactos del calentamiento global²⁷⁷. La liberación de hidratos de metano terrestres a medida que los glaciares retroceden podría amplificar aún más la retroalimentación del permafrost²⁷⁸.

Se está investigando cuál es el mejor enfoque para eliminar el metano atmosférico²⁷⁹. Esta estrategia podría ser vital para combatir el metano procedente de fuentes naturales²⁸⁰. Estas fuentes incluyen el

calentamiento de los humedales tropicales y árticos y las turberas que parecen estar emitiendo más metano como parte de una retroalimentación que se refuerza a sí misma entre el clima y el ciclo del carbono²⁸¹. El IE6 del WGI estima que la liberación de metano procedente del deshielo del permafrost podría alcanzar los 4.100 millones de toneladas hasta 2.100 con los compromisos climáticos actuales²⁸².

Un estudio de modelización dirigido por la Universidad de Stanford calcula que la eliminación de las emisiones de metano causadas por el hombre en unos tres años reduciría el calentamiento en 0,21 °C²⁸³. Dos posibles categorías de estrategias de eliminación de metano son la oxidación catalítica²⁸⁴ y la oxidación microbiana mejorada²⁸⁵.

Se están explorando muchas estrategias y tecnologías dentro de cada categoría. Recientemente, un grupo de investigación del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT, por sus siglas en inglés) identificó un material arcilloso capaz de oxidar los niveles atmosféricos de metano a temperaturas relativamente bajas²⁸⁶. Otro ejemplo son los aerosoles de sales de hierro que se han propuesto como un mecanismo rentable para oxidar el metano atmosférico²⁸⁷. Se han realizado experimentos con filtros que contienen microbios comedores de metano para procesar metano relativamente concentrado, como el que se encuentra en las minas de carbón y sobre los vertederos y las lagunas de estiércol²⁸⁸.

Las alternativas a la eliminación del metano pueden incluir medidas para evitar su formación natural. Estudios preliminares sugieren que el uso de aditivos como el biocarbón (carbono negro producido a partir de la pirólisis de biomasa), ácidos, paja o tecnología basada en sulfato cálcico dihidratado (yeso) podría reducir las emisiones de metano procedentes de lagunas de estiércol, arrozales y otras fuentes antropogénicas de metano²⁸⁹. Podrían aplicarse métodos similares a fuentes naturales y seminaturales, como humedales y embalses.

Para más información, véase Institute for Governance & Sustainable Development (2022) [METHANE REMOVAL: R&D needed for removing methane from the atmosphere](#), Nota Informativa.

6. Los principales países emisores están aplicando y deben reforzar las medidas de mitigación del metano

Los gobiernos nacionales y subnacionales están desarrollando y aplicando cada vez más políticas e iniciativas de mitigación del metano. Sin embargo, estas medidas deben ampliarse y reforzarse para lograr las reducciones de metano necesarias a corto plazo²⁹⁰. Los gobiernos pueden reforzar las políticas de mitigación del metano aplicando al máximo las tecnologías, leyes y estructuras de gobernanza ya disponibles y estudiando formas de ampliar la mitigación del metano a través de otras vías disponibles. La AIE ha elaborado una Hoja de ruta y un Paquete de Herramientas Regulatorias para la Reducción de las Fugas de Metano en la Industria del Petróleo y el Gas²⁹¹. La [base de datos de políticas de la IEA](#) incluye las políticas de reducción de metano de sus países miembros en todo el mundo. A continuación se describen ejemplos de medidas específicas de mitigación del metano en Estados Unidos, la Unión Europea, Canadá, México, India, China, Brasil e Irak. También cabe destacar la finalización de las regulaciones de Colombia en febrero de 2022, que la convierte en el primer país de Sudamérica en regular las emisiones procedentes del petróleo y el gas²⁹².

A. Estados Unidos

Estados Unidos se fijó el objetivo de alcanzar emisiones netas de gases de efecto invernadero iguales a cero a más tardar en 2050, con un objetivo intermedio de alcanzar, en 2030, una reducción del 50-52% respecto a los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero de 2005²⁹³. En noviembre de 2021, la Casa Blanca publicó el *Plan de Reducción de Emisiones de Metano de Estados Unidos*, una iniciativa de todo el gobierno y un modelo para adoptar un enfoque sectorial para reducir las emisiones de metano²⁹⁴. Como parte del Plan, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) propuso una serie de regulaciones en virtud de la Ley de Aire Limpio para establecer requisitos de control de emisiones más estrictos para las operaciones de gas y petróleo en forma de límites a la fuga y el venteo para las emisiones de metano procedentes de fuentes de petróleo y gas nuevas y existentes²⁹⁵. La EPA calcula que, si se aprueban, las regulaciones reducirán 41 millones de toneladas de metano hasta 2035²⁹⁶. La Oficina de Gestión de Tierras también ha restablecido normas para evitar los residuos procedentes del venteo, la quema en antorcha y las fugas producto de la explotación de petróleo y gas en tierras federales, que se prevé que reduzcan las emisiones de metano en un 35% con respecto a la línea de base de 2014²⁹⁷. Además, el Departamento de Transporte está ultimando normas para reducir las fugas en todo el sistema de gasoductos²⁹⁸. Sin embargo, los informes indican que la administración Biden está aprobando más permisos de perforación en terrenos públicos que las administraciones anteriores²⁹⁹.

El 31 de enero de 2022, la administración Biden anunció los próximos pasos del Plan de Reducción de Emisiones de Metano de Estados Unidos, empezando por la asignación de 1.150 millones de dólares a los Estados para que limpien los pozos de petróleo y gas abandonados³⁰⁰. Los siguientes pasos de este Plan incluyen la aplicación de la Ley de [Protección de Nuestra Infraestructura de Oleoductos y Aumento de la Seguridad](#) (PIPES, por sus siglas en inglés) para garantizar que los operadores de oleoductos minimicen las fugas de metano, haciendo hincapié en los actuales esfuerzos de investigación e inversiones para reducir el metano procedente del ganado, y asignando 11.300 millones de dólares en financiación para la recuperación de tierras de minas abandonadas y 1.000 millones de dólares para la modernización de oleoductos de gas natural. Como parte del Plan, la administración Biden anunció la creación de un grupo interinstitucional para coordinar la medición, monitoreo, notificación y verificación del metano, y convocó un taller para las comunidades del sector de la energía sobre la reutilización de las infraestructuras de combustibles fósiles³⁰¹.

El *Plan de Reducción de Emisiones de Metano de Estados Unidos* también incluye regulaciones y programas para reducir el metano procedente de otras fuentes³⁰². La EPA está aplicando normas y requisitos actualizados de reducción de emisiones para los vertederos municipales de residuos sólidos (originalmente se estimaba que reducirían las emisiones de metano en más de 300.000 toneladas métricas de metano al año)³⁰³. La EPA también está realizando un seguimiento de otros muchos esfuerzos para reducir el metano, incluidos los proyectos de digestores anaeróbicos de ganado y de captura de gases de vertedero³⁰⁴.

En agosto de 2022, el Departamento de Energía de Estados Unidos anunció una financiación de hasta 32 millones de dólares para la investigación y el desarrollo de tecnologías de monitoreo, medición y otras tecnologías de mitigación para detectar y reducir las emisiones de metano en el sector del petróleo y el gas³⁰⁵.

Además, el gobierno federal está gestionando una serie de iniciativas voluntarias que incentivan la reducción de metano y proporcionan apoyo técnico para reducir estas emisiones. Entre ellas se incluyen el *Food Waste Challenge* (Desafío para reducir el desperdicio de alimentos) con el fin de

reducir el desperdicio de alimentos en un 50% para 2030³⁰⁶, el *Landfill Methane Outreach Program* (Programa de divulgación del metano de vertedero) que promueve la captura y el uso del gas de vertedero³⁰⁷, el *Coalbed Methane Outreach Program* (Programa de divulgación del metano en capas de carbón) que promueve el uso del metano de las minas de carbón³⁰⁸ y el Programa *AgStar* que pretende reducir las emisiones de metano de los residuos ganaderos³⁰⁹. El Departamento de Agricultura de Estados Unidos también ha anunciado una financiación de 1.000 millones de dólares en concepto de *Partnerships for Climate-Smart Commodities* (Asociaciones para materias primas climáticamente inteligentes) para fomentar la aplicación de prácticas inteligentes en términos climáticos, incluidas las prácticas que mitigan las emisiones de metano, como la gestión del estiércol, la gestión de los piensos para reducir las emisiones entéricas y el humedecimiento y secado alternativos de los arrozales³¹⁰.

El 2 de diciembre de 2021, la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada–Energía (ARPA-E, por sus siglas en inglés) del Departamento de Energía anunció 12 seleccionados que recibirán un total de 35 millones de dólares en subvenciones para reducir las emisiones de metano de los sectores del petróleo, el gas y el carbón. Estos proyectos incluyen la investigación sobre la reducción de las emisiones de metano de los motores de gas natural, las antorchas de gas y los pozos de las minas de carbón³¹¹. Según la ARPA-E, estas tres fuentes contribuyen a al menos el 10% de las emisiones antropogénicas de metano de Estados Unidos³¹². Al desarrollar el programa REMEDY (Reducción del metano todos los días del año), la ARPA-E reconoció la necesidad de seguir investigando sobre la captura de metano del aire en paralelo a los esfuerzos para capturar CO₂³¹³. En julio de 2022, el presupuesto de ARPA-E se duplicó gracias a la Ley CHIPS y Ciencia³¹⁴.

Como parte de la Ley de Inversión en Infraestructura y Empleos promulgada en noviembre de 2021, el gobierno de Estados Unidos está distribuyendo subvenciones para impulsar la acción climática. El Departamento de Energía distribuirá casi 11.000 millones de dólares en subvenciones para minas abandonadas entre los Estados y tribus elegibles a lo largo de 15 años³¹⁵. Se alienta a los Estados con minas no recuperadas incluidas en la Base de Datos de Oportunidades de Minas de Carbón con Metano de la EPA a dar prioridad a la recuperación de dichas minas, eliminando las emisiones de metano “en la mayor medida posible”³¹⁶. El Departamento de Agricultura también está invirtiendo 10 millones de dólares en un Programa Piloto de Bioproductos para “avanzar en el desarrollo de bioproductos competitivos en términos de costos y con beneficios medioambientales en comparación con los productos tradicionales”³¹⁷, incluidos los productos con menor huella de carbono³¹⁸.

La Ley de Reducción de la Inflación de 2022, aprobada en agosto, destina casi 370.000 millones de dólares de financiación para el clima, incluidos 1.550 millones para controlar y reducir las emisiones de petróleo y gas³¹⁹. La ley incluye un Programa de Reducción de Emisiones de Metano con una tasa de residuos de metano de hasta 1.500 dólares por tonelada de metano para 2026³²⁰, y aumenta las tasas de regalías para el petróleo y el gas extraído de tierras y aguas federales, incluidas las tasas sobre el gas que se pierde de forma evitable por la quema en antorcha o el venteo en casos que no son de emergencia³²¹. La Ley destinará unos 20.000 millones de dólares en los próximos cuatro años a subvenciones para la conservación de la agricultura, que darán prioridad a las cuestiones climáticas, incluida la mitigación del metano³²². Se calcula que esta ley reducirá para 2030 las emisiones de gases de efecto invernadero de Estados Unidos un 40% por debajo de los niveles de 2005³²³.

Mientras tanto, la Ley CHIPS y Ciencia de 2022 también amplió la financiación para la investigación sobre el clima y los sistemas terrestres, incluyendo un Centro de Mediciones, Normas e Información sobre Gases de Efecto Invernadero³²⁴.

Recuadro 4. Los gobiernos subnacionales demuestran su liderazgo en la mitigación del metano

Los estados de Estados Unidos también están trabajando para reducir las emisiones de metano en el sector del petróleo y el gas. California estableció el objetivo legislativo de reducir las emisiones de metano en un 40% para 2030³²⁵. En 2014, Colorado aprobó las primeras regulaciones sobre metano del país, que obliga a las empresas del sector de la energía a reducir las emisiones de metano de las instalaciones de petróleo y gas natural nuevas y existentes. Colorado sigue reforzando sus regulaciones sobre petróleo y gas, prohibiendo las prácticas de rutina de quema y venteo en 2020³²⁶. En la Cumbre de las Américas de junio de 2022, California dio a conocer el Compromiso Climático de California, que incluye una propuesta presupuestaria para sanear pozos petrolíferos inactivos (200 millones de dólares) y lanzar satélites de detección de metano (100 millones de dólares)³²⁷. En 2021, Colorado adoptó normas para reducir las emisiones de metano de los controladores neumáticos³²⁸. Nuevo México hizo lo propio, promulgando normas estrictas para el sector del petróleo y el gas, y prohibiendo también todas las prácticas de rutina de quemaduras y venteo³²⁹. Se espera que una norma más reciente de Nuevo México reduzca aún más las emisiones³³⁰.

Los miembros de la Alianza del Clima de Estados Unidos, que incluye a los gobiernos de 24 Estados y a Puerto Rico, se han propuesto reducir las emisiones de metano en todos los sectores entre un 40 y un 50% para 2030³³¹. Este objetivo incluye la reducción de las emisiones del sector energético en un 40-45% para 2025³³², y del sector de los residuos en un 40-50% para 2030³³³. Los miembros también tienen previsto reducir las emisiones de metano del sector agrícola, incluida la reducción de emisiones de la fermentación entérica en un 30%³³⁴, y hasta un 70% de la gestión del estiércol, para 2030³³⁵. Además, los Estados y municipios han promulgado políticas que prohíben o desvían los residuos orgánicos de los vertederos y pretenden reducir el desperdicio de alimentos³³⁶.

Las instituciones de investigación y de otros ámbitos también están desarrollando herramientas para las jurisdicciones subnacionales, como los marcos de protocolos sectoriales para la reducción de las emisiones de metano, que involucran a los gobiernos en acciones como inventarios, bases de referencia, establecimiento de objetivos, aplicación de políticas e intercambio de información³³⁷.

La Alianza del Clima, la Energía Limpia y el Medio Ambiente de América del Norte creada por Estados Unidos, Canadá y México en 2016 ha acordado reducir las emisiones de metano del sector del petróleo y el gas en un 40-45% para 2025³³⁸. Los socios se comprometieron a desarrollar e implementar regulaciones federales para reducir las emisiones de las nuevas fuentes existentes en el sector del petróleo y el gas, así como a desarrollar e implementar estrategias nacionales de reducción de metano para sectores clave lo antes posible, incluyendo los sectores de gas y petróleo, la agricultura y la gestión de residuos y alimentos³³⁹. Véanse las subsecciones a continuación sobre las medidas de Canadá y México para cumplir con este objetivo. En julio de 2022, Estados Unidos y México se comprometieron juntos a “abordar las emisiones de metano procedentes del petróleo y el gas y de otros sectores”³⁴⁰. Además, Estados Unidos es Parte del Convenio sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia (LRTAP, por sus siglas en inglés), que está examinando los impactos del metano en la formación de ozono, el cual se analiza con más detalle en la **Sección 10**³⁴¹.

En respuesta al impacto de la actual invasión rusa de Ucrania en la energía a nivel mundial, la Casa Blanca acordó ayudar a la transición de la UE para abordar su dependencia del gas ruso, intentando garantizar envíos adicionales de 15 bmc de gas natural licuado (GNL) en 2022, además de “mantener un ambiente regulatorio propicio” con respecto al desarrollo de nuevas capacidades de exportación de gas natural licuado. Sin embargo, también acordó “emprender esfuerzos para reducir la intensidad de gases de efecto invernadero de todas las nuevas infraestructuras de GNL y gasoductos asociados”³⁴². La Comisión Federal Reguladora de la Energía también dio marcha atrás en una nueva

política de evaluación del impacto climático de las emisiones de los gasoductos³⁴³. Esto destaca la importancia de tomar medidas inmediatas para exigir reducciones progresivas de las tasas de emisión de metano procedentes del “gas metano de sustitución” suministrado en respuesta a los cambios en las importaciones de gas metano de los países, teniendo en cuenta los compromisos asumidos en el marco del *Compromiso Mundial sobre el Metano*³⁴⁴.

El 12 de mayo de 2022, los líderes de Estados Unidos y de la Asociación de Naciones del Sudeste Asiático (ASEAN, por sus siglas en inglés) acordaron, en la Cumbre Especial celebrada entre Estados Unidos y ASEAN en Washington, D.C., aumentar su ambición colectiva para, entre otras cosas, reducir las emisiones de metano. La hoja informativa de la Cumbre Especial indica:

“Estados Unidos se ha comprometido a trabajar con las naciones del Sudeste Asiático para reducir las emisiones de metano de la región. Estados Unidos acogió con satisfacción la adhesión de Indonesia, Vietnam, Malasia, Filipinas y Singapur al Compromiso Mundial sobre el Metano en la COP-26, y estamos acelerando la asistencia técnica, los recursos financieros y el desarrollo de proyectos para la mitigación del metano en los países del Compromiso Mundial sobre el Metano, incluso a través de la EPA, la USTDA [Agencia de Comercio y Desarrollo de Estados Unidos], la DFC [Corporación Financiera de Desarrollo] y el EXIM [Banco de Exportación e Importación], así como el recientemente creado Global Methane Hub, un fondo filantrópico que puede apoyar las prioridades de mitigación del metano en la región³⁴⁵”.

Estados Unidos también tiene acuerdos de colaboración con Brasil en materia de energía. El Foro de Energía entre Estados Unidos y Brasil es un mecanismo para que los dos gobiernos intercambien conocimientos técnicos, regulatorios y políticos, incluida la gestión del carbono y el metano³⁴⁶. En agosto de 2022, Estados Unidos y Brasil lanzaron el Diálogo de la Industria de Energía Limpia, un foro bilateral liderado por el sector privado y la industria para promover la energía limpia, incluyendo la eólica marina y el hidrógeno limpio³⁴⁷. En la **Sección 6.G.** también puede encontrarse una descripción de estos avances.

La industria estadounidense del petróleo y el gas ha fundado múltiples iniciativas relacionadas con las emisiones de metano. La *Environmental Partnership* es una asociación de 97 empresas estadounidenses de petróleo y gas natural concebida para mejorar los resultados medioambientales mediante el intercambio de información, incluidas las mejores prácticas en materia de LDAR, quema en antorcha y otras tecnologías³⁴⁸. La *ONE Future Coalition* es una asociación de 50 empresas de gas natural con el objetivo colectivo de reducir las emisiones de metano en toda la cadena de valor del gas natural a un 1% o menos para 2025³⁴⁹. La *Natural Gas Sustainability Initiative*, lanzada por Edison Electric Institute, American Gas Association y otras organizaciones del sector, publicó un protocolo para informar sobre la intensidad de las emisiones de metano³⁵⁰.

En el sector del carbón, la EPA de Estados Unidos documentó 53 proyectos actuales de recuperación de metano de minas de carbón y perfila oportunidades de proyectos en otras minas emisoras de gas³⁵¹. La EPA estimó en 2019 que los proyectos de recuperación en algunas de las minas más gaseosas estaban capturando u oxidando más de 700.000 toneladas de metano al año³⁵². Sin embargo, la producción global de metano de las minas de carbón se ha reducido a la mitad desde 2008, pasando de aproximadamente 57 bmc en 2008 a 23 bmc en 2020³⁵³.

B. Unión Europea

La Unión Europea aborda el metano en sus políticas y trabaja para reforzarlas. La Legislación Europea sobre el Clima incluye un objetivo vinculante para que Europa logre la neutralidad climática

de aquí a 2050, con un objetivo provisional de reducir todas las emisiones de gases de efecto invernadero en un 55% para 2030, con respecto a los niveles de 1990³⁵⁴. La Comisión Europea presentó una estrategia sobre el metano en octubre de 2020 y señaló que el objetivo del 55% requeriría que la Unión Europea redujera las emisiones de metano en un 35-37% para 2030³⁵⁵. Además, la estrategia sobre el metano da prioridad a garantizar un sistema de medición y notificación más preciso de las emisiones del sector privado³⁵⁶.

En julio de 2021, la Comisión Europea adoptó una serie de propuestas, conocidas como el paquete de medidas “Objetivo 55”, que permitirían alcanzar el objetivo de reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en al menos un 55 % de aquí a 2030³⁵⁷. El paquete de medidas “Objetivo 55” aumentaría la ambición de los sectores no cubiertos por el Régimen de Comercio de Derechos de Emisión, como la gestión de residuos, la construcción y la agricultura, incrementando el objetivo global de reducción de emisiones del 30% al 40%³⁵⁸. El paquete también modificaría el Reglamento de la UE sobre el Uso de la Tierra, el Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura para incluir las emisiones distintas del CO₂, incluido el metano, de aquí a 2031³⁵⁹. Más de la mitad de las emisiones nacionales de metano de la Unión Europea se producen en el sector agrícola³⁶⁰, mientras que la mayor parte de las emisiones de metano procedentes del uso de la energía se producen en el exterior³⁶¹. Algunos analistas han llegado a la conclusión de que la Unión Europea no logrará grandes reducciones de las emisiones nacionales de metano sin “políticas que impulsen la adopción de medidas técnicas y de comportamiento en el sector agrícola-ganadero”³⁶².

En diciembre de 2021, la Comisión propuso un reglamento y una directiva³⁶³ basadas en una combinación energética propuesta para 2050 en la que el biogás, el biometano, el hidrógeno renovable e hipocarbónico (véase el **Recuadro 5**) y el metano sintético representarían dos tercios de los combustibles gaseosos, y el resto provendría del gas fósil acompañado de la captura y el almacenamiento de carbono (una reducción del 95% del gas fósil en 2021). La directiva propone limitar la vigencia de los contratos de gas natural a largo plazo más allá de 2049³⁶⁴.

El reglamento propuesto exige a los operadores de petróleo y gas que informen sobre las emisiones de metano a nivel de fuente, incluida la introducción progresiva de mediciones directas y mediciones in situ de los activos no explotados³⁶⁵. El reglamento también exige a los operadores que establezcan programas de detección y reparación de fugas (LDAR, por sus siglas en inglés) y prohíban el venteo y la quema en antorcha rutinarios³⁶⁶. Las inspecciones reglamentarias y la información del Observatorio Internacional de Emisiones de Metano verificarían el cumplimiento de este reglamento³⁶⁷.

Además, los reglamentos propuestos exigirían que los Estados miembros hicieran un inventario público de los pozos de petróleo y gas inactivos. También exigirían que los Estados miembros u otras partes responsables controlasen las emisiones de metano y elaborasen planes de mitigación para la reparación, recuperación y taponamiento permanente³⁶⁸. El reglamento también obligaría a los Estados miembros a elaborar un inventario público de las minas de carbón cerradas y abandonadas, y exigiría a los Estados miembros con jurisdicción sobre las minas abandonadas y a los operadores de minas cerradas que controlen y notifiquen las concentraciones de metano en las minas cerradas o abandonadas en los últimos 50 años³⁶⁹. Además, el reglamento propuesto exige planes de mitigación y prohíbe el venteo y la quema en antorcha innecesarios³⁷⁰.

El reglamento propuesto también especifica que las minas de carbón subterráneas y las estaciones de drenaje realicen mediciones continuas de las emisiones, mientras que las minas de superficie deberán emplear factores de emisión específicos del yacimiento para cuantificar las emisiones³⁷¹. Las minas subterráneas y de superficie calculan las emisiones posteriores a la extracción basándose en los

factores pertinentes y notifican todas las emisiones a los organismos reguladores³⁷². A las minas subterráneas se les prohibiría el venteo y la quema en antorcha rutinarios y se les exigiría que informaran de los casos de quema en antorcha³⁷³.

Asimismo, el reglamento propuesto no incluía objetivos de reducción específicos y vinculantes³⁷⁴. La Unión Europea había considerado la posibilidad de establecer requisitos de intensidad de metano para el gas importado³⁷⁵, pero tales requisitos aún no figuran en ninguna propuesta oficial. En su lugar, la Unión Europea reiteró un llamamiento a la transparencia y remitió el asunto a la Agencia de Cooperación de los Reguladores de la Energía y al Comité de Responsables Europeos de Reglamentación de Valores³⁷⁶. El reglamento propuesto requeriría que los importadores de la UE presenten información adicional sobre los esfuerzos de mitigación de metano de los exportadores y productores, y establezcan una Base de Datos de Transparencia sobre el Metano y una herramienta de seguimiento mundial del metano³⁷⁷. En 2019, la Unión Europea importó casi el 90% de su gas natural, principalmente de Rusia³⁷⁸. Un reglamento de julio de 2022 permitió, polémicamente, la certificación, en circunstancias limitadas, de parte del gas natural bajo la taxonomía de inversión sostenible de la UE³⁷⁹.

La Directiva de Vertederos de la UE obliga a los Estados miembros a separar los residuos biodegradables y establece el objetivo de verter solo el 10 % de los residuos sólidos municipales para 2035³⁸⁰. Los requisitos para que se desvíen los residuos orgánicos ayudaron a lograr un descenso del 47% en las emisiones de los vertederos de la UE entre 1990 y 2017³⁸¹.

Además, la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE) está estudiando el papel del metano como precursor de la formación de ozono en la región de la CEPE como parte de su trabajo en el marco del LRTAP³⁸². La región de la CEPE incluye a toda Europa, así como a países de Norteamérica, Asia Central y Asia Occidental. Para más información, véase la **Sección 10**.

Antes de la invasión rusa de Ucrania en febrero de 2022, la Unión Europea importaba de Rusia más del 40% de su consumo total de gas³⁸³. La Unión Europea ha respondido a esta cambiante situación geopolítica anunciando la aceleración de su transición para dejar de utilizar la energía fósil³⁸⁴. El 23 de marzo de 2022, la Comisión Europea presentó una propuesta legislativa para aumentar sus niveles de almacenamiento de gas en un 80% para noviembre de 2022³⁸⁵. Además, emitió un comunicado en el que declaraba sus planes para formar un Grupo de Trabajo sobre Compras Comunes de Gas que “preparará el terreno para asociaciones energéticas con proveedores clave de GNL, gas e hidrógeno en el Mediterráneo, África, Oriente Medio y Estados Unidos”³⁸⁶. El 25 de marzo de 2022, la Casa Blanca y la Comisión Europea sobre Seguridad Energética Europea anunciaron que garantizarían procedimientos regulatorios expeditivos para las infraestructuras de GNL, pero también hicieron hincapié en sus esfuerzos por reducir la intensidad de las emisiones de dichas infraestructuras³⁸⁷. En particular, el 8 de mayo de 2022, el G7 se comprometió a “eliminar gradualmente nuestra dependencia de la energía rusa, incluida la eliminación progresiva o la prohibición de la importación de petróleo ruso”, pero no mencionó específicamente el gas³⁸⁸.

La Comunicación Conjunta sobre el Compromiso Energético Exterior de la UE, publicada el 18 de mayo de 2022, expone los esfuerzos actuales y los planes futuros de la región para diversificar su suministro energético. Esto incluye asociaciones para aumentar las importaciones de gas natural licuado de otros países, como Egipto, Israel, Japón y Corea³⁸⁹, y un compromiso para “garantizar que los suministros adicionales de gas procedentes de los proveedores de gas existentes y nuevos se combinen con medidas específicas para solucionar las fugas de metano, el venteo y la combustión en antorcha”³⁹⁰. Desde entonces, la Unión Europea ha firmado memorandos de entendimiento sobre cooperación

energética con Israel, Egipto y Azerbaiyán, destinados a “permitir un suministro estable de gas natural a la UE que sea coherente con los objetivos de descarbonización a largo plazo y se base en el principio de fijación de precios orientada al mercado”³⁹¹. La Unión Europea no especifica ninguna intención de promulgar reglamentos para controlar las emisiones de metano procedentes de las importaciones de energía, pero aumentará el apoyo para desarrollar un mercado mundial del hidrógeno, empezando por asociaciones con “con países socios fiables para garantizar unas relaciones comerciales y de inversión abiertas y no distorsionadas en el ámbito de los combustibles renovables y con bajas emisiones de carbono”³⁹². Además, dará prioridad al ahorro y la eficiencia energéticos, con el objetivo de lograr una reducción del 5 % de la demanda de petróleo y gas a corto plazo³⁹³.

Recuadro 5. Riesgos y beneficios climáticos limitados del cambio al hidrógeno

El hidrógeno se propone como alternativa energética limpia, especialmente para sectores difíciles de descarbonizar como la industria pesada, el transporte marítimo y la aviación. Los beneficios climáticos del hidrógeno como sustituto de los combustibles fósiles dependen de varios factores: 1) la fuente de la energía utilizada para generar el hidrógeno y sus emisiones y el grado de captura de carbono en el caso del “hidrógeno azul”; 2) la tasa de fuga de metano si se utiliza como fuente de hidrógeno o fuente de energía, con tasas de fuga de metano incluso bajas, del 1,54%, que dan lugar a emisiones de GEI más altas que la quema de gas natural para obtener energía³⁹⁴; y 3) la tasa de fuga del propio hidrógeno, que puede contribuir al calentamiento al prolongar la vida útil del metano y otros GEI. Las estimaciones preliminares sugieren que una tasa de fuga de hidrógeno del 10% en un escenario de alto despliegue podría causar al menos 0,1°C de calentamiento, lo que podría compensar el calentamiento evitado en 2050 por el despliegue de todas las opciones de mitigación del metano rentables actualmente a nivel mundial³⁹⁵. Una fuga elevada de hidrógeno combinada con crecientes emisiones de metano podrían añadir hasta 0,4 °C de calentamiento³⁹⁶.

C. Canadá

Canadá se comprometió a reducir las emisiones en un 40-45% por debajo de los niveles de 2005 para 2030, incluida una reducción del 40-45% de las emisiones de metano procedentes del sector del petróleo y el gas, y alcanzar las emisiones netas cero para 2050³⁹⁷. Como parte de su participación en el *Compromiso Mundial sobre el Metano*, Canadá pretende reducir las emisiones de metano procedentes del petróleo y el gas en un 75%³⁹⁸. Las regulaciones canadienses vigentes abarcan las instalaciones de petróleo y gas nuevas y existentes, e incluyen requisitos más estrictos de detección y reparación de fugas y, cuando se apliquen plenamente, límites cuantitativos al venteo de gas natural³⁹⁹. El gobierno anunció en abril que tenía previsto publicar nuevas directivas sobre los proyectos de petróleo y gas⁴⁰⁰.

En cuanto a los vertederos, Canadá se comprometió a aumentar el número de vertederos que recolecten y capturen eficazmente el metano⁴⁰¹. El gobierno federal de Canadá trabaja con los gobiernos provinciales y locales para concientizar sobre los residuos alimentarios y las opciones de eliminación con el objetivo de reducir la cantidad de residuos orgánicos que se depositan en vertederos⁴⁰². A su vez, los gobiernos locales y provinciales desarrollaron objetivos⁴⁰³, planes⁴⁰⁴ e incentivos fiscales⁴⁰⁵ para reducir el desperdicio de alimentos.

Además, el gobierno federal está poniendo en marcha programas para incentivar la agricultura climáticamente inteligente y la reducción de las emisiones de GEI del sector agrícola. El programa

de Soluciones Climáticas Agrícolas invierte en soluciones climáticas naturales, como el aumento del almacenamiento de carbono en las granjas⁴⁰⁶. El Programa de Tecnología Agrícola Limpia apoya las reducciones de metano en el sector agrícola invirtiendo en energía verde y tecnologías que utilicen el estiércol y otros residuos como fuente de energía⁴⁰⁷.

En febrero de 2021, Canadá y Estados Unidos declararon un “compromiso compartido para reducir las emisiones de metano procedentes del petróleo y del gas con el fin de proteger la salud pública y el medio ambiente, guiado por los mejores conocimientos científicos”⁴⁰⁸. Además, Canadá es Parte del Convenio LRTAP, que está examinando los impactos del metano en la formación de ozono, como se explica con más detalle en la **Sección 10**⁴⁰⁹.

D. México

Además de los objetivos relativos al metano derivados de la Alianza del Clima, Energía Limpia y Medio Ambiente de América del Norte conformada en 2016, México publicó una normativa integral para la reducción de las emisiones de metano en el sector del petróleo y el gas que reconoce el potencial de reducir las emisiones de este sector hasta en un 75% para 2025⁴¹⁰. Estas disposiciones incluyen normas para la detección y reparación trimestral de fugas, el uso de sistemas de recuperación de vapores para capturar el gas, el paso a la neumática de bajo y cero sangrado, y prácticas con menos desperdicios. México también se adhirió al *Compromiso Mundial sobre el Metano*.

Las contribuciones previstas y determinadas a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés) para México en virtud del Acuerdo de París incluyen objetivos para reducir las fugas de metano, el venteo y la combustión controlada en un 25% y para utilizar la recuperación de metano en los vertederos municipales y plantas de tratamiento de agua⁴¹¹. Estos objetivos forman parte de su compromiso de reducir las emisiones de GEI en al menos un 22% y hasta un 36% por debajo del escenario proyectado si no se introdujeran cambios para 2030⁴¹². La actualización de la NDC de México para 2020 confirma este compromiso e incluye una mención a la posible implementación de una Política de Reducción de las Emisiones de Metano⁴¹³.

Una de las prioridades para la reducción del metano en México es mejorar el monitoreo de las emisiones de metano con el fin de elaborar informes precisos. Por ejemplo, recientes mediciones por satélite han revelado que las emisiones de origen antropogénico son un 45% superiores a las estimadas en el inventario nacional de GEI, y que la mayor discrepancia entre las emisiones inferidas y las estimadas procede del sector del petróleo y el gas⁴¹⁴. Otro estudio dirigido por el Fondo de Defensa del Medio Ambiente (EDF, por sus siglas en inglés) concluyó que las fugas de metano de las instalaciones de procesamiento en tierra eran 10 veces superiores a las notificadas, mientras que las emisiones de las instalaciones de procesamiento en alta mar eran un 90% inferiores a las notificadas. Según el EDF, esta conclusión sugiere que el gas de alta mar se conducía a tierra, donde posteriormente se quemaba o se filtraba. Se descubrió que las emisiones de una sola instalación que recibía gas de alta mar equivalían a la mitad del consumo residencial de gas de México⁴¹⁵.

El Presidente de México, Andrés Manuel López Obrador, y otros funcionarios mexicanos se reunieron el 9 de febrero de 2022 con el Enviado Especial Presidencial para el Clima, John Kerry, para continuar el diálogo entre Estados Unidos y México sobre la colaboración climática y acciones en torno a la energía limpia. Durante esta visita, las dos partes acordaron que el enfoque político de sus acciones “incluirlá el control de las emisiones de metano provenientes del combustóleo y el gas, los desechos y la agricultura”, entre otras áreas⁴¹⁶. En julio de 2022, Estados Unidos y México se comprometieron a “abordar las emisiones de metano procedentes del petróleo y el gas y de otros

sectores”, y a que Estados Unidos coopere con México y Pemex en un plan para eliminar la quema y venteo rutinarios⁴¹⁷. Los satélites detectaron recientemente grandes columnas de metano procedentes de una plataforma petrolífera en alta mar en uno de los principales yacimientos petrolíferos de México, lo que pone de relieve la urgencia de abordar estas emisiones⁴¹⁸.

E. India

Según el tercer Informe Bienal de Actualización de la India para la CMNUCC, el metano representó 19,5 millones de toneladas (409 MtCO_{2e}, utilizando el PCG₁₀₀ de 21 según el informe de la India), o el 14,43% de las emisiones totales de GEI de la India en 2016⁴¹⁹. También según este Informe, las principales emisiones de GEI de la India procedentes del sector agrícola son el metano procedente de la fermentación entérica del ganado y del cultivo de arroz⁴²⁰.

India trabaja para reducir las emisiones de metano en el sector agrícola. Dos métodos de cultivo de arroz en este país tienen por objeto reducir el uso de agua y las emisiones de metano: el sistema de intensificación del arroz y el arroz de siembra directa. El sistema de intensificación del arroz se utiliza en 24 de los 28 estados de la India⁴²¹, y el cultivo con el método de siembra directa se está implantando en casi 100.000 hectáreas de tierra⁴²². India también está cambiando las tierras dedicadas al cultivo de arroz por otros cultivos que requieren menos agua y permiten así reducir las emisiones de metano⁴²³. Además, está aplicando métodos, incluidos aditivos para piensos, que aumentan la productividad de los animales productores de leche y reducen las emisiones de GEI⁴²⁴. India también ha puesto en marcha dos programas dedicados al biogás, denominados *Galvanising Organic Bio-Agro Resources* (Gobar-Dhan) y *New National Biogas and Organic Manure*⁴²⁵.

Se calcula que la cantidad de metano en las capas de carbón de la India es de 91,8 billones de pies cúbicos repartidos en 11 estados⁴²⁶. Además, India ha identificado 233,30 billones de pies cúbicos de gas/petróleo de esquisto, cuya comercialización puede aumentar drásticamente las emisiones de metano⁴²⁷.

En julio de 1997, el gobierno indio formuló su política *Coal Bed Methane* (política sobre el metano en las capas de carbón, CBM por sus siglas en inglés) para aprovechar su potencial y reducir las emisiones de metano procedentes de la minería de carbón. Gracias a esta política, el CBM es convertido en gas natural en virtud de las disposiciones de la Ley de Yacimientos Petrolíferos (Regulación y Desarrollo) de 1948 y de las Normas sobre Petróleo y Gas Natural de 1959 del Ministerio de Petróleo y Gas Natural de la India⁴²⁸. Para aprovechar el potencial del CBM, se han ofrecido a las empresas bloques productores de metano en capas del carbón mediante licitaciones competitivas. Hasta ahora, India ha adjudicado 30 bloques de CBM en cuatro rondas de licitaciones a empresas nacionales, privadas y mixtas⁴²⁹.

La estrategia de la India para reducir las emisiones de metano del sector energético parece centrarse en la transición a las energías renovables y la mejora de la eficiencia energética⁴³⁰. En la India, se han debatido y planificado eventos de intercambio, capacitación y proyectos sobre el metano de las minas de carbón y el metano en las capas de carbón⁴³¹. Se está desarrollando un proyecto de drenaje previo en una mina subterránea⁴³² y se han realizado estudios para determinar la viabilidad de otros proyectos sobre la reducción del metano de las minas de carbón⁴³³.

Un acontecimiento de mayo de 2022 con posibles implicancias en la mitigación del metano es el anuncio de que tres autoridades ministeriales—el Ministerio de Ciencias de la Tierra, el Departamento de Ciencia y Tecnología y el Ministerio de Medio Ambiente, Bosques y Cambio Climático—

formarán un consorcio para “trabajar de forma cohesiva en la acción climática y en el cumplimiento de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional de la India en virtud del Acuerdo de París”⁴³⁴.

F. China

El 22 de septiembre de 2020, en la Asamblea General de la ONU, China anunció su objetivo de alcanzar la neutralidad de carbono antes de 2060⁴³⁵. Este objetivo a largo plazo abarca todos los GEI, incluido el metano. A corto plazo, el Proyecto del 14º Plan Quinquenal (2021-2025) de China para el Desarrollo Económico y Social Nacional y los Objetivos a Largo Plazo hasta el Año 2035 establece que China “reforzará el control de otros GEI como el metano, los HFC y los perfluorocarburos (PFC)”⁴³⁶. La destacada referencia al metano en este Plan otorga a los ministerios y organismos nacionales de China autoridad para incluir requisitos detallados sobre el metano en su 14^{to} plan quinquenal de implementación para el período 2021-2025.

El 28 de octubre de 2021, China presentó a la Secretaría de la CMNUCC su NDC actualizada⁴³⁷ y su Estrategia de Desarrollo a Medio Siglo, y a Largo Plazo, con Bajas Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (Estrategia de Medio Siglo)⁴³⁸. En la NDC actualizada, China incorporó su objetivo de aumentar la cuota de los combustibles no fósiles en el consumo de energía primaria hasta alrededor del 25% en 2030 y señaló que ya se han gastado fondos en un importante proyecto, denominado “Desarrollo de grandes yacimientos de petróleo y gas y del metano en las capas del carbón”⁴³⁹. En su Estrategia de Medio Siglo, China incluyó su objetivo de seguir aumentando el porcentaje de combustibles no fósiles hasta más del 80% para 2060⁴⁴⁰. Tanto la NDC actualizada como la Estrategia de Mitad de Siglo enumeran acciones políticas para la reducción de las emisiones de metano. Además, con el fin de apoyar la consecución de los objetivos en materia de combustibles no fósiles y promover el despliegue de energías renovables, el 14^{to} Plan Quinquenal de Trabajo Integral sobre la Conservación de la Energía y la Reducción de las Emisiones de China establece que la energía renovable no se contabilizará en los límites totales de consumo de energía para las localidades durante el período del 14^{to} Plan Quinquenal (2021-2025)⁴⁴¹.

Para el sector de las minas de carbón, los objetivos de China incluyen: “para 2020, el volumen de extracción del metano de las capas de carbón (gas de las minas de carbón) alcanzará los 24 bmc, dentro de los cuales la producción de metano de las capas de carbón en tierra alcanzará los 10 bmc con una tasa de utilización superior al 90%; y la extracción de gas de las minas de carbón alcanzará los 14 bmc con una tasa de utilización superior al 50%”⁴⁴². En una conferencia de prensa del Consejo de Estado celebrada el 27 de abril de 2021, el Ministerio de Ecología y Medio Ambiente anunció un plan para revisar las normas de emisión del metano de las capas de carbón y del gas de las minas de carbón⁴⁴³. Además, las directivas políticas de China sobre la neutralidad del carbono incluyen la ampliación del desarrollo y la utilización del metano en las capas de carbón⁴⁴⁴. Además, China anunció un plan para controlar estrictamente el aumento del consumo de carbón entre 2021 y 2025, y reducirlo gradualmente entre 2026 y 2030⁴⁴⁵. China también anunció objetivos subnacionales clave con implicancias para las emisiones de metano. Entre ellos se incluyen la reducción del consumo de carbón en Pekín, Tianjin, Hebei y las zonas circundantes en un 10% aproximadamente, la reducción del consumo de carbón en la región del Delta del Río Yangtsé en un 5% aproximadamente y el logro de un crecimiento negativo del consumo de carbón en la región de la Llanura de Fenwei para 2025⁴⁴⁶.

En cuanto al sector del petróleo y el gas, China se ha fijado el objetivo de alcanzar el pico y la meseta de consumo de petróleo entre 2026 y 2030⁴⁴⁷. También pretende alcanzar el punto máximo de consumo de petróleo utilizado en el transporte terrestre en 2030⁴⁴⁸. Las NDC actualizadas de China incorporan acciones para reducir las emisiones de metano en este sector, incluso mediante el despliegue de

tecnologías para la recuperación del gas asociado⁴⁴⁹. El 13° Plan Quinquenal de Desarrollo del Gas Natural de China (2016) incluye la promoción de tecnologías de recuperación del gas asociado a los yacimientos petrolíferos, el refuerzo de la detección de fugas de gas natural y la reducción de las emisiones fugitivas de GEI. La Alianza de Metano de Gas y Petróleo de China, una asociación de siete empresas chinas, se ha comprometido a reducir la intensidad media de las emisiones de metano de las empresas en la producción de gas natural por debajo del 0,25% para 2025, y a cooperar y compartir experiencias técnicas sobre el control de las emisiones de metano, incluidos los sistemas LDAR y de recuperación de gas⁴⁵⁰. También se espera que los esfuerzos de China para promover un transporte ecológico y limpio reduzcan el consumo de petróleo y contribuyan a mitigar las emisiones de metano. Ejemplos de los principales objetivos en el sector del transporte son aumentar el transporte impulsado por nuevas energías y energías limpias hasta aproximadamente el 40% [del total de transporte nuevo] por año en 2030 y lograr una tasa de despliegue no inferior al 70% para el transporte ecológico en ciudades con una población de un millón de habitantes o más en 2030⁴⁵¹.

En el sector agrícola, en 2017 China estableció el objetivo de lograr la “reutilización integral” de más del 75% del estiércol de la cría de ganado y aves de corral para 2020⁴⁵². En 2021 elevó este objetivo a más del 80% del estiércol de ganado y aves de corral en todo el país para 2025⁴⁵³. China también aumentará la eficiencia de los fertilizantes y pesticidas químicos hasta el 43% para 2025⁴⁵⁴, lo que también puede tener implicancias en la reducción de las emisiones de metano. Asimismo, está dando prioridad a las medidas de control de las emisiones agrícolas, incluyendo la promoción de plantas de arroz de bajas emisiones y alto rendimiento, la mejora de las técnicas agrícolas, el fomento del uso de fertilizantes orgánicos, la regulación del uso de fertilizantes químicos y pesticidas y el avance en el uso integral de la paja de los cultivos⁴⁵⁵. Además, la CCAC está colaborando con China para, entre otras cosas, investigar y desarrollar estrategias eficaces de mitigación del metano “como el control minucioso del agua, los fertilizantes, los antibióticos y el tipo de pienso, que no sólo pueden reducir las emisiones sino también aumentar la producción agrícola”⁴⁵⁶.

En el sector de los residuos, China se ha fijado objetivos como alcanzar, de aquí a 2025, el 90% de eliminación inocua de los lodos urbanos⁴⁵⁷, el 25% de utilización de los recursos de aguas residuales en las ciudades con escasez de agua a nivel de prefectura y superior⁴⁵⁸, y el 40% de tratamiento de las aguas residuales domésticas en las zonas rurales⁴⁵⁹. Además, para 2030, la tasa media nacional de utilización de agua reciclada urbana aumentará hasta el 30%⁴⁶⁰. Asimismo, China se comprometió a aumentar la reutilización de los residuos domésticos urbanos hasta aproximadamente el 60% en 2025 y el 65% en 2030⁴⁶¹. Este país también está promoviendo el reciclaje y la reutilización de los residuos sólidos industriales con el objetivo de aumentar la tasa de reutilización global de los residuos sólidos industriales a granel hasta el 57% en 2025⁴⁶². Además, China anunció un plan para construir 100 ciudades con cero residuos para 2025⁴⁶³. La construcción de ciudades con cero residuos contribuirá a reducir las emisiones de metano gracias a las mejoras previstas en la eliminación de residuos sólidos en fuentes industriales, la reducción de vertederos de residuos domésticos, la gestión y reutilización de residuos ganaderos y el control de la aplicación de fertilizantes químicos y pesticidas⁴⁶⁴.

Además de las políticas y objetivos nacionales de reducción de emisiones de metano descritos anteriormente, China ha tomado una serie de medidas para mitigar el impacto climático y otros impactos ambientales de sus inversiones en el extranjero. Entre ellas figuran el compromiso de dejar de construir nuevas centrales eléctricas de carbón⁴⁶⁵ y la publicación de directrices gubernamentales que recomiendan a las empresas chinas cumplir las normas internacionales vigentes o las propias de China si el país receptor de la inversión china 1) carece de normas medioambientales aplicables a la inversión y al proyecto en cuestión; o 2) cuenta con normas medioambientales para la inversión o el

proyecto en cuestión que son inferiores a las normas internacionales vigentes o a las que se aplican a dichas inversiones y proyectos en China⁴⁶⁶.

G. Brasil

Brasil es el quinto mayor emisor de metano del mundo⁴⁶⁷, debido a su industria ganadera, que representa el 14% del rebaño bovino mundial⁴⁶⁸. Las emisiones totales de metano de Brasil ascendieron a aproximadamente 400 MtCO_{2e} en 2020, de las cuales ~285 MtCO_{2e} proceden únicamente del sector ganadero⁴⁶⁹.

Brasil es signatario del *Compromiso Mundial sobre el Metano*. Para cumplir con sus obligaciones en el *Compromiso* y la CMNUCC, Brasil promulgó un decreto que creó la Estrategia Federal para Incentivar el Uso Sostenible del Biogás y el Biometano⁴⁷⁰. El decreto establece directrices para incentivar el desarrollo de mercados de carbono, el uso del biometano como fuente de energía renovable y de combustible, y la inversión en investigación científico-tecnológica⁴⁷¹. Además, proporciona una lista no exhaustiva de residuos urbanos y rurales que pueden utilizarse para producir biogás y biometano, incluidos los residuos depositados en vertederos.

La Estrategia Federal, que incluye el Programa Metano Cero, introducirá créditos de metano en los mecanismos de mercado existentes⁴⁷². Los créditos de metano que representan toneladas de metano no emitidas generarán ingresos adicionales para los proyectos de biogás y biometano. Antes del Programa Metano Cero, Brasil fomentaba el desarrollo de biocombustibles a través de RenovaBio, un mercado regulado de créditos de descarbonización que obliga a las empresas distribuidoras de combustibles fósiles a cumplir sus objetivos invirtiendo en empresas de biocombustibles⁴⁷³.

En 2019, Estados Unidos y Brasil lanzaron el Foro de Energía entre Estados Unidos y Brasil como un mecanismo de cooperación en la gestión del carbono y el metano, la energía nuclear civil, las energías renovables, la eficiencia energética y la modernización de la red de suministro eléctrico. En su segunda reunión ministerial de 2022, los dos gobiernos acordaron “intercambiar experiencias en la gestión del carbono y el metano, y el secuestro y almacenamiento de carbono”⁴⁷⁴. Más recientemente, en agosto de 2022, Estados Unidos y Brasil también pusieron en marcha el Diálogo de la Industria de la Energía Limpia para colaborar en materia de energías renovables y combustibles sostenibles, incluida la energía eólica marina y el hidrógeno limpio⁴⁷⁵.

H. Irak

El sector del petróleo y el gas de Irak contribuye en gran medida a las emisiones de metano, que representan aproximadamente el 9 % de las emisiones mundiales de metano del sector en 2019⁴⁷⁶. Irak también ha estado entre los 10 países que más han quemado en los últimos 10 años⁴⁷⁷.

En 2020, Irak anunció que su Ministerio de Salud y su Ministerio de Medio Ambiente y Petróleo crearían un grupo de trabajo técnico interministerial para estudiar la naturaleza y la magnitud de las emisiones de metano del sector del petróleo y el gas del país⁴⁷⁸. Desde entonces, Irak ha incluido el metano en su NDC, se ha unido a la Asociación de la Coalición Clima y Aire sobre el Petróleo y Gas Metano y ha firmado el *Compromiso Mundial sobre el Metano*⁴⁷⁹. En 2022, el Ministerio de Medio Ambiente de Irak anunció que está trabajando con la Asociación Mundial para la Reducción de la Quema de Gas del Banco Mundial para desarrollar su hoja de ruta con el objetivo de quema cero en la producción de petróleo y gas para 2030⁴⁸⁰.

7. La colaboración internacional es fundamental para combatir las emisiones de metano

Organizaciones e iniciativas públicas y privadas de todo el mundo, como las que se describen brevemente a continuación (y el *Global Methane Hub*), están colaborando en la mitigación del metano. Su colaboración es fundamental para fortalecer el consenso que apoye la acción contra el metano, incluso a nivel bilateral y multilateral. Las iniciativas que evalúan el rendimiento del metano pueden ser una parte cada vez más importante de esta colaboración a medida que el mundo se adapta a los cambios en el suministro mundial de gas natural y se centra en evaluar la intensidad de metano de los volúmenes de gas disponibles y el rendimiento asociado de los productores.

i. Organizaciones e iniciativas cuasi-gubernamentales

o *La Coalición Clima y Aire Limpio para Reducir los Contaminantes Climáticos de Vida Corta*

La Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC, por sus siglas en inglés) facilita la mitigación del metano y el intercambio de información a todos los niveles, incluso mediante la publicación de los principales datos científicos. La CCAC es una asociación voluntaria con más de 70 socios estatales y regionales, y un número similar de socios no estatales⁴⁸¹. Se ha propuesto que la CCAC actúe como Secretaría del *Compromiso Mundial sobre el Metano*. Esta coalición ayuda a los países a desarrollar planes para reducir los CCVC⁴⁸². También ayuda a los países a aumentar la ambición de los objetivos de reducción de los CCVC que notifican en sus NDC bajo el Acuerdo de París. Aumentar el apoyo y la financiación de la CCAC reforzaría el intercambio de información y el apoyo técnico a los países, lo que conduciría a un aumento concertado de la ambición. Esto podría incluir una mayor ambición en relación con los informes sobre el metano en el marco de la Asociación CCAC sobre el Petróleo y Gas Metano, que se describe más adelante bajo el título *Iniciativas impulsadas por la industria*. Esto también podría incluir la coordinación del apoyo a las “Oficinas Nacionales de Metano” y otras estructuras de mitigación del metano, adoptando el enfoque de fortalecimiento institucional que ha sido “un factor importante en el éxito” de los países en desarrollo para alcanzar los objetivos del Protocolo de Montreal (véase la **Sección 11**)⁴⁸³.

El 9 de noviembre de 2021, la reunión Ministerial de la CCAC puso en marcha la Iniciativa Emblemática sobre el Metano, cuyos objetivos “a partir de 2022, serán fomentar y reforzar los compromisos de alto nivel para reducir el metano, acelerar y fomentar la concienciación, apoyar la planificación y la ejecución de estrategias, mejorar las herramientas y el análisis para apoyar las medidas y aumentar la financiación”⁴⁸⁴.

Los esfuerzos de la CCAC que dieron lugar a la *Evaluación Global del Metano* aumentaron la concienciación y la atención política sobre las oportunidades de la reducción del metano. Además de la *Evaluación Global del Metano*, el trabajo de la CCAC, con el grupo del Dr. Shindell en la Universidad de Duke, dio como resultado una *herramienta* en línea de acceso público para la mitigación del metano⁴⁸⁵. La CCAC planea mejorar esta herramienta para facilitar su utilización, incluyendo la actualización continua de las emisiones de metano y las métricas existentes para cuantificar los beneficios colaterales. Esto permitirá obtener una visión general a nivel nacional de las medidas pertinentes y los beneficios colaterales relacionados, incluida la creación de empleo.

La CCAC también planea desarrollar un *Rastreador Mundial de Políticas/Aplicación del Metano* con el fin de registrar y cuantificar los avances hacia la aplicación de medidas, políticas y normativas relacionadas con el metano. Además, esta coalición alberga tres centros que trabajarán con gobiernos y otras partes interesadas en los sectores de la agricultura, los residuos y el petróleo y el gas. En particular,

la CEPE se unió a la CCAC en 2015 con el objetivo de contribuir al trabajo de esta última mediante el intercambio de experiencias, conocimientos y mejores prácticas, incluso con respecto al Protocolo enmendado de la CEPE para luchar contra la acidificación, la eutrofización y el ozono troposférico (Protocolo de Gotemburgo) del Convenio LRTAP⁴⁸⁶. Esta relación puede ayudar a informar los esfuerzos para desarrollar un acuerdo mundial sobre el metano con carácter de urgencia. El Convenio LRTAP y el Protocolo de Gotemburgo se tratan más adelante, en la **Sección 10**.

En septiembre de 2022, la CCAC y la Iniciativa Mundial del Metano (GMI, por sus siglas en inglés) convocaron un Foro Mundial sobre Metano, Clima y Aire Limpio con el objetivo de reunir a responsables de políticas, líderes industriales, expertos técnicos e investigadores de todo el mundo⁴⁸⁷. En el mismo se debatieron las posibilidades de proteger el clima y mejorar la calidad del aire, con especial atención al metano. El evento formó parte de la Reunión Anual de la CCAC para 2022 e incluye actualizaciones sobre esfuerzos internacionales como el *Compromiso Mundial sobre el Metano*, el Observatorio Internacional de Emisiones de Metano, el *Global Methane Hub* y la Vía Energética del Compromiso Mundial sobre el Metano.

- *Misión de Innovación Agrícola para el Clima*

La Misión de Innovación Agrícola para el Clima (AIM4C, por sus siglas en inglés), creada conjuntamente por Estados Unidos y Emiratos Árabes Unidos, es una iniciativa para aumentar la financiación y la participación en la agricultura climáticamente inteligente y la innovación de los sistemas alimentarios en los próximos cinco años. Los “sprints de innovación” de la AIM4C guiarán a los participantes para abordar objetivos específicos utilizando financiación coordinada. Dos sprints de innovación que tienen relación directa con la mitigación del metano son la “*Greener Cattle Initiative: Addressing Enteric Methane Emissions*” y “*Satellite monitoring of quantity and quality of available biomass in pastoral livestock systems*”⁴⁸⁸. Más de 70 países y organizaciones se han asociado a esta iniciativa⁴⁸⁹.

- *Foro de Productores Neto Cero*

En abril de 2021, Canadá, Noruega, Qatar, Arabia Saudita y Estados Unidos anunciaron su intención de crear el Foro de Productores Neto Cero (en inglés, *Net-Zero Producers Forum*). El Foro “desarrollaría estrategias pragmáticas de emisiones netas cero, incluida la reducción del metano, el avance del enfoque de la economía circular del carbono, el desarrollo y despliegue de tecnologías de energía limpia y de captura y almacenamiento de carbono, la diversificación de la dependencia de los ingresos procedentes de los hidrocarburos y otras medidas acordes con las circunstancias nacionales de cada país”⁴⁹⁰.

- *Asociación Mundial para la Reducción de la Quema de Gas del Banco Mundial*

La Asociación Mundial para la Reducción de la Quema de Gas del Banco Mundial es un fondo fiduciario de múltiples donantes compuesto por 17 gobiernos, 13 compañías petroleras y 3 organizaciones multilaterales. La GGFR desarrolla programas para la reducción de la quema de gas específicos a cada país, realiza investigaciones, comparte las mejores prácticas, crea conciencia, garantiza compromisos globales para acabar con la quema rutinaria que provoca emisiones de metano y avanza en la medición y la notificación de la quema⁴⁹¹. Estados Unidos tiene previsto reincorporarse a la GGFR⁴⁹². Esta Asociación busca compromisos con la iniciativa *Zero Routine Flaring* de aquí a 2030. Los gobiernos y las empresas que participan en la Iniciativa del Banco Mundial “Eliminación de la quema regular de gas para 2030” se comprometen a poner fin a la quema rutinaria para 2030⁴⁹³.

34 gobiernos, 53 empresas de petróleo y gas y 15 organizaciones de desarrollo apoyan la Iniciativa⁴⁹⁴. En colaboración con la *Oil and Gas Climate Initiative* y el Payne Institute (Facultad de Minería de Colorado), el GGFR está desarrollando un Herramienta de Seguimiento de la Quema de Gas, una plataforma en línea que ofrecerá un seguimiento en tiempo real de la quema de gas en todo el mundo.

El informe de la Herramienta de Seguimiento de la Quema de Gas de 2022 reveló que diez países representan el 75% de toda la quema de gas y el 50% de la producción mundial de petróleo: “Siete de los 10 países que más gas queman han mantenido esta posición de forma constante durante los últimos 10 años: Rusia, Irak, Irán, Estados Unidos, Venezuela, Argelia y Nigeria. Los tres restantes (México, Libia y China) han registrado aumentos significativos en los últimos años”⁴⁹⁵.

- *La Iniciativa Global de Residuos 50 para 2050*

Egipto realizó el lanzamiento de la [Iniciativa Global de Residuos 50 para 2050](#) en la COP27 celebrada en Sharm El-Sheikh en noviembre de 2022. Esta Iniciativa identifica posibles vínculos entre los residuos y el metano. Asimismo, en una sesión organizada en el marco de la COP27 anunció la creación de un “África verde”, que incluye el objetivo de reducir los residuos en un 50% en los países africanos⁴⁹⁶.

La Iniciativa Global de Residuos estima que el sector de los residuos contribuye en un 20% a las emisiones mundiales de metano⁴⁹⁷. Las emisiones de metano procedentes del vertido de residuos sólidos alcanzaron alrededor de 1,3 MtCH₄ en 2010, y se prevé que aumentarán aún más si no mejoran las prácticas de gestión de residuos⁴⁹⁸. La Iniciativa Global de Residuos desarrollará una plataforma para asociaciones y proyectos sobre mitigación y adaptación y apoyará la transferencia de conocimientos e innovación de infraestructuras para la gestión de residuos⁴⁹⁹.

- ii. *Iniciativas impulsadas por la industria*

- *Iniciativa Mundial del Metano*

La Iniciativa Mundial del Metano (GMI, por sus siglas en inglés) es una asociación público-privada que abarca los tres sectores principales (producción de energía, agricultura y residuos) y promueve la captura y el uso del metano⁵⁰⁰. Facilita el intercambio de información y asistencia técnica a nivel internacional. La GMI incluye a 45 países que representan alrededor del 70% de las emisiones antropogénicas de metano del mundo, entre ellos Estados Unidos, Canadá, Argentina, Brasil, Rusia, China, India y Australia⁵⁰¹. Según su sitio web, los proyectos de la GMI han reducido más de 500 MtCO_{2e} desde 2004⁵⁰².

- *Asociación Petróleo y Gas Metano*

La Asociación Petróleo y Gas Metano (OGMP, por sus siglas en inglés), una iniciativa de la CCAC (con el PNUMA, la Comisión Europea y EDF) avanza en la notificación de las emisiones de metano, entre otros, mediante el marco de notificación OGMP 2.0. Este Marco exige a las empresas que informen sobre las emisiones de metano procedentes de fuentes que intervienen en toda la cadena de valor del petróleo y el gas, con el objetivo de reducir las emisiones entre un 50 y un 75% para 2030⁵⁰³. La Unión Europea pretende basarse en este Marco para desarrollar sus requisitos de medición, notificación y verificación para el sector energético⁵⁰⁴.

- *Iniciativa Climática Petróleo y Gas*

La Iniciativa Climática de Petróleo y Gas (OGCI, por sus siglas en inglés) es una iniciativa liderada por los CEO de las empresas que son miembro y por medio de la cual acuerdan una serie de compromisos y principios. En particular, los miembros de la OGCI se comprometen, de aquí a 2025, a que la intensidad media colectiva de emisiones de metano procedente de las operaciones agregadas de extracción de petróleo y gas se sitúe muy por debajo del 0,20%, a partir de una base de referencia de 2017 del 0,30%. También se comprometen, entre otras cosas, a reducir la intensidad total de carbono de las actividades de exploración y producción de 23 kg de GEI por barril de petróleo o gas en 2017 a 17 kg en 2025 y a apoyar expresamente el objetivo de quema rutinaria cero para 2030⁵⁰⁵.

- *Asociación Mundial de Biogás*

La Asociación Mundial de Biogás actúa como una asociación comercial mundial para los sectores industriales del biogás, los gases de vertedero y la digestión anaeróbica⁵⁰⁶. La Asociación proporciona a sus miembros publicaciones como el Directorio Mundial de la Industria del Biogás, datos sobre la magnitud y el crecimiento de los mercados mundiales del biogás y varios análisis que demuestran el potencial ambiental y económico de la industria⁵⁰⁷. La Asociación organiza la Cumbre Mundial del Biogás, que en 2021 se centró en la mitigación del metano⁵⁰⁸.

- *Los Principios Rectores del Metano*

Los 24 signatarios de los Principios Rectores del Metano (en inglés, *Methane Guiding Principles*) de la industria del petróleo y el gas se han comprometido a informar públicamente sobre cómo están cumpliendo la intención de cinco principios, incluida la reducción continua de las emisiones de metano, la mejora de la exactitud de los datos sobre emisiones y el aumento de la transparencia. El compromiso de reducir las emisiones de metano incluye la aplicación de programas LDAR y la reducción de las emisiones fugitivas y por venteo. El grupo también ha publicado un conjunto de herramientas para los responsables políticos.

Los 24 signatarios de los Principios Rectores del Metano de la industria del petróleo y el gas se han comprometido a informar públicamente sobre cómo están cumpliendo con los cinco principios, incluida la reducción continua de las emisiones de metano, la mejora de la exactitud de los datos sobre dichas emisiones y el aumento de la transparencia⁵⁰⁹. El compromiso de reducir las emisiones de metano incluye la aplicación de programas LDAR y la reducción de las emisiones fugitivas y por venteo. El grupo también ha publicado un conjunto de herramientas para los responsables de políticas⁵¹⁰.

- ii. *Iniciativas de calificación del desempeño*

- *MiQ*

RMI y SYSTEMIQ crearon MiQ, una organización independiente sin fines de lucro. MiQ desarrolló un sistema de certificación basado en la intensidad de metano que califica los volúmenes de gas natural producidos y el rendimiento de los productores. La intención es crear un mercado de gas natural diferenciado para incentivar a los productores a reducir las emisiones de metano del sector del petróleo y el gas⁵¹¹.

- *Iniciativa para la Sostenibilidad del Gas Natural*

La Iniciativa para la Sostenibilidad del Gas Natural (*Gas Sustainability Initiative*, NGSI, por sus siglas en inglés) desarrolló el Protocolo de Intensidad de las Emisiones de Metano de (*NGSI Methane*

Emissions Intensity Protocol) como un enfoque voluntario para que las empresas calculen la intensidad de sus emisiones de metano⁵¹².

8. Los sistemas de monitoreo añaden transparencia y responsabilidad

En la actualidad, las emisiones de metano se calculan sobre la base de una serie de regímenes y protocolos de notificación existentes, como la CMNUCC, la *Global Reporting Initiative* (GRI) y los programas nacionales de notificación. Los sistemas cada vez más sofisticados de medición y monitoreo de las emisiones de metano añadirán transparencia y responsabilidad a los esfuerzos mundiales de reducción del metano. En concreto, estos sistemas serán esenciales para garantizar que el mundo se dirige en la dirección correcta para alcanzar reducciones del 30% (o más) en las emisiones de metano necesarias para frenar el calentamiento del planeta a corto plazo, tal y como apela el *Compromiso Mundial sobre el Metano*. Los sistemas de monitoreo ayudan a proporcionar información crucial que el público puede utilizar para exigir responsabilidades a las empresas y los países⁵¹³.

Los sistemas de monitoreo incluyen satélites y tecnologías de sobrevuelo desde aviones desplegados para identificar con mayor exactitud los puntos de origen de las emisiones de las infraestructuras, y dispositivos manuales de vigilancia con luz infrarroja y de otro tipo utilizados sobre el terreno para localizar la maquinaria emisora.

La rápida mejora de las tecnologías de detección de metano y análisis de datos está impulsando un auge de las empresas privadas dedicadas al monitoreo y análisis de datos⁵¹⁴. A continuación figura una lista no exhaustiva de iniciativas destinadas a mejorar el monitoreo y la responsabilidad de las emisiones de metano. Estos ejemplos sugieren cómo una combinación de servicios de monitoreo públicos y privados podría ofrecer un “sistema de sistemas” para las empresas, los entes reguladores, los investigadores y los ciudadanos interesados en el seguimiento y la mitigación de las emisiones de metano⁵¹⁵.

Entre las iniciativas de medición y monitoreo del metano se incluyen las siguientes:

- *Carbon Mapper*

En abril de 2021, Carbon Mapper, Inc., una organización sin fines de lucro financiada con fondos filantrópicos, anunció un plan para lanzar una constelación de satélites con el fin de localizar las emisiones de metano, en colaboración con el Estado de California, el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA, Planet, la Universidad de Arizona, la Universidad Estatal de Arizona, High Tide Foundation y RMI⁵¹⁶. Los dos primeros satélites están en fase de desarrollo y se lanzarán en 2023. El desarrollo de una constelación multisatélite operativa comenzará en 2025⁵¹⁷. Además, Carbon Mapper está elaborando un portal de datos en colaboración con la Junta de Recursos del Aire de California para poner los datos a disposición del público.

- *Copernicus*

Copernicus es el programa de observación de la Tierra de la UE que proporciona servicios de información con datos procedentes de sistemas de observación por satélite e *in situ* (no espaciales)⁵¹⁸. La Comisión Europea gestiona el servicio de vigilancia Copernicus y ejecuta el programa en colaboración con los Estados miembros, agencias y centros europeos⁵¹⁹. Además de recabar información de sistemas *in situ*, la Unión Europea pondrá en órbita una constelación de unos 20 satélites antes de 2030⁵²⁰. De los seis servicios de información, el Servicio de Vigilancia Atmosférica⁵²¹, el Servicio de Vigilancia Terrestre⁵²² y el Servicio de Cambio Climático de

Copernicus⁵²³ están estrechamente relacionados con el monitoreo del metano. Todos estos servicios de información son de libre acceso para todos.

- *MethaneSAT del Fondo de Defensa Ambiental*

El MethaneSAT del Fondo de Defensa Ambiental (EDF, por sus siglas en inglés) planea lanzar un nuevo satélite para realizar un monitoreo periódico de las operaciones mundiales de petróleo y gas, incluida la identificación de emisiones de metano en grandes áreas geográficas y la medición de emisiones en lugares predeterminados⁵²⁴. En enero de 2021, MethaneSAT celebró un contrato con SpaceX para la puesta en órbita de su nuevo satélite dedicado al metano, prevista para el 1 de octubre de 2022⁵²⁵. Una vez lanzado, MethaneSAT transmitirá sus datos en línea sin costo alguno para los usuarios no comerciales.

- *GHGSat*

GHGSat, empresa mundial de monitoreo de emisiones, firmó en 2019 un memorando de intenciones con la Agencia Espacial Canadiense y la Agencia Espacial Europea⁵²⁶. GHGSat colaborará con el Observatorio Internacional de Emisiones de Metano proporcionando datos gratuitos sobre las emisiones de metano captadas desde sus satélites⁵²⁷. El 4 de mayo de 2022, GHGSat compartió sus primeros hallazgos utilizando tecnología satelital sobre las emisiones de metano del ganado de una granja en Joaquin Valley, California⁵²⁸. Más recientemente, en agosto de 2022, GHGSat detectó emisiones de vertederos en Buenos Aires, Delhi, Lahore y Mumbai, descubriendo que los vertederos contribuyen entre un 6 y un 50% de las emisiones declaradas a nivel urbano⁵²⁹.

- *La Iniciativa del Metano y el Proyecto de Metodología de Medición del Metano del Foro Internacional de Energía*

La Iniciativa del Metano del Foro Internacional de Energía (IEF, por sus siglas en inglés) desarrollará una metodología de medición de las emisiones de metano que permita normalizar la recolección de datos⁵³⁰. El proyecto de metodología de medición del metano pretende ayudar a los Estados miembros del IEF a elaborar planes creíbles de reducción del metano en el sector energético basados en los mejores datos disponibles sobre las emisiones de metano⁵³¹.

- *El Observatorio Internacional de Emisiones de Metano*

Presentado el 31 de octubre de 2021 en la Cumbre del G20, el Observatorio Internacional de Emisiones de Metano (IMEO, por sus siglas en inglés) es una iniciativa del PNUMA con el apoyo de la Comisión Europea y de otros gobiernos que integrará los datos de las emisiones de metano obtenidos de múltiples fuentes en una base de datos congruente que describirá el nivel de confianza en cada elemento de datos⁵³². El IMEO se centrará inicialmente en el sector energético y más adelante se extenderá a los residuos y la agricultura⁵³³. Además, el IMEO desempeñará un papel importante en la aplicación del *Compromiso Mundial sobre el Metano*, ayudando a los países a priorizar sus acciones y monitoreando los compromisos⁵³⁴. El PNUMA alberga al IMEO, con una financiación pública de 100 millones de euros a lo largo de cinco años (incluida la financiación de la Comisión Europea como miembro fundador)⁵³⁵. El Observatorio se coordinará estrechamente con la CCAC, entre otras organizaciones, incluso en lo relativo a la incorporación y el análisis de los datos del OGMP 2.0, mencionado en la **Sección 7**⁵³⁶. En 2021, el IMEO publicó su primer informe, *An Eye on Methane*, en el que se describen los avances del OGMP 2.0 y los retos pendientes en el monitoreo y la medición del metano.

- *Oil and Climate Index Plus (OCI+)*

Investigadores de RMI, la Universidad de Stanford, la Universidad de Calgary y Koomey Analytics desarrollaron la herramienta *Oil and Climate Index Plus (OCI+)* como respuesta a la poca claridad de los informes sobre las emisiones de GEI que realiza el sector del petróleo y el gas⁵³⁷. El OCI+ presenta una evaluación completa del ciclo de vida de las emisiones de GEI provocadas por la mitad de la producción mundial de petróleo y gas. La herramienta OCI+ y el informe que la acompaña concluyen que las emisiones más significativas de los combustibles fósiles se producen no sólo en el punto de combustión, sino también en la boca del pozo y durante el procesamiento, el refinado y el transporte⁵³⁸. El informe también menciona la reducción del metano como “la máxima prioridad para el sector del petróleo y el gas”⁵³⁹.

9. Crear una estrategia de responsabilidad y cumplimiento utilizando sistemas sólidos de monitoreo de las emisiones

Como se ha comentado en la **Sección 8**, los sistemas de monitoreo de emisiones añaden transparencia y responsabilidad a los esfuerzos de reducción. Las tecnologías que sustentan estos sistemas están a listas para revolucionar la información disponible al hacer visibles emisiones que antes eran invisibles para el público, los organismos reguladores y los propietarios y operadores de fuentes de metano de todos los sectores. Estos sistemas de monitoreo, cuando se combinan con una estrategia de responsabilidad y cumplimiento, serán esenciales para garantizar que el mundo se encamine hacia la máxima reducción de las emisiones de metano.

Mecanismos eficaces de responsabilidad y respuesta para abordar las fuentes de emisiones incluirían varios componentes. En el nivel más básico, se encuentra: 1) un ejercicio de inventario por el total de emisiones, sectores y ubicación; 2) el nivel de referencia de las emisiones por jurisdicción; 3) el objetivo de reducción por el total de emisiones y sectores; y 4) monitoreo y notificación, proporcionando total transparencia. Además, estos componentes incluyen las capacidades de 1) identificar y alertar a las organizaciones responsables de los activos emisores; 2) dar a conocer las emisiones a los organismos reguladores responsables y 3) garantizar que los datos de las emisiones estén disponibles de forma accesible y oportuna para los organismos de control de la sociedad civil, los medios de comunicación y las comunidades afectadas.

Una estrategia eficaz de responsabilidad y cumplimiento debe incorporar mecanismos de “zanahoria” (incentivos) y “palo” (por ejemplo, mecanismos regulatorios, “hacer públicos los nombres de los infractores”). La estrategia debe abarcar a los operadores de fuentes de metano, a los organismos gubernamentales responsables, incluidos los fiscales, y a la sociedad civil, incluidas las comunidades afectadas. Además, también deben identificarse soluciones para abordar las emisiones detectadas y conectar a los operadores con la capacidad técnica y los recursos financieros necesarios, según proceda. Asimismo, resulta necesario crear capacidades que reflejen la formación y otros incentivos adecuados para las partes interesadas implicadas en los aspectos de la estrategia relacionados con la responsabilidad. Entre ellos se encuentran los operadores de fuentes de emisión, las agencias reguladoras, las agencias de calificación de riesgo financiero y los organismos de vigilancia.

Una estrategia de responsabilidad podría contener varios componentes, los cuales incluyen:

- 1) Un mapa de activos y un inventario de fuentes de metano con coordenadas geoespaciales que permitan la identificación detallada de las fuentes y los contactos correspondientes para los operadores;
- 2) Una “guía telefónica” de los agentes de control correspondientes a cada punto de emisión (federal, estatal, local, sector privado, etc.) en base a la ubicación y el tipo de activo;
- 3) Un mecanismo para acceder a los datos sobre emisiones procedentes de los sistemas de monitoreo y convertirlos rápidamente en formatos utilizables por los actores responsables; y
- 4) Una red de coordinación y comunicación de los actores de la sociedad civil por región, país y jurisdicción subnacional donde las emisiones sean significativas, con el fin de reforzar la capacidad colectiva de la sociedad civil para actuar a medida que surjan los datos sobre las emisiones.

A nivel gubernamental, podrían establecerse Oficinas Nacionales de Metano que asumieran la responsabilidad de elaborar y mantener inventarios de emisiones y de identificar y monitorear los principales puntos de origen de las mismas. Estas Oficinas también servirían de enlace con los organismos subnacionales correspondientes para crear sistemas eficaces de rendición de cuentas, establecer procedimientos e identificar especialistas y otras partes interesadas en las que se pueda confiar para que ayuden a desplegar acciones y sistemas de rendición de cuentas. Estas Oficinas se organizarían regionalmente, y también a nivel subnacional, para fomentar la cooperación y el intercambio de información y las estrategias de mitigación.

Un componente clave para incentivar las acciones de mitigación es que las fuentes de emisiones de metano identificadas tengan acceso a tecnologías y financiación para aplicar las soluciones de mitigación. Un Grupo de Evaluación Tecnológica y Económica (inspirado en el Grupo de Evaluación Tecnológica y Económica del Protocolo de Montreal) y una Herramienta de Seguimiento del Metano (albergado por la CCAC) podrían evaluar y recomendar soluciones tecnológicas de forma periódica para fomentar la innovación continua y el apoyo a la aplicación de las mejores prácticas.

10. Los esfuerzos internacionales, incluido el Compromiso Mundial sobre el Metano, están catalizando otras acciones bilaterales y multilaterales para frenar el metano

Las emisiones de metano procedentes de cualquier fuente y en cualquier lugar afectan al clima mundial, así como a la salud pública y al medio ambiente, ya que el metano es un gas de efecto invernadero bien mezclado y contribuye a aumentar la contaminación de fondo por ozono troposférico. La mitigación del metano por parte de todos y cada uno de los países es, por lo tanto, el mejor medio para lograr una reducción rápida y eficaz de las emisiones de metano en cualquier lugar que se produzcan⁵⁴⁰.

Además del *Compromiso Mundial sobre el Metano*, los esfuerzos bilaterales y regionales conexos sientan las bases para la celebración de un acuerdo mundial sobre el metano, que encuentra su inspiración en el exitoso Protocolo de Montreal de 1987. El Protocolo de Montreal no sólo ha resuelto la primera gran amenaza para la atmósfera global al poner el ozono estratosférico en vías de recuperación para 2065, sino que también ha hecho más por evitar el calentamiento global más que cualquier otro acuerdo⁵⁴¹, evitando una cantidad de calentamiento que, de otro modo, habría igualado o incluso superado el calentamiento que el CO² está causando en la actualidad⁵⁴².

El Protocolo de Montreal ofrece una estructura arquitectónica útil para adoptar un enfoque sectorial que pueda incluirse dentro de un acuerdo internacional, lo cual se analiza más adelante. Además, se

están llevando a cabo otros debates sobre el metano en el marco del *Compromiso Mundial sobre el Metano*, el Protocolo de Gotemburgo del Convenio sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia y la Declaración Conjunta de Glasgow de Estados Unidos y China para Reforzar la Acción Climática en la década de 2020.

A. El Compromiso Mundial sobre el Metano y el Pacto Climático de Glasgow

El *Compromiso Mundial sobre el Metano* se lanzó formalmente a nivel de Jefes de Estado en el segmento de alto nivel de la COP26 el 2 de noviembre de 2021 en Glasgow⁵⁴³. Estados Unidos y la Unión Europea anunciaron por primera vez este *Compromiso* en el Foro de las Principales Economías el 17 de septiembre de 2021⁵⁴⁴. El mismo compromete a los gobiernos a un objetivo colectivo mundial de reducción de las emisiones mundiales de metano en al menos un 30% con respecto a los niveles de 2020 para 2030. Los signatarios también se comprometen a avanzar hacia el uso de las metodologías de inventario de buenas prácticas del IPCC de más alto nivel para cuantificar las emisiones de metano, con especial atención a las fuentes de altas emisiones⁵⁴⁵. La aplicación con éxito del *Compromiso Mundial sobre el Metano* reduciría el calentamiento en al menos 0,2 °C para 2050⁵⁴⁶. Para septiembre de 2022, 120 países y la Unión Europea se habían adherido al *Compromiso*⁵⁴⁷, quienes representan aproximadamente el 70% de la economía mundial y casi la mitad de las emisiones antropogénicas⁵⁴⁸. En la COP26, el expresidente de Estados Unidos Barack Obama recordó a los asistentes que “frenar las emisiones de metano es actualmente la forma más rápida y eficaz de limitar el calentamiento”⁵⁴⁹.

En la Cumbre Especial entre Estados Unidos y la ASEAN celebrada en Washington, D.C., el 12 de mayo de 2022, Estados Unidos se comprometió a “acelerar la asistencia técnica, los recursos financieros y el desarrollo de proyectos para la mitigación del metano en los países del *Compromiso Mundial sobre el Metano*, incluso a través de la EPA, la USTDA [Agencia de Comercio y Desarrollo de Estados Unidos], la DFC [Corporación Financiera de Desarrollo] y el EXIM [Banco de Exportación e Importación], así como el recientemente creado *Global Methane Hub*”⁵⁵⁰.

Alcanzar el objetivo de reducción de emisiones establecido en el *Compromiso Mundial sobre el Metano* mantendría al planeta en una vía coherente con el objetivo de no superar los 1,5 °C, según la *Evaluación Global del Metano*⁵⁵¹. Esto equivale aproximadamente a una reducción del 35% por debajo de los niveles previstos para 2030. El despliegue de todas las medidas disponibles y adicionales podría conducir a una reducción del 45% por debajo de los niveles de 2030 para alcanzar casi 0,3 °C de calentamiento evitado en la década de 2040⁵⁵².

Es la primera vez que los Jefes de Estado se comprometen, en el marco de un *Compromiso* como el antes mencionado, a actuar con celeridad para reducir los supercontaminantes climáticos y alcanzar el objetivo de 1,5 °C de temperatura del Acuerdo de París. El Pacto de Glasgow para el Clima, acordado en la COP26, también menciona explícitamente el metano y los GEI distintos del CO². El Pacto “invita a las Partes a considerar nuevas medidas para reducir para 2030 las emisiones de gases de efecto invernadero distintos del dióxido de carbono, incluido el metano[.]”⁵⁵³ En su comunicado del 27 de mayo de 2022, los Ministros de Clima, Energía y Medio Ambiente del G7 reafirmaron su adhesión al *Compromiso Mundial sobre el Metano* y señalaron la importancia de responder “a la crisis actual, de manera coherente con nuestros objetivos climáticos y sin crear efectos de bloqueo”⁵⁵⁴.

En junio de 2022, Estados Unidos, la Unión Europea y otros 11 países pusieron en marcha la Vía Energética del Compromiso Mundial sobre el Metano, que incluye 59 millones de dólares en financiación para apoyar la reducción de metano en el sector del petróleo y el gas⁵⁵⁵. La financiación

incluye 4 millones de dólares para apoyar la Asociación Mundial para la Reducción de la Quema de Gas del Banco Mundial, 5,5 millones de dólares para apoyar la Iniciativa Global del Metano, hasta 9,5 millones de dólares del Observatorio Internacional de Emisiones de Metano del PNUMA para apoyar las evaluaciones científicas de las emisiones de metano y el potencial de mitigación, y hasta 40 millones de dólares anuales del *Global Methane Hub* filantrópico para apoyar la mitigación del metano en el sector de la energía fósil.

Estos compromisos iniciales, así como los que se describen a continuación, aumentan la conciencia sobre la oportunidad de frenar el calentamiento reduciendo el metano, los sectores implicados y el nivel de ambición necesario. Los gobiernos deberían basarse en el *Compromiso* y en la Vía Energética del *Compromiso* para abrir la puerta a un acuerdo mundial sobre el metano, incluyendo la actuación inmediata para exigir una tasa de emisiones de metano progresivamente más baja a los proveedores de “gas metano de sustitución” en respuesta a los cambios en el abastecimiento energético.

B. Medidas relativas al metano en virtud del Protocolo de Gotemburgo del Convenio sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia

El *Compromiso Mundial sobre el Metano* sienta las bases para abordar la emergencia de una reducción más concreta del metano, incluso en forma de un acuerdo mundial sobre el metano que se inspire en modelos de éxito como el Convenio de la CEPE de las Naciones Unidas sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia (LRTAP) y su Protocolo de 1999 para reducir la acidificación, la eutrofización y el ozono troposférico (Protocolo de Gotemburgo)⁵⁵⁶, que se describen a continuación.

El LRTAP es un marco de tratado regional entre Europa, América del Norte, Rusia y los países del antiguo bloque del Este para reducir la contaminación atmosférica transfronteriza y comprender la ciencia relacionada⁵⁵⁷. El metano es el último de los principales precursores del ozono que no está explícitamente controlado por el Protocolo de Gotemburgo, en su versión actual⁵⁵⁸.

Incluir el metano en el LRTAP es un tema de debate activo y debería reconocer y reforzar los esfuerzos, incluso a través de la colaboración existente de la CEPE con la CCAC, para desarrollar un acuerdo mundial sobre el metano con carácter de urgencia. La CEPE se unió a la CCAC en 2015 con el objetivo de contribuir al trabajo de esta última a través del intercambio de experiencias, conocimientos y mejores prácticas, incluso en lo que respecta al Protocolo de Gotemburgo⁵⁵⁹.

Varios órganos subsidiarios del LRTAP están estudiando las emisiones de metano, incluida la modelización de los efectos de las emisiones de metano procedentes de fuera de la región sobre los niveles de ozono en la región de la CEPE⁵⁶⁰. El LRTAP y sus ocho protocolos⁵⁶¹ reflejan una serie de innovaciones que pueden beneficiar el desarrollo de un acuerdo mundial sobre el metano. Entre ellas se encuentran: la adopción de un enfoque basado en la tecnología que incorpore medidas nacionales para reducir los contaminantes⁵⁶²; un sólido organismo científico que supervise si las Partes van en la dirección correcta para cumplir sus objetivos⁵⁶³ y un sistema dual de notificación que exige a las Partes que informen de sus emisiones anuales de contaminantes y de los avances en la aplicación de sus estrategias nacionales⁵⁶⁴. Estos mecanismos de políticas reconocen, incorporan y supervisan los esfuerzos nacionales existentes para el control de las emisiones de contaminantes atmosféricos. A la hora de desarrollar un mecanismo mundial de control de las emisiones de metano, valdrá la pena tener en cuenta los beneficios de las innovaciones del LRTAP al momento de determinar la mejor manera de reconocer las medidas existentes de los países para controlar el metano.

Si bien el LRTAP podría ser un mecanismo regional valioso para establecer controles vinculantes del metano, otras consideraciones de dicho convenio desde una perspectiva global incluyen:

- *Las Partes del LRTAP provienen de América del Norte, Europa y Asia Central y Occidental y no incluyen a varios países con emisiones significativas de metano o países en desarrollo que apoyan el Compromiso Mundial sobre el Metano.* Las Partes del LRTAP son miembros de la CEPE⁵⁶⁵. No todas las Partes del LRTAP son también Partes de los protocolos adicionales de dicho convenio. Por ejemplo, Rusia es Parte del LRTAP pero no del [Protocolo de Gotemburgo](#). Las Partes del LRTAP no incluyen a los principales países emisores de metano⁵⁶⁶, como Brasil, China, India e Irán, ni a otros [países del mundo en desarrollo que participan en el Compromiso Mundial sobre el Metano](#), como Argentina, Ghana, Indonesia, Irak, México, Nigeria y Pakistán.
- *El metano es objeto de debate activo, pero en este momento no está controlado por el LRTAP ni por ninguno de sus protocolos.* El LRTAP controla los contaminantes que contribuyen a la contaminación atmosférica transfronteriza. [Ocho protocolos](#) aclaran las obligaciones de las Partes en relación con contaminantes y actividades específicas. El Protocolo más reciente, y el más importante en torno al metano, es el Protocolo de Gotemburgo, que entró en vigor en 2005⁵⁶⁷. Los objetivos del Protocolo de Gotemburgo incluyen el control y la reducción de las emisiones de azufre, óxidos de nitrógeno, amoníaco, compuestos orgánicos volátiles (distintos del metano) y partículas causadas por actividades antropogénicas que puedan tener efectos nocivos para la salud humana y el medio ambiente, los ecosistemas naturales, los materiales, los cultivos y el clima a corto y largo plazo, debido, entre otras cosas, al ozono troposférico derivado del transporte a gran distancia de los contaminantes cubiertos⁵⁶⁸. El metano es una fuente importante de ozono troposférico y contribuye a los niveles de ozono de fondo en todo el mundo⁵⁶⁹. Aunque el metano está reconocido como precursor del ozono en el Protocolo de Gotemburgo⁵⁷⁰, actualmente no es un contaminante controlado.
- *La CEPE sigue centrándose en el papel del metano como precursor del ozono y en cómo las emisiones de metano procedentes de fuera de la CEPE afectan a la formación de ozono dentro de la CEPE.* La CEPE reconoce que el aumento mundial de las emisiones de metano procede en gran parte de países de fuera de la región de la CEPE (o de la CEPE)⁵⁷¹. La misma revisa las fuentes de las emisiones mundiales de metano, enfocándose en cómo las emisiones de las regiones no pertenecientes a la CEPE afectan al transporte y la formación de ozono dentro de la CEPE⁵⁷². Esta revisión también incluye cómo mejorar las reducciones de las emisiones de metano a través de un futuro instrumento⁵⁷³.
- *Es posible que sea necesario acelerar el proceso del LRTAP para formalizar los controles vinculantes referentes al metano con el fin de apoyar la reducción de las emisiones de metano con carácter de urgencia, al tiempo que se brindan oportunidades para la contribución, la colaboración y el apoyo a los controles mundiales de dichas emisiones.* Desde 2018, varios órganos subsidiarios del LRTAP han estado considerando emprender el trabajo relacionado con el metano. En septiembre de 2021, un Informe de Progreso Conjunto concluyó que el metano es el principal causante del aumento de los niveles de ozono de fondo, y que el sector de los residuos en Europa y el sector del petróleo y el gas en Europa del Este, Asia y Estados Unidos tienen el mayor potencial de reducción en esas regiones⁵⁷⁴. La finalización de la investigación sobre las mejores técnicas disponibles para la reducción de las emisiones y la contribución de las medidas climáticas a dicha reducción está prevista para la primavera de

2022⁵⁷⁵, y la finalización de la Revisión para diciembre de 2022⁵⁷⁶. El Proyecto de Informe sobre la Revisión del Protocolo de Gotemburgo reconoce que es necesario centrarse en mayor medida en el metano, ya que desempeña un papel clave en la sinergia entre la contaminación atmosférica y los esfuerzos de mitigación relativos al clima⁵⁷⁷. En su 41º período de sesiones en diciembre de 2021, el Órgano Ejecutivo “acordó incluir el metano en su análisis para la revisión del Protocolo [de Gotemburgo]”⁵⁷⁸. Durante su 60º período de sesiones, el Grupo de Trabajo sobre Estrategias y Revisión (WGSR, por sus siglas en inglés) tomó nota de una lista no exhaustiva de opciones para abordar el metano, que incluyen el establecimiento de compromisos nacionales de reducción de emisiones y/o el establecimiento de objetivos sectoriales de emisiones⁵⁷⁹. Además, el WGSR debatió las opciones para abordar el metano en un futuro instrumento, incluido el posible vínculo con otros organismos como el Foro de Cooperación Internacional sobre Contaminación Atmosférica⁵⁸⁰ y la Iniciativa Global del Metano⁵⁸¹. En 2022-2023, otro grupo de trabajo llevará a cabo un examen de la respuesta regional del ozono a las reducciones mundiales del metano⁵⁸².

Teniendo esto en cuenta y reconociendo que controlar del metano requiere una acción urgente, las Partes del LRTAP deberían considerar dos cosas importantes: incorporar rápidamente el metano dentro de los mecanismos existentes y apelar a un acuerdo de emergencia para tener en cuenta la naturaleza global de las emisiones y los impactos del metano.

C. Declaración Conjunta de Glasgow de Estados Unidos y China para Reforzar la Acción Climática en la década de 2020

La Declaración Conjunta de Glasgow de Estados Unidos y China para reforzar la acción climática en la década de 2020, anunciada en la COP26 el 10 de noviembre de 2021, compromete a las dos mayores economías y emisores de contaminantes climáticos a abordar conjuntamente la crisis climática mediante “acciones aceleradas en la década crítica de 2020”⁵⁸³, incluidas medidas adicionales para reducir las emisiones de metano. China acordó desarrollar un “Plan de Acción Nacional exhaustivo y ambicioso” para lograr el control y la reducción de las emisiones de metano en la década de 2020⁵⁸⁴. Ambos países también se comprometieron a “cooperar para mejorar la medición de las emisiones de metano”, a reunirse durante el primer semestre de 2022 para centrarse en cuestiones de medición y mitigación del metano⁵⁸⁵ y a establecer un Grupo de Trabajo para Reforzar la Acción Climática en la década de 2020 para hacer frente a la crisis climática, el cual se reuniría periódicamente⁵⁸⁶.

El anuncio por parte de China de un Plan de Acción Nacional para reducir las emisiones de metano en la década de 2020 es un paso importante hacia la consecución de los objetivos del *Compromiso Mundial sobre el Metano*, aunque China aún no se ha adherido formalmente al mismo. No obstante, como resultado de la Declaración Conjunta de Estados Unidos y China, las actividades que emprendan los países de dicho instrumento sin duda ayudarán a informar las políticas de mitigación y las soluciones técnicas de China con respecto al metano. También resulta importante que tanto las NDC actualizadas como la Estrategia de Medio Siglo de China enumeran acciones políticas para la reducción de GEI distintos del CO₂, incluido el metano⁵⁸⁷.

D. Un Acuerdo Mundial sobre el Metano para Abordar la Emergencia Climática y Promover la Paz y la Seguridad

En vísperas de la COP26 de Glasgow, el Parlamento Europeo pidió a la Comisión y a los Estados miembros que “negocien un acuerdo mundial vinculante sobre la mitigación del metano en la reunión de la COP 26 que se celebrará en Glasgow, en consonancia con las trayectorias modelizadas que

limitan el calentamiento global a 1,5 °C del Informe Especial del IPCC, el IE6 y la *Evaluación Global del Metano*⁵⁸⁸. Ya existe una base sólida y evolutiva para negociar un acuerdo de este tipo. Esto incluye actuar de inmediato para negociar una tasa de emisiones de metano progresivamente más baja por parte de los proveedores de “gas metano de sustitución” en respuesta a los cambios en el abastecimiento a medida que se reduce la disponibilidad de gas ruso. La base está conformada por la *Evaluación Global del Metano*, el *Compromiso Mundial sobre el Metano*; el IE6 del WGI; la voluntad de los principales líderes en pos del multilateralismo para resolver los desafíos globales sin precedentes y mantener viva la democracia; una sólida política de mitigación del metano y logros técnicos a nivel internacional, nacional y subnacional; mejores capacidades de medición y seguimiento y colaboraciones públicas y privadas durante la última década.

i. El Protocolo Montreal brinda inspiración y un modelo para el acuerdo mundial sobre el metano

El Protocolo Relativo a las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono (Protocolo de Montreal) sirve de inspiración y modelo para un acuerdo mundial obligatorio sobre el metano centrado en un sector determinado. Este Protocolo está ampliamente considerado como el acuerdo ambiental más exitoso del mundo, ya que no sólo ha puesto la capa de ozono estratosférico en vías de recuperación para 2065, sino que también ha evitado un calentamiento global al menos igual al provocado actualmente por las emisiones de CO₂⁵⁸⁹.

El Protocolo de Montreal presenta varias características que contribuyen al éxito de un acuerdo mundial sobre el metano, aunque es posible que sea necesario adoptar un enfoque diferente en el caso del metano asociado a la producción y el consumo de combustibles fósiles⁵⁹⁰. En primer lugar, el tratado impone obligaciones obligatorias a todas las Partes, tanto a las de los países desarrollados como a las de los países en desarrollo. Al mismo tiempo, aplica el principio de “responsabilidades comunes pero diferenciadas y capacidades respectivas”⁵⁹¹. Este principio se aplica concediendo a las Partes que son países en desarrollo un período de gracia, a menudo de cinco o diez años, antes de exigirles que eliminen o reduzcan progresivamente una sustancia controlada⁵⁹². El Protocolo también se aplica a través de un mecanismo de financiación específico, el Fondo Multilateral, por el que los países desarrollados asumen los “costos adicionales acordados” en que incurran los países en desarrollo al eliminar o reducir gradualmente las sustancias controladas⁵⁹³. Además del apoyo financiero a las tecnologías de sustitución, el Protocolo de Montreal proporciona ayuda financiera para reforzar las Unidades Nacionales del Ozono que funcionan en cada una de las 147 Partes que son países en desarrollo⁵⁹⁴. La oficina OzonAction del PNUMA también ofrece formación y capacitación de manera periódica a las Partes representantes de países en desarrollo, ampliando la acción y la concienciación sobre la importancia de lograr la mitigación del agotamiento de la capa de ozono y del cambio climático en el marco del Protocolo de Montreal.

Otras características importantes del Protocolo de Montreal son sus grupos de evaluación, en particular el Grupo de Evaluación Científica (SAP, por sus siglas en inglés)⁵⁹⁵ y el Grupo de Evaluación Tecnológica y Económica (GETE)⁵⁹⁶. El SAP evalúa el estado de agotamiento de la capa de ozono y la ciencia atmosférica pertinente. El GETE examina las tecnologías y los aspectos **económicos** de las alternativas a las sustancias químicas que se están eliminando, reuniendo a expertos de la industria, el gobierno y el mundo académico para encontrar soluciones e informar de forma independiente sin censura gubernamental⁵⁹⁷.

El Protocolo de Montreal fue precedido por un acuerdo marco subyacente, el Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono⁵⁹⁸. Una estrategia que involucre el desarrollo de un acuerdo

mundial sobre el metano debería contemplar y anticipar una rápida priorización y aceleración de las acciones para hacer frente a las crisis, incluidas las relacionadas con la seguridad alimentaria y la energía. No obstante, una estructura similar de marco-protocolo podría ser adecuada para un tratado mundial sobre el metano: un acuerdo marco seguido de una serie de protocolos sobre los sectores de energía, residuos y agricultura⁵⁹⁹, al tiempo que promueva la investigación y el desarrollo de estrategias para eliminar el metano de la atmósfera y contrarrestar así las emisiones naturales⁶⁰⁰.

ii. *Ya existen las bases científicas, políticas y técnicas para la negociación de un acuerdo mundial sobre el metano inspirado en el Protocolo de Montreal*

La urgencia de frenar el calentamiento a corto plazo implica que la velocidad en la selección de las soluciones climáticas debe convertirse en el factor más importante⁶⁰¹ con el fin de limitar rápidamente el calentamiento, frenar las retroalimentaciones que se refuerzan a sí mismas, evitar los puntos críticos de inflexión y proteger a las personas y los ecosistemas más vulnerables⁶⁰². El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, el IPCC⁶⁰³, la CCAC⁶⁰⁴ y el Consejo Ártico⁶⁰⁵ han contribuido a esta comprensión científica. El sexto informe de evaluación del Grupo de Trabajo II del IPCC (IE6 del WGII) destaca una seria advertencias sobre las consecuencias de un mayor retraso en la puesta en marcha de la acción mundial y la urgencia de frenar el calentamiento a corto plazo⁶⁰⁶. La *Evaluación Global del Metano* confirma que reducir las emisiones de metano es la estrategia de mitigación más rápida y la única plausible para limitar el calentamiento en las próximas dos décadas⁶⁰⁷.

En respuesta a este llamado a la acción, los gobiernos, las organizaciones y las iniciativas de colaboración de todos los niveles han creado una sólida base política y técnica para el control mundial del metano. Esta base incluye:

- **El compromiso y reconocimiento internacional que implica acciones cruciales para reducir el metano.** Por ejemplo, más de 180 de las 197 Partes del Acuerdo de París hacen referencia al metano en sus NDC⁶⁰⁸. Estados Unidos y la Unión Europea afianzaron su apoyo al *Compromiso Mundial sobre el Metano* a nivel de los principales líderes durante el Foro de las Principales Economías sobre Energía y Clima celebrado en septiembre de 2021⁶⁰⁹. En junio de 2022, Estados Unidos, la UE y otros 11 países lanzaron la Vía Energética del *Compromiso*, que incluye la concesión de financiación para apoyar las reducciones de metano en el sector del petróleo y el gas. En septiembre de 2022, este acuerdo ya contaba con 121 participantes⁶¹⁰, entre los que se encontraban países en desarrollo como Argentina, Ghana, Indonesia, Irak y México como algunos de los primeros partidarios⁶¹¹. El G20 ha reconocido que el metano es “una de las formas más rápidas, factibles y rentables de limitar el cambio climático y su impacto” y ha acordado promover la cooperación y la transparencia⁶¹². La Unión Europea se ha comprometido a reducir todas las emisiones de gases de efecto invernadero en un 55% para 2030⁶¹³ y la Comisión Europea ha hecho hincapié en la necesidad de una acción unificada y global sobre el metano⁶¹⁴. Las Partes de la Comisión Económica del LRTAP—y en particular del Protocolo de Gotemburgo—están llevando a cabo un proceso para formalizar la mitigación vinculante del metano, a la vez que ofrecen oportunidades de contribución, colaboración y apoyo a los controles mundiales del metano⁶¹⁵. Y la CCAC está reforzando activamente el proceso de comprensión y el nivel de ambición a nivel global para el control del metano a través de proyectos como la Iniciativa Emblemática sobre el Metano (*Methane Flagship*)⁶¹⁶.

- **Compromisos y acciones bilaterales y nacionales para la mitigación del metano.** Por ejemplo, Estados Unidos y China, en su *Declaración Conjunta de Glasgow para Reforzar la Acción Climática en la Década de 2020*, demostraron la capacidad de estos dos rivales económicos y políticos para encontrar un terreno común en la mitigación del metano⁶¹⁷. China anunció posteriormente sus propios planes de control de las emisiones de metano⁶¹⁸. Estas iniciativas políticas y la creciente emergencia climática subrayan la importancia de la cooperación, incluso en tiempos de crisis política,—y de cierta competencia que fomente la ambición—entre los campeones de la mitigación del metano en China y otros países⁶¹⁹. Canadá⁶²⁰ y México⁶²¹, por ejemplo, han promulgado regulaciones para las emisiones de metano del sector energético y se han sumado a Estados Unidos en el compromiso de aumentar la cooperación⁶²².
- **Esfuerzos subnacionales que inspiran medidas nacionales.** Estos esfuerzos incluyen regulaciones de algunos estados de Estados Unidos como California⁶²³, Nuevo México⁶²⁴ y Colorado⁶²⁵, y de provincias canadienses como Columbia Británica⁶²⁶. Iniciativas centradas en el clima como C40 Cities network⁶²⁷ y la Coalición Under2⁶²⁸ han unido a entidades subnacionales de todo el mundo para hacer frente a las emisiones de metano.
- **Iniciativas de Medición y Monitoreo del Metano.** El programa satelital Carbon Mapper⁶²⁹ y el Observatorio Internacional de Emisiones de Metano⁶³⁰ ya están contribuyendo a la comprensión global de los niveles de emisiones de metano que contribuyen a la emergencia climática. Estas iniciativas y las tecnologías que se describen en la **Sección 8** son esenciales para saber si el mundo se dirige en la dirección correcta para cumplir con los compromisos existentes. También proporcionan información crítica necesaria para el éxito y la solidez de la rendición de cuentas y los mecanismos de aplicación en el marco de un acuerdo mundial sobre el metano.
- **Iniciativas de colaboración público-privada en todos los niveles sobre la mitigación del metano.** Estos esfuerzos, que se analizan con mayor profundidad en la **Sección 7**, están reforzando la concienciación sobre las medidas efectivas de mitigación del metano que deben sustentar un acuerdo mundial exitoso sobre el metano. Entre ellas se incluyen, además de las iniciativas de la CCAC, la Iniciativa Global del Metano⁶³¹, la Iniciativa Climática de Petróleo y Gas⁶³² y las iniciativas de calificación del rendimiento en la mitigación de las emisiones de metano como MiQ⁶³³ y la Iniciativa para la Sostenibilidad del Gas Natural⁶³⁴.

Esta base científica, técnica y política, sumada a la inspiración del Protocolo de Montreal, proporciona la comprensión, la ambición, los ejemplos y las soluciones necesarias para desarrollar un acuerdo mundial sobre el metano.

iii. La creación y el fortalecimiento de las organizaciones necesarias para apoyar un acuerdo mundial sobre el metano pueden y deben comenzar inmediatamente en el marco de la CCAC

Con la rapidez como factor clave para las soluciones climáticas, el trabajo en las organizaciones que eventualmente apoyarán un acuerdo mundial sobre el metano no debe esperar al inicio de las negociaciones. La emergencia climática y su impacto no tienen análogos en la historia de la humanidad. Por lo tanto, la estrategia para desarrollar un acuerdo de este tipo debe contemplar y anticipar la rápida priorización y aceleración de la acción para hacer frente a las crisis, incluidas las relacionadas con la seguridad alimentaria y la energía. Este trabajo puede y debe comenzar inmediatamente. Esto incluye reforzar o crear, dentro de una organización como la CCAC que ha sido

propuesta como la Secretaría del *Compromiso Mundial sobre el Metano*, organizaciones científicas, de evaluación técnica, financieras y de creación de capacidades similares a las establecidas en el Protocolo de Montreal⁶³⁵. La creación de un régimen de control del metano basado en este exitoso modelo ayudaría a garantizar el cumplimiento de su mandato⁶³⁶.

- iv. Basándose en las sólidas bases científicas, técnicas y políticas existentes y de las organizaciones de la CCAC, las negociaciones de un acuerdo mundial sobre el metano deberían comenzar a nivel de los Jefes de Estado*

Basándose en las sólidas bases ya existentes, utilizando el Protocolo de Montreal como inspiración y modelo y empleando organizaciones desarrolladas en el seno de una organización como la CCAC, debería lanzarse un acuerdo mundial sobre el metano a nivel de los Jefes de Estado. Las negociaciones para el acuerdo deberían celebrarse con una velocidad sin precedentes. El Protocolo de Montreal se negoció en sólo nueve meses⁶³⁷ y, en marzo de 2022, el PNUMA inició las negociaciones con la ambición de concluir un acuerdo mundial para hacer frente a la contaminación por plásticos dos años después, en 2024⁶³⁸.

11. Las organizaciones financieras y filantrópicas pueden proporcionar un apoyo financiero fundamental para alcanzar objetivos y acciones ambiciosas contra el metano

Será fundamental conseguir los fondos y la financiación adecuados para apoyar a los gobiernos y a las organizaciones comprometidas con la rápida reducción del metano. Las organizaciones filantrópicas privadas, los bancos multilaterales, los gobiernos y otras partes interesadas del sector financiero juegan un papel importante a la hora de posibilitar una rápida mitigación del metano para responder a la emergencia climática.

Más de 20 organizaciones filantrópicas importantes ya se han comprometido a destinar más de 328 millones de dólares para apoyar los esfuerzos encaminados a reducir drásticamente las emisiones de metano, incluidos los esfuerzos diplomáticos basados en el *Compromiso Mundial sobre el Metano*⁶³⁹. Estas organizaciones también se comprometieron a conceder subvenciones rápidamente y a garantizar la flexibilidad de la financiación⁶⁴⁰. Como resultado, en marzo de 2022, se lanzó el *Global Methane Hub* que “apoyará y sostendrá la acción de la sociedad civil, los gobiernos y la industria privada, incluso en los más de 100 países que han firmado el *Compromiso* invirtiendo significativamente en soluciones para la reducción de metano”⁶⁴¹.

Sin embargo, cabe destacar que las soluciones de mitigación del metano siguen estando escasamente financiadas⁶⁴². Una evaluación pionera del panorama de financiación para la mitigación del metano registró alrededor de 11.600 millones de dólares en inversiones anuales durante 2019 y 2020, apenas el 2% de la financiación climática total registrada (financiación pública para el desarrollo y financiación privada relacionada con el clima, excluida la filantropía), y 10 veces menos que los 119.000 millones de dólares necesarios cada año hasta 2050 en base al costo de las medidas de mitigación fácilmente disponibles coherentes con un escenario de calentamiento de 2 °C⁶⁴³. Entre los sectores que reciben financiación, el sector de los residuos representa alrededor del 66% de la financiación para la reducción, mientras que los sectores de la agricultura y la energía reciben conjuntamente alrededor del 33% de la financiación disponible, a pesar de emitir el 82% del metano antropogénico⁶⁴⁴.

Al más alto nivel, los bancos multilaterales de desarrollo pueden apoyar a los países para que alcancen al menos un 30% de la reducción de las emisiones de metano, en consonancia con el *Compromiso Mundial sobre el Metano* y la *Evaluación Global del Metano*, incluso a través de las siguientes acciones:

- 1) Garantizar la disponibilidad de mecanismos de financiación para proyectos que reduzcan las emisiones de metano procedentes de los combustibles fósiles, los residuos y la agricultura.
- 2) Promover una evaluación del riesgo climático que incluya los puntos críticos de inflexión y las retroalimentaciones en materia climática⁶⁴⁵.
- 3) Evitar inversiones que precipiten los puntos críticos de inflexión y que no estén alineadas con el objetivo de mantener la temperatura global por debajo de 1,5 °C en la próxima década.
- 4) Introducir PCG₂₀ en la evaluación sobre el impacto climático para valorar más precisamente el impacto a corto plazo en la temperatura de las acciones para reducir el metano y otros CCVC.

Al tiempo que incorporan estas respuestas de emergencia climática en los procesos bancarios, las instituciones financieras multilaterales pueden basarse inmediatamente en sus compromisos existentes para ayudar a los países a invertir en la reducción del metano. Por ejemplo, el Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo (BERD) respaldó el *Compromiso Mundial sobre el Metano*⁶⁴⁶. El BERD ya financia proyectos verdes en sectores que provocan altas emisiones de metano, como la energía y el agronegocio⁶⁴⁷. En la presentación de dicho *compromiso*, el BERD se comprometió a ayudar a sus países de operación en sus esfuerzos para reducir el metano, incluso a través de la asistencia técnica y la financiación de proyectos para la reducción de metano⁶⁴⁸. El Banco Europeo de Inversiones y el Fondo Verde para el Clima también se comprometieron a proporcionar asistencia técnica y financiación con el objeto de apoyar el *Compromiso*⁶⁴⁹.

También será importante que los gobiernos donantes brinden apoyo financiero, incluso a través de un mecanismo específico similar al Fondo Multilateral del Protocolo de Montreal. El apoyo del Fondo Multilateral al “fortalecimiento institucional” de las unidades nacionales del ozono en los países en desarrollo “está reconocido como un factor importante para el éxito de [los países en desarrollo] en el cumplimiento de las medidas de control del Protocolo de Montreal”⁶⁵⁰. Un modelo similar para apoyar una red de “Oficinas Nacionales de Metano” podría capacitar rápidamente a los gobiernos para que puedan evaluar y actuar sobre las oportunidades de mitigación del metano en todos los sectores y países, incluyendo el desarrollo de líneas de base de las emisiones de metano, el seguimiento y el inventario de los emisores, la educación sobre el metano, la aplicación de planes de acción nacionales sobre el metano y la facilitación del vínculo con la financiación mundial y otros fondos importantes para la mitigación del metano.

A. El Fondo Fiduciario para la Resiliencia y la Sostenibilidad

El 2 de agosto de 2021, la Junta de Gobernadores del Fondo Monetario Internacional (FMI) aprobó la asignación general anticipada de Derechos Especiales de Giro (DEG) por un valor de \$456.000 millones (equivalentes a 605.000 millones de dólares)⁶⁵¹. Aunque se trata de un logro histórico del FMI bajo la dirección de su Directora Gerente, Kristalina Georgieva, la gran mayoría de los DEG se destinan a países de renta alta debido al sistema de cuotas del Fondo. Reconociendo esta deficiencia, los líderes del G7 se comprometieron a redirigir \$100.000 millones de DEG a los países más necesitados de recursos para hacer frente a la pandemia del COVID-19 y para estabilizar sus economías y emprender una recuperación ecológica y global que esté en consonancia con los objetivos compartidos en materia de desarrollo y clima⁶⁵².

El 13 de octubre de 2021, en la reunión del G20 celebrada en Roma, los líderes mundiales emitieron la Declaración de los Líderes, en la que solicitaban al FMI la creación de un Fondo Fiduciario para la Resiliencia y la Sostenibilidad (FFRS). En esta Declaración, los Líderes del G20 detallaron que el FFRS “proporcionaría financiación asequible a largo plazo para ayudar a los países de renta baja... y a los países vulnerables de renta media a reducir los riesgos para la estabilidad prospectiva de balanza de pagos, incluidos los derivados de pandemias y del cambio climático”⁶⁵³. Esta fue la primera vez que los Jefes de Estado del G20 pidieron al FMI que cumpla una función en la reducción de los riesgos económicos provocados por el cambio climático.

El Directorio Ejecutivo del FMI aprobó la creación del FFRS el 13 de abril de 2022⁶⁵⁴. Este Fondo complementará el actual conjunto de instrumentos de préstamo de dicho fondo, que se centra en los retos estructurales a más largo plazo, como el cambio climático y la preparación para enfrentar las pandemias. Su objetivo es mejorar la resiliencia y la sostenibilidad económicas mediante: 1) el apoyo de la reforma de políticas para reducir los riesgos macrocríticos asociados con los retos estructurales a más largo plazo; y 2) la ampliación del espacio de políticas y los colchones financieros para mitigar los riesgos derivados de dichos retos estructurales a más largo plazo—contribuyendo así a la *estabilidad prospectiva de balanza de pagos*⁶⁵⁵.

El FMI reconoce que el cambio climático es un reto estructural a largo plazo que hará a los países más propensos a sufrir graves problemas relativos a la balanza de pagos debido al aumento de la probabilidad y el impacto de futuras perturbaciones y el menoscabo de las perspectivas de crecimiento⁶⁵⁶. El FFRS puede financiar, entre otras cosas, los costos de las inversiones públicas y/o privadas relacionadas con el clima, como la rehabilitación energética de los edificios existentes, los costos relacionados con la transición a las tecnologías verdes y los costos de compensación de las políticas destinadas a garantizar una transición justa, como la prestación de asistencia social mientras los gobiernos retiran las subvenciones al carbono⁶⁵⁷. El FMI colaborará con el Banco Mundial y los bancos multilaterales de desarrollo regionales para establecer las prioridades políticas y la condicionalidad. Las medidas del FFRS se basarán y serán coherentes con los diagnósticos de país elaborados tanto por el FMI como por el Banco Mundial en relación con los objetivos del FFRS⁶⁵⁸.

Alrededor de las tres cuartas partes de los miembros del FMI podrán postularse para recibir la financiación del FFRS, incluidos los países de renta baja, los pequeños Estados en desarrollo y vulnerables y los países de renta media baja⁶⁵⁹. El límite de acceso será de 1.000 millones de DEG. Los préstamos tendrán un plazo de vencimiento de 20 años y un período de gracia de 10 años y medio.

Los recursos del FFRS se movilizarán a partir de las contribuciones voluntarias de sus miembros⁶⁶⁰. Estará listo para iniciar operaciones de préstamo una vez que alcance una masa crítica de recursos procedentes de una amplia base de contribuyentes y cuando se hayan implantado sistemas y procesos financieros sólidos, lo que se prevé que ocurra a finales de 2022⁶⁶¹. Sus necesidades totales de recursos se estiman en 33.000 millones de DEG (equivalentes a 45.000 millones de dólares).

El marco propuesto para establecer el FFRS no menciona específicamente la mitigación de las emisiones de metano entre los proyectos que podrían beneficiarse de la financiación de este Fondo. Sin embargo, el texto de la propuesta es lo suficientemente amplio como para abarcar la acción contra el metano. Debería alentarse al FMI y a sus miembros, con la orientación del Banco Mundial, a destinar fondos a la reforma de políticas dirigidas a la mitigación de las emisiones de metano.

En particular, el FFRS podría proporcionar apoyo financiero a los países en sus esfuerzos por reducir el metano y crear las condiciones de mercado para la inversión del sector privado en este sentido. Por

ejemplo, el FFRS podría incluir la posibilidad de asignar DEG a países de renta media que tengan la capacidad de catalizar financiación de bajo costo para aplicar el *Compromiso Mundial sobre el Metano*. El FFRS también debería mejorar la capacidad de los países de renta media para movilizar financiación a más largo plazo para transiciones justas en sectores con altas emisiones de metano. Estos aspectos de diseño deben realizarse sin aumentar la carga de la deuda del receptor del DEG.

A medida que el FMI establece el FFRS para reducir el riesgo climático, debe mantener la ciencia climática como el núcleo de sus esfuerzos. El diseño, la implementación y la medición del éxito del FFRS deben guiarse por los últimos avances científicos sobre la emergencia climática, el riesgo climático y la trayectoria hacia una zona climáticamente segura, incluida la mitigación rápida y a corto plazo del metano. A través de su mandato, el FFRS podría incorporar el objetivo de reducir el riesgo climático para la estabilidad prospectiva de balanza de pagos reduciendo la tasa de calentamiento a la mitad en la próxima década.

El Congreso de Estados Unidos ha propuesto aportar 21 millones de dólares al Fondo Fiduciario para el Crecimiento y la Lucha contra la Pobreza o al Fondo Fiduciario para la Resiliencia y la Sostenibilidad⁶⁶². El 18 de agosto de 2022, China anunció su voluntad de recanalizar 10.000 millones de dólares de sus DEG a “los dos fondos fiduciarios del FMI” y dirigir sus contribuciones a África⁶⁶³. El FMI espera poner en funcionamiento el FFRS en octubre de 2022⁶⁶⁴.

B. El Grupo del Banco Mundial

El Grupo del Banco Mundial (GBM) es el mayor proveedor de financiación climática para los países en desarrollo. En 2018, el GBM anunció una nueva serie de objetivos relacionados con el clima para el período comprendido entre 2021 y 2025, “con el que duplica las inversiones en el actual período de cinco años para llevarlas hasta unos USD 200.000 millones a fin de apoyar a los países para que adopten medidas de gran envergadura en materia de cambio climático”⁶⁶⁵. Los 200.000 millones de dólares se componen de “alrededor de USD 100.000 millones en financiamiento directo del Banco Mundial, más aproximadamente USD 100.000 millones en financiamiento directo combinado” de la Corporación Financiera Internacional y el Organismo Multilateral de Garantía de Inversiones, así como de capital privado movilizad por el GBM⁶⁶⁶.

Los últimos informes del IPCC ofrecen una oportunidad para que el GBM revise su [Plan de Acción sobre el Cambio Climático \(2021-2025\)](#) y realinee su cartera con el objetivo de mantener la temperatura en 1,5 °C conforme al l Acuerdo de París, centrándose en la emergencia climática, los puntos críticos de inflexión y los bucles de retroalimentación, y dando prioridad a las inversiones en estrategias de mitigación rápida dado que son esenciales para aumentar la resiliencia y reducir el riesgo climático⁶⁶⁷.

El GBM también podría comenzar a incorporar la utilización de métricas que capturen el impacto a corto plazo del metano y de otros CCVC en la temperatura, tales como el PCG₂₀, en todo su trabajo de promoción de los mercados de carbono⁶⁶⁸.

En 2012, el G8 acordó encargar al GBM que evaluara mecanismos innovadores de pago por desempeño para hacer frente al metano⁶⁶⁹. Un informe del Grupo de Estudio sobre el Financiamiento del Metano apoyó la creación de un mecanismo para el metano⁶⁷⁰. En su fase de diseño y desarrollo, el [Mecanismo Piloto de Subasta para la Mitigación del Cambio Climático y la Reducción de las Emisiones de Metano](#) (PAF, por sus siglas en inglés) contó con el apoyo de la *Coalición Clima y Aire Limpio*⁶⁷¹. Este mecanismo completó tres subastas para asignar un precio garantizado para futuros

créditos de carbono en forma de opción de venta negociable, dos para la reducción de las emisiones de metano del sector de los residuos y una para la reducción de las emisiones de óxido nítrico procedentes de la producción de ácido nítrico⁶⁷². Las tres subastas asignaron hasta 54 millones de dólares, lo que se tradujo en una reducción de hasta 20,6 millones de toneladas métricas de CO₂eq (al utilizar el PCG₁₀₀ se subestima el impacto climático del metano). Los principales contribuyentes al PAF fueron Alemania, Suecia, Suiza (a través de una contribución conjunta de la Secretaría de Estado de Economía y la Fundación Climate Cent) y Estados Unidos⁶⁷³. El *Compromiso Mundial sobre el Metano* podría brindar la oportunidad de seguir explorando este tipo de mecanismos de financiación.

La Corporación Financiera Internacional financia proyectos de mitigación del metano. Por ejemplo, el 29 de julio de 2022, hizo pública su financiación para 24 proyectos de conversión de gas de vertedero en energía que se llevarán a cabo en 10 provincias de China⁶⁷⁴. Se calcula que el proyecto reducirá unas 3,4 mtCO₂e de GEI mediante la captura de metano⁶⁷⁵. Su Programa de Bonos Verdes ofrece financiación para proyectos relacionados con la reducción del metano centrados en la ganadería, la acuicultura, la quema de gas y la conversión de residuos en energía, entre la lista de proyectos que pueden recibir financiación⁶⁷⁶. Sin embargo, la Corporación Financiera Internacional podría avanzar más y actualizar sus [Normas de Desempeño sobre Sostenibilidad Ambiental y Social](#) y sus [Definiciones y Métricas para Actividades Relacionadas con el Clima](#) utilizando los datos científicos más recientes sobre la emergencia climática, incorporando los puntos críticos de inflexión y los bucles de retroalimentación en su definición de riesgo climático para que su oferta de financiación se mantenga actualizada.

Además, el Organismo Multilateral de Garantía de Inversiones, miembro del GBM que ofrece garantías a largo plazo⁶⁷⁷, puede apoyar la adopción rápida y permanente de soluciones para las emisiones de metano. Muchas de las acciones para reducir las emisiones de metano implican inversiones a largo plazo. Asimismo, este organismo podría elaborar un plan para ampliar su producto de optimización de capital con el objeto de apoyar una serie de préstamos para la mitigación del metano y desplegar una estrategia para atraer la asociación de bancos comerciales en proyectos clave.

C. Una estrategia de financiación mundial para hacer frente a la crisis climática

En la COP26, la Primera Ministra de Barbados, Mia Mottley, presentó un plan de financiación para hacer frente a la emergencia climática. La Primera Ministra Mottley, que también es Copresidenta del Comité de Desarrollo del Banco Mundial y del FMI, señaló que:

“Los bancos centrales de los países más ricos han realizado \$25 trillones de expansión cuantitativa en los últimos 13 años. \$25 trillones. De ellos, en los últimos 18 meses, \$9 trillones se destinaron a la lucha contra la pandemia. Si hubiéramos utilizado esos \$25 trillones para comprar bonos con el fin de financiar la transición energética, o el cambio de alimentación, o de la manera en que nos transportamos, ahora, hoy, estaríamos logrando ese límite de 1,5 grados que es tan vital para nosotros”⁶⁷⁸. [La traducción al español nos pertenece]

La Primera Ministra Mottley propuso un aumento anual de DEG de \$500.000 millones al año durante veinte años, que se depositarían en un fondo fiduciario para financiar la transición. Señaló que \$500.000 millones son sólo el 2% de los \$25 trillones que los bancos centrales de los países más ricos han comprometido en los últimos 13 años⁶⁷⁹.

La propuesta incluye el diseño de un fondo fiduciario de \$500.000 millones que operaría en base a un sistema de subastas para lograr una mayor mitigación climática y que incluiría al sector privado

en sus criterios de elegibilidad. La Primera Ministra Mottley sigue abogando por la creación de este fondo fiduciario que, para hacer frente verdaderamente a la emergencia climática, debe dar prioridad a la reducción de las emisiones de metano.

12. Conclusión

Reducir las emisiones de metano es la mejor manera que conocemos de frenar el calentamiento global en los próximos 20 años. Alcanzar el objetivo de hasta 0,3 °C de calentamiento evitado para mantener el límite de 1,5°C dentro de nuestro alcance requiere crear mecanismos técnicos, financieros y de gobernanza. El *Compromiso Mundial sobre el Metano* y los objetivos relacionados representan pasos importantes para lograr un acuerdo mundial en esta materia. Mientras tanto, es necesario tomar medidas inmediatas para exigir a los proveedores de “gas metano de sustitución” una tasa de emisiones de metano progresivamente más baja en respuesta a los cambios en las importaciones de gas metano de los países. La mejora de los sistemas de control añaden transparencia, pero debe ir acompañada de una estrategia de responsabilidad y cumplimiento que incentive la reducción efectiva de las emisiones, conectando a los emisores con la capacidad técnica y financiera necesarias. El presente *Manual sobre el Metano* expone la urgencia, las oportunidades y los elementos clave para fundar una base sólida con el fin de elaborar un acuerdo mundial sobre el metano, que debería ser el objetivo final si deseamos frenar el calentamiento global durante esta década.

References

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-36 (“Strong, rapid and sustained reductions in CH₄ emissions would also limit the warming effect resulting from declining aerosol pollution and would improve air quality.”). See also Naik V., et al. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7 (“Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*). {6.6.3, 6.7.3, 4.4.4}”).

² Naik V., et al. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7, 6-8 (“Across the SSPs, the collective reduction of CH₄, ozone precursors and HFCs can make a difference of global mean surface air temperature of 0.2 with a very likely range of [0.1–0.4] °C in 2040 and 0.8 with a very likely range of [0.5–1.3] °C at the end of the 21st century (comparing SSP3-7.0 and SSP1-1.9), which is substantial in the context of the Paris Agreement. Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*). {6.6.3, 6.7.3, 4.4.4}”; “Additional CH₄ and BC mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with SO₂ reductions that would accompany decarbonization (*high confidence*).”).

³ Solomon S., Daniel J. S., Sanford T. J., Murphy D. M., Plattner G.-K., Knutti R., & Friedlingstein P. (2010) *Persistence of climate changes due to a range of greenhouse gases*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 107(43): 18354–18359, 18357 (“In the case of a gas with a 10-y lifetime, for example, energy is slowly stored in the ocean during the period when concentrations are elevated, and this energy is returned to the atmosphere from the ocean after emissions cease and radiative forcing decays, keeping atmospheric temperatures somewhat elevated for several decades. Elevated temperatures last longer for a gas with a 100-y lifetime because, in this case, radiative forcing and accompanying further ocean heat uptake continue long after emissions cease. As radiative forcing decays further, the energy is ultimately restored from the ocean to the atmosphere. Fig. 3 shows that the slow timescale of ocean heat uptake has two important effects. It limits the transfer of energy to the ocean if emissions and radiative forcing occur only for a few decades or a century. However, it also implies that any energy that is added to the ocean remains available to be transferred back to the atmosphere for centuries after cessation of emissions.”).

⁴ Dreyfus G. B., Xu Y., Shindell D. T., Zaelke D., & Ramanathan V. (2022) *Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 119(22): e2123536119, 1–8, 1 (“We find that mitigation measures that target only decarbonization are essential for strong long-term cooling but can result in weak near-term warming (due to unmasking the cooling effect of co-emitted aerosols) and lead to temperatures exceeding 2°C before 2050. In contrast, pairing decarbonization with additional mitigation measures targeting short-lived climate pollutants (SLCPs) and N₂O, slows the rate of warming a decade or two earlier than decarbonization alone and avoids the 2°C threshold altogether. These non-CO₂ targeted measures when combined with decarbonization can provide net cooling by 2030, reduce the rate of warming from 2030 to 2050 by about 50%, roughly half of which comes from methane, significantly larger than decarbonization alone over this timeframe.”); (“Aggressive decarbonization to achieve net-zero CO₂ emissions in the 2050s (as in the decarb-only scenario) results in weakly accelerated net warming compared to the reference case, with a positive warming up to 0.03 °C in the mid-2030s, and no net avoided warming until the mid-2040s due to the reduction in co-emitted cooling aerosols (Figure 3a). By 2050, decarbonization measures result in very limited net avoided warming (0.07°C), consistent with Shindell and Smith (43), but rise to a likely detectable 0.25°C by 2060 and a major benefit of 1.4°C by 2100 (Table S5). In contrast, pairing decarbonization with mitigation measures targeting CH₄, BC, HFC, and N₂O (not an SLCP due to its longer lifetime) independent from decarbonization are essential to slowing the rate of warming by the 2030s to under 0.3°C per decade (Table 1, Figure 3b), similar to the 0.2°C to 0.25°C per decade warming prior to 2020 (38, 53). Recent studies suggest that rate of warming rather than level of warming controls likelihood of record-shattering extreme weather events (54, 55). By 2050, the net avoided warming from the targeted non-CO₂ measures is 0.26°C, almost 4 times larger than the net benefit of decarbonization alone (0.07°C) (Table S5).”). See also Xu Y. & Ramanathan V. (2017) *Well below 2 °C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 114(39): 10315–

10323, 10321 (“Constrained by CO₂ lifetime and the diffusion time of new technologies (decades), the scenarios considered here (SI Appendix, Fig. S2A) suggest that about half of the 2.6 °C CO₂ warming in the baseline-fast scenario can be mitigated by 2100 and only 0.1–0.3 °C can be mitigated by 2050... The SP [super pollutant] lever targets SLCPs. Reducing SLCP emissions thins the SP blanket within few decades, given the shorter lifetimes of SLCPs (weeks for BC to about 15 years for HFCs). The mitigation potential of the SP lever with a maximum deployment of current technologies ... is about 0.6 °C by 2050 and 1.2 °C by 2100 (SI Appendix, Fig. S5B and Table S1).”); and Naik V., *et al.* (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 6-6 (“Over time scales of 10 to 20 years, the global temperature response to a year’s worth of current emissions of SLCPs is at least as large as that due to a year’s worth of CO₂ emissions (*high confidence*).”).

⁵ United Nations Environment Programme & World Meteorological Organization (2011) *INTEGRATED ASSESSMENT OF BLACK CARBON AND TROPOSPHERIC OZONE*, 254, 262 (“Evaluating global mean temperature change, it was found that the targeted measures to reduce emissions of methane and BC could greatly reduce warming rates over the next few decades (Figure 6.1; Box 6.1). When all measures are fully implemented, warming during the 2030s relative to the present would be only half as much as in the reference scenario. In contrast, even a fairly aggressive strategy to reduce CO₂ emissions, as for the CO₂-measures scenario, does little to mitigate warming until after the next 20-30 years (Box 6.2).”; “Large impacts of the measures examined here were also seen for the Arctic despite the minimal amount of emissions currently taking place there. This occurs due to the high sensitivity of the Arctic both to pollutants that are transported there from remote sources and to radiative forcing that takes place in areas of the northern hemisphere outside the Arctic. The 16 measures examined here, including the measures on pellet stoves and coal briquettes, reduce warming in the Arctic by 0.7 °C (range 0.2 to 1.3 °C) at 2040. This is a large portion of the 1.1 °C (range 0.7 to 1.7 °C) warming projected under the reference scenario for the Arctic, and hence implementation of the measures would be virtually certain to substantially slow, but not halt, the pace of Arctic climate change.”). See also Shindell D., *et al.* (2012) *Simultaneously Mitigating Near-Term Climate Change and Improving Human Health and Food Security*, *SCIENCE* 335(6065): 183–189, 184–185 (“The global mean response to the CH₄ plus BC measures was $-0.54 \pm 0.05^{\circ}\text{C}$ in the climate model. ...Roughly half the forcing is relatively evenly distributed (from the CH₄ measures). The other half is highly inhomogeneous, especially the strong BC forcing, which is greatest over bright desert and snow or ice surfaces. Those areas often exhibit the largest warming mitigation, making the regional temperature response to aerosols and ozone quite distinct from the more homogeneous response to well-mixed greenhouse gases.... BC albedo and direct forcings are large in the Himalayas, where there is an especially pronounced response in the Karakoram, and in the Arctic, where the measures reduce projected warming over the next three decades by approximately two thirds and where regional temperature response patterns correspond fairly closely to albedo forcing (for example, they are larger over the Canadian archipelago than the interior and larger over Russia than Scandinavia or the North Atlantic).”).

⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), Figure SPM.2.

⁷ Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, *ENVIRON. SCI. POLICY* 134: 127–136, 128 (“The increase in atmospheric CH₄ observed over the past decade has been tracking RCP8.5, the warmest scenario assessed by the IPCC, which yields an estimated 4.3°C of warming globally by 2100 (Jackson *et al.*, 2020; Saunio *et al.*, 2020; Nisbet *et al.*, 2020). Furthermore, there is no reversal of this trend on the horizon: under current policy scenarios, by 2050 CH₄ emissions are expected to increase by 30% compared to 2015 levels (Höglund-Isaksson *et al.*, 2020). Together with recent trends, these prognoses serve to underscore the urgency of mitigating CH₄ emissions.”).

⁸ National Oceanic and Atmospheric Administration (7 April 2022) *Increase in atmospheric methane set another record during 2021* (“NOAA’s preliminary analysis showed the annual increase in atmospheric methane during 2021 was 17 parts per billion (ppb), the largest annual increase recorded since systematic measurements began in 1983. The increase during 2020 was 15.3 ppb. Atmospheric methane levels averaged 1,895.7 ppb during 2021, or around 162% greater than pre-industrial levels.”). See also Vaughan A. (7 January 2022) *Record levels of greenhouse gas methane are a ‘fire alarm moment’*, *NEW SCIENTIST* (“According to data compiled by the US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), average atmospheric concentrations of methane reached a record 1900 parts per billion (ppb) in September

2021, the highest in nearly four decades of records. The figure stood at 1638 ppb in 1983.”); and Pultarova T. (11 January 2022) *Satellites reveal record high methane concentrations despite reduction pledges*, SPACE.

⁹ Xu Y., Ramanathan V., & Victor D. G. (2018) *Global warming will happen faster than we think*, Comment, NATURE 564(7734): 30–32, 30–31 (“But the latest IPCC special report underplays another alarming fact: global warming is accelerating. Three trends—rising emissions, declining air pollution and natural climate cycles—will combine over the next 20 years to make climate change faster and more furious than anticipated. In our view, there’s a good chance that we could breach the 1.5 °C level by 2030, not by 2040 as projected in the special report (see ‘Accelerated warming’). The climate-modelling community has not grappled enough with the rapid changes that policymakers care most about, preferring to focus on longer-term trends and equilibria.”). Since Xu, Ramanathan, and Victor Comment was published, the IPCC has updated its estimate for when 1.5 °C will be exceeded: see Arias P. A., et al. (2021) *Technical Summary, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), TS-9 (“Timing of crossing 1.5°C global warming: Slightly different approaches are used in SR1.5 and in this Report. SR1.5 assessed a likely range of 2030 to 2052 for reaching a global warming level of 1.5°C (for a 30-year period), assuming a continued, constant rate of warming. In AR6, combining the larger estimate of global warming to date and the assessed climate response to all considered scenarios, the central estimate of crossing 1.5°C of global warming (for a 20-year period) occurs in the early 2030s, ten years earlier than the midpoint of the likely range assessed in the SR1.5, assuming no major volcanic eruption. (TS.1.3, Cross-Section Box TS.1)”).

¹⁰ Madge G. (8 May 2022) *Temporary breaching of 1.5C in next five years?*, UK MET OFFICE (“The chance of at least one year exceeding 1.5°C above pre-industrial levels between 2022–2026 is about as likely as not (48%). However, there is only a very small chance (10%) of the five-year mean exceeding this threshold.”); discussing World Meteorological Organization (2022) *Global Annual to Decadal Climate Update*. See also Hook L. (9 May 2022) *World on course to breach global 1.5C warming threshold within five years*, FINANCIAL TIMES.

¹¹ Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, NATURE 575(7784): 592–595, 594 (“In our view, the clearest emergency would be if we were approaching a global cascade of tipping points that led to a new, less habitable, ‘hothouse’ climate state¹¹. Interactions could happen through ocean and atmospheric circulation or through feedbacks that increase greenhouse-gas levels and global temperature.”). See also Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) *Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points*, SCIENCE 377(6611): eabn7950, 1–10, 7 (“Current warming is ~1.1°C above preindustrial and even with rapid emission cuts warming will reach ~1.5°C by the 2030s (23). We cannot rule out that WAIS and GrIS tipping points have already been passed (see above) and several other tipping elements have minimum threshold values within the 1.1 to 1.5°C range. Our best estimate thresholds for GrIS, WAIS, REEF, and abrupt permafrost thaw (PFAT) are ~1.5°C although WAIS and GrIS collapse may still be avoidable if GMST returns below 1.5°C within an uncertain overshoot time (likely decades) (94).”); and Wunderling N., Donges J. F., Kurths J., & Winkelmann R. (2021) *Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming*, EARTH SYST. DYN. 12(2): 601–619, 614 (“In this study, we show that this risk increases significantly when considering interactions between these climate tipping elements and that these interactions tend to have an overall destabilising effect. Altogether, with the exception of the Greenland Ice Sheet, interactions effectively push the critical threshold temperatures to lower warming levels, thereby reducing the overall stability of the climate system. The domino-like interactions also foster cascading, non-linear responses. Under these circumstances, our model indicates that cascades are predominantly initiated by the polar ice sheets and mediated by the AMOC. Therefore, our results also imply that the negative feedback loop connecting the Greenland Ice Sheet and the AMOC might not be able to stabilise the climate system as a whole.”).

¹² Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers, in CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., et al. (eds.), SPM-11, SPM-13 (“Approximately 3.3 to 3.6 billion people live in contexts that are highly vulnerable to climate change (*high confidence*).”; “Levels of risk for all Reasons for Concern (RFC) are assessed to become high to very high at lower global warming levels than in AR5 (*high confidence*). Between 1.2°C and 4.5°C global warming level very high risks emerge in all five RFCs compared to just two RFCs in AR5 (*high confidence*). Two of these transitions from high to very high risk are associated with near-term warming: risks to unique and threatened systems at a median value of 1.5°C [1.2 to 2.0] °C (*high confidence*) and risks

associated with extreme weather events at a median value of 2°C [1.8 to 2.5] °C (*medium confidence*). Some key risks contributing to the RFCs are projected to lead to widespread, pervasive, and potentially irreversible impacts at global warming levels of 1.5–2°C if exposure and vulnerability are high and adaptation is low (*medium confidence*).”; “SPM.B.3 Global warming, reaching 1.5°C in the near-term, would cause unavoidable increases in multiple climate hazards and present multiple risks to ecosystems and humans (*very high confidence*). The level of risk will depend on concurrent near-term trends in vulnerability, exposure, level of socioeconomic development and adaptation (*high confidence*).”).

¹³ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 17 (“Mitigation of methane is very likely the strategy with the greatest potential to decrease warming over the next 20 years.”).

¹⁴ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 21 (“This is because a realistically paced phase-out of fossil fuels, or even a rapid one under aggressive decarbonization, is likely to have minimal net impacts on near-term temperatures due to the removal of co-emitted aerosols (Shindell and Smith 2019). As methane is the most powerful driver of climate change among the short-lived substances (Myhre et al. 2013), mitigation of methane emissions is very likely to be the most powerful lever in reducing near-term warming. This is consistent with other assessments; for example, the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (IPCC AR5) showed that methane controls implemented between 2010 and 2030 would lead to a larger reduction in 2040 warming than the difference between RCPs 2.6, 4.5 and 6.0 scenarios. (The noted IPCC AR5-era scenarios are called representative concentration pathways (RCPs, with the numerical value indicating the target radiative forcing in 2100 (Kirtman et al. 2013)).”). *See also* Ocko I. B., Sun T., Shindell D., Oppenheimer M., Hristov A. N., Pacala S.W., Mauzerall D. L., Xu Y., & Hamburg S. P. (2021) [Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming](#), ENVIRON. RES. LETT. 16(5): 054042, 1–11, 1 (“Pursuing all mitigation measures now could slow the global-mean rate of near-term decadal warming by around 30%, avoid a quarter of a degree centigrade of additional global-mean warming by midcentury, and set ourselves on a path to avoid more than half a degree centigrade by end of century. On the other hand, slow implementation of these measures may result in an additional tenth of a degree of global-mean warming by midcentury and 5% faster warming rate (relative to fast action), and waiting to pursue these measures until midcentury may result in an additional two tenths of a degree centigrade by midcentury and 15% faster warming rate (relative to fast action).”); and Shindell D. & Smith C. J. (2019) [Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels](#), NATURE 573: 408–411, Addendum “Methods” (“We note that, although this study focuses on the effects of fossil-fuel related emissions, accounting for the effects of reductions in greenhouse gases from non-fossil sources—including fluorinated gases and both methane and nitrous oxide from agriculture—along with biofuels that are a large source of warming black carbon, could eliminate any near-term penalty entirely. In fact, given that the net effect of the fossil-fuel phase-out on temperature is minimal during the first 20 years (Fig. 3), reducing those other emissions is the only plausible way in which to decrease warming during that period.”).

¹⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) [Summary for Policymakers](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-36 (“Strong, rapid and sustained reductions in CH₄ emissions would also limit the warming effect resulting from declining aerosol pollution and would improve air quality.”). *See also* Naik V., et al. (2021) [Chapter 6: Short-lived climate forcers](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7 (“Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*). {6.6.3, 6.7.3, 4.4.4}”).

¹⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) [Summary for Policymakers](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE](#), Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Shukla P. R., et al. (eds.), SPM-30–SPM-31 (“Deep GHG emissions reductions by 2030 and 2040, particularly reductions of methane emissions, lower peak warming, reduce the likelihood of overshooting warming limits and lead to less reliance on net negative CO₂ emissions that reverse warming in the latter half of the century..... Future non-CO₂ warming depends on reductions in non-CO₂ GHG, aerosol and their precursor, and ozone precursor emissions. In modelled global low emission pathways, the projected reduction of cooling and warming aerosol emissions over time leads to net warming in the near- to mid-term. In these mitigation pathways, the projected

reductions of cooling aerosols are mostly due to reduced fossil fuel combustion that was not equipped with effective air pollution controls. Non-CO₂ GHG emissions at the time of net zero CO₂ are projected to be of similar magnitude in modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) or lower. These non-CO₂ GHG emissions are about 8 [5–11] GtCO₂-eq per year, with the largest fraction from CH₄ (60% [55–80%]), followed by N₂O (30% [20–35%]) and F-gases (3% [2–20%]). [FOOTNOTE 52] Due to the short lifetime of CH₄ in the atmosphere, projected deep reduction of CH₄ emissions up until the time of net zero CO₂ in modelled mitigation pathways effectively reduces peak global warming. (*high confidence*) {3.3, AR6 WG I SPM D1.7}”).

¹⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., et al. (eds.), SPM-22 (“C.1.2 In modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) assuming immediate action, global net CO₂ emissions are reduced compared to modelled 2019 emissions by 27% [11–46%] in 2030 and by 52% [36–70%] in 2040; and global CH₄ emissions are reduced by 24% [9–53%] in 2030 and by 37% [20–60%] in 2040. In pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot global net CO₂ emissions are reduced compared to modelled 2019 emissions by 48% [36–69%] in 2030 and by 80% [61–109%] in 2040; and global CH₄ emissions are reduced by 34% [21–57%] in 2030 and 44% [31–63%] in 2040. There are similar reductions of non-CO₂ emissions by 2050 in both types of pathways: CH₄ is reduced by 45% [25–70%]; N₂O is reduced by 20% [-5 – 55%]; and F-Gases are reduced by 85% [20–90%]. [FOOTNOTE 44] Across most modelled pathways, this is the maximum technical potential for anthropogenic CH₄ reductions in the underlying models (*high confidence*). Further emissions reductions, as illustrated by the IMP-SP pathway, may be achieved through changes in activity levels and/or technological innovations beyond those represented in the majority of the pathways (*medium confidence*). Higher emissions reductions of CH₄ could further reduce peak warming. (*high confidence*) (Figure SPM.5) {3.3}”).

¹⁸ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 9 (“Currently available measures could reduce emissions from [the fossil-fuel, waste, and agriculture] sectors by approximately 180 Mt/yr, or as much as 45 per cent, by 2030. This is a cost-effective step required to achieve the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) 1.5° C target. According to scenarios analysed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), global methane emissions must be reduced by between 40–45 per cent by 2030 to achieve least cost-pathways that limit global warming to 1.5° C this century, alongside substantial simultaneous reductions of all climate forcers including carbon dioxide and short-lived climate pollutants. (Section 4.1)”). See also DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggstad C., & Ulanov A. (2021) *CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT*, McKinsey Sustainability (“According to our analysis, five industries could take actions that would have a significant impact on methane emissions, reducing annual methane emissions by 20 percent by 2030 and by 46 percent by 2050. This impact could be achieved largely with established technologies and at a reasonable cost: 90 percent of these reductions could come at a cost of less than \$25 per metric ton of carbon dioxide equivalent (tCO₂e).”).

¹⁹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 10 (“The levels of methane mitigation needed to keep warming to 1.5°C will not be achieved by broader decarbonization strategies alone. The structural changes that support a transformation to a zero-carbon society found in broader strategies will only achieve about 30 per cent of the methane reductions needed over the next 30 years. Focused strategies specifically targeting methane need to be implemented to achieve sufficient methane mitigation. At the same time, without relying on future massive-scale deployment of unproven carbon removal technologies, expansion of natural gas infrastructure and usage is incompatible with keeping warming to 1.5°C. (Sections 4.1, 4.2 and 4.3)”).

²⁰ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 10 (“Roughly 60 per cent, around 75 Mt/yr, of available targeted measures have low mitigation costs², and just over 50 per cent of those have negative costs – the measures pay for themselves quickly by saving money (Figure SDM2). Low-cost abatement potentials range from 60–80 per cent of the total for oil and gas, from 55–98 per cent for coal, and approximately 30–60 per cent in the waste sector. The greatest potential for negative cost abatement is in the oil and gas subsector where captured methane adds to revenue instead of being released to the atmosphere. (Section 4.2)”; “Less than US\$ 600 per tonne of methane reduced, which would

correspond to ~US\$ 21 per tonne of carbon dioxide equivalent if converted using the IPCC Fifth Assessment Report's GWP₁₀₀ value of 28 that excludes carbon-cycle feedbacks.”).

²¹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 87 (“Analysis of the technical potential to mitigate methane from four separate studies shows that for 2030, reductions of 29–57 Mt/yr could be made in the oil and gas subsector, 12–25 Mt/yr from coal mining, 29–36 Mt/yr in the waste sector and 6–9 Mt/yr from rice cultivation. Values for the livestock subsector are less consistent, ranging from 4–42 Mt/yr.”).

²² United States Climate Alliance (2018) *FROM SLCP CHALLENGE TO ACTION: A ROADMAP FOR REDUCING SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS TO MEET THE GOALS OF THE PARIS AGREEMENT*, 102 (“Within the waste sector, all cost abatement potential is concentrated within the solid waste subsector which has three to six times the potential found in the wastewater (sewage) subsector (Figure 4.9). Totals in the three available analyses are very similar for the full waste sector, so that the full range is captured by 32 ± 4 Mt/ yr. Hence this sector has about half the potential of the fossil sector for all cost measures and a much narrower uncertainty range. Evaluating this mitigation potential as a share of projected 2030 waste sector emissions is complicated by a large divergence between them, which were ~70 Mt/yr in the Harmsen and US EPA analyses, whereas there was a much larger value of 114 Mt/yr in the IIASA analysis. Hence although all the studies find similar abatement potential, the share of 2030 emissions from waste estimated to be abatable ranges from just 25 per cent in the IIASA analysis to ~40-50 per cent in the US EPA and Harmsen analyses. For low-cost measures in the waste sector, the analyses are again fairly consistent with all falling within the range 16 ± 5 Mt/yr.”).

²³ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 87 (“Analysis of the technical potential to mitigate methane from four separate studies shows that for 2030, reductions of 29–57 Mt/yr could be made in the oil and gas subsector, 12–25 Mt/yr from coal mining, 29–36 Mt/yr in the waste sector and 6–9 Mt/yr from rice cultivation. Values for the livestock subsector are less consistent, ranging from 4–42 Mt/yr.”).

²⁴ Lowe M. & Lowe-Skillern R. (2021) *Find, Measure, Fix: Jobs in the U.S. Methane Emissions Mitigation Industry*, Datu Research, 6 (“Methane emissions mitigation means jobs. A wide and steadily expanding range of skills are required, from field technicians to chemical engineers to data scientists. Interviews with firms indicate that these jobs offer upward mobility. Many firms expect to expand their workforce if new federal and/or state methane rules are put into place. Of the eight states that either have methane rules or are considering them, seven are among the top states for employee locations in the methane emissions mitigation industry, including California, Colorado, Pennsylvania, New York, Wyoming, New Mexico, and Ohio. This would suggest that employee locations are poised to grow if the federal government and/or states roll out new rules on methane emissions.”).

²⁵ United States Department of State (11 October 2021) *Joint U.S.-EU Statement on the Global Methane Pledge*, Press Release (“Countries joining the Global Methane Pledge commit to a collective goal of reducing global methane emissions by at least 30 percent from 2020 levels by 2030 and moving towards using highest tier IPCC good practice inventory methodologies to quantify methane emissions, with a particular focus on high emission sources. Successful implementation of the Pledge would reduce warming by at least 0.2 degrees Celsius by 2050.”).

²⁶ The *Global Methane Pledge* calls for reducing global methane emissions by at least 30 percent from 2020 levels by 2030, which is comparable to 35 percent reduction below 2030 business-as-usual projections and within the range found to be consistent with 1.5 °C pathways in Figure ES.1 of the *Global Methane Assessment*. See United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*; and United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *Briefing on the Global Methane Pledge* (“The Global Methane Pledge is a strong first step as the first-ever Heads-of State global commitment to cut methane emissions at a level consistent with a 1.5 C pathway.”).

²⁷ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 8 (“Available targeted methane measures, together with additional measures that contribute to priority development goals, can simultaneously reduce human-caused methane emissions by as much as 45 per cent, or 180 million tonnes a year (Mt/yr) by 2030. This will avoid nearly 0.3°C of global warming by the 2040s and complement all long-term climate change mitigation efforts.”).

²⁸ von Braun J., Ramanathan V., & Turkson P. K. A. (2022) *Resilience of people and ecosystems under climate stress*, Pontifical Academy of Sciences (“Recommendations: *Resilience building must rest on three pillars*: Mitigation, Adaptation & Transformation. Mitigation: *Reduce climate risks*... . Adaptation: *Reduce exposure and vulnerability to unavoidable climate risks*. Exposure & vulnerability reduction has three faces: Reductions in sensitivity to climate change; Reductions in risk exposure; & enhancement of adaptive capacity. There are limits to adaptation and hence adaptation has to be integrated with mitigation actions to avoid crossing the limits.”); where the definition of resilience is taken from Möller V., van Diemen R., Matthews J. B. R., Méndez C., Semenov S., Fuglestedt J. S., & Resinger A. (2022) *Annex II: Glossary*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY*, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Minterbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), AII-37–AII-38 (“The capacity of interconnected social, economic and ecological systems to cope with a hazardous event, trend or disturbance, responding or reorganising in ways that maintain their essential function, identity and structure. Resilience is a positive attribute when it maintains capacity for adaptation, learning and/or transformation (Arctic Council, 2016).”).

²⁹ Zaelke D., Piccolotti R., & Dreyfus G. (14 November 2021) *Glasgow climate summit: A glass half full*, THE HILL (“The new architecture also includes cutting not just carbon dioxide but also non-carbon dioxide climate emissions, with a specific focus on methane, a super climate pollutant responsible for 0.5 degrees Celsius of today’s observed warming of 1.1 degrees Celsius. Cutting methane presents the *single biggest and fastest mitigation action* the world can take to keep warming from breaching the 1.5 degrees Celsius guardrail. This makes fast reductions of methane essential for adaptation as well.”). See also Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY*, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., et al. (eds.), SPM-13 (“Near-term actions that limit global warming to close to 1.5°C would substantially reduce projected losses and damages related to climate change in human systems and ecosystems, compared to higher warming levels, but cannot eliminate them all (*very high confidence*).”); and Intergovernmental Panel on Climate Change (2018) *GLOBAL WARMING OF 1.5 °C, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 22 (“Social justice and equity are core aspects of climate-resilient development pathways that aim to limit global warming to 1.5°C as they address challenges and inevitable trade-offs, widen opportunities, and ensure that options, visions, and values are deliberated, between and within countries and communities, without making the poor and disadvantaged worse off (*high confidence*).”).

³⁰ Mbow C., et al. (2019) *Chapter 5: Food Security*, in *CLIMATE CHANGE AND LAND, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*, Shukla P. R., et al. (eds.), 451 (“Methane increases surface ozone which augments warming-induced losses and some quantitative analyses now include climate, long-lived (CO₂) and multiple short-lived pollutants (CH₄, O₃) simultaneously (Shindell et al. 2017; Shindell 2016). Reduction of tropospheric ozone and black carbon can avoid premature deaths from outdoor air pollution and increases annual crop yields (Shindell et al. 2012). These actions plus methane reduction can influence climate on shorter time scales than those of carbon dioxide reduction measures. Implementing them substantially reduces the risks of crossing the 2°C threshold and contributes to achievement of the SDGs (Haines et al. 2017; Shindell et al. 2017).”; “Ozone causes damage to plants through damages to cellular metabolism that influence leaf-level physiology to whole-canopy and root-system processes and feedbacks.... Using atmospheric chemistry and a global integrated assessment model, Chuwah et al. (2015) found that without a large decrease in air pollutant emissions, high ozone concentration could lead to an increase in crop damage of up to 20% in agricultural regions in 2050 compared to projections in which changes in ozone are not accounted for. Higher temperatures are associated with higher ozone concentrations; C3 crops are sensitive to ozone (e.g., soybeans, wheat, rice, oats, green beans, peppers, and some types of cottons) and C4 crops are moderately sensitive (Backlund et al. 2008).”). See also Climate & Clean Air Coalition, *Tropospheric ozone (last visited 31 August 2022)* (“79–121 million: Estimated global crop production losses owing to ozone total 79–121 million tonnes, worth USD 11–18 billion annually... 1 million: Long-term exposure to ozone air pollution is linked to 1 million premature deaths per year due to respiratory diseases.”).

³¹ Luna M. & Nicholas D. (2022) *An environmental justice analysis of distribution-level natural gas leaks in Massachusetts, USA*, ENERGY POLICY 162(112778): 1–23, 1 (“Using recently available high resolution leak data, this analysis of natural gas leaks across the state of Massachusetts shows that People of Color, limited English speaking

households, renters, lower income residents, and adults with lower levels of education are disproportionately exposed to natural gas leaks and that their leaks take longer to repair, as compared to the general population, and particularly as compared to White residents and to homeowners. This pattern is evident for all leaks in the state, for leaks disaggregated by leak class or grade, and for leaks disaggregated by utility. This analysis shows that natural gas leaks are an environmental justice issue warranting further study and policy attention.”); *discussed in* Segal E. (17 February 2022) *New Research Shines Light On Natural Gas Leak Crisis*, FORBES. *See also* United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 11 (“This assessment found that every million tonnes (Mt) of methane reduced: - prevents approximately 1 430 annual premature deaths due to ozone globally. Of those, 740 would have died from respiratory disease and 690 from cardiovascular disease. Every million tonnes of reduced methane emissions could also avoid approximately 4 000 asthma-related accident and emergency department visits and 90 hospitalizations per year. (Section 3.4) - avoids losses of 145 000 tonnes of wheat, soybeans, maize and rice ozone exposure every year. This is roughly equivalent to increased global yields of 55 000 tonnes of wheat, 17 000 tonnes of soybeans, 42 000 tonnes of maize, and 31 000 tonnes of rice annually for every million tonnes of methane reduced. (Section 3.5)”).

³² Dreyfus G. B., Xu Y., Shindell D. T., Zaelke D., & Ramanathan V. (2022) *Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 119(22): e2123536119, 1–8, 1 (“We find that mitigation measures that target only decarbonization are essential for strong long-term cooling but can result in weak near-term warming (due to unmasking the cooling effect of co-emitted aerosols) and lead to temperatures exceeding 2°C before 2050. In contrast, pairing decarbonization with additional mitigation measures targeting short-lived climate pollutants (SLCPs) and N₂O, slows the rate of warming a decade or two earlier than decarbonization alone and avoids the 2°C threshold altogether. These non-CO₂ targeted measures when combined with decarbonization can provide net cooling by 2030, reduce the rate of warming from 2030 to 2050 by about 50%, roughly half of which comes from methane, significantly larger than decarbonization alone over this timeframe.”).

³³ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-36 (“Strong, rapid and sustained reductions in CH₄ emissions would also limit the warming effect resulting from declining aerosol pollution and would improve air quality.”). *See also* Naik V., et al. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-8 (“Additional CH₄ and BC mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with SO₂ reductions that would accompany decarbonization (*high confidence*).”); and Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., et al. (eds.), SPM-31 (“In modelled global low emission pathways, the projected reduction of cooling and warming aerosol emissions over time leads to net warming in the near- to mid-term. In these mitigation pathways, the projected reductions of cooling aerosols are mostly due to reduced fossil fuel combustion that was not equipped with effective air pollution controls.”).

³⁴ Saunio M., et al. (2020) *The Global Methane Budget 2000-2017*, EARTH SYST. SCI. DATA 12(3): 1561–1623, 1561 (“For the 2008–2017 decade, global methane emissions are estimated by atmospheric inversions (a top-down approach) to be 576 Tg CH₄ yr⁻¹ (range 550–594, corresponding to the minimum and maximum estimates of the model ensemble). Of this total, 359 Tg CH₄ yr⁻¹ or ~ 60 % is attributed to anthropogenic sources, that is emissions caused by direct human activity (i.e. anthropogenic emissions; range 336–376 Tg CH₄ yr⁻¹ or 50 %–65 %).”).

³⁵ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 28 (“Fossil fuels: release during oil and gas extraction, pumping and transport of fossil fuels accounts for roughly 23 per cent of all anthropogenic emissions, with emissions from coal mining contributing 12 per cent.”).

³⁶ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 28 (“Agriculture: emissions from enteric fermentation and manure management represent roughly 32 per cent of global anthropogenic emissions. Rice cultivation adds another 8 per cent to anthropogenic emissions. Agricultural waste burning contributes about 1 per cent or less.”).

³⁷ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 28 (“Waste: landfills and waste management represents the next largest component making up about 20 per cent of global anthropogenic emissions.”).

³⁸ Saunio M., *et al.* (2020) *The Global Methane Budget 2000-2017*, EARTH SYST. SCI. DATA 12(3): 1561–1623, 1561 (“For the 2008–2017 decade, global methane emissions are estimated by atmospheric inversions (a top-down approach) to be 576 Tg CH₄ yr⁻¹ (range 550–594, corresponding to the minimum and maximum estimates of the model ensemble). Of this total, 359 Tg CH₄ yr⁻¹ or ~ 60 % is attributed to anthropogenic sources, that is emissions caused by direct human activity (i.e. anthropogenic emissions; range 336–376 Tg CH₄ yr⁻¹ or 50 %–65 %).”).

³⁹ Canadell J. G., *et al.* (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 5-66 (“This new assessment, based on studies included in or published since SROCC (Schaefer *et al.*, 2014; Koven *et al.*, 2015c; Schneider von Deimling *et al.*, 2015; Schuur *et al.*, 2015; MacDougall and Knutti, 2016a; Gasser *et al.*, 2018; Yokohata *et al.*, 2020), estimates that the permafrost CO₂ feedback per degree of global warming (Figure 5.29) is 18 (3.1–41, 5th–95th percentile range) PgC °C⁻¹. The assessment is based on a wide range of scenarios evaluated at 2100, and an assessed estimate of the permafrost CH₄-climate feedback at 2.8 (0.7–7.3 5th–95th percentile range) Pg C_{eq} °C⁻¹ (Figure 5.29). This feedback affects the remaining carbon budgets for climate stabilisation and is included in their assessment (Section 5.5.2).”). *See also* Lan X., Nisbet E. G., Dlugokencky E. J., & Michel S. E. (2021) *What do we know about the global methane budget? Results from four decades of atmospheric CH₄ observations and the way forward*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 20200440, 1–14, 11 (“Explaining the renewed and accelerating increase in atmospheric CH₄ burden since 2007 remains challenging, and the exact causes are not yet clear. But, the observations we describe suggest that increased emissions from microbial sources are the strongest driver, with a relatively smaller contribution from other processes, e.g., fossil fuel exploitation. A more difficult question to answer is the one posed by this special issue: is warming feeding the warming? We cannot say for certain, but we cannot rule out the possibility that climate change is increasing CH₄ emissions. The strong signals from the tropics combined with the isotopic data are consistent with increased emissions from natural wetlands, but large [interannual variability (IAV)] and inter-decadal variability in wetland drivers like precipitation make it difficult to identify small trends. Observations are needed that will help process models capture this variability. The size of the IAV illustrates the potential scope of uncontrollable near-future change and emphasizes the urgency of reducing the global methane burden by mitigating the methane emissions that we can control, from the fossil fuel and agricultural sectors.”). However, other studies suggest a more limited increase in recent emissions from natural wetlands compared to agriculture and waste and energy production sectors, *see* Zhang Z., *et al.* (2021) *Anthropogenic emissions are the main contribution to the rise of atmospheric methane (1993-2017)*, NAT’L SCI. REV. 9(5): nwab200, 1–13, 1 (“Our emission scenarios that have the fewest biases with respect to isotopic composition suggest that the agriculture, landfill, and waste sectors were responsible for 53±13% of the renewed growth over the period 2007-2017 compared to 2000-2006; industrial fossil fuel sources explained an additional 34±24%, and wetland sources contributed the least at 13±9%. The hypothesis that a large increase in emissions from natural wetlands drove the decrease in atmospheric δ¹³C-CH₄ values cannot be reconciled with current process-based wetland CH₄ models. This finding suggests the need for increased wetland measurements to better constrain the contemporary and future role of wetlands in the rise of atmospheric methane and climate feedbacks. Our findings highlight the predominant role of anthropogenic activities in driving the growth of atmospheric CH₄ concentrations.”).

⁴⁰ Jackson R. B., *et al.* (2021) *Atmospheric methane removal: a research agenda*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 20200454, 1–17, 1 (“Atmospheric methane removal may be needed to offset continued methane release and limit the global warming contribution of this potent greenhouse gas. Eliminating most anthropogenic methane emissions is unlikely this century, and sudden methane release from the Arctic or elsewhere cannot be excluded, so technologies for negative emissions of methane may be needed. Carbon dioxide removal (CDR) has a well-established research agenda, technological foundation and comparative modelling framework [23–28]. No such framework exists for methane removal. We outline considerations for such an agenda here. We start by presenting the technological Mt CH₄ yr⁻¹ considerations for methane removal: energy requirements (§2a), specific proposed technologies (§2b), and air processing and scaling requirements (§2c). We then outline the climate and air quality impacts and feedbacks of methane removal (§3a) and argue for the creation of a Methane Removal Model Intercomparison Project (§3b), a multi-model framework that would better quantify the expected impacts of methane removal. In §4, we discuss some broader implications of methane

removal.”). *See also* Abernethy S., O’Connor F. M., Jones C. D., & Jackson R. B. (2021) *Methane removal and the proportional reductions in surface temperature and ozone*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 20210104, 1–13, 6 (“Due to the temporal nature of effective cumulative removal, comparisons between methane and carbon dioxide depend on the timescale of interest. The equivalent of MCR for carbon dioxide, the TCRC, is $0.00048 \pm 0.0001^\circ\text{C}$ per Pg CO_2 [38], two orders of magnitude smaller than our MCR estimate of $0.21 \pm 0.04^\circ\text{C}$ per effective Pg CH_4 removed (figure 2). Accounting for the time delay for carbon dioxide removal due to the lagged response of the deep ocean, the TCRC for CO_2 removal may be even lower [39]. If 1 year of anthropogenic emissions was removed (0.36 Pg CH_4 [3] and 41.4 Pg CO_2 [40]), the transient temperature impact would be almost four times larger for methane than for CO_2 (0.075°C compared to 0.02°C). Using this example, however, maintaining a steady-state response of 0.36 Pg CH_4 effectively removed would require the ongoing removal of roughly $0.03 \text{ Pg } \text{CH}_4 \text{ yr}^{-1}$, since a removal rate of E/τ is required to maintain an effective cumulative removal of E .”).

⁴¹ Lauvaux T., Giron C., Mazzolini M., d’Aspremont A., Duren R., Cusworth D., Shindell D., & Ciais P. (2022) *Global assessment of oil and gas methane ultra-emitters*, SCIENCE 375(6580): 557–561, 578, 561 (“On the basis of adjusted emissions, O&G ultra-emitter estimates represent 8 to 12% of global O&G CH_4 emissions (according to national inventories; Fig. 2C), a contribution not included in most current inventories (13).”; “In terms of net climate benefits, eliminating methane emissions from ultra-emitters would lead to $0.005^\circ \pm 0.002^\circ\text{C}$ of avoided warming over the next one to three decades on the basis of linearized estimates from prior modeling (38). Though small, this value is approximately equal to the total influence from all emissions since 2005 from Australia or the Netherlands (39), or removal of 20 million vehicles from the road for 1 year. The avoided warming would prevent $\sim 1600 \pm 800$ premature deaths annually due to heat exposure and $\sim 1.3 \pm 0.9$ billion hours of labor productivity lost annually due to exposure to heat and humidity, with the latter valued at $\sim \$200$ million per year.”). Note that IEA estimates about 3.5 Mt of methane emissions from the oil and gas sector based on satellite data, representing 6% of IEA’s estimate of oil and gas emissions from the 15 countries where such emission events were detected. Recall that IEA uses a scaling approach to estimate emissions and found 70% higher emissions than officially reported. *See* International Energy Agency (2022) *GLOBAL METHANE TRACKER 2022*, 6 (“Globally, our analysis finds that methane emissions from the energy sector are about 70% greater than the sum of estimates submitted by national governments.”); 16 (“Accounting for the level of satellite coverage, very large emitting events detected by satellite are estimated to have been responsible for around 3.5 Mt of emissions from oil and gas operations in 2021 (6% of our estimate of oil and gas emissions in the 15 countries where events were detected).”).

⁴² Abernethy S. & Jackson R. B. (2022) *Global temperature goals should determine the time horizons for greenhouse gas emission metrics*, ENVIRON. RES. LETT. 17(2): 024019, 1–10, 7 (“Although NDCs and long-term national pledges are currently insufficient to keep warming below 2°C , let alone 1.5°C [50–52], the time horizons used for emission metrics should nevertheless be consistent with that central goal of the Paris Agreement. We therefore support the use of the 20 year time horizon over the 100 year version, when binary choices between these two must be made, due to the better alignment of the former with the temperature goals of the Paris Agreement. The 50 year time horizon, not yet in widespread use but now included in IPCC AR6, is in fact the only time horizon that the IPCC presents that falls within the range of time horizons that align with the Paris Agreement temperature goals (24–58 years). However, to best align emission metrics with the Paris Agreement 1.5°C goal, we recommend the use of the 24 year time horizon, using 2045 as the end point time, with its associated $\text{GWP}_{1.5^\circ\text{C}} = 75$ and $\text{GTP}_{1.5^\circ\text{C}} = 41$.”). *See also* Abernethy S. (14 March 2022) *Why don’t people realize how bad methane is for climate change? Bad math*, SAN FRANCISCO CHRONICLE; *discussed in* McKenna P. (9 February 2022) *To Counter Global Warming, Focus Far More on Methane, a New Study Recommends*, INSIDE CLIMATE NEWS (“The Environmental Protection Agency is drastically undervaluing the potency of methane as a greenhouse gas when the agency compares methane’s climate impact to that of carbon dioxide, a new study concludes. The EPA’s climate accounting for methane is ‘arbitrary and unjustified’ and three times too low to meet the goals set in the Paris climate agreement, the research report, published Wednesday in the journal *Environmental Research Letters*, found.”); *and* Rathi A. (15 February 2022) *The Case Against Methane Emissions Keeps Getting Stronger*, BLOOMBERG.

⁴³ Limiting warming to 1.5°C with little or no overshoot requires reducing global methane emissions by 34% [21–57%, range from modelled scenarios] in 2030 compared to 2019 levels, which is consistent with achieving and exceeding the *Global Methane Pledge* collective target. *See* Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., *et al.* (eds.), SPM-22 (“In

pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot global net CO₂ emissions are reduced compared to modelled 2019 emissions by 48% [36–69%] in 2030 and by 80% [61–109%] in 2040; and global CH₄ emissions are reduced by 34% [21–57%] in 2030 and 44% [31–63%] in 2040. There are similar reductions of non-CO₂ emissions by 2050 in both types of pathways: CH₄ is reduced by 45% [25–70%]; N₂O is reduced by 20% [-5 – 55%]; and F-Gases are reduced by 85% [20–90%]. [FOOTNOTE 44] Across most modelled pathways, this is the maximum technical potential for anthropogenic CH₄ reductions in the underlying models (*high confidence*). Further emissions reductions, as illustrated by the IMP-SP pathway, may be achieved through changes in activity levels and/or technological innovations beyond those represented in the majority of the pathways (*medium confidence*). Higher emissions reductions of CH₄ could further reduce peak warming. (*high confidence*) (Figure SPM.5) {3.3}”).

⁴⁴ Hook L. & Campbell C. (23 August 2022) *Methane hunters: what explains the surge in the potent greenhouse gas?*, FINANCIAL TIMES (“If you think of fossil fuel emissions as putting the world on a slow boil, methane is a blow torch that is cooking us today,” says Durwood Zaelke, president of the Institute for Governance & Sustainable Development, and an advocate of stricter policies to reduce methane emissions. “The fear is that this is a self-reinforcing feedback loop.... If we let the earth warm enough to start warming itself, we are going to lose this battle.”).

⁴⁵ Feng Z., Xu Y., Kobayashi K., Dai L., Zhang T., Agathokleous E., Calatayud V., Paoletti E., Mukherjee A., Agrawal M., Park R. J., Oak Y. J., & Yue X. (2022) *Ozone pollution threatens the production of major staple crops in East Asia*, NAT. FOOD 3: 47–56, 47 (“East Asia is a hotspot of surface ozone (O₃) pollution, which hinders crop growth and reduces yields. Here, we assess the relative yield loss in rice, wheat and maize due to O₃ by combining O₃ elevation experiments across Asia and air monitoring at about 3,000 locations in China, Japan and Korea. China shows the highest relative yield loss at 33%, 23% and 9% for wheat, rice and maize, respectively. The relative yield loss is much greater in hybrid than inbred rice, being close to that for wheat. Total O₃-induced annual loss of crop production is estimated at US\$63 billion.”). See also United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 68 (“Methane also plays a significant role in reducing crop yields and the quality of vegetation. Ozone exposure is estimated to result in yield losses in wheat, 7.1 per cent; soybean, 12.4 per cent; maize, 6.1 per cent; and rice, 4.4 per cent for near present-day global totals (Mills et al. 2018; Shindell et al. 2016; Avnery et al. 2011a)”; and Shindell D., Faluvegi G., Kasibhatla P., & Van Dingenen R. (2019) *Spatial Patterns of Crop Yield Change by Emitted Pollutant*, EARTH’S FUTURE 7(2): 101–112, 101 (“Our statistical modeling indicates that for the global mean, climate and composition changes have decreased wheat and maize yields substantially whereas rice yields have increased. Well-mixed greenhouse gasses drive most of the impacts, though aerosol-induced cooling can be important, particularly for more polluted area including India and China. Maize yield losses are most strongly attributable to methane emissions (via both temperature and ozone).”).

⁴⁶ Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, ENVIRON. SCI. POLICY 134: 127–136, 129 (“Methane is an important contributor to the formation of tropospheric O₃. In addition to acting as a greenhouse gas and being directly harmful to human health (see Section 3.3), it also harms plants by causing cellular damage within the leaves, adversely affecting plant production, reducing the rate of photosynthesis, and requiring increased resource allocation to detoxify and repair leaves (Ashmore, 2005, Sitch et al., 2007). This results in an estimated \$11–\$18 billion worth of global crop losses annually (Avnery et al., 2011). Beyond this, however, O₃ damage to plants may significantly reduce the ability of terrestrial ecosystems to absorb carbon, negating some of the enhanced carbon uptake due to CO₂ fertilization that is expected to partially offset rising atmospheric CO₂ concentrations (Sitch et al., 2007, Ciaies et al., 2013, Arneeth et al., 2010, Ainsworth et al., 2012).”).

⁴⁷ Based upon IGSD’s research involving the UNFCCC NDC Registry, as of 23 August 2022, 184 NDCs directly reference methane. Of these, 28 NDCs include quantitative sectoral or economy-wide methane-reduction targets. See IGSD NDC tracker. See also Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, ENVIRON. SCI. POLICY 134: 127–136, 131 (“A closer look into the NDCs shows that some go beyond simply listing CH₄ under the scope of covered gases and provide more detailed information on CH₄ mitigation. For instance, a number of NDCs include sector-specific policies in the areas of agriculture, waste, oil and gas, and coal that will reduce CH₄ emissions (Ross et al., 2018; Walderdorff, 2020). An even smaller number of NDCs include a quantitative, CH₄-specific reduction target, such as Canada, Japan, and New Zealand. Table 2 provides a summary of NDCs that include a quantitative descriptor of CH₄ mitigation as of January 1, 2021. While some of the NDCs shown in Table 2 include true quantitative CH₄ reduction targets, others quantify the potential for CH₄ reductions, or specify goals expressed in terms of efficiency or intensity. In aggregate, very few NDCs provide concrete

or quantitative details on CH₄ mitigation activities – indeed, the NDCs summarized in Table 2 are among those that provide the greatest amount of specificity on CH₄ mitigation, which still tends to be very little.”). IGSD makes the following note re: the following three countries included in Mar *et al.* (2022): • Afghanistan: Afghanistan included methane reduction targets within its quantitative emissions reductions goals, but this is not reflected in Mar *et al.* (2022); • China: China’s 2016 Intended NDC included a numeric target for coal-bed methane capture, but this target is absent from its updated 2021 submission; China was therefore not included as a country with a numeric methane target; and • Dominica: Dominica’s Intended NDC included plans to install methane capture at a landfill. This project was slated for 2016–2021, but project completion remains unconfirmed.

⁴⁸ For a list of Global Methane Pledge participants, *see* <https://www.globalmethanepledge.org/#pledges>.

⁴⁹ United States Department of State (2 November 2021) *United States, European Union, and Partners Formally Launch Global Methane Pledge to Keep 1.5°C Within Reach*, Press Release (“Today, the United States, the European Union, and partners formally launched the Global Methane Pledge, an initiative to reduce global methane emissions to keep the goal of limiting warming to 1.5 degrees Celsius within reach. A total of over 100 countries representing 70% of the global economy and nearly half of anthropogenic methane emissions have now signed onto the pledge.”). *See also* International Energy Agency (2022) *GLOBAL METHANE TRACKER 2022*, 19 (“Led by the United States and the European Union, the Pledge now has 111 country participants who together are responsible for 45% of global human-caused methane emissions.”).

⁵⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), Figure SPM.2.

⁵¹ National Oceanic and Atmospheric Administration (7 April 2021) *Despite pandemic shutdowns, carbon dioxide and methane surged in 2020*, NOAA Research News (“NOAA’s preliminary analysis showed the annual increase in atmospheric methane for 2020 was 14.7 parts per billion (ppb), which is the largest annual increase recorded since systematic measurements began in 1983.”).

⁵² Vaughan A. (7 January 2022) *Record levels of greenhouse gas methane are a ‘fire alarm moment’*, NEW SCIENTIST (“According to data compiled by the US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), average atmospheric concentrations of methane reached a record 1900 parts per billion (ppb) in September 2021, the highest in nearly four decades of records. The figure stood at 1638 ppb in 1983.”).

⁵³ White House (18 September 2021) *Joint US-EU Press Release on the Global Methane Pledge*, Statements and Releases (“Methane is a potent greenhouse gas and, according to the latest report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, accounts for about half of the 1.0 degree Celsius net rise in global average temperature since the pre-industrial era. Rapidly reducing methane emissions is complementary to action on carbon dioxide and other greenhouse gases, and is regarded as the single most effective strategy to reduce global warming in the near term and keep the goal of limiting warming to 1.5 degrees Celsius within reach.”).

⁵⁴ Naik V., *et al.* (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcings*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 6-47 (“For methane emissions, in addition to their direct effect, there are indirect positive ERFs from methane enhancing its own lifetime, causing ozone production, enhancing stratospheric water vapor, and influencing aerosols and the lifetimes of HCFCs and HFCs (Myhre *et al.*, 2013b; O’Connor *et al.*, 2021). The ERF from methane emissions is considerably higher than the ERF estimate resulting from its abundance change. The central estimate with the very likely range is 1.21 (0.90 to 1.51) W m⁻² for emission-based estimate versus 0.54 W m⁻² for abundance-based estimate (cf. section 7.3.5). The abundance-based ERF estimate for CH₄ results from contributions of its own emissions and the effects of several other compounds, some decreasing CH₄ lifetime, notably NO_x, which importantly reduce the CH₄ abundance-based ERF.”). *See also* Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, ENVIRON. SCI. POLICY 134: 127–136, 129 (*see* Table 1 on Present-day anthropogenic radiative forcing directly and indirectly attributable to CH₄ and its chemistry, showing that the radiative forcing contributed by methane to ozone formation, CO₂ formation, increased

stratospheric water vapor, and reduction in sulfate aerosol formation are 0.241 W m^{-2} , 0.018 W m^{-2} , 0.05 W m^{-2} , and 0.1 W m^{-2} , respectively.).

⁵⁵ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 17, 21 (“Mitigation of methane is very likely the strategy with the greatest potential to decrease warming over the next 20 years.”; “This is because a realistically paced phase-out of fossil fuels, or even a rapid one under aggressive decarbonization, is likely to have minimal net impacts on near-term temperatures due to the removal of co-emitted aerosols (Shindell and Smith 2019). As methane is the most powerful driver of climate change among the short-lived substances (Myhre et al. 2013), mitigation of methane emissions is very likely to be the most powerful lever in reducing near-term warming. This is consistent with other assessments; for example, the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (IPCC AR5) showed that methane controls implemented between 2010 and 2030 would lead to a larger reduction in 2040 warming than the difference between RCPs 2.6, 4.5 and 6.0 scenarios. (The noted IPCC AR5-era scenarios are called representative concentration pathways (RCPs, with the numerical value indicating the target radiative forcing in 2100 (Kirtman et al. 2013)).”). See also Shindell D. & Smith C. J. (2019) *Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels*, NATURE 573: 408–411, Addendum “Methods” (“We note that, although this study focuses on the effects of fossil-fuel related emissions, accounting for the effects of reductions in greenhouse gases from non-fossil sources—including fluorinated gases and both methane and nitrous oxide from agriculture—along with biofuels that are a large source of warming black carbon, could eliminate any near-term penalty entirely. In fact, given that the net effect of the fossil-fuel phase-out on temperature is minimal during the first 20 years (Fig. 3), reducing those other emissions is the only plausible way in which to decrease warming during that period.”).

⁵⁶ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 8 (“Reducing human-caused methane emissions is one of the most cost-effective strategies to rapidly reduce the rate of warming and contribute significantly to global efforts to limit temperature rise to 1.5°C . Available targeted methane measures, together with additional measures that contribute to priority development goals, can simultaneously reduce human-caused methane emissions by as much as 45 per cent, or 180 million tonnes a year (Mt/yr) by 2030. This will avoid nearly 0.3°C of global warming by the 2040s and complement all long-term climate change mitigation efforts. It would also, each year, prevent 255 000 premature deaths, 775 000 asthma related hospital visits, 73 billion hours of lost labour from extreme heat, and 26 million tonnes of crop losses globally.”).

⁵⁷ Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, NATURE 575(7784): 592–595, 592 (“Models suggest that the Greenland ice sheet could be doomed at 1.5°C of warming³, which could happen as soon as 2030. ...The world’s remaining emissions budget for a 50:50 chance of staying within 1.5°C of warming is only about 500 gigatonnes (Gt) of CO_2 . Permafrost emissions could take an estimated 20% (100 Gt CO_2) off this budget, and that’s without including methane from deep permafrost or undersea hydrates. If forests are close to tipping points, Amazon dieback could release another 90 Gt CO_2 and boreal forests a further 110 Gt CO_2 . With global total CO_2 emissions still at more than 40 Gt per year, the remaining budget could be all but erased already. ...We argue that the intervention time left to prevent tipping could already have shrunk towards zero, whereas the reaction time to achieve net zero emissions is 30 years at best. Hence we might already have lost control of whether tipping happens. A saving grace is that the rate at which damage accumulates from tipping — and hence the risk posed — could still be under our control to some extent.”). See also Ripple W. J., Wolf C., Newsome T. M., Gregg J. W., Lenton T. M., Palomo I., Eikelboom J. A. J., Law B. E., Huq S., Duffy P. B., & Rockström J. (2021) *World Scientists’ Warning of a Climate Emergency 2021*, BIOSCIENCE 71(9): biab079, 894–898, 894 (“There is also mounting evidence that we are nearing or have already crossed tipping points associated with critical parts of the Earth system, including the West Antarctic and Greenland ice sheets, warm-water coral reefs, and the Amazon rainforest.”).

⁵⁸ Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) *Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points*, SCIENCE 377(6611): eabn7950, 1–10, 7 (“Current warming is $\sim 1.1^\circ\text{C}$ above preindustrial and even with rapid emission cuts warming will reach $\sim 1.5^\circ\text{C}$ by the 2030s (23). We cannot rule out that WAIS and GrIS tipping points have already been passed (see above) and several other tipping elements have minimum threshold values within the 1.1 to 1.5°C range. Our best estimate thresholds for GrIS, WAIS, REEF, and abrupt permafrost thaw (PFAT) are $\sim 1.5^\circ\text{C}$ although WAIS and

GrIS collapse may still be avoidable if GMST returns below 1.5°C within an uncertain overshoot time (likely decades (94)).”).

⁵⁹ Here we use “climate tipping points” to mean abrupt shifts, as in Drijfhout *et al.* (2015). Armstrong McKay *et al.* (2022) identify 16 “core” climate tipping points, with 6 likely to occur between 1.5°C and 2°C using the more restrictive definition of “when change in part of the climate system becomes (i) self-perpetuating beyond (ii) a warming threshold as a result of asymmetry in the relevant feedbacks, leading to (iii) substantial and widespread Earth system impacts.” See Drijfhout S., Bathiany S., Beaulieu C., Brovkin V., Claussen M., Huntingford C., Scheffer M., Sgubin G., & Swingedouw D. (2015) *Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 112(43): E5777–E5786, E5777 (“Abrupt transitions of regional climate in response to the gradual rise in atmospheric greenhouse gas concentrations are notoriously difficult to foresee. However, such events could be particularly challenging in view of the capacity required for society and ecosystems to adapt to them. We present, to our knowledge, the first systematic screening of the massive climate model ensemble informing the recent Intergovernmental Panel on Climate Change report, and reveal evidence of 37 forced regional abrupt changes in the ocean, sea ice, snow cover, permafrost, and terrestrial biosphere that arise after a certain global temperature increase. Eighteen out of 37 events occur for global warming levels of less than 2°, a threshold sometimes presented as a safe limit.”). Compare with Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) *Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points*, SCIENCE 377(6611): eabn7950, 1–10, 7 (“The chance of triggering CTPs is already non-negligible and will grow even with stringent climate mitigation (SSP1-1.9 in Fig. 2, B and C). Nevertheless, achieving the Paris Agreement’s aim to pursue efforts to limit warming to 1.5°C would clearly be safer than keeping global warming below 2°C (90) (Fig. 2). Going from 1.5 to 2°C increases the likelihood of committing to WAIS and GrIS collapse near complete warm-water coral die-off, and abrupt permafrost thaw; further, the best estimate threshold for LABC collapse is crossed. The likelihood of triggering AMOC collapse, Boreal forest shifts, and extra-polar glacier loss becomes non-negligible at >1.5°C and glacier loss becomes likely by ~2°C. A cluster of abrupt shifts occur in ESMs at 1.5 to 2°C (19). Although not tipping elements, ASSI loss could become regular by 2°C, gradual permafrost thaw would likely become widespread beyond 1.5°C, and land carbon sink weakening would become significant by 2°C.”). See also Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, NATURE 575(7784): 592–595, 593 (“A further key impetus to limit warming to 1.5 °C is that other tipping points could be triggered at low levels of global warming. The latest IPCC models projected a cluster of abrupt shifts between 1.5 °C and 2 °C, several of which involve sea ice. This ice is already shrinking rapidly in the Arctic...”); Arias P. A., *et al.* (2021) *Technical Summary*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), TS-71–TS-72 (“It is likely that under stabilization of global warming at 1.5°C, 2.0°C, or 3.0°C relative to 1850–1900, the AMOC will continue to weaken for several decades by about 15%, 20% and 30% of its strength and then recover to pre-decline values over several centuries (*medium confidence*). At sustained warming levels between 2°C and 3°C, there is limited evidence that the Greenland and West Antarctic Ice Sheets will be lost almost completely and irreversibly over multiple millennia; both the probability of their complete loss and the rate of mass loss increases with higher surface temperatures (*high confidence*). At sustained warming levels between 3°C and 5°C, near-complete loss of the Greenland Ice Sheet and complete loss of the West Antarctic Ice Sheet is projected to occur irreversibly over multiple millennia (*medium confidence*); with substantial parts or all of Wilkes Subglacial Basin in East Antarctica lost over multiple millennia (*low confidence*). Early-warning signals of accelerated sea-level-rise from Antarctica, could possibly be observed within the next few decades. For other hazards (e.g., ice sheet behaviour, glacier mass loss and global mean sea level change, coastal floods, coastal erosion, air pollution, and ocean acidification) the time and/or scenario dimensions remain critical, and a simple and robust relationship with global warming level cannot be established (*high confidence*).... The response of biogeochemical cycles to anthropogenic perturbations can be abrupt at regional scales and irreversible on decadal to century time scales (*high confidence*). The probability of crossing uncertain regional thresholds increases with climate change (*high confidence*). It is *very unlikely* that gas clathrates (mostly methane) in deeper terrestrial permafrost and subsea clathrates will lead to a detectable departure from the emissions trajectory during this century. Possible abrupt changes and tipping points in biogeochemical cycles lead to additional uncertainty in 21st century atmospheric GHG concentrations, but future anthropogenic emissions remain the dominant uncertainty (*high confidence*). There is potential for abrupt water cycle changes in some high-emission scenarios, but there is no overall consistency regarding the magnitude and timing of such changes. Positive land surface feedbacks, including vegetation, dust, and snow, can contribute to abrupt changes in aridity, but there is only low confidence that such changes will occur during the 21st century. Continued Amazon deforestation, combined with a warming climate, raises the probability that this ecosystem

will cross a tipping point into a dry state during the 21st century (*low confidence*). {TS3.2.2, 5.4.3, 5.4.5, 5.4.8, 5.4.9, 8.6.2, 8.6.3, Cross-chapter Box 12.1}”); and Lee J. Y., *et al.* (2021) *Chapter 4: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 4-96 (Table 4.10 lists 15 components of the Earth system susceptible to tipping points).

⁶⁰ Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, *NATURE* 575(7784): 592–595, 594 (“In our view, the clearest emergency would be if we were approaching a global cascade of tipping points that led to a new, less habitable, ‘hothouse’ climate state¹¹. Interactions could happen through ocean and atmospheric circulation or through feedbacks that increase greenhouse-gas levels and global temperature.”). See also Wunderling N., Donges J. F., Kurths J., & Winkelmann R. (2021) *Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming*, *EARTH SYST. DYN.* 12(2): 601–619, 614 (“In this study, we show that this risk increases significantly when considering interactions between these climate tipping elements and that these interactions tend to have an overall destabilising effect. Altogether, with the exception of the Greenland Ice Sheet, interactions effectively push the critical threshold temperatures to lower warming levels, thereby reducing the overall stability of the climate system. The domino-like interactions also foster cascading, non-linear responses. Under these circumstances, our model indicates that cascades are predominantly initiated by the polar ice sheets and mediated by the AMOC. Therefore, our results also imply that the negative feedback loop connecting the Greenland Ice Sheet and the AMOC might not be able to stabilise the climate system as a whole.”); and Rocha J. C., Peterson G., Bodin Ö., & Levin S. (2018) *Cascading regime shifts within and across scales*, *SCIENCE* 362(6421): 1379–1383, 1383 (“A key lesson from our study is that regime shifts can be interconnected. Regime shifts should not be studied in isolation under the assumption that they are independent systems. Methods and data collection need to be further developed to account for the possibility of cascading effects. Our finding that ~45% of regime shift couplings can have structural dependence suggests that current approaches to environmental management and governance underestimate the likelihood of cascading effects.”).

⁶¹ Drijfhout S., Bathiany S., Beaulieu C., Brovkin V., Claussen M., Huntingford C., Scheffer M., Sgubin G., & Swingedouw D. (2015) *Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models*, *PROC. NAT'L. ACAD. SCI.* 112(43): E5777–E5786, E5784 (“Permafrost carbon release (51) and methane hydrates release (52) were not expected in CMIP5 simulations, because of missing biogeochemical components in those models capable of simulating such changes.”). See also Bathiany S., Hidding J., & Scheffer M. (2020) *Edge Detection Reveals Abrupt and Extreme Climate Events*, *J. CLIM.* 33(15): 6399–6421, 6416 (“Despite their societal relevance, our knowledge about the risks of future abrupt climate shifts is far from robust. Several important aspects are highly uncertain: future greenhouse gas emissions (scenario uncertainty), the current climate state (initial condition uncertainty), the question whether and how to model specific processes (structural uncertainty), and what values one should choose for parameters appearing in the equations (parametric uncertainty). Such uncertainties can be explored using ensemble simulations. For example, by running many simulations with different combinations of parameter values a perturbed-physics ensemble can address how parameter uncertainty affects the occurrence of extreme events (Clark *et al.* 2006). This strategy can be particularly beneficial for studying abrupt events as well since abrupt shifts are associated with region-specific processes, whereas models are usually calibrated to produce a realistic global mean climate at the expense of regional realism (Mauritsen *et al.* 2012; McNeall *et al.* 2016). The currently available model configurations are therefore neither reliable nor sufficient to assess the risk of abrupt shifts (Drijfhout *et al.* 2015). It is hence very plausible that yet-undiscovered tipping points can occur in climate models.”); Canadell J. G., *et al.* (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 5-78 (“There is *low confidence* in the estimate of the non-CO₂ biogeochemical feedbacks, due to the large range in the estimates of α for some individual feedbacks (Figure 5.29c), which can be attributed to the diversity in how models account for these feedbacks, limited process-level understanding, and the existence of known feedbacks for which there is not sufficient evidence to assess the feedback strength.”); and Permafrost Pathways, *Course of Action: Mitigation Policy*, Woodwell Climate Research Center (*last visited* 29 July 2022) (“Depending on how hot we let it get, carbon emissions from Arctic permafrost thaw are expected to be in the range of 30 to more than 150 billion tons of carbon (110 to more than 550 Gt CO₂) this century, with upper estimates on par with the cumulative emissions from the entire United States at its current rate. To put it another way, permafrost thaw emissions could use up between 25 and 40 percent of the remaining carbon budget that would be necessary to cap warming at the internationally agreed-upon 2 degrees Celsius global temperature threshold established in the Paris Agreement.... Despite the enormity of this problem, gaps in permafrost carbon

monitoring and modeling are resulting in permafrost being left out of global climate policies, rendering our emissions targets fundamentally inaccurate. World leaders are in a race against time to reduce emissions and prevent Earth's temperature from reaching dangerous levels. The problem is, without including current and projected emissions from permafrost, this race will be impossible to finish.... 82% [o]f IPCC models do not include carbon emissions from permafrost thaw.”).

⁶² Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., *et al.* (eds.), SPM-22 (“In pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot global net CO₂ emissions are reduced compared to modelled 2019 emissions by 48% [36–69%] in 2030 and by 80% [61-109%] in 2040; and global CH₄ emissions are reduced by 34% [21–57%] in 2030 and 44% [31-63%] in 2040. There are similar reductions of non-CO₂ emissions by 2050 in both types of pathways: CH₄ is reduced by 45% [25–70%]; N₂O is reduced by 20% [-5 – 55%]; and F-Gases are reduced by 85% [20–90%]. [FOOTNOTE 44] Across most modelled pathways, this is the maximum technical potential for anthropogenic CH₄ reductions in the underlying models (*high confidence*). Further emissions reductions, as illustrated by the IMP-SP pathway, may be achieved through changes in activity levels and/or technological innovations beyond those represented in the majority of the pathways (*medium confidence*). Higher emissions reductions of CH₄ could further reduce peak warming. (*high confidence*) (Figure SPM.5) {3.3}”). *See also* Intergovernmental Panel on Climate Change (2018) *Summary for Policymakers*, in *GLOBAL WARMING OF 1.5 °C, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), SPM-15 (“In model pathways with no or limited overshoot of 1.5 °C, global net anthropogenic CO₂ emissions decline by about 45% from 2010 levels by 2030 (40–60% interquartile range), reaching net zero around 2050 (2045–2055 interquartile range).... Modelled pathways that limit global warming to 1.5 °C with no or limited overshoot involve deep reductions in emissions of methane and black carbon (35% or more of both by 2050 relative to 2010).”).

⁶³ Naik V., *et al.* (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcings*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 6-8 (“Additional CH₄ and BC mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with SO₂ reductions that would accompany decarbonization (*high confidence*).”). *See also* Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., *et al.* (eds.), SPM-31 (“In modelled global low emission pathways, the projected reduction of cooling and warming aerosol emissions over time leads to net warming in the near- to mid-term. In these mitigation pathways, the projected reductions of cooling aerosols are mostly due to reduced fossil fuel combustion that was not equipped with effective air pollution controls.”).

⁶⁴ Dreyfus G. B., Xu Y., Shindell D. T., Zaelke D., & Ramanathan V. (2022) *Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 119(22): e2123536119, 1–8, 1 (“We find that mitigation measures that target only decarbonization are essential for strong long-term cooling but can result in weak near-term warming (due to unmasking the cooling effect of co-emitted aerosols) and lead to temperatures exceeding 2°C before 2050. In contrast, pairing decarbonization with additional mitigation measures targeting short-lived climate pollutants (SLCPs) and N₂O, slows the rate of warming a decade or two earlier than decarbonization alone and avoids the 2°C threshold altogether. These non-CO₂ targeted measures when combined with decarbonization can provide net cooling by 2030, reduce the rate of warming from 2030 to 2050 by about 50%, roughly half of which comes from methane, significantly larger than decarbonization alone over this timeframe.”). *See also* Ramanathan V. & Feng Y. (2008) *On avoiding dangerous anthropogenic interference with the climate system: Formidable challenges ahead*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 105(38): 14245–14250, 14248 (“Switching from coal to “cleaner” natural gas will reduce CO₂ emission and thus would be effective in minimizing future increases in the committed warming. However, because it also reduces air pollution and thus the ABC [Atmospheric Brown Cloud] masking effect, it may speed up the approach to the committed warming of 2.4°C (1.4–4.3°C).”); Hansen J. E. & Sato M. (2021) *July Temperature Update: Faustian Payment Comes Due* (“It follows that the global warming acceleration is due to the one huge climate forcing that we have chosen not to measure: the forcing caused by imposed changes of atmospheric aerosols... We should expect the global warming rate for the quarter of a century 2015-2040 to be about double the 0.18°C/decade rate during 1970-2015 (see Fig. 2), unless appropriate countermeasures are taken.”); Berwyn B. (15 September 2021) *The Rate of Global Warming During Next 25 Years Could Be Double What it Was in the Previous 50*,

a Renowned Climate Scientist Warns, INSIDE CLIMATE NEWS (“James Hansen, a climate scientist who shook Washington when he told Congress 33 years ago that human emissions of greenhouse gases were cooking the planet, is now [warning](#) that he expects the rate of global warming to double in the next 20 years. While still warning that it is carbon dioxide and methane that are driving global warming, Hansen said that, in this case, warming is being accelerated by the decline of other industrial pollutants that they’ve cleaned from it.... In Hansen’s latest warning, he said scientists are dangerously underestimating the climate impact of reducing sulfate aerosol pollution. ‘Something is going on in addition to greenhouse warming,’ Hansen [wrote](#), noting that July’s average global temperature soared to its second-highest reading on record even though the Pacific Ocean is in a cooling La Niña phase that temporarily dampens signs of warming. Between now and 2040, he wrote that he expects the climate’s rate of warming to double in an ‘acceleration that can be traced to aerosols.’ That acceleration could lead to total warming of 2 degrees Celsius by 2040, the upper limit of the temperature range that countries in the Paris accord agreed was needed to prevent disastrous impacts from climate change. What’s more, Hansen and other researchers said the processes leading to the acceleration are not adequately measured, and some of the tools needed to gauge them aren’t even in place.... A doubling of the rate of global warming would put the planet in the fast lane of glacial melting, sea level rise and coral reef ecosystem die-offs, as well as escalating heatwaves, droughts and floods. But that future is not yet set in stone, said [Michael Mann](#), a climate scientist at Penn State. ¶ He said Hansen’s prediction appears inconsistent with the scientific literature assessed by the [Intergovernmental Panel on Climate Change](#). The IPCC’s latest [report](#) advises “that reductions of carbon emissions by 50 percent over the next decade and net-zero by 2100, along with a ramp-down in both aerosols and other short-term agents, including black carbon and other trace anthropogenic greenhouse gases, stabilizes warming well below 2 degrees Celsius,” Mann said. ¶ But the IPCC report also highlighted that declining aerosol pollution will speed warming. ¶ “The removal of air pollution, either through air quality measures or because combustion processes are phased out to get rid of CO₂, will result in an increase in the resulting rate of warming,” said climate scientist and IPCC report author [Joeri Rogelj](#), director of research at the Imperial College London’s [Grantham Institute](#). ¶ There’s a fix for at least some of this short-term increase in the rate of warming, he said. ¶ “The only measures that can counteract this increased rate of warming over the next decades are methane reductions,” Rogelj said. “I just want to highlight that methane reductions have always been part of the portfolio of greenhouse gas emissions reductions that are necessary to meet the goals of the Paris Agreement. This new evidence only further emphasizes this need.”); and Dvorak M. T., Armour K. C., Frierson D. M. W., Proistosescu C., Baker M. B., & Smith C. J. (2022) *Estimating the timing of geophysical commitment to 1.5 and 2.0 °C of global warming*, NAT. CLIM. CHANGE 12: 547–552, 547 (“Following abrupt cessation of anthropogenic emissions, decreases in short-lived aerosols would lead to a warming peak within a decade, followed by slow cooling as GHG concentrations decline. This implies a geophysical commitment to temporarily crossing warming levels before reaching them. Here we use an emissions-based climate model (FaIR) to estimate temperature change following cessation of emissions in 2021 and in every year thereafter until 2080 following eight Shared Socioeconomic Pathways (SSPs). Assuming a medium-emissions trajectory (SSP2–4.5), we find that we are already committed to peak warming greater than 1.5 °C with 42% probability, increasing to 66% by 2029 (340 GtCO₂ relative to 2021). Probability of peak warming greater than 2.0 °C is currently 2%, increasing to 66% by 2057 (1,550 GtCO₂ relative to 2021). Because climate will cool from peak warming as GHG concentrations decline, committed warming of 1.5 °C in 2100 will not occur with at least 66% probability until 2055.”).

⁶⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-36 (“Strong, rapid and sustained reductions in CH₄ emissions would also limit the warming effect resulting from declining aerosol pollution and would improve air quality.”). See also Naik V., et al. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7, 6-8 (“Across the SSPs, the collective reduction of CH₄, ozone precursors and HFCs can make a difference of global mean surface air temperature of 0.2 with a very likely range of [0.1–0.4] °C in 2040 and 0.8 with a very likely range of [0.5–1.3] °C at the end of the 21st century (comparing SSP3-7.0 and SSP1-1.9), which is substantial in the context of the Paris Agreement. Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*). {6.6.3, 6.7.3, 4.4.4}”; “Additional CH₄ and BC mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with SO₂ reductions that would accompany decarbonization (*high confidence*).”); United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 21 (“This is because a realistically paced phase-out of fossil fuels, or even a rapid one under aggressive decarbonization, is likely to have minimal net impacts on near-term temperatures due to the removal of co-emitted aerosols (Shindell and Smith 2019). As methane

is the most powerful driver of climate change among the short-lived substances (Myhre et al. 2013), mitigation of methane emissions is very likely to be the most powerful lever in reducing near-term warming. This is consistent with other assessments; for example, the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (IPCC AR5) showed that methane controls implemented between 2010 and 2030 would lead to a larger reduction in 2040 warming than the difference between RCPs 2.6, 4.5 and 6.0 scenarios. (The noted IPCC AR5-era scenarios are called representative concentration pathways (RCPs, with the numerical value indicating the target radiative forcing in 2100 (Kirtman et al. 2013)).”); and Shindell D. & Smith C. J. (2019) *Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels*, NATURE 573: 408–411, Addendum “Methods” (“We note that, although this study focuses on the effects of fossil-fuel related emissions, accounting for the effects of reductions in greenhouse gases from non-fossil sources—including fluorinated gases and both methane and nitrous oxide from agriculture—along with biofuels that are a large source of warming black carbon, could eliminate any near-term penalty entirely. In fact, given that the net effect of the fossil-fuel phase-out on temperature is minimal during the first 20 years (Fig. 3), reducing those other emissions is the only plausible way in which to decrease warming during that period.”).

⁶⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Shukla P. R., et al. (eds.), SPM-30–SPM-31 (“Deep GHG emissions reductions by 2030 and 2040, particularly reductions of methane emissions, lower peak warming, reduce the likelihood of overshooting warming limits and lead to less reliance on net negative CO₂ emissions that reverse warming in the latter half of the century... Future non-CO₂ warming depends on reductions in non-CO₂ GHG, aerosol and their precursor, and ozone precursor emissions. In modelled global low emission pathways, the projected reduction of cooling and warming aerosol emissions over time leads to net warming in the near- to mid-term. In these mitigation pathways, the projected reductions of cooling aerosols are mostly due to reduced fossil fuel combustion that was not equipped with effective air pollution controls. Non-CO₂ GHG emissions at the time of net zero CO₂ are projected to be of similar magnitude in modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) or lower. These non-CO₂ GHG emissions are about 8 [5–11] GtCO₂-eq per year, with the largest fraction from CH₄ (60% [55–80%]), followed by N₂O (30% [20–35%]) and F-gases (3% [2–20%]). [FOOTNOTE 52] Due to the short lifetime of CH₄ in the atmosphere, projected deep reduction of CH₄ emissions up until the time of net zero CO₂ in modelled mitigation pathways effectively reduces peak global warming. (high confidence) {3.3, AR6 WG I SPM D1.7}”).

⁶⁷ Fiore A. M., Jacob D. J., Field B. D., Streets D. G., Fernandes S. D., & Jang C. (2002) *Linking ozone pollution and climate change: The case for controlling methane*, GEOPHYS. RES. LETT. 29(19): 1919, 25-1–25-4, 25-1 (“Methane is a known major source of the tropospheric O₃ background, but is not generally considered a precursor to regional O₃ pollution episodes in surface air because of its long lifetime (8–9 years)... Our global 3-D model analysis shows that reducing CH₄ emissions enables a simultaneous pursuit of O₃ air quality and climate change mitigation objectives. Whereas reductions in NO_x emissions achieve localized decreases in surface O₃ concentrations, reductions in CH₄ emissions lower the global O₃ background and improve surface air quality everywhere.”). See also United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT*, 45 (“Next, the linearity of the response to different magnitudes of methane concentration change was examined. At the national level, population weighted ozone changes are extremely linear across a range of methane increases and decreases (Figure 3.4). Though the response itself varies from country to country (i.e. the slopes are different), the ozone change at the national level is directly proportional to the methane concentration change regardless of the ozone metric chosen. This result is consistent with prior studies which also indicate that the ozone/methane relationship is approximately linear (Fiore et al. 2008) but its magnitude depends on the local availability of nitrogen oxides, and, through nitrogen oxides, of hydroxyl (West et al. 2006; Wang and Jacob 1998).”).

⁶⁸ Turner M. C., Jerrett M., Pope C. A., Krewski D., Gapstur S. M., Diver W. R., Beckerman B. S., Marshall J. D., Su J., Crouse D. L., & Burnett R. T. (2016) *Long-Term Ozone Exposure and Mortality in a Large Prospective Study*, AM. J. RESPIR. CRIT. CARE MED. 193(10): 1134–1142, 1134 (“We observed significant positive associations between long-term O₃ and all-cause, circulatory, and respiratory mortality with 2%, 3%, and 12% increases in risk per 10 ppb, respectively, in this large-scale study with 22 years of follow-up.”).

⁶⁹ Feng Z., Xu Y., Kobayashi K., Dai L., Zhang T., Agathokleous E., Calatayud V., Paoletti E., Mukherjee A., Agrawal M., Park R. J., Oak Y. J., & Yue X. (2022) *Ozone pollution threatens the production of major staple crops in East Asia*, NAT. FOOD 3: 47–56, 47 (“East Asia is a hotspot of surface ozone (O₃) pollution, which hinders crop growth and reduces

yields. Here, we assess the relative yield loss in rice, wheat and maize due to O₃ by combining O₃ elevation experiments across Asia and air monitoring at about 3,000 locations in China, Japan and Korea. China shows the highest relative yield loss at 33%, 23% and 9% for wheat, rice and maize, respectively. The relative yield loss is much greater in hybrid than inbred rice, being close to that for wheat. Total O₃-induced annual loss of crop production is estimated at US\$63 billion.”).

⁷⁰ Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, ENVIRON. SCI. POLICY 134: 127–136, 129–130 (“Beyond this, however, O₃ damage to plants may significantly reduce the ability of terrestrial ecosystems to absorb carbon, negating some of the enhanced carbon uptake due to CO₂ fertilization that is expected to partially offset rising atmospheric CO₂ concentrations (Sitch et al., 2007; Ciais et al., 2013; Arneth et al., 2010; Ainsworth et al., 2012). However, the magnitude of this effect remains the subject of scientific debate, largely due to the complexity of interactions between plant response to O₃ and other environmental variables, including other air pollutants, CO₂ concentrations, temperature, precipitation, and nitrogen availability (Ainsworth et al., 2012; Kvalevåg and Myhre, 2013; Sitch et al., 2007; Simpson et al., 2014). For instance, Sitch et al. (2007) estimated that the present-day indirect radiative forcing due to O₃-induced plant damage could be as high as 0.21–0.38 W m⁻², comparable to the direct radiative forcing of tropospheric O₃. However, Kvalevåg and Myhre (2013) argue that this estimate is far too high and that accounting for nitrogen limitation on plant growth reduces the expected impact; they estimate an indirect radiative.”).

⁷¹ Butler T., Lupascu A., & Nalam A. (2020) *Attribution of ground-level ozone to anthropogenic and natural sources of nitrogen oxides and reactive carbon in a global chemical transport model*, ATMOS. CHEM. PHYS. 20(17): 10707–10731, 10726 (“As a reactive carbon precursor, methane contributes 35 % of the tropospheric ozone burden and 41 % of the Northern Hemisphere annual average surface mixing ratio, which is more than any other source of reactive carbon.”).

⁷² Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, ENVIRON. SCI. POLICY 134: 127–136, 130 (“Importantly, the role of methane’s contribution to O₃ production is expected to increase in the future, as emissions of other anthropogenic precursors (primarily NO_x and VOCs) are anticipated to decrease as a result of current and planned air quality regulations across much of the globe. For instance, Young et al. (2013) showed that rising CH₄ concentrations could be a major driver of increased surface O₃ by 2100 under the high-emission scenario developed for the IPCC 5th Assessment report. Turnock et al. (2018) showed that increased O₃ production from rising CH₄ concentrations could offset the reduction in surface O₃ due to reductions in emissions of shorter-lived O₃ precursors.”).

⁷³ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 8 (Figure ES1: Current and projected anthropogenic methane emissions and the identified sectoral mitigation potential in 2030 along with several benefits associated with sectoral-level methane emissions mitigation. Avoided warming occurs in the 2040s, other impacts are annual values beginning in 2030 that would continue thereafter).

⁷⁴ Staniaszek Z., Griffiths P. T., Folberth G. A., O’Connor F. M., Abraham N. L., Archibald A. T. (2021) *The role of future anthropogenic methane emissions in air quality and climate*, NPJ CLIM. ATMOS. SCI. 5(21): 1–8, 2–3 (“To quantify the air-quality impacts of anthropogenic methane, we calculated the long-term ozone-related mortality for SSP3-7.0 and ZAME for 2050, according to the method in Malley et al.³⁰. We found that the ozone associated with anthropogenic methane is responsible for 690,000 premature deaths per year (456,000–910,000, lower and upper bounds of mortality rate) in 2050: 43% from respiratory causes and 57% from cardiovascular causes. This corresponds to around 1270 annual deaths per million tonnes (Tg) of methane emissions, or 65% higher total (ozone-related) deaths per year compared to ZAME.”).

⁷⁵ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 78 (“The total valuation per tonne of methane for all market and non-market impacts assessed here is roughly US\$ 4 300 using a cross-nation income elasticity for WTP of 1.0 and US\$ 7 900 using an elasticity of 0.4 (Figure 3.19) – values are ~US\$ 150 per tonne larger for fossil-related emissions. This value is dominated by mortality effects, of which US\$ 2 500 are due to ozone and ~US\$ 700 are due to heat using the more conservative 500 deaths per million tonnes of methane of this analysis’ two global-scale estimates and a WTP income elasticity of 1.0, followed by climate impacts.”).

⁷⁶ Secretariat of the United Nations Framework Convention on Climate Change (2 November 2021) *World Leaders Kick Start Accelerated Climate Action at COP26*, Press Release (“Today is also the first time a COP in recent history has hosted a major event on methane, with 103 countries, including 15 major emitters including Brazil, Nigeria and Canada, signing up to the Global Methane Pledge.”).

⁷⁷ United States Department of State (11 October 2021) *Joint U.S.-EU Statement on the Global Methane Pledge*, Press Release (“At the Major Economies Forum on Energy and Climate (MEF) on September 17, 2021, President Biden and European Commission President Ursula von der Leyen announced, with support from seven additional countries, the Global Methane Pledge—an initiative to be launched at the World Leaders Summit at the 26th UN Climate Change Conference (COP-26) this November in Glasgow, United Kingdom.”).

⁷⁸ United States Department of State (11 October 2021) *Joint U.S.-EU Statement on the Global Methane Pledge*, Press Release (“Countries joining the Global Methane Pledge commit to a collective goal of reducing global methane emissions by at least 30 percent from 2020 levels by 2030 and moving towards using highest tier IPCC good practice inventory methodologies to quantify methane emissions, with a particular focus on high emission sources. Successful implementation of the Pledge would reduce warming by at least 0.2 degrees Celsius by 2050.”).

⁷⁹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *Briefing on the Global Methane Pledge* (“The Global Methane Pledge is a strong first step as the first-ever Heads-of State global commitment to cut methane emissions at a level consistent with a 1.5 C pathway.”). See also United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 9 (“Currently available measures could reduce emissions from these major sectors by approximately 180 Mt/yr, or as much as 45 per cent, by 2030. This is a cost-effective step required to achieve the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) 1.5° C target. According to scenarios analysed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), global methane emissions must be reduced by between 40–45 per cent by 2030 to achieve least cost-pathways that limit global warming to 1.5° C this century, alongside substantial simultaneous reductions of all climate forcers including carbon dioxide and short-lived climate pollutants. (Section 4.1).”).

⁸⁰ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 8 (“Available targeted methane measures, together with additional measures that contribute to priority development goals, can simultaneously reduce human-caused methane emissions by as much as 45 per cent, or 180 million tonnes a year (Mt/yr) by 2030. This will avoid nearly 0.3°C of global warming by the 2040s and complement all long-term climate change mitigation efforts.”).

⁸¹ See generally (3 December 2021) *Methane matters*, Editorial, NAT. GEOSCI. 14: 875.

⁸² Naik V., et al. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7, 6-8 (“Across the SSPs, the collective reduction of CH₄, ozone precursors and HFCs can make a difference of global mean surface air temperature of 0.2 with a very likely range of [0.1–0.4] °C in 2040 and 0.8 with a very likely range of [0.5–1.3] °C at the end of the 21st century (comparing SSP3-7.0 and SSP1-1.9), which is substantial in the context of the Paris Agreement. Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*). {6.6.3, 6.7.3, 4.4.4}”; “Additional CH₄ and BC mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with SO₂ reductions that would accompany decarbonization (*high confidence*).”).

⁸³ Solomon S., Daniel J. S., Sanford T. J., Murphy D. M., Plattner G.-K., Knutti R., & Friedlingstein P. (2010) *Persistence of climate changes due to a range of greenhouse gases*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 107(43): 18354–18359, 18357 (“In the case of a gas with a 10-y lifetime, for example, energy is slowly stored in the ocean during the period when concentrations are elevated, and this energy is returned to the atmosphere from the ocean after emissions cease and radiative forcing decays, keeping atmospheric temperatures somewhat elevated for several decades. Elevated temperatures last longer for a gas with a 100-y lifetime because, in this case, radiative forcing and accompanying further ocean heat uptake continue long after emissions cease. As radiative forcing decays further, the energy is ultimately restored from the ocean to the atmosphere. Fig. 3 shows that the slow timescale of ocean heat uptake has two important effects. It limits the transfer of

energy to the ocean if emissions and radiative forcing occur only for a few decades or a century. However, it also implies that any energy that is added to the ocean remains available to be transferred back to the atmosphere for centuries after cessation of emissions.”).

⁸⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Annex VII Glossary*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.).

⁸⁵ Boers N. & Rypdal M. (2021) *Critical slowing down suggests that the western Greenland Ice Sheet is close to a tipping point*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 118(21): 1–7, 1 (“A crucial nonlinear mechanism for the existence of this tipping point is the positive melt-elevation feedback: Melting reduces ice sheet height, exposing the ice sheet surface to warmer temperatures, which further accelerates melting. We reveal early-warning signals for a forthcoming critical transition from ice-core-derived height reconstructions and infer that the western Greenland Ice Sheet has been losing stability in response to rising temperatures. We show that the melt-elevation feedback is likely to be responsible for the observed destabilization. Our results suggest substantially enhanced melting in the near future.”).

⁸⁶ Duffy K. A., Schwalm C. R., Arcus V. L., Koch G. W., Liang L. L., & Schipper L. A. (2021) *How close are we to the temperature tipping point of the terrestrial biosphere?*, SCI. ADV. 7(3): eaay1052, 1 (“The temperature dependence of global photosynthesis and respiration determine land carbon sink strength. While the land sink currently mitigates ~30% of anthropogenic carbon emissions, it is unclear whether this ecosystem service will persist and, more specifically, what hard temperature limits, if any, regulate carbon uptake. Here, we use the largest continuous carbon flux monitoring network to construct the first observationally derived temperature response curves for global land carbon uptake. We show that the mean temperature of the warmest quarter (3-month period) passed the thermal maximum for photosynthesis during the past decade. At higher temperatures, respiration rates continue to rise in contrast to sharply declining rates of photosynthesis. Under business-as-usual emissions, this divergence elicits a near halving of the land sink strength by as early as 2040.”).

⁸⁷ Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) are required to report emissions on a gas-by-gas basis in units of mass. Framework Convention on Climate Change *Dec. 18/CMA.1, FCCC/PA/CMA/2018/3/Add.2*, at Annex ¶47 (March 19, 2019) (“47. Each Party shall report estimates of emissions and removals for all categories, gases and carbon pools considered in the GHG inventory throughout the reported period on a gas-by-gas basis in units of mass at the most disaggregated level, in accordance with the IPCC guidelines referred to in paragraph 20 above, using the common reporting tables, including a descriptive summary and figures underlying emission trends, with emissions by sources listed separately from removals by sinks, except in cases where it may be technically impossible to separate information on emissions and removals in the LULUCF sector, and noting that a minimum level of aggregation is needed to protect confidential business and military information.”). *See also* Allen M. R., et al. (2022) *Indicate separate contributions of long-lived and short-lived greenhouse gases in emission targets*, NPJ CLIM. ATMOS. SCI. 5(5): 1–4, 1 (“As researchers who have published over recent years on the issue of comparing the climate effects of different greenhouse gases, we would like to highlight a simple innovation that would enhance the transparency of stocktakes of progress towards achieving any multi-decade-timescale global temperature goal. In addition to specifying targets for total CO₂-equivalent emissions of all greenhouse gases, governments and corporations could also indicate the separate contribution to these totals from greenhouse gases with lifetimes around 100 years or longer, notably CO₂ and nitrous oxide, and the contribution from Short-Lived Climate Forcers (SLCFs), notably methane and some hydrofluorocarbons. This separate indication would support an objective assessment of the implications of aggregated emission targets for global temperature, in alignment with the UNFCCC Parties’ Decision (4/CMA.1)1 to provide ‘information necessary for clarity, transparency and understanding’ in nationally determined contributions (NDCs) and long-term low-emission development strategies (LT-LEDs).”).

⁸⁸ Abernethy S. & Jackson R. B. (2022) *Global temperature goals should determine the time horizons for greenhouse gas emission metrics*, ENVIRON. RES. LETT. 17(2): 024019, 1–10, 7 (“Although NDCs and long-term national pledges are currently insufficient to keep warming below 2 °C, let alone 1.5 °C [50–52], the time horizons used for emission metrics should nevertheless be consistent with that central goal of the Paris Agreement. We therefore support the use of the 20 year time horizon over the 100 year version, when binary choices between these two must be made, due to the better alignment of the former with the temperature goals of the Paris Agreement. The 50 year time horizon, not yet in widespread use but now included in IPCC AR6, is in fact the only time horizon that the IPCC presents that falls within

the range of time horizons that align with the Paris Agreement temperature goals (24–58 years). However, to best align emission metrics with the Paris Agreement 1.5 °C goal, we recommend the use of the 24 year time horizon, using 2045 as the end point time, with its associated $GWP_{1.5^{\circ}C} = 75$ and $GTP_{1.5^{\circ}C} = 41$.”); *discussed in* McKenna P. (9 February 2022) *To Counter Global Warming, Focus Far More on Methane, a New Study Recommends*, INSIDE CLIMATE NEWS (“The Environmental Protection Agency is drastically undervaluing the potency of methane as a greenhouse gas when the agency compares methane’s climate impact to that of carbon dioxide, a new study concludes. The EPA’s climate accounting for methane is “arbitrary and unjustified” and three times too low to meet the goals set in the Paris climate agreement, the research report, published Wednesday in the journal *Environmental Research Letters*, found.”); and Rath A. (15 February 2022) *The Case Against Methane Emissions Keeps Getting Stronger*, BLOOMBERG.

⁸⁹ Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) are required to report emissions on a gas-by-gas basis in units of mass. Framework Convention on Climate Change Dec. 18/CMA.1, FCCC/PA/CMA/2018/3/Add.2, at Annex ¶ 37 (March 19, 2019) (“37. Each Party shall use the 100-year time-horizon global warming potential (GWP) values from the IPCC Fifth Assessment Report, or 100-year time-horizon GWP values from a subsequent IPCC assessment report as agreed upon by the CMA, to report aggregate emissions and removals of GHGs, expressed in CO₂ eq. Each Party may in addition also use other metrics (e.g., global temperature potential) to report supplemental information on aggregate emissions and removals of GHGs, expressed in CO₂ eq. In such cases, the Party shall provide in the national inventory document information on the values of the metrics used and the IPCC assessment report they were sourced from.”).

⁹⁰ Forster P., et al. (2021) *Chapter 7: The Earth’s Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), Table 7.SM.7.

⁹¹ Lynch J., Cain M., Pierrehumbert R., & Allen M. (2020) *Demonstrating GWP*: a means of reporting warming-equivalent emissions that captures the contrasting impacts of short- and long-lived climate pollutants*, ENVIRON. RES. LETT. 15(4): 044023, 1–13, 2 (“Following these behaviours, sustained emissions of an SLCP therefore result in a similar impact to a one-off release of a fixed amount of CO₂: both lead to a relatively stable long-term increase in radiative forcing. Thus an alternative means of equivalence can be derived, relating a change in the rate of emissions of SLCPs to a fixed quantity of CO₂...”). See also Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, ENVIRON. SCI. POLICY 134: 127–136, 132 (“However, this practice of assigning “equivalence” belies the physical reality, namely that CH₄’s impact on climate is distinct from CO₂’s in several important ways, as described in Section 3. In effect, only the long-term climate impact of CH₄ (i.e., its radiative forcing over a 100-year time horizon) is robustly taken into account under the Kyoto Protocol and the Paris Agreement. Among other things, this means that CH₄’s outsized contribution to near-term climate warming is overlooked.... The focus on CO₂ equivalence under the UNFCCC also leads to an information and transparency gap. The common practice of expressing mitigation targets in terms of aggregate CO₂e, without specifying which reductions come from which GHGs, compromises the ability of modelers to evaluate in detail how the climate will respond to pledged emission reductions; this is because the climate responds differently to the different climate forcers (Fig. 2).”).

⁹² Cain M., Lynch J., Allen M. R., Fuglestedt J. S., Frame D. J., & Macey A. H. (2019) *Improved calculation of warming-equivalent emissions for short-lived climate pollutants*, NPJ CLIM. ATMOS. SCI. 2(29): 1–7, 1 (“We have used an empirical method to find a definition of GWP* that preserves the link between an emission and the warming it generates in the medium term up to 2100. The physical interpretation of equation 1 is that the flow term (with coefficient *r*) represents the fast climate response to a change in radiative forcing, generated by the atmospheric and ocean mixed-layer response.³⁰ The timescale of this response is about 4 years here.³¹ The stock term (with coefficient *s*) represents the slower timescale climate response to a change in radiative forcing, due to the deep ocean response. This effect means that the climate responds slowly to past changes in radiative forcing, and is why the climate is currently far from equilibrium. We have approximated this response by treating a quarter of the climate response to a SLCP as “cumulative”).

⁹³ Rogelj J. & Schleussner C.-F. (2021) *Reply to Comment on ‘Unintentional unfairness when applying new greenhouse gas emissions metrics at country level’*, ENVIRON. RES. LETT. 16(6): 068002, 1–8, 2 (“These ethical issues arise from moving away from an emissions centered metric like GWP-100—where every unit of emissions of a certain GHG is treated equally and independent of the emitter or timing of emissions—to metrics like GWP*—which focus on additional warming and where the treatment of a unit of emissions depends on the emitter and their emission history... Meanwhile,

a group of the world's biggest dairy producers seems happy to consider the grandfathering GWP* perspective and explicitly dismisses other fairness perspectives that would increase their companies' responsibility for reducing methane emissions (Cady 2020)."); citing Cady R. (2020) *A Literature Review of GWP*: A proposed method for estimating global warming potential (GWP*) of short-lived climate pollutants like methane*, GLOBAL DAIRY PLATFORM; discussed in Elgin B. (19 October 2021) *Beef Industry Tries to Erase Its Emissions With Fuzzy Methane Math*, BLOOMBERG GREEN.

⁹⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-19 ("With every additional increment of global warming, changes in extremes continue to become larger. For example, every additional 0.5°C of global warming causes clearly discernible increases in the intensity and frequency of hot extremes, including heatwaves (*very likely*), and heavy precipitation (*high confidence*), as well as agricultural and ecological droughts in some regions (*high confidence*). Discernible changes in intensity and frequency of meteorological droughts, with more regions showing increases than decreases, are seen in some regions for every additional 0.5°C of global warming (*medium confidence*). Increases in frequency and intensity of hydrological droughts become larger with increasing global warming in some regions (*medium confidence*). There will be an increasing occurrence of some extreme events unprecedented in the observational record with additional global warming, even at 1.5°C of global warming. Projected percentage changes in frequency are higher for rarer events (*high confidence*).").

⁹⁵ Fischer E. M., Sippel S., & Knutti R. (2021) *Increasing probability of record-shattering climate extremes*, NAT. CLIM. CHANGE 11: 689–695, 689 ("Here, we show models project not only more intense extremes but also events that break previous records by much larger margins. These record-shattering extremes, nearly impossible in the absence of warming, are likely to occur in the coming decades. We demonstrate that their probability of occurrence depends on warming rate, rather than global warming level, and is thus pathway-dependent. In high-emission scenarios, week-long heat extremes that break records by three or more standard deviations are two to seven times more probable in 2021–2050 and three to 21 times more probable in 2051–2080, compared to the last three decades.").

⁹⁶ Xu Y., Ramanathan V., & Victor D. G. (2018) *Global warming will happen faster than we think*, Comment, NATURE 564(7734): 30–32, 30–31 ("But the latest IPCC special report underplays another alarming fact: global warming is accelerating. Three trends—rising emissions, declining air pollution and natural climate cycles—will combine over the next 20 years to make climate change faster and more furious than anticipated. In our view, there's a good chance that we could breach the 1.5 °C level by 2030, not by 2040 as projected in the special report (see 'Accelerated warming'). The climate-modelling community has not grappled enough with the rapid changes that policymakers care most about, preferring to focus on longer-term trends and equilibria."). Since Xu, Ramanathan, and Victor Comment was published, the IPCC has updated its estimate for when 1.5 °C will be exceeded: see Arias P. A., et al. (2021) *Technical Summary*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), TS-9 ("Timing of crossing 1.5°C global warming: Slightly different approaches are used in SR1.5 and in this Report. SR1.5 assessed a likely range of 2030 to 2052 for reaching a global warming level of 1.5°C (for a 30-year period), assuming a continued, constant rate of warming. In AR6, combining the larger estimate of global warming to date and the assessed climate response to all considered scenarios, the central estimate of crossing 1.5°C of global warming (for a 20-year period) occurs in the early 2030s, ten years earlier than the midpoint of the likely range assessed in the SR1.5, assuming no major volcanic eruption. (TS.1.3, Cross-Section Box TS.1)"). See also Matthews H. D., Tokarska K. B., Rogelj J., Smith C. J., MacDougall A. H., Hausteijn K., Mengis N., Sippel S., Forster P. M., & Knutti R. (2021) *An integrated approach to quantifying uncertainties in the remaining carbon budget*, COMMUN. EARTH ENVIRON. 2(7): 1–11, 5 ("It is worth noting however, that the spread of our [remaining carbon budget (RCBs)] estimate does include negative values, with a 17% chance that the RCB for 1.5 °C is less than zero (i.e. is already exceeded). This outcome could arise due to current and/or unrealised future warming being at the higher end of their respective distributions, or in the case that the current non-CO₂ forcing fraction is small or negative owing to very strong current aerosol forcing. In this case, we would expect 1.5 °C to be exceeded even in the absence of additional emissions, and any future emissions between now and the time of net-zero CO₂ emissions would cause temperatures to rise further above this threshold.").

⁹⁷ Molina M., Zaelke D., Sarma K. M., Andersen S. O., Ramanathan V., & Kaniaru D. (2009) *Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 106(49): 20616–20621, 20616 ("Current emissions of anthropogenic greenhouse gases (GHGs) have already

committed the planet to an increase in average surface temperature by the end of the century that may be above the critical threshold for tipping elements of the climate system into abrupt change with potentially irreversible and unmanageable consequences. This would mean that the climate system is close to entering if not already within the zone of ‘dangerous anthropogenic interference’ (DAI). Scientific and policy literature refers to the need for ‘early,’ ‘urgent,’ ‘rapid,’ and ‘fast-action’ mitigation to help avoid DAI and abrupt climate changes. We define “fast-action” to include regulatory measures that can begin within 2–3 years, be substantially implemented in 5–10 years, and produce a climate response within decades.”). *See also* Molina M., Ramanathan V. & Zaelke D. (2020) *Best path to net zero: Cut short-lived climate pollutants*, BULLETIN OF THE ATOMIC SCIENTISTS (“And let us be clear: By “speed,” we mean measures—including regulatory ones—that can begin within two-to-three years, be substantially implemented in five-to-10 years, and produce a climate response within the next decade or two.”).

⁹⁸ von Braun J., Ramanathan V., & Turkson P. K. A. (2022) *Resilience of people and ecosystems under climate stress*, Pontifical Academy of Sciences (“Recommendations: *Resilience building must rest on three pillars: Mitigation, Adaptation & Transformation. Mitigation: Reduce climate risks... . Adaptation: Reduce exposure and vulnerability to unavoidable climate risks. Exposure & vulnerability reduction has three faces: Reductions in sensitivity to climate change; Reductions in risk exposure; & enhancement of adaptive capacity. There are limits to adaptation and hence adaptation has to be integrated with mitigation actions to avoid crossing the limits.*”); where the definition of resilience is taken from Möller V., van Diemen R., Matthews J. B. R., Méndez C., Semenov S., Fuglestedt J. S., & Resinger A. (2022) *Annex II: Glossary*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY*, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Minterbeck K., Alegria A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), AII-37–AII-38 (“The capacity of interconnected social, economic and ecological systems to cope with a hazardous event, trend or disturbance, responding or reorganising in ways that maintain their essential function, identity and structure. Resilience is a positive attribute when it maintains capacity for adaptation, learning and/or transformation (Arctic Council, 2016).”). *See also* Zaelke D., Piccolotti R., & Dreyfus G. (14 November 2021) *Glasgow climate summit: A glass half full*, THE HILL (“The new architecture also includes cutting not just carbon dioxide but also non-carbon dioxide climate emissions, with a specific focus on methane, a super climate pollutant responsible for 0.5 degrees Celsius of today’s observed warming of 1.1 degrees Celsius. Cutting methane presents the single biggest and fastest mitigation action the world can take to keep warming from breaching the 1.5 degrees Celsius guardrail. This makes fast reductions of methane essential for adaptation as well.”); Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY*, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pörtner H.-O., et al. (eds.), SPM-13 (“Near-term actions that limit global warming to close to 1.5°C would substantially reduce projected losses and damages related to climate change in human systems and ecosystems, compared to higher warming levels, but cannot eliminate them all (*very high confidence*).”); and Intergovernmental Panel on Climate Change (2018) *GLOBAL WARMING OF 1.5 °C, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 22 (“Social justice and equity are core aspects of climate-resilient development pathways that aim to limit global warming to 1.5°C as they address challenges and inevitable trade-offs, widen opportunities, and ensure that options, visions, and values are deliberated, between and within countries and communities, without making the poor and disadvantaged worse off (*high confidence*).”).

⁹⁹ Xu Y., Ramanathan V., & Victor D. G. (2018) *Global warming will happen faster than we think*, Comment, NATURE 564(7734): 30–32, 30–31 (“But the latest IPCC special report underplays another alarming fact: global warming is accelerating. Three trends—rising emissions, declining air pollution and natural climate cycles—will combine over the next 20 years to make climate change faster and more furious than anticipated. In our view, there’s a good chance that we could breach the 1.5 °C level by 2030, not by 2040 as projected in the special report (see ‘Accelerated warming’). The climate-modelling community has not grappled enough with the rapid changes that policymakers care most about, preferring to focus on longer-term trends and equilibria.”). Since Xu, Ramanathan, and Victor Comment was published, the IPCC has updated its estimate for when 1.5 °C will be exceeded: *see* Arias P. A., et al. (2021) *Technical Summary*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS*, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), TS-9 (“Timing of crossing 1.5°C global warming: Slightly different approaches are used in SR1.5 and in this Report. SR1.5 assessed a likely range of 2030 to 2052 for reaching a global warming level of 1.5°C (for a 30-year period), assuming a continued, constant rate of warming. In AR6, combining the larger estimate of global warming to date and the assessed climate response to all considered scenarios, the central estimate of crossing 1.5°C of global warming (for a 20-year period) occurs in the early

2030s, ten years earlier than the midpoint of the likely range assessed in the SR1.5, assuming no major volcanic eruption. (TS.1.3, Cross-Section Box TS.1”).

¹⁰⁰ Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, NATURE 575(7784): 592–595, 594 (“In our view, the clearest emergency would be if we were approaching a global cascade of tipping points that led to a new, less habitable, ‘hothouse’ climate state¹¹. Interactions could happen through ocean and atmospheric circulation or through feedbacks that increase greenhouse-gas levels and global temperature.”). See also Wunderling N., Donges J. F., Kurths J., & Winkelmann R. (2021) *Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming*, EARTH SYST. DYN. 12(2): 601–619, 614 (“In this study, we show that this risk increases significantly when considering interactions between these climate tipping elements and that these interactions tend to have an overall destabilising effect. Altogether, with the exception of the Greenland Ice Sheet, interactions effectively push the critical threshold temperatures to lower warming levels, thereby reducing the overall stability of the climate system. The domino-like interactions also foster cascading, non-linear responses. Under these circumstances, our model indicates that cascades are predominantly initiated by the polar ice sheets and mediated by the AMOC. Therefore, our results also imply that the negative feedback loop connecting the Greenland Ice Sheet and the AMOC might not be able to stabilise the climate system as a whole.”); and Rocha J. C., Peterson G., Bodin Ö., & Levin S. (2018) *Cascading regime shifts within and across scales*, SCIENCE 362(6421): 1379–1383, 1383 (“A key lesson from our study is that regime shifts can be interconnected. Regime shifts should not be studied in isolation under the assumption that they are independent systems. Methods and data collection need to be further developed to account for the possibility of cascading effects. Our finding that ~45% of regime shift couplings can have structural dependence suggests that current approaches to environmental management and governance underestimate the likelihood of cascading effects.”).

¹⁰¹ Steffen W., et al. (2018) *Trajectories of the Earth System in the Anthropocene*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 115(33): 8252–8259, 8254, 8256 (“This risk is represented in Figs. 1 and 2 by a planetary threshold (horizontal broken line in Fig. 1 on the Hothouse Earth pathway around 2 °C above preindustrial temperature). Beyond this threshold, intrinsic biogeophysical feedbacks in the Earth System (*Biogeophysical Feedbacks*) could become the dominant processes controlling the system’s trajectory. Precisely where a potential planetary threshold might be is uncertain (15, 16). We suggest 2 °C because of the risk that a 2 °C warming could activate important tipping elements (12, 17), raising the temperature further to activate other tipping elements in a domino-like cascade that could take the Earth System to even higher temperatures (*Tipping Cascades*). Such cascades comprise, in essence, the dynamical process that leads to thresholds in complex systems (section 4.2 in ref. 18). This analysis implies that, even if the Paris Accord target of a 1.5 °C to 2.0 °C rise in temperature is met, we cannot exclude the risk that a cascade of feedbacks could push the Earth System irreversibly onto a “Hothouse Earth” pathway. ... Hothouse Earth is likely to be uncontrollable and dangerous to many, particularly if we transition into it in only a century or two, and it poses severe risks for health, economies, political stability (12, 39, 49, 50) (especially for the most climate vulnerable), and ultimately, the habitability of the planet for humans.”). Note limitations in current models means IPCC has low confidence in its ability to assess these feedbacks. See Canadell J. G., et al. (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 5-78 (“There is low confidence in the estimate of the non-CO₂ biogeochemical feedbacks, due to the large range in the estimates of α for some individual feedbacks (Figure 5.29c), which can be attributed to the diversity in how models account for these feedbacks, limited process-level understanding, and the existence of known feedbacks for which there is not sufficient evidence to assess the feedback strength.”).

¹⁰² Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, NATURE, 575: 592–595.

¹⁰³ Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) *Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points*, SCIENCE 377(6611): eabn7950, 1–10, 7 (“Current warming is ~1.1°C above preindustrial and even with rapid emission cuts warming will reach ~1.5°C by the 2030s (23). We cannot rule out that WAIS and GrIS tipping points have already been passed (see above) and several other tipping elements have minimum threshold values within the 1.1 to 1.5°C range. Our best estimate thresholds for GrIS, WAIS, REEF, and abrupt permafrost thaw (PFAT) are ~1.5°C although WAIS and

GrIS collapse may still be avoidable if GMST returns below 1.5°C within an uncertain overshoot time (likely decades (94)).”).

¹⁰⁴ Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) *Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points*, SCIENCE 377(6611): eabn7950, 1–10, 7 (“The chance of triggering CTPs is already non-negligible and will grow even with stringent climate mitigation (SSP1-1.9 in Fig. 2, B and C). Nevertheless, achieving the Paris Agreement’s aim to pursue efforts to limit warming to 1.5°C would clearly be safer than keeping global warming below 2°C (90) (Fig. 2). Going from 1.5 to 2°C increases the likelihood of committing to WAIS and GrIS collapse near complete warm-water coral die-off, and abrupt permafrost thaw; further, the best estimate threshold for LABC collapse is crossed. The likelihood of triggering AMOC collapse, Boreal forest shifts, and extra-polar glacier loss becomes non-negligible at >1.5°C and glacier loss becomes likely by ~2°C. A cluster of abrupt shifts occur in ESMs at 1.5 to 2°C (19). Although not tipping elements, ASSI loss could become regular by 2°C, gradual permafrost thaw would likely become widespread beyond 1.5°C, and land carbon sink weakening would become significant by 2°C.”).

¹⁰⁵ King M. D., Howat I. M., Candela S. G., Noh M. J., Jeong S., Noël B. P. Y., van den Broeke M. R., Wouters B., & Negrete A. (2020) *Dynamic ice loss from the Greenland Ice Sheet driven by sustained glacier retreat*, COMM. EARTH & ENV’T.: 1–7, 1 (“The Greenland Ice Sheet is losing mass at accelerated rates in the 21st century, making it the largest single contributor to rising sea levels. Faster flow of outlet glaciers has substantially contributed to this loss, with the cause of speedup, and potential for future change, uncertain.”).

¹⁰⁶ Box J. E., Hubbard A., Bahr D. B., Colgan W. T., Fettweis X., Mankoff K. D., Wehrlé A., Noël B., van den Broeke M. R., Wouters B., Bjørk A. A., & Fausto R. S. (2022) *Greenland ice sheet climate disequilibrium and committed sea-level rise*, NAT. CLIM. CHANGE: 1–11, 2, 5 (“Application of the average 2000–2019, hereafter ‘recent’, climatology to Greenland’s entire glacierized area of 1,783,090 km² gives an AAR/AAR₀ (α) disequilibrium with the current ice configuration corresponding with a $3.3 \pm 0.8\%$ committed area and volume loss. Taken in perpetuity, this imbalance with recent climate results in $59 \pm 15 \times 10^3$ km² of committed retreat of Greenland’s ice area, equivalent to $110 \pm 27 \times 10^3$ km³ of the ice sheet volume or 274 ± 68 mm of global eustatic SLR.”); “Given the breadth and potency of those processes, we contend that known physical mechanisms can deliver most of the committed ice volume loss from Greenland’s disequilibrium with its recent climate within this century. Nevertheless, we underscore that a SLR of at least 274 ± 68 mm is already committed, regardless of future climate warming scenarios.”); *discussed in* Mooney C. (29 August 2022) *Greenland ice sheet set to raise sea levels by nearly a foot, study finds*, THE WASHINGTON POST; and Funes Y. (29 August 2022) *The Greenland Ice Sheet’s Terrifying Future*, ATMOS.

¹⁰⁷ Wunderling N., Winkelmann R., Rockström J., Loriani S., Armstrong-McKay D., Ritchie P., Sakschewski B., & Donges J. (22 April 2022) *Global warming overshoots increase risk of triggering climate tipping points and cascades*, NATURE (preprint), 1–31, 1, 11–12, 18 (“Climate tipping elements play a crucial role for the stability of the Earth system under human pressures and are potentially at risk of disintegrating within and partially even below the Paris temperature guardrails of 1.5-2.0°C above pre-industrial levels. However, current policies and actions make it very likely to, at least temporarily, transgress the Paris targets. This raises the question whether tipping points can still be avoided under such overshoot scenarios. Here, we investigate the associated risks for tipping under a range of temperature overshoot scenarios using a stylised network model of four interacting climate tipping elements: the Greenland and West Antarctic Ice Sheets, the Atlantic Meridional Overturning Circulation and the Amazon rainforest. Our results reveal that temporary overshoots can increase tipping risks by up to 72% compared to a soft landing without overshoots, even when the long-term equilibrium temperature stabilises within the Paris range.”).

¹⁰⁸ Xu Y. & Ramanathan V. (2017) *Well below 2 °C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 114(39): 10319–10323, 10320 (“Box 2. Risk Categorization of Climate Change to Society. ... [A] 2 °C warming would double the land area subject to deadly heat and expose 48% of the population. A 4 °C warming by 2100 would subject 47% of the land area and almost 74% of the world population to deadly heat, which could pose existential risks to humans and mammals alike unless massive adaptation measures are implemented, such as providing air conditioning to the entire population or a massive relocation of most of the population to safer climates. ... This bottom 3 billion population comprises mostly subsistent farmers, whose livelihood will be severely impacted, if not destroyed, with a one- to five-year megadrought, heat waves, or heavy floods; for those among the bottom 3 billion of the world’s population who are living in coastal areas, a 1- to 2-m rise in sea level (likely with a warming in excess of 3 °C)

poses existential threat if they do not relocate or migrate. It has been estimated that several hundred million people would be subject to famine with warming in excess of 4 °C (54). However, there has essentially been no discussion on warming beyond 5 °C. Climate change-induced species extinction is one major concern with warming of such large magnitudes (>5 °C). The current rate of loss of species is ~1,000-fold the historical rate, due largely to habitat destruction. At this rate, about 25% of species are in danger of extinction in the coming decades (56). Global warming of 6 °C or more (accompanied by increase in ocean acidity due to increased CO₂) can act as a major force multiplier and expose as much as 90% of species to the dangers of extinction (57). The bodily harms combined with climate change-forced species destruction, biodiversity loss, and threats to water and food security, as summarized recently (58), motivated us to categorize warming beyond 5 °C as unknown??, implying the possibility of existential threats.”). See also Kemp L., Xu C., Depledge J., Ebi K. L., Gibbins G., Kohler T. A., Rockström J., Scheffer M., Schellnhuber H. J., Steffen W., & Lenton T. M. (2022) *Climate Endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 119(34): e2108146119, 1–9, 2, 3 (“Despite 30 y of efforts and some progress under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) anthropogenic greenhouse gas (GHG) emissions continue to increase. Even without considering worst-case climate responses, the current trajectory puts the world on track for a temperature rise between 2.1 °C and 3.9 °C by 2100 (11). If all 2030 nationally determined contributions are fully implemented, warming of 2.4 °C (1.9 °C to 3.0 °C) is expected by 2100. Meeting all long-term pledges and targets could reduce this to 2.1 °C (1.7 °C to 2.6 °C) (12). Even these optimistic assumptions lead to dangerous Earth system trajectories. Temperatures of more than 2 °C above preindustrial values have not been sustained on Earth’s surface since before the Pleistocene Epoch (or more than 2.6 million years ago) (13).”; “This is particularly alarming, as human societies are locally adapted to a specific climatic niche. The rise of large-scale, urbanized agrarian societies began with the shift to the stable climate of the Holocene ~12,000 y ago (42). Since then, human population density peaked within a narrow climatic envelope with a mean annual average temperature of ~13 °C. Even today, the most economically productive centers of human activity are concentrated in those areas (43). The cumulative impacts of warming may overwhelm societal adaptive capacity.”).

¹⁰⁹ Dreyfus G. B., Xu Y., Shindell D. T., Zaelke D., & Ramanathan V. (2022) *Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 119(22): e2123536119, 1–8, 1 (“We find that mitigation measures that target only decarbonization are essential for strong long-term cooling but can result in weak near-term warming (due to unmasking the cooling effect of co-emitted aerosols) and lead to temperatures exceeding 2°C before 2050. In contrast, pairing decarbonization with additional mitigation measures targeting short-lived climate pollutants (SLCPs) and N₂O, slows the rate of warming a decade or two earlier than decarbonization alone and avoids the 2°C threshold altogether. These non-CO₂ targeted measures when combined with decarbonization can provide net cooling by 2030, reduce the rate of warming from 2030 to 2050 by about 50%, roughly half of which comes from methane, significantly larger than decarbonization alone over this timeframe.”). See also Ou Y., Roney C., Alsalam J., Calvin K., Creason J., Edmonds J., Fawcett A. A., Kyle P., Narayan K., O'Rourke P., Patel P., Ragnauth S., Smith S. J., & McJeon H. (2021) *Deep mitigation of CO₂ and non-CO₂ greenhouse gases toward 1.5 °C and 2 °C futures*, NATURE COMMUN. 12(6245): 1–9, 4 (“CO₂ abatement only cannot achieve the 1.5 °C target under all modeled 1.5 °C pathways but achieves the 2 °C target if reaching net-zero CO₂ by 2030 under 2 °C pathways; CO₂-driven GHG abatement achieves the 1.5 °C target if reaching net-zero CO₂ by 2032 under 1.5 °C pathways or achieves the 2 °C target if reaching net-zero CO₂ by 2045 under 2 °C pathways; Comprehensive GHG abatement achieves the 1.5 °C target if reaching net-zero CO₂ by 2053 under 1.5 °C pathways or achieves the 2 °C target if reaching net-zero CO₂ by 2075 under 2 °C pathways.”).

¹¹⁰ Lelieveld J., Klingmüller K., Pozzer A., Burnett R. T., Haines A., & Ramanathan V. (2019) *Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 116(15): 7192–7197, 7194 (“Finally, our model simulations show that fossil-fuel-related aerosols have masked about 0.51(±0.03) °C of the global warming from increasing greenhouse gases (Fig. 3).”). See also Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-2 (Figure SPM.2c shows that Sulphur dioxide (SO₂) contributes –0.49 °C (–0.10 to –0.93 °C) to observed warming in 2010–2019 relative to 1850–1900).

¹¹¹ Ramanathan V. & Feng Y. (2008) *On avoiding dangerous anthropogenic interference with the climate system: Formidable challenges ahead*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 105(38): 14245–14250, 14248 (“Switching from coal to “cleaner” natural gas will reduce CO₂ emission and thus would be effective in minimizing future increases in the committed warming. However, because it also reduces air pollution and thus the ABC [Atmospheric Brown Cloud]

masking effect, it may speed up the approach to the committed warming of 2.4°C (1.4–4.3°C).” See also United Nations Environment Programme & World Meteorological Organization (2011) *INTEGRATED ASSESSMENT OF BLACK CARBON AND TROPOSPHERIC OZONE*, 254 (“Evaluating global mean temperature change, it was found that the targeted measures to reduce emissions of methane and BC could greatly reduce warming rates over the next few decades (Figure 6.1; Box 6.1). When all measures are fully implemented, warming during the 2030s relative to the present would be only half as much as in the reference scenario. In contrast, even a fairly aggressive strategy to reduce CO₂ emissions, as for the CO₂-measures scenario, does little to mitigate warming until after the next 20-30 years (Box 6.2). In fact, sulphur dioxide (SO₂) is coemitted with CO₂ in some of the most highly emitting activities, coal burning in large-scale combustion such as in power plants, for example, that are obvious targets for reduced usage under a CO₂-emissions mitigation strategy. Hence such strategies can lead to additional near-term warming (Figure 6.1), in a well-known temporary effect (e.g. Raes and Seinfeld, 2009), although most of the near-term warming is driven by CO₂ emissions in the past. The CO₂-measures scenario clearly leads to long-term benefits however, with a dramatically lower warming rate at 2070 under that scenario than under the scenario with only CH₄ and BC measures (see Figure 6.1 and timescales in Box 6.2). Hence the near-term measures clearly cannot be substituted for measures to reduce emissions of long-lived GHGs. The near-term measures largely target different source sectors for emissions than the CO₂ measures, so that the emissions reductions of the short-lived pollutants are almost identical regardless of whether the CO₂ measures are implemented or not, as shown in Chapter 5. The near-term measures and the CO₂ measures also impact climate change over different timescales owing to the different lifetimes of these substances. In essence, the near-term CH₄ and BC measures are effectively uncoupled from CO₂ measures examined here.”); Shindell D. & Smith C. J. (2019) *Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels*, NATURE 573: 408–411, 409–410, Addendum “Methods” (“These results differ greatly from the idealized picture of a near-instantaneous response to the removal of aerosol cooling followed by a slow transition to dominance by the effects of CO₂. In these more plausible cases, the temperature effects of the reduction in CO₂, SO₂ and CH₄ roughly balance one another until about 2035. After this, the cooling effects of reduced CO₂ continue to increase, whereas the warming induced by a reduction in SO₂ and the cooling induced by the reduction in CH₄ taper off, such that the cooling induced by the reduction in CO₂ dominates (Fig. 3). Examining the effects of CO₂ and SO₂ alone (Fig. 3d), the faster response of SO₂ to the changes in emissions means that the net effect of these two pollutants would indeed be a short-term warming—but a very small one, of between 0.02 °C and 0.10 °C in the ensemble mean temperature response (up to 0.30 °C for the 95th percentile across pathways). Accounting for all fossil-related emissions (Fig. 3e), any brief climate penalty decreases to no more than 0.05 °C (0.19 °C at the 95th percentile), with the smaller value largely due to the additional near-term cooling from reductions in methane. Nearly all the warming in the 2020s and 2030s (Fig. 2) is therefore attributable to the effect of the residual emissions (mainly of CO₂) during the gradual fossil phase-out, as well as the response to historical emissions.”; “We note that, although this study focuses on the effects of fossil-fuel related emissions, accounting for the effects of reductions in greenhouse gases from non-fossil sources—including fluorinated gases and both methane and nitrous oxide from agriculture—along with biofuels that are a large source of warming black carbon, could eliminate any near-term penalty entirely. In fact, given that the net effect of the fossil-fuel phase-out on temperature is minimal during the first 20 years (Fig. 3), reducing those other emissions is the only plausible way in which to decrease warming during that period.”); Hansen J. E. & Sato M. (13 July 2021) *July Temperature Update: Faustian Payment Comes Due*, Columbia University (“It follows that the global warming acceleration is due to the one huge climate forcing that we have chosen not to measure: the forcing caused by imposed changes of atmospheric aerosols... We should expect the global warming rate for the quarter of a century 2015-2040 to be about double the 0.18°C/decade rate during 1970-2015 (see Fig. 2), unless appropriate countermeasures are taken.”); *discussed in* Berwyn B. (15 September 2021) *The Rate of Global Warming During Next 25 Years Could Be Double What it Was in the Previous 50, a Renowned Climate Scientist Warns*, INSIDE CLIMATE NEWS; and Feijoo F., Mignone B. K., Kheshgi H. S., Hartin C., McJeon H., & Edmonds J. (2019) *Climate and carbon budget implications of linked future changes in CO₂ and non-CO₂ forcing*, ENVIRON. RES. LETT. 14(4): 04407, 1–11.

¹¹² Xu Y. & Ramanathan V. (2017) *Well below 2 °C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 114(39): 10315–10323, Supplemental Information (Table S1). See also Dreyfus G. B., Xu Y., Shindell D. T., Zaelke D., & Ramanathan V. (2022) *Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 119(22): e2123536119, 1–8, 5 (“Aggressive decarbonization to achieve net-zero CO₂ emissions in the 2050s (as in the decarb-only scenario) results in weakly accelerated net warming compared to the reference case, with a positive warming up to 0.03 °C in the mid-2030s, and no net avoided warming until the mid-2040s due to the reduction in co-emitted cooling aerosols (Figure 3a). By 2050, decarbonization measures result in very limited net avoided warming (0.07°C), consistent with Shindell and Smith (43), but rise to a likely detectable 0.25°C by 2060 and a major benefit of 1.4°C by 2100 (Table S5). In contrast,

pairing decarbonization with mitigation measures targeting CH₄, BC, HFC, and N₂O (not an SLCP due to its longer lifetime) independent from decarbonization are essential to slowing the rate of warming by the 2030s to under 0.3°C per decade (Table 1, Figure 3b), similar to the 0.2°C to 0.25°C per decade warming prior to 2020 (38, 53). Recent studies suggest that rate of warming rather than level of warming controls likelihood of record-shattering extreme weather events (54, 55). By 2050, the net avoided warming from the targeted non-CO₂ measures is 0.26°C, almost 4 times larger than the net benefit of decarbonization alone (0.07°C) (Table S5).”).

¹¹³ Naik V., et al. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7, 6-8 (“Across the SSPs, the collective reduction of CH₄, ozone precursors and HFCs can make a difference of global mean surface air temperature of 0.2 with a very likely range of [0.1–0.4] °C in 2040 and 0.8 with a very likely range of [0.5–1.3] °C at the end of the 21st century (comparing SSP3-7.0 and SSP1-1.9), which is substantial in the context of the Paris Agreement. Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*). {6.6.3, 6.7.3, 4.4.4}”; “Additional CH₄ and BC mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with SO₂ reductions that would accompany decarbonization (*high confidence*).”). See also Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-36 (“Strong, rapid and sustained reductions in CH₄ emissions would also limit the warming effect resulting from declining aerosol pollution and would improve air quality.”).

¹¹⁴ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 17 (“Mitigation of methane is very likely the strategy with the greatest potential to decrease warming over the next 20 years.”).

¹¹⁵ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 21 (“This is because a realistically paced phase-out of fossil fuels, or even a rapid one under aggressive decarbonization, is likely to have minimal net impacts on near-term temperatures due to the removal of co-emitted aerosols (Shindell and Smith 2019). As methane is the most powerful driver of climate change among the short-lived substances (Myhre et al. 2013), mitigation of methane emissions is very likely to be the most powerful lever in reducing near-term warming. This is consistent with other assessments; for example, the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (IPCC AR5) showed that methane controls implemented between 2010 and 2030 would lead to a larger reduction in 2040 warming than the difference between RCPs 2.6, 4.5 and 6.0 scenarios. (The noted IPCC AR5-era scenarios are called representative concentration pathways (RCPs, with the numerical value indicating the target radiative forcing in 2100 (Kirtman et al. 2013)).”). See also Ocko I. B., Sun T., Shindell D., Oppenheimer M., Hristov A. N., Pacala S.W., Mauzerall D. L., Xu Y., & Hamburg S. P. (2021) *Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming*, ENVIRON. RES. LETT. 16(5): 054042, 1–11, 1 (“Pursuing all mitigation measures now could slow the global-mean rate of near-term decadal warming by around 30%, avoid a quarter of a degree centigrade of additional global-mean warming by midcentury, and set ourselves on a path to avoid more than half a degree centigrade by end of century. On the other hand, slow implementation of these measures may result in an additional tenth of a degree of global-mean warming by midcentury and 5% faster warming rate (relative to fast action), and waiting to pursue these measures until midcentury may result in an additional two tenths of a degree centigrade by midcentury and 15% faster warming rate (relative to fast action).”); and Shindell D. & Smith C. J. (2019) *Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels*, NATURE 573: 408–411, Addendum “Methods” (“We note that, although this study focuses on the effects of fossil-fuel related emissions, accounting for the effects of reductions in greenhouse gases from non-fossil sources—including fluorinated gases and both methane and nitrous oxide from agriculture—along with biofuels that are a large source of warming black carbon, could eliminate any near-term penalty entirely. In fact, given that the net effect of the fossil-fuel phase-out on temperature is minimal during the first 20 years (Fig. 3), reducing those other emissions is the only plausible way in which to decrease warming during that period.”).

¹¹⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-36 (“Strong, rapid and sustained reductions in CH₄

emissions would also limit the warming effect resulting from declining aerosol pollution and would improve air quality.”). See also Naik V., et al. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7 (“Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*). {6.6.3, 6.7.3, 4.4.4}”).

¹¹⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., et al. (eds.), SPM-30–SPM-31 (“Deep GHG emissions reductions by 2030 and 2040, particularly reductions of methane emissions, lower peak warming, reduce the likelihood of overshooting warming limits and lead to less reliance on net negative CO₂ emissions that reverse warming in the latter half of the century. Reaching and sustaining global net zero GHG emissions results in a gradual decline in warming. (*high confidence*) (Table SPM.1) {3.3, 3.5, Box 3.4, Cross-Chapter Box 3 in Chapter 3, AR6 WG I SPM D1.8}”).

¹¹⁸ Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., et al. (eds.), SPM-22 (“C.1.2 In modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) assuming immediate action, global net CO₂ emissions are reduced compared to modelled 2019 emissions by 27% [11–46%] in 2030 and by 52% [36–70%] in 2040; and global CH₄ emissions are reduced by 24% [9–53%] in 2030 and by 37% [20–60%] in 2040. In pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot global net CO₂ emissions are reduced compared to modelled 2019 emissions by 48% [36–69%] in 2030 and by 80% [61–109%] in 2040; and global CH₄ emissions are reduced by 34% [21–57%] in 2030 and 44% [31–63%] in 2040. There are similar reductions of non-CO₂ emissions by 2050 in both types of pathways: CH₄ is reduced by 45% [25–70%]; N₂O is reduced by 20% [-5 – 55%]; and F-Gases are reduced by 85% [20–90%]. [FOOTNOTE 44] Across most modelled pathways, this is the maximum technical potential for anthropogenic CH₄ reductions in the underlying models (*high confidence*). Further emissions reductions, as illustrated by the IMP-SP pathway, may be achieved through changes in activity levels and/or technological innovations beyond those represented in the majority of the pathways (*medium confidence*). Higher emissions reductions of CH₄ could further reduce peak warming. (*high confidence*) (Figure SPM.5) {3.3}”).

¹¹⁹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, Figure 5.1.

¹²⁰ Naik V., et al. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7, 6-8 (“An additional concomitant methane mitigation (consistent with SSP1’s stringent climate mitigation policy implemented in the SSP3 world) would not only alleviate this warming but would turn this into a cooling of 0.07 with a likely range of [-0.02 to 0.14] °C (compared with SSP3-7.0 in 2040). Across the SSPs, the collective reduction of CH₄, ozone precursors and HFCs can make a difference of GSAT of 0.2 with a very likely range of [0.1–0.4] °C in 2040 and 0.8 with a very likely range of [0.5–1.3] °C at the end of the 21st century (comparing SSP3-7.0 and SSP1-1.9), which is substantial in the context of the Paris Agreement. Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*). {6.6.3, 6.7.3, 4.4.4}”; “Additional CH₄ and BC mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with SO₂ reductions that would accompany decarbonization (*high confidence*).”).

¹²¹ Staniaszek Z., Griffiths P. T., Folberth G. A., O’Connor F. M., Abraham N. L., Archibald A. T. (2021) *The role of future anthropogenic methane emissions in air quality and climate*, NPJ CLIM. ATMOS. SCI. 5(21): 1–8, 3 (“Between 2015 to 2050 alone, SSP3-7.0 leads to almost 2° of warming in UKCA-CH₄ (see Fig. 3a)—the entirety of the temperature limit compared to pre-industrial levels set in the Paris agreement¹. The total temperature increase (pre-industrial to 2050) in SSP3-7.0 is 2.82 ± 0.12 K. The ZAME experiment shows that 1° of this warming (or one-third of the SSP3-7.0 total temperature increase to 2050) can be attributed to the effects of future anthropogenic methane emissions. This further highlights the potential of methane emissions reductions for climate mitigation^{6–8,32} but shows that even the zero methane scenario breaches 1.5°, and underscores the necessity of CO₂ mitigation.”).

¹²² United Nations Environment Programme & World Meteorological Organization (2011) *INTEGRATED ASSESSMENT OF BLACK CARBON AND TROPOSPHERIC OZONE*, 239, 246 (“Evaluating global mean temperature change, it was found that the targeted measures to reduce emissions of methane and BC could greatly reduce warming rates over the next few decades (Figure 6.1; Box 6.1). When all measures are fully implemented, warming during the 2030s relative to the present would be only half as much as in the reference scenario. In contrast, even a fairly aggressive strategy to reduce CO₂ emissions, as for the CO₂-measures scenario, does little to mitigate warming until after the next 20–30 years (Box 6.2).”; “Large impacts of the measures examined here were also seen for the Arctic despite the minimal amount of emissions currently taking place there. This occurs due to the high sensitivity of the Arctic both to pollutants that are transported there from remote sources and to radiative forcing that takes place in areas of the northern hemisphere outside the Arctic. The 16 measures examined here, including the measures on pellet stoves and coal briquettes, reduce warming in the Arctic by 0.7 °C (range 0.2 to 1.3 °C) at 2040. This is a large portion of the 1.1 °C (range 0.7 to 1.7 °C) warming projected under the reference scenario for the Arctic, and hence implementation of the measures would be virtually certain to substantially slow, but not halt, the pace of Arctic climate change.”).

¹²³ Ocko I. B., Sun T., Shindell D., Oppenheimer M., Hristov A. N., Pacala S. W., Mauzerall D. L., Xu Y., & Hamburg S. P. (2021) *Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming*, ENVIRON. RES. LETT. 16(5): 054042, 1–11, 1 (“Pursuing all mitigation measures now could slow the global-mean rate of near-term decadal warming by around 30%, avoid a quarter of a degree centigrade of additional global-mean warming by midcentury, and set ourselves on a path to avoid more than half a degree centigrade by end of century. On the other hand, slow implementation of these measures may result in an additional tenth of a degree of global-mean warming by midcentury and 5% faster warming rate (relative to fast action), and waiting to pursue these measures until midcentury may result in an additional two tenths of a degree centigrade by midcentury and 15% faster warming rate (relative to fast action).”).

¹²⁴ Staniaszek Z., Griffiths P. T., Folberth G. A., O’Connor F. M., Abraham N. L., Archibald A. T. (2021) *The role of future anthropogenic methane emissions in air quality and climate*, NPJ CLIM. ATMOS. SCI. 5(21): 1–8, 2 (“In the ZAME scenario, (following the cessation of anthropogenic methane emissions, Fig. 1a), surface methane decreases globally with an e-folding timescale of 6.55 ± 0.06 years, and reaches below pre-industrial levels by 2030 (i.e. within 15 years; see Fig. 1b). The whole atmosphere methane burden declines to below pre-industrial levels within 12 years, stabilising at 1775 ± 15 Tg, 71% below the counterfactual in 2050.”).

¹²⁵ Sun T., Ocko I. B., Hamburg S. P., (2022) *The value of early methane mitigation in preserving Arctic summer sea ice*, ENVIRON. RES. LETT. 17(4): 044001, 1–11, 1 (“While drastic cuts in carbon dioxide emissions will ultimately control the fate of Arctic summer sea ice, we show that simultaneous early deployment of feasible methane mitigation measures is essential to avoiding the loss of Arctic summer sea ice this century. In fact, the benefit of combined methane and carbon dioxide mitigation on reducing the likelihood of a seasonally ice-free Arctic can be greater than the simple sum of benefits from two independent greenhouse gas policies. The extent to which methane mitigation can help preserve Arctic summer sea ice depends on the implementation timeline. The benefit of methane mitigation is maximized when all technically feasible measures are implemented within this decade, and it decreases with each decade of delay in implementation due to its influence on end-of-century temperature. A key insight is that methane mitigation substantially lowers the risk of losing Arctic summer sea ice across varying levels of concomitant carbon dioxide mitigation.”).

¹²⁶ Bonan D. B., Schneider T., Eisenman I., & Wills R. C. J. (2021) *Constraining the Date of a Seasonally Ice-Free Arctic Using a Simple Model*, GEOPHYS. RES. LETT. 48(18): 1–12, 1 (“Under a high-emissions scenario, an ice-free Arctic will likely (>66% probability) occur between 2036 and 2056 in September and between 2050 and 2068 from July to October. Under a medium-emissions scenario, the “likely” date occurs between 2040 and 2062 in September and much later in the 21st century from July to October.”).

¹²⁷ Pistone K., Eisenman I., & Ramanathan V. (2019) *Radiative Heating of an Ice-Free Arctic Ocean*, GEOPHYS. RES. LETT. 46(13): 7474–7480, 7474 (“Here we use satellite observations to estimate the amount of solar energy that would be added in the worst-case scenario of a complete disappearance of Arctic sea ice throughout the sunlit part of the year. Assuming constant cloudiness, we calculate a global radiative heating of 0.71 W/m² relative to the 1979 baseline state. This is equivalent to the effect of one trillion tons of CO₂ emissions. These results suggest that the additional heating due to complete Arctic sea ice loss would hasten global warming by an estimated 25 years.”).

¹²⁸ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 21 (“This is because a realistically paced phase-out of fossil fuels, or even a rapid one under aggressive decarbonization, is likely to have minimal net impacts on near-term temperatures due to the removal of co-emitted aerosols (Shindell and Smith 2019). As methane is the most powerful driver of climate change among the short-lived substances (Myhre et al. 2013), mitigation of methane emissions is very likely to be the most powerful lever in reducing near-term warming. This is consistent with other assessments; for example, the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (IPCC AR5) showed that methane controls implemented between 2010 and 2030 would lead to a larger reduction in 2040 warming than the difference between RCPs 2.6, 4.5 and 6.0 scenarios. (The noted IPCC AR5-era scenarios are called representative concentration pathways (RCPs, with the numerical value indicating the target radiative forcing in 2100 (Kirtman et al. 2013)).”). See also Shindell D. & Smith C. J. (2019) *Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels*, NATURE 573: 408–411, Addendum “Methods” (“We note that, although this study focuses on the effects of fossil-fuel related emissions, accounting for the effects of reductions in greenhouse gases from non-fossil sources—including fluorinated gases and both methane and nitrous oxide from agriculture—along with biofuels that are a large source of warming black carbon, could eliminate any near-term penalty entirely. In fact, given that the net effect of the fossil-fuel phase-out on temperature is minimal during the first 20 years (Fig. 3), reducing those other emissions is the only plausible way in which to decrease warming during that period.”).

¹²⁹ Saunio M., et al. (2020) *The Global Methane Budget 2000-2017*, EARTH SYST. SCI. DATA 12(3): 1561–1623, 1561 (“For the 2008–2017 decade, global methane emissions are estimated by atmospheric inversions (a top-down approach) to be 576 Tg CH₄ yr⁻¹ (range 550–594, corresponding to the minimum and maximum estimates of the model ensemble). Of this total, 359 Tg CH₄ yr⁻¹ or ~ 60 % is attributed to anthropogenic sources, that is emissions caused by direct human activity (i.e. anthropogenic emissions; range 336–376 Tg CH₄ yr⁻¹ or 50 %–65 %).”).

¹³⁰ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 25 (“Anthropogenic methane emissions come primarily from three sectors: fossil fuels, ~35 per cent; agriculture, ~40 per cent; and waste, ~20 per cent.”).

¹³¹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 29 (“In comparison, biomass burning, which has a mixture of anthropogenic and natural causes, and the use of biofuels are relatively minor sources of methane. Agricultural waste burning, included in the biofuels category in the US EPA inventory and in the agricultural sector in CEDS, GAINS, EDGAR and FAO estimates for this category but not included in Figure 2.1, range from 1 to 3 Mt/yr. ... Though some biomass burning is natural, current burning results largely from anthropogenic activities. Large amounts of biomass are burned in the tropics in human induced fires related to shifting cultivation, deforestation, burning of agricultural wastes and the use of biofuels (Dlugokencky and Houweling 2015). Biomass burning remains a relatively small source of methane and it accounts for approximately 5 per cent of global methane emissions, an estimated 10–25 Mt/yr (Figure 2.1) (Saunio et al. 2020).”).

¹³² United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 9–10 (“Currently available measures could reduce emissions from these major sectors by approximately 180 Mt/yr, or as much as 45 per cent, by 2030. This is a cost-effective step required to achieve the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) 1.5° C target... Roughly 60 per cent, around 75 Mt/yr, of available targeted measures have low mitigation costs², and just over 50 per cent of those have negative costs – the measures pay for themselves quickly by saving money.”).

¹³³ United Nations Environment Programme (2021) *EMISSIONS GAP REPORT 2021: THE HEAT IS ON – A WORLD OF CLIMATE PROMISES NOT YET DELIVERED*, 47 (“Over the last two decades, the main cause of increasing atmospheric methane is likely increasing anthropogenic emissions, with hotspot contributions from agriculture and waste in South and South-East Asia, South America and Africa, and from fossil fuels in China, the Russian Federation and the United States of America (Jackson et al. 2020). Emissions from natural sources may also be increasing, as wetlands warm, tropical rainfall increases and permafrost thaws.”). See also Lan X., Nisbet E. G., Dlugokencky E. J., & Michel S. E. (2021) *What do we know about the global methane budget? Results from four decades of atmospheric CH₄ observations and the way forward*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 20200440, 1–14, 11 (“Explaining the renewed and accelerating increase

in atmospheric CH₄ burden since 2007 remains challenging, and the exact causes are not yet clear. But, the observations we describe suggest that increased emissions from microbial sources are the strongest driver, with a relatively smaller contribution from other processes, e.g., fossil fuel exploitation. A more difficult question to answer is the one posed by this special issue: is warming feeding the warming? We cannot say for certain, but we cannot rule out the possibility that climate change is increasing CH₄ emissions. The strong signals from the tropics combined with the isotopic data are consistent with increased emissions from natural wetlands, but large [interannual variability (IAV)] and inter-decadal variability in wetland drivers like precipitation make it difficult to identify small trends. Observations are needed that will help process models capture this variability. The size of the IAV illustrates the potential scope of uncontrollable near-future change and emphasizes the urgency of reducing the global methane burden by mitigating the methane emissions that we can control, from the fossil fuel and agricultural sectors.”). However, other studies suggest a more limited increase in recent emissions from natural wetlands compared to agriculture and waste and energy production sectors. See Zhang Z., et al. (2021) *Anthropogenic emissions are the main contribution to the rise of atmospheric methane (1993-2017)*, NAT’L SCI. REV. 9(5): nwab200, 1–13, 1 (“Our emission scenarios that have the fewest biases with respect to isotopic composition suggest that the agriculture, landfill, and waste sectors were responsible for 53±13% of the renewed growth over the period 2007-2017 compared to 2000-2006; industrial fossil fuel sources explained an additional 34±24%, and wetland sources contributed the least at 13±9%. The hypothesis that a large increase in emissions from natural wetlands drove the decrease in atmospheric δ¹³C-CH₄ values cannot be reconciled with current process-based wetland CH₄ models. This finding suggests the need for increased wetland measurements to better constrain the contemporary and future role of wetlands in the rise of atmospheric methane and climate feedbacks. Our findings highlight the predominant role of anthropogenic activities in driving the growth of atmospheric CH₄ concentrations.”); and Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, ENVIRON. SCI. POLICY 134: 127–136, 128, 129 (“While the precise explanation for the stabilization and subsequent growth of atmospheric CH₄ over the past two decades has been a subject of debate within the scientific community (Nisbet et al., 2019; Kirschke et al., 2013; Rigby et al., 2017; Turner et al., 2019; Schaefer, 2019; Saunio et al., 2016, 2020), a new study concludes that the recent growth is due in roughly equal parts to emissions from fossil fuel sources and the combined emissions from agricultural and waste sources (Jackson et al., 2020). The increase in atmospheric.”; “Wetlands are currently the largest natural source of atmospheric CH₄ (Saunio et al., 2020), with emissions controlled by environmental factors including the soil temperature, water table depth, and vegetation cover and composition (Dean et al., 2018; Gedney et al., 2004); all of these variables are affected by climate change. Zhang et al. (2017) calculate that increased CH₄ emissions from wetlands under climate change scenarios could result in an increased radiative forcing ranging from 0.08 W m⁻² for RCP2.6 (strong climate mitigation with the possibility of reaching the 2° target) to 0.19 W m⁻² for RCP8.5 (business-as-usual). Beyond 2100, climate change-induced CH₄ emissions from marine and freshwater systems and permafrost could also become important (Arneeth et al., 2010; Dean et al., 2018; O’Connor et al., 2010).”).

¹³⁴ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 28 (“Fossil fuels: release during oil and gas extraction, pumping and transport of fossil fuels accounts for roughly 23 per cent of all anthropogenic emissions, with emissions from coal mining contributing 12 per cent.”).

¹³⁵ Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model*, ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 025004, 1–21, 7–8 (Table 2 and Supplementary material tab “World”). See also International Energy Agency (2022) *GLOBAL METHANE TRACKER*, 4 (“We estimate that the global energy sector was responsible for around 135 million tonnes of methane emitted into the atmosphere in 2021. Following the Covid-induced decline in 2020, this represents a year-on-year increase in energy-related methane emissions of almost 5%, largely due to higher fossil fuel demand and production as economies recovered from the shock of the pandemic... Of the 135 million tonnes of energy-related emissions, an estimated 42 Mt are from coal operations, 41 Mt from oil, 39 Mt are from extracting, processing and transporting natural gas, 9 Mt from the incomplete combustion of bioenergy (largely when wood and other solid biomass is used as a traditional cooking fuel), and 4 Mt leaks from end-use equipment.”).

¹³⁶ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 29 (“Within the fossil fuel sector, extraction, processing and distribution of the three main fuels have comparable impacts, with emissions from oil and gas each contributing 34 per cent followed by coal with 32 per cent of sectoral emissions in 2020 (Höglund-Isaksson 2020). Emissions from the coal subsector are entirely from mining-related activities, including both active and abandoned facilities. Within oil and gas,

methane emissions associated with onshore conventional extraction along with downstream gas usage are the largest sources (Figure 2.3). Venting, the deliberate release of unwanted gas, is the primary cause of emissions during onshore conventional extraction, whereas fugitive emissions, the inadvertent release or escape of gas from fossil fuel systems, dominate downstream gas emissions. Within the fossil fuel sector, at the national level, emissions from the oil subsector in Russia and the coal subsector in China appear to be far larger than any other national level subsectors (Scarpelli *et al.* 2020). While these types of data based on national inventories are useful, it is important to note that many local measurements show large differences and often substantially higher emissions than conventional reporting, in many cases due to the presence of a small number of super-emitters, and imply these estimates may be too low (Zhang *et al.* 2020; Duren *et al.* 2019; Varon *et al.*, 2019; Zavala-Araiza *et al.* 2018). These emissions give a sense of mitigation opportunities by region and sector, which is explored in Chapter 4.”).

¹³⁷ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 30 (Figure 2.3, “Within the fossil fuel sector, extraction, processing and distribution of the three main fuels have comparable impacts, with emissions from oil and gas each contributing 34 per cent followed by coal with 32 per cent of sectoral emissions in 2020 (Höglund-Isaksson 2020). Emissions from the coal subsector are entirely from mining-related activities, including both active and abandoned facilities. Within oil and gas, methane emissions associated with onshore conventional extraction along with downstream gas usage are the largest sources (Figure 2.3). Venting, the deliberate release of unwanted gas, is the primary cause of emissions during onshore conventional extraction, whereas fugitive emissions, the inadvertent release or escape of gas from fossil fuel systems, dominate downstream gas emissions. Within the fossil fuel sector, at the national level, emissions from the oil subsector in Russia and the coal subsector in China appear to be far larger than any other national level subsectors (Scarpelli *et al.* 2020). While these types of data based on national inventories are useful, it is important to note that many local measurements show large differences and often substantially higher emissions than conventional reporting, in many cases due to the presence of a small number of super-emitters, and imply these estimates may be too low (Zhang *et al.* 2020; Duren *et al.* 2019; Varon *et al.*, 2019; Zavala-Araiza *et al.* 2018). These emissions give a sense of mitigation opportunities by region and sector, which is explored in Chapter 4.”).

¹³⁸ Hope M. (2014) *Explained: Fugitive methane emissions from natural gas production*, CARBONBRIEF (“Natural gas is mainly methane, some of which escapes during the drilling, extraction, and transportation process. Such outbreaks are known as fugitive emissions.”). See also Picard D. (2000) *Fugitive emissions from oil and natural gas activities*, Background Paper in IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories (“In general, fugitive emissions from oil and gas activities may be attributed to the following primary types of sources: • fugitive equipment leaks; • process venting; • evaporation losses; • disposal of waste gas streams (e.g., by venting or flaring), and • accidents and equipment failures.”).

¹³⁹ International Energy Agency (2022) [GLOBAL METHANE TRACKER 2022](#), 6 (“Globally, our analysis finds that methane emissions from the energy sector are about 70% greater than the sum of estimates submitted by national governments.”).

¹⁴⁰ International Energy Agency (2022) [GLOBAL METHANE TRACKER 2022](#), 18 (“Emissions from abandoned coal mines and oil and gas wells are not included in the Global Methane Tracker: existing measurements cover a limited number of facilities and regions, and reliable data on abandoned mines and wells is not available for most countries. These sources could, nonetheless, represent significant levels of emissions. The U.S. Environmental Protection Agency indicates they are responsible for close to 5% of energy-related methane in the United States; and a recent study estimated that abandoned mines could account for almost one fifth of methane emissions from worldwide coal production.”); citing Kholod N., Evans M., Pilcher R. C., Roshchanka V., Ruiz F., Coté M., & Collings R. (2020) *Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production*, J. CLEAN. PROD. 256(120489): 1–12.

¹⁴¹ United States Environmental Protection Agency, *About Coal Mine Methane* (last visited 31 August 2022) (“CMM is released by different types of mines: [Active underground mines](#), which release methane through degasification systems (drainage system methane) and ventilation systems (ventilation air methane or VAM); [Abandoned or closed mines](#) release abandoned mine methane (AMM) from diffuse vents, ventilation pipes, boreholes, or fissures in the ground; [Surface mines](#) emit less methane than underground mines, but because surface mines produce large volumes of coal, some surface mines can also emit methane in large quantities.”).

¹⁴² Assan S. (2022) *Tackling Australia's Coal Mine Methane Problem*, Ember, 5 (“The IEA estimated that Australian coal mines emitted 1.8 million tonnes of methane in 2021, double the officially reported figures. Independent satellite measurements have also uncovered underreporting of methane emissions from Australian coal mines. Open-pit mines show the greatest disparity between reported and measured emissions.”).

¹⁴³ Kholod N., Evans M., Pilcher R. C., Roshchanka V., Ruiz F., Coté M., & Collings R. (2020) *Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production*, J. CLEAN. PROD. 256(120489): 1–12, 9–10 (“The results show that regardless of future coal production scenario used by the model, [abandoned mine methane (AMM)] emissions will increase in the future. AMM emissions accounted for 17% of the total methane from coal mining in 2010. For comparison, data reported to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) from key coal producing countries show that the share of AMM in total methane emissions from coal mining in the latest available year (2015) was 1% in Germany, 2% in each Australia and Poland, 11% in the United States and 34% in the United Kingdom (UNFCCC, 2017). AMM emissions can be difficult to inventory because of ownership issues, measurement problems, the extent of mine flooding, and other factors. Because AMM emissions grow faster than [coal mine methane (CMM)], the share of AMM in total methane emissions may increase to 23% by 2050 and 27% in 2100 in the reference scenario.”).

¹⁴⁴ International Energy Agency (2021) *NET ZERO BY 2050: A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR*, 104 (“In the NZE, total methane emissions from fossil fuels fall by around 75% between 2020 and 2030, equivalent to a 2.5 gigatonne of carbon-dioxide equivalent (GtCO₂-eq) reduction in GHG emissions (Figure 3.5).”). See also Smirnov A. (2 November 2021) *Why the world must act on coal mine methane*, EMBER (“The IEA estimates that 40.5 million tonnes (MT) of methane leaked from global operational coal mines in 2020. Using a multiplier of 86, as recommended by the IPCC to assess the short-term climate impact of methane, this means coal mines leak methane equivalent to 3,490 million tonnes of CO₂ each year. This is much bigger than the multiplier of 30 used by the IEA when they calculated coal mine methane’s impact was already bigger than aviation and shipping combined. This means coal mine methane’s short-term climate impact – at 3,490 million tonnes CO₂e – is greater than the EU-27’s CO₂ emissions, which were 2,920 million tonnes in 2019.... The IEA’s *Net Zero by 2050* report shows that coal power generation needs to fall by two thirds this decade – a massive 67% fall from 2020 to 2030 – to keep warming to 1.5 degrees.”).

¹⁴⁵ International Energy Agency (28 July 2022) *Global coal demand is set to return to its all-time high in 2022*, Press release (“Based on current economic and market trends, global coal consumption is forecast to rise by 0.7% in 2022 to 8 billion tonnes, assuming the Chinese economy recovers as expected in the second half of the year, the IEA’s July 2022 *Coal Market Update* says. This global total would match the annual record set in 2013, and coal demand is likely to increase further next year to a new all-time high.”).

¹⁴⁶ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 28 (“Agriculture: emissions from enteric fermentation and manure management represent roughly 32 per cent of global anthropogenic emissions. Rice cultivation adds another 8 per cent to anthropogenic emissions. Agricultural waste burning contributes about 1 per cent or less.”).

¹⁴⁷ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 29 (“The two largest sources are livestock and fossil fuels. Within the livestock subsector, enteric fermentation and manure management are the two processes generating emissions, with the former dominant and cattle the dominant animal (Figure 2.2). Within the manure category, pigs play the largest role though cattle are again important.”).

¹⁴⁸ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 29 (see Figure 2.2 showing annual livestock methane emissions with cattle accounting for majority of enteric methane emissions). See also Food and Agriculture Organization of the United Nations (2016) *Reducing Enteric Methane for Improving Food Security and Livelihoods*, 3 (“Globally, ruminant livestock produce about 2.7 Gt CO₂ eq. of enteric methane annually, or about 5.5% of total global greenhouse gas emissions from human activities. Cattle account for 77% of these emissions (2.1 Gt), buffalo for 14% (0.37 Gt) and small ruminants (sheep and goats) for the remainder (0.26 Gt).”).

¹⁴⁹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 29 (“The two largest sources are livestock and fossil fuels. Within the livestock subsector, enteric fermentation and manure management are the two processes generating emissions, with the former dominant and cattle the dominant animal (Figure 2.2). Within the manure category, pigs play the largest role though cattle are again important.”).

¹⁵⁰ Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model*, ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 025004, 1–21, 7–8 (Table 2) and Supplementary material tab “World”.

¹⁵¹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 29 (“While rice cultivation feeds up to a third of the world’s population, rice fields are a significant source of methane (Mbow *et al.* 2019; Dlugokencky and Houweling 2015). Methane is produced through anaerobic decomposition of organic material in flooded rice fields which are responsible for approximately 8–11 per cent of global anthropogenic methane emissions (Saunio *et al.* 2020; Mbow *et al.* 2019).”).

¹⁵² United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), Figure 2.6 (Showing that rice cultivation accounted for an estimated 26.6 million tons of methane emissions in 2017, out of a total of 129 million tons of methane emissions in Asia and a total of 10.4 million tons in Southeast Asia, Korea, and Japan.).

¹⁵³ Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model*, ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 025004, 1–21, 7–8 (Table 2) and Supplementary material tab “World”.

¹⁵⁴ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 28 (“Waste: landfills and waste management represents the next largest component making up about 20 per cent of global anthropogenic emissions.”).

¹⁵⁵ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), Table 2.1 (showing estimated natural and anthropogenic source and sinks of methane in 2017, with landfill and waste accounting for 68 [64-71] MtCH₄). *See also* Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model*, ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 025004, 1–21.

¹⁵⁶ Maasackers J. D., Varon D. J., Elfarsdóttir A., McKeever J., Jervis D., Mahapatra G., Pandey S., Lorente A., Borsdorff T., Foorhuis L. R., Schuit B. J., Tol P., van Kempen T. A., van Hees R., & Aben I. (2022) *Using satellites to uncover large methane emissions from landfills*, SCI. ADV. 8(32): eabn9683, 1–8, 1 (“We use the global surveying Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) to identify large emission hot spots and then zoom in with high-resolution target-mode observations from the GHGSat instrument suite to identify the responsible facilities and characterize their emissions. Using this approach, we detect and analyze strongly emitting landfills (3 to 29 t hour⁻¹) in Buenos Aires, Delhi, Lahore, and Mumbai. Using TROPOMI data in an inversion, we find that city-level emissions are 1.4 to 2.6 times larger than reported in commonly used emission inventories and that the landfills contribute 6 to 50% of those emissions.”).

¹⁵⁷ Kaza S., Yao L. C., Bhada-Tata P., & Van Woerden F. (2018) [WHAT A WASTE 2.0 : A GLOBAL SNAPSHOT OF SOLID WASTE MANAGEMENT TO 2050](#), World Bank Urban Development Series, 3 (“The world generates 2.01 billion tonnes of municipal solid waste annually, with at least 33 percent of that—extremely conservatively—not managed in an environmentally safe manner.... When looking forward, global waste is expected to grow to 3.40 billion tonnes by 2050.”); *discussed in* World Bank (20 September 2018) *Global Waste to Grow by 70 Percent by 2050 Unless Urgent Action is Taken: World Bank Report*, Press Release (“Without urgent action, global waste will increase by 70 percent on current levels by 2050, according to the World Bank’s new *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050* report. Driven by rapid urbanization and growing populations, global annual waste generation is expected to jump to 3.4 billion tonnes over the next 30 years, up from 2.01 billion tonnes in 2016, the report finds.”).

¹⁵⁸ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 9 (“Currently available measures could reduce emissions from [the fossil-fuel, waste, and agriculture] sectors by approximately 180 Mt/yr, or as much as 45 per cent, by 2030. This is a cost-effective step required to achieve the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) 1.5° C target. According to scenarios analysed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), global methane emissions must be reduced by between 40–45 per cent by 2030 to achieve least cost-pathways that limit global warming to 1.5° C this century, alongside substantial simultaneous reductions of all climate forcers including carbon dioxide and short-lived climate pollutants. (Section 4.1)”).

¹⁵⁹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 10 (“The levels of methane mitigation needed to keep warming to 1.5°C will not be achieved by broader decarbonization strategies alone. The structural changes that support a transformation to a zero-carbon society found in broader strategies will only achieve about 30 per cent of the methane reductions needed over the next 30 years. Focused strategies specifically targeting methane need to be implemented to achieve sufficient methane mitigation. At the same time, without relying on future massive-scale deployment of unproven carbon removal technologies, expansion of natural gas infrastructure and usage is incompatible with keeping warming to 1.5°C. (Sections 4.1, 4.2 and 4.3)”).

¹⁶⁰ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 10 (“Roughly 60 per cent, around 75 Mt/yr, of available targeted measures have low mitigation costs², and just over 50 per cent of those have negative costs – the measures pay for themselves quickly by saving money (Figure SDM2). Low-cost abatement potentials range from 60–80 per cent of the total for oil and gas, from 55–98 per cent for coal, and approximately 30–60 per cent in the waste sector. The greatest potential for negative cost abatement is in the oil and gas subsector where captured methane adds to revenue instead of being released to the atmosphere. (Section 4.2)”); “Less than US\$ 600 per tonne of methane reduced, which would correspond to ~US\$ 21 per tonne of carbon dioxide equivalent if converted using the IPCC Fifth Assessment Report’s GWP₁₀₀ value of 28 that excludes carbon-cycle feedbacks.”).

¹⁶¹ Lowe M. & Lowe-Skillern R. (2021) *Find, Measure, Fix: Jobs in the U.S. Methane Emissions Mitigation Industry*, Datu Research, 6 (“Methane emissions mitigation means jobs. A wide and steadily expanding range of skills are required, from field technicians to chemical engineers to data scientists. Interviews with firms indicate that these jobs offer upward mobility. Many firms expect to expand their workforce if new federal and/or state methane rules are put into place. Of the eight states that either have methane rules or are considering them, seven are among the top states for employee locations in the methane emissions mitigation industry, including California, Colorado, Pennsylvania, New York, Wyoming, New Mexico, and Ohio. This would suggest that employee locations are poised to grow if the federal government and/or states roll out new rules on methane emissions.”).

¹⁶² Example of methane mitigation technical potentials and costs include: Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model*, ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 025004, 1–21; International Energy Agency (2021) *Methane Tracker 2021*; United States Environmental Protection Agency (2019) *GLOBAL NON-CO₂ GREENHOUSE GAS EMISSION PROJECTIONS & MITIGATION 2015-2050*, EPA-430-R-19-010; and DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggestad C., & Ulanov A. (2021) *CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT*, McKinsey Sustainability.

¹⁶³ See Solar Impulse Foundation, *Solutions Explorer*.

¹⁶⁴ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 87 (“Analysis of the technical potential to mitigate methane from four separate studies shows that for 2030, reductions of 29–57 Mt/yr could be made in the oil and gas subsector, 12–25 Mt/yr from coal mining, 29–36 Mt/yr in the waste sector and 6–9 Mt/yr from rice cultivation. Values for the livestock subsector are less consistent, ranging from 4–42 Mt/yr.”).

¹⁶⁵ International Energy Agency (2021) *Curtailing Methane Emissions from Fossil Fuel Operations: Pathways to a 75% cut by 2030*, 11–13 (“Reducing methane from oil and gas operations is particularly promising because more than 70% of

emissions can be abated with existing technologies. In addition, the cost of mitigation is often lower than the market value of the gas that is captured. Based on average natural gas prices from 2017-2021, we estimate that almost 45% of oil and gas methane emissions can be avoided with measures that would come at no net cost. While new investments to abate the remaining emissions would total about USD 13 billion, those costs would be more than offset by revenues from the sale of captured methane.... Under the Net Zero Scenario, total methane emissions from fossil fuels fall by around 75% from 2020 levels by 2030. About one-third of this drop results from overall reduction in fossil fuel consumption. Most of it depends on the accelerated deployment of mitigation measures and technologies leading to the elimination of all technically avoidable methane emissions by 2030.”).

¹⁶⁶ International Energy Agency (2022) [GLOBAL METHANE TRACKER 2022](#), 25 (“The cost effectiveness of abatement measures vary by country, depending on the prevailing emissions sources, capital and labour costs, and natural gas prices. We estimate that it is technically possible to avoid over 70% of today’s methane emissions from global oil and gas operations. Based on average natural gas prices over the past five years, over 40% of methane emissions from oil and gas operations could be avoided at no net cost as the outlays for the abatement measures are less than the market value of the additional gas that is captured. Based on the elevated natural gas prices seen in 2021, almost all of the options to reduce emissions from oil and gas operations worldwide could be avoided implemented at no net cost.”). *See also* International Energy Agency (2021) [Methane Tracker 2021](#) (“We estimate that it is technically possible to avoid around three quarters of today’s methane emissions from global oil and gas operations. Moreover, a significant share of these could be avoided at no net cost, as the cost of the abatement measure is less than the market value of the additional gas that is captured. Natural gas prices around the world affect the share of global emissions that can be abated at no net cost; this share is typically around 40-50%, although the plunge in natural gas prices in 2020 temporarily brought this down to around 10%.”).

¹⁶⁷ International Energy Agency (2022) [GLOBAL METHANE TRACKER 2022](#), 4–5 (“Methane leaks in 2021 from fossil fuel operations, if captured and marketed, would have made an additional 180 billion cubic metres of gas available to the market, an amount similar to all the gas used in Europe’s power sector. This would have been comfortably enough to ease today’s price pressures.”).

¹⁶⁸ International Energy Agency (2022) [GLOBAL METHANE TRACKER 2022](#), 5 (“The best companies and countries are showing what can be done to reduce emissions from oil and gas operations, but the intensity of methane emissions (emissions per unit of production) ranges widely. The best performing countries are more than 100 times better than the worst. Norway and the Netherlands have the lowest emissions intensities in our updated Tracker, and countries in the Middle East such as Saudi Arabia and the United Arab Emirates also have relatively low emissions intensities; Turkmenistan and Venezuela have the highest. If all producing countries were to match Norway’s emissions intensity, global methane emissions from oil and gas operations would fall by more than 90%.”); 24 (“The methane emissions intensity of oil and gas operations varies greatly across countries, with the best performing countries having an emission intensity over 100 times lower than the worst performers. High emission intensities from oil and gas operations are not inevitable; they are an “above-ground issue” that can be addressed cost-effectively through a well-established combination of high operational standards, firm policy action and technology deployment.”). *See also* Ocko I. B., Sun T., Shindell D., Oppenheimer M., Hristov A. N., Pacala S.W., Mauzerall D. L., Xu Y., & Hamburg S. P. (2021) [Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming](#), ENVIRON. RES. LETT. 16(5): 054042, 1–11, 5 (“For oil and gas, we supplement the IEA (2017) abatement potential of 75% below current levels with voluntary company commitments of capping upstream leakage. This results in an 83% below 2030 level abatement potential rather than 77% without industry targets.”).

¹⁶⁹ Clean Air Task Force, [Oil and Gas Mitigation Program](#) (last visited 31 August 2022) (“Fortunately, most leaks are straightforward to repair (and fixing leaks is paid for by the value of the gas that is saved by repairing them). Further, finding leaks has become efficient with modern technology. The standard approach today is to use special cameras that can detect infrared light (think of night-vision goggles) which are tuned to make methane, which is invisible to our eyes, visible. They allow inspectors to directly image leaking gas in real time, with the ability to inspect entire components (not just connections and other areas most likely to leak) and pinpoint the precise source, making repair more straightforward. And, technology promises to make this process even more efficient (and cheaper) over the coming years. These technologies can be utilized to reduce harmful leak emissions, by using regular inspections as the lynchpin of rigorous “leak detection and repair” (LDAR) programs. These programs require operators to regularly survey all of their facilities for leaks and improper emissions, and repair all the leaks they identify in a reasonable time. For

example, [California](#) requires operators to survey all sites four times a year. [Colorado](#) has a different approach, requiring operators of the largest sites to survey them monthly, but requiring less frequent inspections for site with smaller potential emissions.”).

¹⁷⁰ Clean Air Task Force, *Oil and Gas Mitigation Program* (last visited 29 July 2022) (Listing pneumatic equipment venting, compressor seal venting, tank venting, well completion venting, oil well venting and flaring, and dehydrator venting as sources of the “biggest mitigation opportunities.”).

¹⁷¹ See e.g., International Energy Agency (2021) *Methane Tracker 2021* (“Many pieces of equipment in the oil and natural gas value chains emit natural gas in their regular course of operation, including valves, and gas-driven pneumatic controllers and pumps. Retrofitting these devices or replacing them with lower-emitting versions can reduce emissions.”).

¹⁷² International Energy Agency (2021) *Methane Tracker 2021* (Listing replacement of existing devices, installing new emissions control devices, leak detection and repair (LDAR), and alternative and innovative technologies as the four “main mitigation measures.”). See also Clean Air Task Force, *Oil and Gas Mitigation Program* (last visited 31 August 2022) (“Fortunately, most leaks are straightforward to repair (and [fixing leaks is paid for by the value of the gas that is saved by repairing them](#)). Further, finding leaks has become efficient with modern technology. The standard approach today is to use special cameras that can detect infrared light (think of night-vision goggles) which are tuned to make methane, which is invisible to our eyes, visible. They allow inspectors to directly image leaking gas in real time, with the ability to inspect entire components (not just connections and other areas most likely to leak) and pinpoint the precise source, making repair more straightforward. And, technology promises to make this process [even more efficient \(and cheaper\) over the coming years](#). These technologies can be utilized to reduce harmful leak emissions, by using regular inspections as the lynchpin of rigorous “leak detection and repair” (LDAR) programs. These programs require operators to regularly survey all of their facilities for leaks and improper emissions, and repair all the leaks they identify in a reasonable time. For example, [California](#) requires operators to survey all sites four times a year. [Colorado](#) has a different approach, requiring operators of the largest sites to survey them monthly, but requiring less frequent inspections for site with smaller potential emissions.”).

¹⁷³ Clean Air Task Force, *Oil and Gas Mitigation Program* (last visited 31 August 2022) (“Venting is even more harmful than flaring, since methane warms the climate so powerfully, and VOC and toxic pollutants are released unabated. Venting of this gas should be prohibited in all cases as an absolutely unnecessary source of harmful air pollution. There are numerous low-cost (and usually profitable) ways to utilize natural gas from oil wells. Flaring should be a last resort: only in the most extreme cases should oil producers be allowed to flare gas, and it should be strictly a temporary measure. Rules prohibiting venting of natural gas can easily reduce emissions by 95%.”).

¹⁷⁴ World Bank (5 May 2022) *Global Flaring and Venting Regulations* (last visited 31 August 2022) (“Flared and vented gas can replace more-polluting fuels in local communities, cutting emissions and expanding energy access for the poorest. In 2021, an estimated 144 billion cubic meters of associated gas were wastefully flared around the world. If captured and put to productive purposes, this gas could power the entirety of sub-Saharan Africa.”).

¹⁷⁵ Curry T., Hellgren L., Russell P., & Fraioli S. (2022) [BENCHMARKING METHANE AND OTHER GHG EMISSIONS OF OIL AND NATURAL GAS PRODUCTION IN THE UNITED STATES](#), Ceres & Clean Air Task Force, 3 (“• Of 303 oil and natural gas producers with reported data, the top 100 oil and gas producers by total energy production were responsible for approximately 74% and 77%, respectively, of total reported methane and GHG emissions in 2020. While most top-100 producers are also among the top 100 emitters, production rank does not correspond to emissions rank. • The methane emissions intensity of natural gas production and the GHG emissions intensity of oil and gas production varies dramatically across producers. Natural gas producers in the highest quartile of methane emissions intensity have an average emissions intensity that is nearly 24 times higher than natural gas producers in the lowest quartile of methane emissions intensity. Oil and gas producers in the highest quartile of GHG emissions intensity have an average emissions intensity that is more than 13 times higher than oil and gas producers in the lowest quartile.”); *discussed in* Clean Air Task Force (14 July 2022) *Greenhouse gas emissions vary dramatically across U.S. oil and gas companies, according to updated analysis*, News and Media; and Budryk Z. (14 July 2022) *Four companies are top sources of US greenhouse gas, methane emissions: report*, THE HILL.

¹⁷⁶ Curry T., Hellgren L., Russell P., & Fraioli S. (2022) *BENCHMARKING METHANE AND OTHER GHG EMISSIONS OF OIL AND NATURAL GAS PRODUCTION IN THE UNITED STATES*, Ceres & Clean Air Task Force, 3 (“• Pneumatic controllers were the largest source of total reported production-segment methane emissions, making up 62% of total reported methane emissions. • Fuel combustion equipment, such as engines and heaters, were the largest source of total reported production-segment CO₂ emissions, responsible for 58% of total reported CO₂ emissions. • In oil-heavy basins, associated gas venting and flaring can be a significant contributor to GHG emissions. In the Williston basin, for example, this source is responsible for 59% of total GHG emissions. In gas-heavy basins, associated gas is limited or non-existent; for example, there was no reported associated gas venting and flaring in the Appalachian basin. Across all basins, associated gas venting and flaring was responsible for 14% of total reported onshore production segment GHG emissions.”).

¹⁷⁷ Proville J., Roberts K. A., Peltz A., Watkins L., Trask E., & Wiersma D. (2022) *The demographic characteristics of populations living near oil and gas wells in the USA*, *POPUL. ENVIRON.*, 1–14, 10, 11 (“These results underscore the degree to which the US population and oil and gas production are intertwined. Over 18 million people live within one mile of wells. Many of these consist of marginalized groups (Hispanic: 3.3 m; Black: 1.8 m; Asian: 0.7 m; Native American: 0.5 m; below the poverty line: 2.9 m; over 64 years old: 2.7 m; under 5 years old: 1.2 m). From a relative standpoint, at a national aggregated scale, most population groups are found to be less prevalent near wells than their county-level controls. The exceptions to this are Native Americans, Whites, people over 64 years old, and people with less than a high school degree. For these populations, we find a respective 25.0%, 9.5%, 6.6%, and 46.6% higher prevalence living within one mile of wells than controls.”; “Another important policy aspect for exploration in subsequent research is the relationship between employment and populations living near wells. Our results highlight widespread clusters of high unemployment near wells 4–12 times the national average (Online Resource 3).”). See also Proville J., & Roberts K. (2022) *Creating data to support communities on the front lines of oil and gas production in the US*, ENVIRONMENTAL DEFENSE FUND.

¹⁷⁸ Raimi D., Nerurkar N., & Bordoff J. (2020) *GREEN STIMULUS FOR OIL AND GAS WORKERS: CONSIDERING A MAJOR FEDERAL EFFORT TO PLUG ORPHANED AND ABANDONED WELLS*, Columbia School of International and Public Affairs Center on Global Energy Policy & Resources for the Future, 20 (“A large federal effort to plug orphaned and abandoned oil and gas wells has the potential to provide tens of thousands of jobs—potentially up to 120,000. These efforts would reduce local air pollution, safety risks, and greenhouse gas emissions at a cost of \$67 to \$170 per ton of CO₂-equivalent, well within the range of other policy options. These costs are somewhat uncertain due to limited data on methane emissions from abandoned wells and potential changes to the future costs of carrying out such a program.”).

¹⁷⁹ Alvarez R. A., *et al.* (2018) *Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain*, *SCIENCE* 361(6398): 186–188, 186 (“Methane emissions from the U.S. oil and natural gas supply chain were estimated by using ground-based, facility-scale measurements and validated with aircraft observations in areas accounting for ~30% of U.S. gas production. When scaled up nationally, our facility-based estimate of 2015 supply chain emissions is 13 ± 2 teragrams per year, equivalent to 2.3% of gross U.S. gas production. This value is ~60% higher than the U.S. Environmental Protection Agency inventory estimate, likely because existing inventory methods miss emissions released during abnormal operating conditions. Methane emissions of this magnitude, per unit of natural gas consumed, produce radiative forcing over a 20-year time horizon comparable to the CO₂ from natural gas combustion. Substantial emission reductions are feasible through rapid detection of the root causes of high emissions and deployment of less failure-prone systems.”).

¹⁸⁰ Chen Y., Sherwin E. D., Berman E. S. F., Jones B. B., Gordon M. P., Wetherley E. B., Kort E. A., & Brandt A. R. (2022) *Quantifying Regional Methane Emissions in the New Mexico Permian Basin with a Comprehensive Aerial Survey*, *ENVIRON. SCI. TECHNOL.* 56(7): 4317–4323, 4321 (“Importance of Large Sample Size and Direct Measurement. Compared to an EPA GHGI estimate aligned to our study area and time period (Figure 4a), this study suggests total methane emissions from upstream and midstream O&G activities in the New Mexico Permian to be 6.5 (+2.4/–2.3) times larger. It is important to explore further a key strength of our method compared to prior bottom-up studies: very large study sample size.”).

¹⁸¹ Sadavarte P., Pandey S., Maasackers J. D., Lorente A., Borsdorff T., van der Gon H. D., Houweling S., & Aben I. (2021) *Methane Emissions from Super-emitting Coal Mines in Australia quantified using TROPOMI Satellite Observations*, *ENVIRON. SCI. TECHNOL.* 55(24): 16537–16580, 16537 (“Our results indicate that for two of the three locations, our satellite-based estimates are significantly higher than reported to the Australian government. Most remarkably, 40% of the quantified emission came from a single surface mine (Hail Creek) located in a methane-rich coal

basin.”); *discussed in* Clark A. (29 November 2021) *These Australian Coal Mines are Methane Super-Emitters*, BLOOMBERG GREEN.

¹⁸² Lauvaux T., Giron C., Mazzolini M., d’Aspremont A., Duren R., Cusworth D., Shindell D., & Ciais P. (2022) *Global assessment of oil and gas methane ultra-emitters*, SCIENCE 375(6580): 557–561, 557 (“Ultra-emitters are primarily detected over the largest O&G basins throughout the world. With a total contribution equivalent to 8 to 12% (~8 million metric tons of methane per year) of the global O&G production methane emissions, mitigation of ultra-emitters is largely achievable at low costs and would lead to robust net benefits in billions of US dollars for the six major O&G-producing countries when considering societal costs of methane.”).

¹⁸³ International Energy Agency (2022) *GLOBAL METHANE TRACKER 2022*, 6, 16 (“Globally, our analysis finds that methane emissions from the energy sector are about 70% greater than the sum of estimates submitted by national governments.”; “Accounting for the level of satellite coverage, very large emitting events detected by satellite are estimated to have been responsible for around 3.5 Mt of emissions from oil and gas operations in 2021 (6% of our estimate of oil and gas emissions in the 15 countries where events were detected).”).

¹⁸⁴ Rocky Mountain Institute, *Profiling Supply Chain Emissions (last visited 29 July 2022)* (“Russian Federation Astrakhanskoye Total Emissions Intensity 1,060 kg CO₂ eq./barrel oil equivalent; Turkmenistan South Caspian Basin Total Emissions Intensity 1,010 kg CO₂ eq./barrel oil equivalent; United States Permian TX Total Emissions Intensity 908 kg CO₂ eq./barrel oil equivalent”). *See also* Malik N. S. (23 June 2022) *World’s Dirtiest Oil and Gas Fields Are in Russia, Turkmenistan and Texas*, BLOOMBERG (Graph, “The Worst Offenders”); and Gordon D., Koomey J., Brandt A., & Bergerson J. (2022) *KNOW YOUR OIL AND GAS: GENERATING CLIMATE INTELLIGENCE TO CUT PETROLEUM INDUSTRY EMISSIONS*, Rocky Mountain Institute.

¹⁸⁵ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 87 (“Analysis of the technical potential to mitigate methane from four separate studies shows that for 2030, reductions of 29–57 Mt/yr could be made in the oil and gas subsector, 12–25 Mt/yr from coal mining, 29–36 Mt/yr in the waste sector and 6–9 Mt/yr from rice cultivation. Values for the livestock subsector are less consistent, ranging from 4–42 Mt/yr.”).

¹⁸⁶ International Energy Agency (2022) *GLOBAL METHANE TRACKER 2022*, 29–30 (“In the IEA’s Net Zero Emissions by 2050 Scenario, coal use drops by 55% from 2020 to 2030, and by almost 90% by 2050. This decline would significantly cut methane emissions from coal mines as well as emissions of CO₂ and other air pollutants; emissions reductions would be even larger if concentrated on the worst-performing coal assets. For example, removing the worst-performing quartile of production would remove around 25 Mt of methane while removing the best performing quartile would only remove about 4 Mt.”).

¹⁸⁷ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 107 (“Coal mining: pre-mining degasification; air methane oxidation with improved ventilation.”). *See also* DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggestad C., & Ulanov A. (2021) *CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT*, McKinsey Sustainability, 22 (“Levers such as full ventilation and degasification of underground mines are standard coal mine methane (CMM) abatement technology but would likely see adoption rates of only 0.5 to 1.0 percent by 2030 and 2 to 4 percent by 2050. Other levers—such as ventilation air methane (VAM) capture and utilization, capture of abandoned mine gas, degasification of surface mines, and predrainage of surface mine—are less technically challenging but are expensive. They could see 2 to 16 percent adoption rates in 2030, growing to 20 to 30 percent adoption rates by 2050.”); and United States Environmental Protection Agency (2019) *GLOBAL NON-CO₂ GREENHOUSE GAS EMISSION PROJECTIONS & MITIGATION 2015-2050*, EPA-430-R-19-010, 14 (“In 2030, VAM oxidation is the leading emission abatement measure, but using degasification for power generation presents the largest abatement potential at prices below \$0/tCO₂e. The two technologies combined contribute 90% of potential abatement in 2030.”).

¹⁸⁸ DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggestad C., & Ulanov A. (2021) *CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT*, McKinsey Sustainability, 22 (“Levers such as full ventilation and degasification of underground mines are standard coal mine methane (CMM) abatement technology but would likely see adoption rates of only 0.5 to 1.0 percent by 2030 and 2 to 4

percent by 2050. Other levers—such as ventilation air methane (VAM) capture and utilization, capture of abandoned mine gas, degasification of surface mines, and predrainage of surface mine—are less technically challenging but are expensive. They could see 2 to 16 percent adoption rates in 2030, growing to 20 to 30 percent adoption rates by 2050.”). See also United States Environmental Protection Agency (2019) [GLOBAL NON-CO₂ GREENHOUSE GAS EMISSION PROJECTIONS & MITIGATION 2015-2050](#), EPA-430-R-19-010, 15 (“In 2030, the top 3 mitigation technologies globally are the use of stand-alone VAM, degasification for power generation, and degasification for pipeline injection. Using stand-alone VAM can abate up to 443 MtCO₂e (76% of coal mining's total abatement potential), although it is one of the most expensive abatement options in coal mining because of three key factors: (1) the equipment itself is large and costly; (2) there is no revenue source; and (3) only a handful of technologies have been demonstrated at a commercial scale and, as such, economies of scale in production have not been realized. Technology improvements have the potential to reduce the costs of VAM oxidation technology, making more of the potential abatement economically feasible for mine operators.”).

¹⁸⁹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 107 (“Coal mining: flooding abandoned mines.”).

¹⁹⁰ United Nations Economic Commission for Europe (2019) [BEST PRACTICE GUIDANCE FOR EFFECTIVE METHANE RECOVERY AND USE FROM ABANDONED COAL MINES](#), ECE Energy Series No. 64, 3 (“Technologies and management practices allow methane from abandoned mines to be extracted, providing significant environmental, economic, social and public safety benefits. The methods for extracting gas from abandoned mines differ from those employed to capture and recover gas from working mines. Once a mine is sealed from the atmosphere, gas from all underground sources becomes potentially available for extraction at a single production location. Methane concentrations recovered from a well-sealed former gassy mine typically range from 15% to 90%, and with no oxygen. The other major gaseous components may be nitrogen, including de-oxygenated air, and carbon dioxide. Low concentrations of carbon monoxide and trace hydrocarbons such as ethane are sometimes present.”).

¹⁹¹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 91 (“In addition, a transition away from fossil fuels could still leave abandoned infrastructure. There were more than 3.2 million abandoned oil and gas wells in the United States alone in 2018, which emit ~0.3 Mt/yr of methane according to the US EPA (US EPA report to UNFCCC; 2020). That agency acknowledges that this figure is likely a large underestimate due to incomplete data. Similarly, The International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) estimates that 2020 emissions of methane from abandoned coal mines around the world are just over 3.5 Mt/yr (Höglund-Isaksson 2020).”).

¹⁹² United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 14 (“Additional measures, which reduce methane emissions but do not primarily target methane, could substantially contribute to methane mitigation over the next few decades. Examples include decarbonization measures – such as a transition to renewable energy and economy-wide energy efficiency improvements. Various implementation levers exist. Emissions pricing, for example, can be an effective policy which could incentivize substantial methane mitigation and support the broad application of methane reduction measures. A rising global tax on methane emissions starting at around US\$ 800 per tonne could, for instance, reduce methane emissions by as much as 75 per cent by 2050. (Section 4.3)”).

¹⁹³ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 87 (“Analysis of the technical potential to mitigate methane from four separate studies shows that for 2030, reductions of 29–57 Mt/yr could be made in the oil and gas subsector, 12–25 Mt/yr from coal mining, 29–36 Mt/yr in the waste sector and 6–9 Mt/yr from rice cultivation. Values for the livestock subsector are less consistent, ranging from 4–42 Mt/yr.”).

¹⁹⁴ United States Climate Alliance (2018) [FROM SLCP CHALLENGE TO ACTION: A ROADMAP FOR REDUCING SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS TO MEET THE GOALS OF THE PARIS AGREEMENT](#), 13 (“Actions to improve manure management and to reduce methane from enteric fermentation have the potential to significantly reduce agricultural methane emissions across U.S. Climate Alliance states. Improving manure storage and handling, composting manure, utilizing pasture-based systems, or installing anaerobic digesters significantly reduces methane from manure management on dairy, swine, and other livestock operations. These practices may reduce methane from manure management by as much as 70 percent in

U.S. Climate Alliance states (Appendix A) and can help improve soil quality and fertility, reduce water use and increase water quality, reduce odors, and decrease the need for synthetic fertilizers and associated greenhouse gas emissions. Promising technologies are also emerging that may cut methane emissions from enteric fermentation by 30 percent or more (see A). Developing strategies that work for farmers and surrounding communities can significantly reduce methane emissions, increase and diversify farm revenues, and support water quality and other environmental benefits.”) See also Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model*, ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 025004, 1–21, 13–14 (“The technical abatement potential for agricultural sources is assessed at 21 percent below baseline emissions in year 2050. This includes relatively limited abatement potentials for livestock of 12 percent due to applicability limitations (see section S3.4. in the SI for details). Large farms with more than 100 LSU contribute about a third of global CH₄ emissions from livestock and for this group we find it technically feasible to reduce emissions by just over 30 percent below baseline emissions in year 2050 (see figures S6–2 in the SI). The available options include reduction of enteric fermentation emissions through animal feed changes (Gerber et al 2013, Hristov et al 2013) combined with implementation of breeding schemes that simultaneously target genetic traits for improved productivity and enhanced animal health/longevity and fertility. Increased productivity reduces system emissions by enabling the production of the same amount of milk using fewer animals. The dual objective in breeding schemes is important as a one-eyed focus on increased productivity leads to deteriorating animal health and fertility and a risk that system emissions increase due to a need to keep a larger fraction of unproductive replacement animals in the stock (Lovett et al 2006, Berglund 2008, Bell et al 2011). The enteric fermentation options are considered economically feasible for commercial/industrial farms with more than 100 LSU but not for smaller- and medium- sized farms. Breeding schemes are assumed to deliver impacts on emissions only after 20 years and feed changes are assumed applicable only while animals are housed indoor. Emissions from manure management can be reduced through treatment of manure in anaerobic digesters (ADs) with biogas recovery. To be efficient from both an economic and environmental point of view, a certain scale is needed to accommodate both the fixed investment of the AD plant and the time farmers spend carefully attending to and maintaining the process (for details see section 3.3.1.3 in Höglund-Isaksson et al 2018).”).

¹⁹⁵ Herrero M., Henderson B., Havlík P., Thornton P. K., Conant R. T., Smith P., Wiersenius S., Hristov A. N., Gerber P., Gill M., Butterbach-Bahl K., Valin H., Garnett T., & Stehfest E. (2016) *Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector*, NAT. CLIM. CHANGE 6(5): 452–461, 453 (“We estimate that total emissions from livestock from 1995 to 2005 were between 5.6 and 7.5 GtCO₂e yr⁻¹ (Table 1). The most important sources of emissions were enteric CH₄ (E_{CH₄}; 1.6–2.7 GtCO₂e yr⁻¹; refs 9–13,15), N₂O emissions associated with feed production (1.3–2.0 GtCO₂e yr⁻¹; ref. 15) and land use for animal feed and pastures, including change in land use (~1.6 GtCO₂e yr⁻¹; ref. 15). ...Taking an aggregate view of the sector, and using all LCA sources of emissions, animal feed production accounts for about 45% of the sector’s emissions, with about half of these emissions related to fertilization of feed crops and pastures (manure and fertilizer included)¹⁵. The remaining animal feed emissions are shared between energy use and land use. Enteric fermentation contributes about 40% of total emissions, followed by manure storage and processing (~10% of emissions)^{17,18}.”).

¹⁹⁶ Lazenby R. (2022) *Rethinking manure biogas: Policy considerations to promote equity and protect the climate and environment*, Vermont Law and Center for Agriculture and Food Systems, 24-25 (“Because manure biogas systems capture rather than reduce emissions, these systems require the ongoing generation of GHG emissions to be financially viable. The digester’s function is to capture the emissions, so the system breaks down if emissions are reduced at the source. Producers must continue to generate manure at scale for the facilities to remain financially sustainable. The large upfront investment in these systems then fixes the current numbers and concentration of livestock at facilities where they are installed, despite the range of harms generated by such concentrated operations. Simultaneously, the new subsidized revenue streams support the ongoing generation of manure at scale.”).

¹⁹⁷ Agrovive Biologicals (30 May 2022) *Announcement: New In-Plant Inoculants Lower Methane Emissions* (“Corn silage from these early on-farm trials was sent to Fermentrics Technologies, an independent fermentation laboratory for potential methane reduction analysis. Their four-step analysis process supports a greater than 30% methane reduction. The final percent reduction will be released when the fourth analysis is completed later this summer. Other studies are underway that could demonstrate even more impressive results. Dairy One - a DFA aligned cooperative - Agrovive Biologicals and other interested parties have contracted with Cornell University to do a seed-to-lagoon agronomic, nutritional and economic study. Results are expected in fall 2022. A large, multi-farm study is being initiated by a leading dairy cooperative and their producer patrons by applying ‘Leaf2Rumen’ Inoculant to 100,000 plus acres of corn for silage

this June. During June 2022 South Dakota State University will be launching a beef cow feeding study to evaluate animal performance and measure methane and greenhouse gas emissions.”).

¹⁹⁸ Vijn S., *et al.* (2020) *Key Considerations for the Use of Seaweed to Reduce Enteric Methane Emissions from Cattle*. FRONT. VET. SCI. 7(597430): 1–9, 2 (“Feeding livestock many seaweeds—also known as red, green or brown marine macroalgae—has been shown to reduce methane production, but with highly variable results (9–12). For example, *in vitro* analysis suggested that the tropical/subtropical red seaweed *Asparagopsis taxiformis* can reduce methane production by 95% when added to feed at a 5% organic matter inclusion rate... Kinley *et al.* (14) reported that inclusion of *A. taxiformis* at 0.10 and 0.20% of dietary dry matter over a 90 day period decreased methane production in steers up to 40 and 98%, and produced weight gain improvements of 24 and 17 kg, respectively, relative to control steers.”). *See also* Kinley R. D., Martinez-Fernandez G., Matthews M. K., de Nys, R., Magnusson M., Tomkins N. W. (2020) *Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed*, J. CLEAN. PROD. 259(120836): 1–10, 2 (“A rumen *in vitro* study screened 20 different macroalgae species and *Asparagopsis taxiformis* was identified as the primary candidate for further investigation (Machado *et al.*, 2014). Subsequent *in vitro* work to determine optimum inclusion rates for ruminants has demonstrated no negative impact on fermentation with 99% decrease in CH₄ (Kinley *et al.*, 2016a). Validation of the *in vitro* work was demonstrated *in vivo* with a clear inclusion level response effect and decrease of 80% CH₄ production in sheep (Li *et al.*, 2018). Further validation of the capability of *Asparagopsis in vitro* (Roque *et al.*, 2019a; Kinley *et al.*, 2016b) and *in vivo* as a functional feed ingredient for lactating dairy cattle demonstrated CH₄ decrease of 67% (Roque *et al.*, 2019b).”); Abbott D. W., *et al.* (2020) *Seaweed and Seaweed Bioactives for Mitigation of Enteric Methane: Challenges and Opportunities*, ANIMALS 10(2432): 1–28, 2, 5 (“Recently, researchers concluded that commercial production of the red seaweed *A. taxiformis* could create new economies due to the fact that addition of small quantities of this seaweed in the diet of ruminant animals reduced CH₄ emissions by up to 98% when included at 0.2% of dry matter intake of steer diets [14].”; “The greatest CH₄ mitigation potential was observed for the red seaweed *A. taxiformis* with almost complete inhibition *in vitro* with inclusion levels up to 16.7% of the organic matter (OM). *A. taxiformis* was highly effective in decreasing the production of CH₄ with a reduction of 99% at doses as low as 2% OM [45,46,47,48].”; and Roque B. M., Venegas M., Kinley R. D., de Nys R., Duarte T. L., Yang X., & Kebreab E. (2021) *Red Seaweed (Asparagopsis taxiformis) supplementation reduces enteric methane over 80% in beef steers*, PLOS ONE 16(3): 1–20, 7–9 (“Steers fed low forage TMR and supplemented with *A. taxiformis* reduced CH₄ production, yield, and intensity by 72.4 and 81.9%, 69.8 and 80.0%, and 67.5 and 82.6% for Low and High treatments, respectively. Additionally, H₂ production, yield, and intensity increased by 419 and 618%, 503 and 649%, and 566 and 559% for the Low and High treatments, respectively. No significant differences were found in CO₂ production, yield, or intensity in any of the three diets.”).

¹⁹⁹ Duggan T. (6 May 2022) *To fight climate change, California approves seaweed that cuts methane emissions in cow burps*, SAN FRANCISCO CHRONICLE (“On Friday, Blue Ocean Barns, which produces the red seaweed at a farm on the Big Island of Hawaii, announced that the supplement had been approved for use on both conventional and organic dairy farms. Called Brominata, the red seaweed variety has been shown to cut methane emissions in dairy cows by 52% over 50 days but so far has been used only in trials.”).

²⁰⁰ Rumin8 (18 July 2022) *Rumin8 Attracts Domestic and International Climate Fund Investors – Aware Super Sentient WA Growth Fund and Prelude Ventures* (“Rumin8’s lead product replicates the methane reductions of red seaweed (*Asparagopsis*), but instead of harvesting from the marine ecosystem, the plant’s methane busting bioactive is manufactured and transformed into a scalable, stable feed supplement in Rumin8’s quality-controlled laboratories. ... Rumin8 recently concluded highly encouraging sheep trials which demonstrated methane reductions of up to 95 per cent, with no residues detected in 80 independently analysed samples.”). *See also* Algae Planet (2 June 2022) *Rumin8 Copies Asparagopsis in Lab*.

²⁰¹ de Sousa A. (9 September 2021) *World’s Top Beef Supplier Approves Methane-Busting Cow Feed*, BLOOMBERG (“Latin America is the first region to grant approvals for the DSM product, which is also trying to get permission in the European Union, the U.S. and New Zealand. A trial on Brazilian beef showed Bovaer cut methane emissions from cows’ stomachs by as much as 55%, the company said. Bovaer has undergone trials in 13 countries, with more than 48 peer-reviewed studies published.”). *See also* Bryce E. (20 September 2021) *Kowbucha, seaweed, vaccines: the race to reduce cows’ methane emissions*, GUARDIAN (“There are dozens more livestock methane interventions under development, according to a recent assessment co-authored by Ermias Kebreab. But only a handful – including Bovaer and Zelp – have reached the market. Even here, there’s still fine-tuning to be done. For instance Bovaer needs to be

constantly in the rumen to work, meaning it may be less practical for free-ranging cattle whose feeding is less controlled (van Nieuwland said DSM is working to develop slow-release 3-NOP to help with this).”).

²⁰² European Commission (23 February 2022) *Daily News 23/02/2022*, Press Release (“Today, Member States have approved the marketing in the EU of an innovative feed additive, as proposed by the Commission. The additive, consisting of 3-nitrooxypropanol, will help to reduce the emission of methane, a potent greenhouse gas, from cows. Commissioner for Health and Food Safety, Stella Kyriakides, said: “Innovation is key for a successful shift towards a more sustainable food system. The EU continues to lead the way in ensuring food safety while adapting to new technologies that can make food production more sustainable. Cutting farming-related methane emissions is key in our fight against climate change and today’s approval is a very telling example of what we can achieve through new agricultural innovations.” The product went through a stringent scientific assessment by the European Food Safety Authority which concluded that it is efficacious in reducing methane emissions by cows for milk production. Once the decision is adopted by the Commission, expected in the coming months, the feed additive will be the first of its kind available on the EU market.”). *See also* Martin R. (20 April 2022) *Methane-reducing feed pilot to include 10,000 cows in three European countries*, IRISH EXAMINER (“The cooperative is set to pilot the use of Bovaer[®] with 10,000 dairy cows across more than 50 farms in Denmark, Sweden and Germany, ensuring a diverse group of farms participate in the pilot programme. . . If preliminary findings are as expected, Arla Foods plans to double the pilot project to include 20,000 cows in 2023. Bovaer[®] is currently commercially available in the EU, Brazil, Chile, and Australia.”).

²⁰³ Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, White Paper, 13 (“Despite these very promising signs, important issues remain to be resolved. Although studies have promising results so far, the world is unlikely to undertake a massive investment to incorporate these feed additives globally on the basis of a limited number of studies that have lasted each for only a few months for 3-NOP and three studies with live animals for algae. We believe a few steps are critical to widespread adoption although they could be undertaken with enough commitment in the next three years. . . The first need is for studies that last at least two years for each of these products. Studies to date have at most lasted four months. . . Longer-term studies also provide the opportunity to evaluate effects on yields and feed conversion efficiency... safety tests... costs of production...”).

²⁰⁴ McCulloch C. (1 July 2022) *Beef produced with 90% methane reducing feed hits shelves*, ALL ABOUT FEED (“The more environmentally friendly beef is available from June 30 in selected Coop supermarkets in Sweden. It is claimed 5% of the world’s greenhouse gas emissions come from methane produced by cows’ burps and farts.”). *See also* Peters A. (30 June 2022) *The world’s first ‘methane-reduced’ beef is now at grocery stores*, FAST COMPANY (“At the Swedish grocery chain, Coop, there’s now a new product that isn’t available anywhere else in the world: “low methane” beef. Selected stores are selling a limited-edition run of ground beef, sirloin steak, and beef fillets from cattle that have been fed red seaweed—a supplement that cuts emissions of methane, a potent greenhouse gas that cows and steers emit when they burp and fart.”).

²⁰⁵ Kebreab E. & Feng X. (2021) *Strategies to Reduce Methane Emissions from Enteric and Lagoon Sources*, California Air Resources Board, 69 (“In general, higher moisture contents in raw composting manure could enhance the CH₄ mitigation rates, however, the pH, and C/N content were not linearly related to CH₄ mitigation. Adding biochar, acids, and straw to manure could mitigate CH₄ emissions by 82.4%, 78.1%, and 47.7%, respectively. However, the data for straw is quite small so it should not be taken out of context as it may introduce a source of carbon into lagoons. The meta-analysis conducted with selected additives indicated manure additives were an effective method to reduce CH₄ emission, with biochar being the most effective. However, further studies of manure additives on CH₄ mitigation are required to support a more accurate quantitative analysis and potential impacts to water quality and crop yield after land application. Most of the research for biochar and straw is when used as additive to solid or semi solid manure so they should be interpreted in that context.”). *See also* Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, White Paper, 26 (“Another emerging option involves adding acid to manure stored in wet form, which can almost eliminate methane emissions. Some experiments with acidification have occurred for many years (Fangueiro, Hjorth, and Gioelli 2015) (Søren O. Petersen, Andersen, and Eriksen 2012), but experimental work has been increasing (Rodhe et al. 2019). Acidification can be done at different stages of manure management: in the barn, in storage tanks, prior to field application. Methane reductions require a regular, but modest, insertion of acid into storage tanks. Acidifying manure also reduces ammonia losses when methane is applied, and in some experiments increases yields

(Loide 2019). Yield gains probably occur if farmers either do not apply or are not allowed to apply more nitrogen fertilizer to replace the nitrogen lost with the releases of ammonia. The amount of acid required for sufficient acidification to greatly reduce methane is still unclear.”; “There are also a variety of promising innovative methods to reduce methane. There is experimental evidence, for example, that some additives, such as sulfate, can be added in modest quantities and still reduce two-thirds of the methane emissions from storage even without significantly reducing pH (Petersen, Andersen & Eriksen 2012) (Petersen et al. 2014) (Sokolov et al. 2020).”); Peterson C., El Mashad H. M., Zhao Y., Pan Y., & Mitloehner F. M. (2020) *Effects of SOP Lagoon Additive on Gaseous Emissions from Stored Liquid Dairy Manure*, SUSTAINABILITY 12(1393): 1–17, 1 (“A variety of additives have been applied to reduce emissions from manure. Although the composition and mechanism of the emission reduction of several additives are known, information on many other commercial additives is not available because of confidentiality and limits in the marketing literature. Calcium sulfate (gypsum) can be found abundantly in nature and has been used to improve soil properties. . . . Different forms of gypsum have been tested for the mitigation of GHG and ammonia emissions from livestock effluents. The results have had varying results: while some studies reported a decrease in ammonia emissions after the addition of gypsum, not all have demonstrated the efficacy of gypsum in reducing the release of GHGs. Many of the results were obtained using a considerable amount of material (3% to 10% of manure wet weight) making the application not practical in real-world conditions. Borgonovo et al. first published results on this specific commercial additive (SOP LAGOON), made of gypsum processed with proprietary technology, and found that the addition of the products to fresh liquid manure has a reduction potential of 21.5% of CH₄, 22.9% of CO₂, 100% of N₂O and 100% of NH₃ emissions on day 4, even at very low dosages. It should be mentioned that similar to other commercial additives, the exact manufacturing process of SOP Lagoon is unknown due to confidentiality.”); and Borgonovo F., Conti C., Lovarelli D., Ferrante V., & Guarino M. (2019) *Improving the sustainability of dairy slurry with a commercial additive treatment*, SUSTAINABILITY 11(4988): 1–14, 8 (“N₂O, CO₂, and CH₄ emissions, from the treated slurry, were respectively 100%, 22.9% and 21.5% lower than the control at T4 when the emission peaks were recorded.”).

²⁰⁶ Babiker M., et al. (2022) *Chapter 12: Cross Sectoral Perspectives in CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE*, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Shukla P. R., et al. (eds.), 12-102 (“Anaerobic digestion of organic wastes (e.g., food waste, manure) produces a nutrient-rich digestate and biogas that can be utilised for heating and cooking or upgraded for use in electricity generation, industrial processes, or as transportation fuel (See Chapter 6) (Parsaee et al. 2019; Hamelin et al. 2021).”).

²⁰⁷ Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, White Paper, 24, 25 (“Much of the focus on manure management has been to encourage the use of digesters. Digesters turn even more of the [manure] into methane into biogas, but in a way that can be captured and burned for energy. Millions of small, low-technology digesters are in use in Asia for household energy use, and larger, modern digesters have also received significant investments in Western countries. For farms that now produce large quantities of methane – for example, that use large lagoons to store manure in warm parts of the world – digesters can be a cost-effective mechanism for reducing methane as well as overall greenhouse gas emissions (Searchinger et al. 2019). In other contexts, however, the climate benefits for methane are uncertain and probably unable to justify the expense. The purpose of a digester is to turn as much of the biomass in manure into methane as possible. As a result, digesters create more methane than normal storage systems. Although the intent is to capture and burn this methane for energy, if the digester has significant leakage rates the amount of methane released can exceed the methane released by present management, depending on the system in use. That seems particularly likely in informal, household systems studied so far (Bruun et al. 2014), although the leakage rates around the world have been little studied.”; “Several alternative manure management options exist. One starts with more quickly removing manure from barns because barn temperatures tend to be high, and higher temperatures increase methane formation (Montes et al. 2013). Barn storage can lead to high methane losses even in a few days, particularly in pig barns where temperatures are often higher than outside (Petersen et al. 2016). In many systems, it is common for manure to remain in pig or dairy barns for a few weeks – and some for much longer -- but it is possible to construct systems and sometimes to operate existing barns to remove manure each day. One analysis of different studies found average reduction rates for methane at the level of 50%, although that will obviously depend on climate and alternative management systems (Mohankumar, et al. 2018). A second set of options focuses on separating the solid portion of manure from the liquid portion. Even without adding water for barn cleaning, manure in pork and cattle systems tends to be wet enough to create the oxygen-less conditions that create methane. A variety of techniques with increasing sophistication can separate solids from liquids.”). See also Cameron K. C. & Di H. J. (2019) *A new method to treat farm dairy effluent to produce clarified water for recycling and to reduce environmental risks from the land application of*

effluent, J. SOILS SEDIMENTS 19(5): 2290–2302, 2291 (“The basis of the new method for treating FDE is to use a coagulant to coagulate and flocculate colloidal particles in the FDE into flocs that have sufficient mass for gravity to cause them to settle out of the liquid, thus producing: (i) clarified water and (ii) treated effluent. Coagulation involves the addition of a coagulant to neutralize the negative electrical charges on the surfaces of colloids (e.g. soil, dung, organic matter) that would normally prevent them from coagulating into flocs that have sufficient mass to settle out of the water under gravity. In addition, during mixing of the coagulant into the effluent, the coagulant can create a mechanism called ‘sweep floc’ which also causes the colloids to stick together producing flocs.”); *discussed in* Mulhollem J. (11 July 2022) *Researcher gets grant to study biofilters to reduce livestock facility methane*, PENN STATE.

²⁰⁸ Lazenby R. (2022) *Rethinking manure biogas: Policy considerations to promote equity and protect the climate and environment*, Vermont Law and Center for Agriculture and Food Systems, 28 (“The massive quantities of manure produced at industrial scale livestock facilities can and do cause serious environmental, quality of life, and public health harms to neighboring communities. These harms do not cease to exist upon the addition of an anaerobic digester. In fact, while proponents of biogas systems sometimes argue that capping lagoons can address these issues, impacted environmental justice communities around the country have organized against the proliferation of biogas because it is viewed as maintaining and supporting a harmful system.¹⁰⁴”); *citing* Gittelsohn P., Diamond D., Henning L., Payan M., Utesch L., & Utesch N. (2021) *The False Promises of Biogas: Why Biogas Is an Environmental Justice Issue*, ENVIRONMENTAL JUSTICE. *See also* Hindenanch J. (27 October 2021) *Climate credits for factory farm gas violate civil rights, fail to achieve climate benefits, states petition submitted to CARB*, Leadership Counsel for Justice & Accountability (“The petition calls on [California Air Resources Board (CARB)] to exclude polluting factory farm-derived methane from the [Low Carbon Fuel Standard (LCFS)] or amend the credit system to better account for the actual climate impact of using factory farm-generated methane as a transportation fuel and exclude those projects that entrench and exacerbate local air and water pollution. As currently formulated, the credit system overstates the emission reduction benefits of factory farm gas by failing to account for the fuel’s life-cycle emissions — from crop production, intestinal emissions and animal feed to the disposal of manure and pipeline leaks. In the petition, groups also emphasize that factory farms have been able to exploit the credit systems to “double dip” — using public dollars to subsidize the construction of dairy digesters, while also receiving millions for the credits sold through the LCFS.”); Oglesby C. (28 March 2022) *This plan is a lie: Biogas on hog farms could do more harm than good*, ENERGY NEWS NETWORK; and Sainato M. (4 February 2022) *California subsidies for dairy cows’ biogas are lose-lose, campaigners say*, THE GUARDIAN.

²⁰⁹ Bakkaloglu S., Cooper J., & Hawkes A. (2022) *Methane emissions along biomethane and biogas supply chains are underestimated*, ONE EARTH 5(6): 724–736, 726, 730 (“Although emissions from the biomethane supply chain are comparable to oil and natural-gas production in terms of Tg CH₄ year⁻¹, the production-normalized emission rate is considerably higher. This could be due to a variety of factors, including poorly managed production facilities; a lack of attention to the biomethane industry resulting in lower investments for modernization, operation, and monitoring; and employment of highly skilled plant operators when compared with oil and natural gas. In addition, poor design and management of feedstock and digestate storage units as well as a limited interest in infrastructure emissions may result in higher emission rates compared with the amount of gas produced. Because oil and natural-gas supply chains have been primarily operated by large companies for decades, they have invested more in leak detection and repair. On the other hand, given the growth in biomethane generation due to national decarbonization strategies, more urgent efforts are also needed for the biomethane supply chain to address not only CH₄ emissions but also the sustainability of biomethane.”); “The synthesis of available data here showed that this leads to lower direct CH₄ emissions than the oil and natural-gas supply chain but much higher CH₄ loss rates than the oil and natural-gas supply chain. This conclusion is pertinent in the context of global efforts to mitigate CH₄ emissions, which to date largely focuses on natural-gas supply chains.”).

²¹⁰ Staggs B. (16 August 2022) *California cows are leaving the state and that won’t help global warming*, DAILY BULLETIN (“But while half of those reductions have come from dairies changing the ways they process cow manure, the other half has come because California simply is losing cows. And when cows are moved, global methane emissions don’t actually drop. They just shift, or “leak,” into another state, where lighter regulations mean the greenhouse problems likely will get worse.”).

²¹¹ United States Environmental Protection Agency (2019) *GLOBAL NON-CO₂ GREENHOUSE GAS EMISSION PROJECTIONS & MITIGATION 2015-2050*, EPA-430-R-19-010, 56 (“The analysis considers six enteric fermentation CH₄ abatement measures: improved feed conversion efficiency, antibiotics, bovine somatotropin (bST), propionate precursors, antimethanogen vaccines, and intensive grazing. Many of the currently available enteric fermentation abatement options

work indirectly by increasing animal growth rates and reducing time to finish (or increasing milk production for dairy cows). These abatement measures achieve emission reductions because increased productivity means fewer animals are required to produce the same amount of meat or milk. Furthermore, several of the abatement measures are inexpensive to implement and are cost-effective at reducing emissions. For example, the average annual operation and maintenance cost for antibiotics ranges from \$4 to \$9 per head. Likewise, intensive grazing can save farmers up to \$180 annually while reducing emissions by 9 MtCO₂e at break-even prices below \$0/tCO₂e.”).

²¹² Balehegn M. (2021) *Livestock sustainability research in Africa with a focus on the environment*, ANIM. FRONT. 11(4): 47–56, 48 (“Such interventions include improving feed quality by upgrading crop residues, concentrate supplementation, that effectively reduce enteric CH₄ production and emission intensity while improving feed conversion efficiency and miscellaneous sustainable livestock intensification strategies that improve productivity while minimizing the negative environmental impact of livestock. Such strategies include manure management, animal breeding, grazing practices, and sustainable forage production or pastureland management practices such as intercropping, silvopastoral practices, etc. Perhaps more than the need for new research is that for awareness creation about best bet technologies and approaches for improving livestock production and sustainability and for sustained extension support to enhance the adoption and use of available technologies and approaches. Given that African countries are already critically affected by climate change as manifested by extreme weather variability and recurrent drought, strategies that provide synergetic opportunities for climate adaptation and mitigation are needed for resource-limited smallholder farmers. Implementation of successful adaptation and mitigation schemes, however, is costly to smallholder farmers, and therefore policy support towards providing financial and technical incentives is required.”). See also Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, White Paper, 7 (“Better feed quality primarily means more digestible feed – feed ruminants can more thoroughly digest and use for energy – and feed with balanced nutrients, including sufficient protein. Although ruminants can break down the cellulosic material that makes up much of the hard cell walls of grasses, leaves and other forages, some fibrous material is easier to digest than other material. As a result, more digestible feeds provide more energy for cattle and less that is lost to methane, other gases, or manure. Because cattle also cannot digest lignin, which increases with the age of the grass, consuming fresher grasses and reducing reliance on most crop residues also helps to reduce methane and improve growth.”).

²¹³ Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, White Paper, 7–8 (“As importantly, the quantity of feed that ruminants can eat is limited by the speed with which the material is digested. Because cattle cannot digest lignin at all, and digest carbohydrates more rapidly than cellulose, they can eat more overall feed when it is more digestible. That has an important effect because the first use of feed by an animal is to support its own maintenance: the energy an animal needs to live. It is the surplus of energy in feed over maintenance requirements that can contribute to milk production, or to weight gain, which means the addition of meat. Although cattle need a balance of different types of feed, in general, cattle fed more digestible feeds can eat more, produce more milk and grow faster than cattle fed less digestible feeds. Although they produce more methane per animal, the methane per kilogram of milk or meat decreases.”).

²¹⁴ Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, White Paper, 9 (“High quality feed and care can also make it possible to use breeds, particularly European breeds, that are more efficient at converting feed and produce more milk per animal and higher daily weight gains. The use of these breeds can be inefficient in warmer countries where these breeds can suffer from heat stress and are less resistant to local diseases or ticks. These breeds are also less efficient where feed has poor quality. Improvements in feed and health care, however, can often allow greater use of western breeds or, quite commonly, productive crossbreeds of western breeds and indigenous cattle breeds.”).

²¹⁵ Kim M., Masaki T., Ikuta K., Iwamoto E., Nishihara K., Hirai M., Uemoto Y., Terada F., & Roh S. (2022) *Physiological responses and adaptations to high methane production in Japanese Black cattle*, SCI. REP. 12(11154): 1–14, 1 (“In this study, using enteric methane emissions, we investigated the metabolic characteristics of Japanese Black cattle. Their methane emissions were measured at early (age 13 months), middle (20 months), and late fattening phases (28 months). Cattle with the highest and lowest methane emissions were selected based on the residual methane emission values, and their liver transcriptome, blood metabolites, hormones, and rumen fermentation characteristics were analyzed.

Blood β -hydroxybutyric acid and insulin levels were high, whereas blood amino acid levels were low in cattle with high methane emissions. Further, propionate and butyrate levels differed depending on the enteric methane emissions. Hepatic genes, such as *SERPINI2*, *SLC7A5*, *ATP6*, and *RRAD*, which were related to amino acid transport and glucose metabolism, were upregulated or downregulated during the late fattening phase. The above mentioned metabolites and liver transcriptomes could be used to evaluate enteric methanogenesis in Japanese Black cattle.”); *discussed in* Sexton C. (31 July 2022) *Study reveals features of cattle with high methane emissions*, EARTH.COM.

²¹⁶ von Soosten D., Meyer U., Flachowsky G., Dänicke S., (2020) *Dairy Cow Health and Greenhouse Gas Emission Intensity*, DAIRY: 20–29, 26 (“In the case of illness in a dairy cow (clinical or subclinical), feed intake and milk yield are usually reduced. For this reason, GHG emissions then increase per kilogram of product. An extended productive life is desirable to achieve a reduction in emission intensity. It remains difficult to consider animal losses in terms of GHG emissions. Apart from the dead animal, we also have to consider the GHG emissions for the production of feed the dead animal had consumed during its life. More data that consider animal health up to animal losses seem to be necessary for a better quantification of GHG emission intensity.”). *See also* Özkan Gülzari Ş., Vosough Ahmadi B., Stott A. W. (2018) *Impact of subclinical mastitis on greenhouse gas emissions intensity and profitability of dairy cows in Norway*, PREV. VET. MED. 150, 19–29, 28 (“We concluded that there is a potential to reduce the total farm emissions intensity by 3.7% if the milk production was improved through reducing the level of [somatic cell count] SCC to 50,000 cells/mL in relation to SCC level 800,000 cells/mL. We, however, acknowledge that this may be an underestimation as [subclinical mastitis] SCM is usually accompanied by other diseases. Based on the presented results, it is concluded that preventing and/or controlling SCM consequently reduces the GHG emissions per unit of production on farm, which results in improved profits for the farmers through reductions in milk losses, optimum culling rate and reduced feed and other variable costs.”).

²¹⁷ Fox N. J., *et al.* (2018) *Ubiquitous parasites drive a 33% increase in methane yield from livestock*, INT. J. PARISITOL. 48(13): 1017–1021, 1017 (“This is to our knowledge the first study that empirically demonstrates disease-driven increases in methane (CH₄) yield in livestock (grams of CH₄ per kg of dry matter intake). We do this by measuring methane emissions (in respiration chambers), dry matter intake, and production parameters for parasitised and parasite-free lambs. This study shows that parasite infections in lambs can lead to a 33% increase in methane yield (g CH₄/kg DMI).”).

²¹⁸ Balehegn M. (2021) *Livestock sustainability research in Africa with a focus on the environment*, ANIM. FRONT. 11(4): 47–56, 54 (“In Africa, sustainable livestock production must address food security and climate change concerns simultaneously in addition to social and economic aspects. The need for and principles of sustainable livestock production apply universally. Although many high-income countries focus on the environmental impacts of livestock production, low-income countries are concerned with increasing livestock productivity to improve income and food supply and reduce high rates of childhood undernutrition and stunting (Tricarico *et al.*, 2020). Currently, most countries in Africa rely on the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) tier 1 methodology to estimate their livestock-based emissions. However, detailed, and precise activity data are lacking, and accurate estimates of natural resource use and environmental impact by livestock in Africa, particularly SSA are scarce.”).

²¹⁹ Herrero M., Henderson B., Havlik P., Thornton P. K., Conant R. T., Smith P., Wirsenius S., Hristov A. N., Gerber P., Gill M., Butterbach-Bahl K., Valin H., Garbett T., & Stehfest E. (2016) *Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector*, NAT. CLIM. CHANGE 6(5): 452–461, 455 (“*Animal productivity and health*. Improving the genetic potential of animals for production, their reproductive performance, health and liveweight gain rates are among the most effective approaches for reducing GHG emissions per unit of product^{32,58}. In subsistence agricultural systems, reduction of herd size by increased reproduction rates increases feed availability as well as the productivity of individual animals and the total herd, thus lowering E_{CH₄} and overall GHG emissions per unit of product. Reducing the age at slaughter by increasing liveweight gain rates significantly decreases GHG emissions per unit of product in beef and other meat production systems. Improved animal health and reduced mortality and morbidity can increase herd productivity and reduce emissions intensity in all livestock systems. Adoption of modern reproductive management technologies, targeting increased conception rates, increased fecundity (in swine and small ruminants) and reduced embryo loss also provide a significant opportunity to reduce GHG emissions from the livestock sector, with appropriate attention to animal welfare considerations. We estimated that these improved animal management practices could reduce emissions in the livestock sector by 0.2 GtCO_{2e} yr⁻¹ by 2050.”).

²²⁰ Laine J. E., *et al.* (2021) *Co-benefits from sustainable dietary shifts for population and environmental health: an assessment from a large European cohort study*, LANCET PLANET. HEALTH 5(11): e786–e796, e794 (“Supporting the co-

benefits of our findings, we also found that reductions in greenhouse gas emissions and land use could occur with higher adherence to the EAT–*Lancet* reference diet, whereby greenhouse gas emissions could be reduced by 50% and land use levels by 62%. Overall, adhering to the EAT–*Lancet* reference diet seems to be beneficial for reducing all-cause mortality and cancer while mutually reducing greenhouse gas emissions and land use; this is particularly concerning for Europe’s local environmental impacts, where agricultural production is among the most intensive in the world.²⁸³).

²²¹ O’Hara Y. (15 December 2017) *Vaccine to reduce methane from cows could be ‘5 to 7 years away’*, NEW ZEALAND HERALD (“However, DairyNZ and the dairy industry, including Fonterra, are looking at ways of mitigating that production as part of the Dairy Action for Climate Change framework, launched earlier this year. DairyNZ’s senior adviser and policy analyst Kara Lok said AgResearch was working on the methane inhibitor vaccine, and it was one of several studies under way.”).

²²² Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, White Paper, 12 (“Vaccines have so far proved frustrating and only temporarily effective but merit continued research. Breeding is another option. Variation in methane production among different individual animals (Wallace et al. 2019), which appears to be heritable, suggests that breeding can over time reduce methane levels. One study estimated methane reductions might approach 15% (González-Recio et al. 2020). These efforts merit serious work but will only show results over several decades.”).

²²³ Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model*, ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 025004, 1–21, 14 (“For CH₄ emissions from rice cultivation, a halving of global emissions is considered possible through improved water management that shorten the period of continuous flooding of fields, combined with a use of low-CH₄ generating hybrids and different soil amendments (see section S6.5 of the SI for details.”). See also United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 16 (“Rice paddies: improved water management or alternate flooding/drainage wetland rice; direct wet seeding; phosphogypsum and sulphate addition to inhibit methanogenesis; composting rice straw; use of alternative hybrids species.” (Listed under “Targeted Measures”)); Project Drawdown, *Technical Summary: Improved Rice Production* (last visited 31 August 2022) (“Improved rice production practices include: changes to water management (alternate wetting and drying); fertility management; use of aerobic cultivars; no-tillage; and direct seeding. Data was collected only from studies that used two or more of these practices.”); and Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, White Paper, 18 (“One way to mitigate methane emissions from rice cultivation is simply to increase yields. Rice emissions are based on the number of hectares planted and harvested each year, and higher yields reduce the area planted for the same total production. Higher yielding crop varieties also appear to generate less methane per hectare (Jiang et al. 2017.”).

²²⁴ Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model*, ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 025004, 1–21, 14 (“For CH₄ emissions from rice cultivation, a halving of global emissions is considered possible through improved water management that shorten the period of continuous flooding of fields, combined with a use of low-CH₄ generating hybrids and different soil amendments (see section S6.5 of the SI for details.”).

²²⁵ Ahmed J., Almeida E., Aminetzah D., Denis N., Henderson K., Katz J., Kitchel H., & Mannion P. (2020) *AGRICULTURE AND CLIMATE CHANGE: REDUCING EMISSIONS THROUGH IMPROVED FARMING PRACTICES*, McKinsey & Company, 18 (“Several practices could reduce methane emissions in rice paddies, relative to what is observed in the continuous flooding systems used most widely across the world. Alternate wetting and drying, single season drainage, and other methods can increase in nitrous oxide emissions. However, this adverse impact is significantly outweighed in terms of tCO₂e by direct methane-emissions reduction.”).

²²⁶ Climate & Clean Air Coalition, *Paddy rice production* (last visited 31 August 2022) (“Alternate wetting and drying (AWD), the practice of allowing the water table to drop below the soil surface at one or multiple points during a growing season, is an effective alternative to continuous flooding, proven to reduce methane emissions by as much as 48%. The practice is also cost-saving for farmers, as it requires a third less water than continuous flooding and does not compromise

yield.”). See also Project Drawdown, *Improved Rice Production* (last visited 31 August 2022) (“These techniques can make rice production efficient, dependable, and sustainable, helping to meet growing demand for this staple food while minimizing adverse climate impacts. We investigated two low-methane rice production solutions: Improved Rice Production (profiled here), with techniques suitable to both small- and large-scale operations, and *System of Rice Intensification*, currently limited to smallholders. This solution replaces conventional paddy rice production in mechanized (non-smallholder) regions. Given that many rice farming methods are long-entrenched customs, change requires helping farmers see what results are possible, cultivating necessary knowledge and skills, and implementing incentives that make new methods compelling.”).

²²⁷ Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, White Paper, 17 (“Moreover, in addition to management, rice yield potential has continued to rise steadily through improved crop breeding (Kumar et al. 2021), and breeders for rice, as for other crops, have many ideas for potentially larger increases in yield potential (Qian et al. 2016).”), 20 (“Results of biochar in rice fields are promising for methane reduction, yields gains and other benefits. Many experiments have now been done, and global meta-analyses suggest that biochar amendment in rice fields can reduce methane emissions by 6-13% compared to not using biochar (Awad et al. 2018) (Liao et al. 2021). In theory, if all rice straws were charred and returned to the fields, the estimated global methane emission reductions along with our estimated changes in water management would increase to 12.55 million tons (Figure 6). In addition, accumulating evidence suggests that biochar amendment in rice fields can boost rice yield by about 9% (Liao et al. 2021). This level of yield benefits could significantly help defray the costs of using biochar.”).

²²⁸ Low J. (20 June 2022) *How Pakistan is navigating water scarcity in agriculture*, GOVINSIDER (“Mechanical rice transplanters may provide some relief. This is a machine that creates equal distancing between seedlings to optimize plant density in the field and maximize yield; ‘The technology helps automate manual work and will be able to reach a degree of precision that cannot be achieved physically,’ Shahruxh explains.”).

²²⁹ Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, White Paper, 18 (“Each 1% increase in rice yields roughly reduces rice methane emissions by 1%. If global rice yields rise only to 5.3 tons per hectare by 2050, the Globagri model estimates that rice methane emissions would rise 13% from 2010 levels (T. Searchinger et al. 2019). But achieving a global average yield of 6.4 tons per hectare per year in 2050 would result in a 4% drop in emissions.”).

²³⁰ Kumar A., et al. (2021) *Genetic gain for rice yield in rainfed environments in India*, FIELD CROPS RES. 260(107977): 1–12, 9 (“This study documents the significant genetic gain for grain yield of a breeding program targeting rainfed lowland rice in India that was based on direct selection for grain yield under both irrigated control and drought conditions. The study utilized extensive multi-season evaluation in target environments under irrigated control, moderate drought stress and severe drought stress between 2004–2014 with number of popular varieties as checks to enable accurate estimation of the genetic gain. The yield improvement of the newly developed stress-tolerant varieties over the best currently grown varieties was also demonstrated on farmers’ fields. The developed STRVs have potential to protect farmers from crop losses against an increasing impact of extreme droughts under climate change.”).

²³¹ California Air Resources Board, *Rice Cultivation Projects* (last visited 29 July 2022).

²³² Romero-Briones A. (19 April 2022) *The Future of Agriculture in a Warming World Panel*, Speech.

²³³ Heller M. (4 November 2021) *It’s not weird, it’s nuts: Farmers graze cows in groves of trees*, E&E GREENWIRE (“It’s part of a broader set of practices called agroforestry that combine food production with trees. Advocates say it could help in the fight against climate change by encouraging both the planting of trees and less-intensive livestock farming. ‘Research suggests silvopasture far outpaces any grassland technique for counteracting the methane emissions of livestock and sequestering carbon under-hoof,’ said Project Drawdown, a San Francisco group inspired by the 2017 best-selling book ‘Drawdown’ by Paul Hawken, on its website. ‘Pastures strewn or crisscrossed with trees sequester five to ten times as much carbon as those of the same size that are treeless, storing it in both biomass and soil.’”).

²³⁴ Heller M. (3 January 2022) *Solar grazing: Sheep tidy up at solar farms*, E&E GREENWIRE (“Promoters say the benefits are far-reaching. Site managers are looking for ways to keep vegetation from overgrowing and shading the panels, and some research suggests grazing saves as much as \$300 per acre each year over other methods. Land owners are looking for whatever value they can draw from their property. And farmers who need places for livestock to munch on grass or other ground cover can charge for the service. The practice has environmental benefits, too, supporters say, by keeping land in agricultural production, controlling runoff and improving soil quality through rotational grazing, in which animals are moved from pasture to pasture over a season.”).

²³⁵ Slade E. M., Riutta T., Roslin T., & Tuomisto H. L. (2016) *The role of dung beetles in reducing greenhouse gas emissions from cattle farming*, SCI. REP. 6(18140): 1–8, 1 (“Several recent papers suggest that dung beetles may affect fluxes of GHGs from cattle farming. Here, we put these previous findings into context. Using Finland as an example, we assessed GHG emissions at three scales: the dung pat, pasture ecosystem and whole lifecycle of milk or beef production. At the first two levels, dung beetles reduced GHG emissions by up to 7% and 12% respectively, mainly through large reductions in methane (CH₄) emissions. However, at the lifecycle level, dung beetles accounted for only a 0.05–0.13% reduction of overall GHG emissions. This mismatch derives from the fact that in intensive production systems, only a limited fraction of all cow pats end up on pastures, offering limited scope for dung beetle mitigation of GHG fluxes. In contrast, we suggest that the effects of dung beetles may be accentuated in tropical countries, where more manure is left on pastures and dung beetles remove and aerate dung faster and that this is thus a key area for future research.”).

²³⁶ Dore S., Deverel S. J., & Christen N. (2022) *A vermifiltration system for low methane emissions and high nutrient removal at a California dairy*, BIORESOUR. TECHNOL. REP. 18(101044): 1–10, 1 (“Methane fluxes and wastewater removal rate of volatile solids, N species, salinity, major ions, and trace elements were monitored for 12 months. Vermifiltration reduced methane emissions relative to an anaerobic lagoon by 97–99% and removed 87% of the volatile solids, contaminants such as salts and trace elements, P (83%) and N (84%) from the wastewater. Vermifiltration of dairy wastewater demonstrated to be a useful tool to mitigate methane emissions, regulate **excess nutrients** and improve water quality at dairy farms.”). See also Singh R., Ray C., Miller D. N., Durso L. M., Meneses Y., Bartelt-Hunt S., & D’Alessio M. (2022) *Effects of feeding mode on the performance, life span and greenhouse gas emissions of a vertical flow macrophyte assisted vermifilter*, NPJ CLEAN WATER 5(31): 1–9, 1 (“This study was conducted to investigate the impact of intermittent feeding on performance, clogging, and gaseous emission on macrophyte assisted vermifiltration (MAVF) based treatment system. Synthetic slaughterhouse wastewater was applied to two different integrated vertical flow based MAVFs. Triplicates were used throughout the study. Eisenia fetida earthworms were added to MAVFs, and Carex muskingmenis plants were planted. Wastewater was applied to the reactors on 1) intermittent (8 h/day) (IMAVF) and 2) continuous (24 h/day) (CMAVF) basis. The average chemical oxygen demand, total nitrogen, and total phosphorous removals achieved by the IMAVF were $80.2 \pm 1.6\%$, $53.9 \pm 1.3\%$ and $66.5 \pm 1\%$ respectively, and $68.3 \pm 1.3\%$, $61.2 \pm 1.4\%$, and $60.5 \pm 1.4\%$ by the CMAVF, respectively. The diffusion of air to the bedding of IMAVFs during no-flow conditions facilitated higher organics oxidation, adsorption of phosphorous, nitrification, and ammonification.... Intermittent application of influent could be considered for improving the performance and lifespan of MAVFs, causing lower environmental footprints.”); discussed in van Deelan G. (15 July 2022) *Manure-Eating Worms Could Be the Dairy Industry’s Climate Solution*, INSIDE CLIMATE NEWS (“Some scientists even say that vermifiltration could reduce greenhouse gas emissions from dairy farms by preventing the production of methane, a powerful greenhouse gas. As such, vermifiltration could be a possible alternative to manure digesters, controversial technologies that capture methane produced by manure ponds, then sell that methane as a fuel source.”).

²³⁷ Bryant R. W., Burns E. E. R., Feidler-Cree C., Carlton D., Flythe M. D., & Martin L. J. (2021) *Spent Craft Brewer’s Yeast Reduces Production of Methane and Ammonia by Bovine Rumen Microbes*, FRONT. ANIM. SCI. 2(720646): 1–10, 1 (“Our research suggests that adding spent craft brewer’s yeast to rumen microbes by single time-point 24-h *in vitro* incubations suppresses production of methane and ammonia. This project examines the correlation between the quantities of hop acids in spent yeast and the production of methane and ammonia by bovine rumen microbes *in vitro*. We determined, by HPLC, the hop acid concentrations in spent yeast obtained from six beer styles produced at a local brewery. We performed anaerobic incubation studies on bovine rumen microbes, comparing the effects of these materials to a baker’s yeast control and to the industry-standard antibiotic monensin. Results include promising decreases in both methane (measured by GC–FID) and ammonia (measured by colorimetric assay) in the presence of craft brewer’s yeast, and a strong correlation between the quantities of hop acids in the spent yeast and the reduction of methane and ammonia. Notably, two of the yeast samples inhibited methane production to a greater degree than the industry-standard antibiotic

monensin. Our results suggest that spent brewer's yeast has potential to improve ruminant growth while reducing anthropogenic methane emission.”).

²³⁸ See *Number 8 Bio* (last visited 29 July 2022).

²³⁹ Roston E. (3 January 2022) *Inside the Project to Genetically Modify Rice to Emit Fewer Greenhouse Gases*, TIME (“Now, 15 years after their initial meeting, Banfield, Doudna and a large team of co-authors have published a paper that takes a major step toward solving the thorny problem of how to study and alter genomes of microbes living in complicated real-world environments, such as the gut microbiome or soil. The complexity of microbial communities has been a major obstacle to discovering technologies that can prevent diseases and improve agriculture. It’s a critical step toward curbing methane, a harmful greenhouse gas that is emitted during rice production.... Rice fields are like smokestacks for soil methane, and to shut down those emissions, scientists first need to understand the microbes. The trouble has been that culturing microbial communities and tinkering with them in a lab with traditional tools ‘could take years or might fail altogether,’ IGI authors write. Their new paper demonstrates that using a Crispr-based system can ‘accelerate this process to weeks.’”). See also Rubin B. E., et al. (2022) *Species- and site-specific genome editing in complex bacterial communities*. NAT. MICROBIOL. 7: 34–47.

²⁴⁰ El Abbadi S. H., Sherwin E. D., Brandt A. R., Luby S. P., & Criddle C. S. (2022) *Displacing fishmeal with protein derived from stranded methane*, NAT. SUSTAIN. 5: 47–56, 47 (“Methane emitted and flared from industrial sources across the United States is a major contributor to global climate change. Methanotrophic bacteria can transform this methane into useful protein-rich biomass, already approved for inclusion into animal feed. In the rapidly growing aquaculture industry, methanotrophic additives have a favourable amino acid profile and can offset ocean-caught fishmeal, reducing demands on over-harvested fisheries.... Our results show that current technology can enable production, in the United States alone, equivalent to 14% of the global fishmeal market at prices at or below the current cost of fishmeal (roughly US\$1,600 per metric ton).”).

²⁴¹ N2–Applied, *N2 Solution* (last visited 31 August 2022) (“N2 Applied has developed a technology that enables local production of fertiliser using only livestock slurry, air and electricity, – dramatically reducing harmful emissions and improving yield at the same time. The technology adds nitrogen from the air into slurry, which increases the nitrogen content. The reaction prevents the loss of ammonia and eliminates methane emissions, making it a real solution helping to achieve climate target commitments on an industrial scale. The end-product is a nitrogen enriched organic fertiliser (NEO), which has the same characteristics as normal slurry, but contains more nitrogen and significantly less emissions. It can still be spread using existing farm equipment, enabling farmers to improve their own food production, reduce the need for chemical fertiliser, and make farming more circular.”).

²⁴² Kebreab E. & Feng X. (2021) *Strategies to Reduce Methane Emissions from Enteric and Lagoon Sources*, California Air Resources Board, 69 (“In general, higher moisture contents in raw composting manure could enhance the CH₄ mitigation rates, however, the pH, and C/N content were not linearly related to CH₄ mitigation. Adding biochar, acids, and straw to manure could mitigate CH₄ emissions by 82.4%, 78.1%, and 47.7%, respectively. However, the data for straw is quite small so it should not be taken out of context as it may introduce a source of carbon into lagoons. The meta-analysis conducted with selected additives indicated manure additives were an effective method to reduce CH₄ emission, with biochar being the most effective. However, further studies of manure additives on CH₄ mitigation are required to support a more accurate quantitative analysis and potential impacts to water quality and crop yield after land application. Most of the research for biochar and straw is when used as additive to solid or semi solid manure so they should be interpreted in that context.”). See also Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, White Paper, 26 (“Another emerging option involves adding acid to manure stored in wet form, which can almost eliminate methane emissions. Some experiments with acidification have occurred for many years (Fangueiro, Hjorth, and Gioelli 2015) (Søren O. Petersen, Andersen, and Eriksen 2012), but experimental work has been increasing (Rodhe et al. 2019). Acidification can be done at different stages of manure management: in the barn, in storage tanks, prior to field application. Methane reductions require a regular, but modest, insertion of acid into storage tanks. Acidifying manure also reduces ammonia losses when methane is applied, and in some experiments increases yields (Loide 2019). Yield gains probably occur if farmers either do not apply or are not allowed to apply more nitrogen fertilizer to replace the nitrogen lost with the releases of ammonia. The amount of acid required for sufficient acidification to greatly reduce methane is still unclear.”; “There are also a variety of promising innovative methods to reduce methane. There is

experimental evidence, for example, that some additives, such as sulfate, can be added in modest quantities and still reduce two-thirds of the methane emissions from storage even without significantly reducing pH (Petersen, Andersen & Eriksen 2012) (Petersen et al. 2014) (Sokolov et al. 2020).”); Peterson C., El Mashad H. M., Zhao Y., Pan Y., & Mitloehner F. M. (2020) *Effects of SOP Lagoon Additive on Gaseous Emissions from Stored Liquid Dairy Manure*, SUSTAINABILITY 12(4): 1393, 1–17, 1 (“A variety of additives have been applied to reduce emissions from manure. Although the composition and mechanism of the emission reduction of several additives are known, information on many other commercial additives is not available because of confidentiality and limits in the marketing literature. Calcium sulfate (gypsum) can be found abundantly in nature and has been used to improve soil properties. . . . Different forms of gypsum have been tested for the mitigation of GHG and ammonia emissions from livestock effluents. The results have had varying results: while some studies reported a decrease in ammonia emissions after the addition of gypsum, not all have demonstrated the efficacy of gypsum in reducing the release of GHGs. Many of the results were obtained using a considerable amount of material (3% to 10% of manure wet weight) making the application not practical in real-world conditions. Borgonovo et al. first published results on this specific commercial additive (SOP LAGOON), made of gypsum processed with proprietary technology, and found that the addition of the products to fresh liquid manure has a reduction potential of 21.5% of CH₄, 22.9% of CO₂, 100% of N₂O and 100% of NH₃ emissions on day 4, even at very low dosages. It should be mentioned that similar to other commercial additives, the exact manufacturing process of SOP Lagoon is unknown due to confidentiality.”); Yang S., Xiao Y., Sun X., Ding J., Jiang Z., & Xu J. (2019) *Biochar improved rice yield and mitigated CH₄ and N₂O emissions from paddy field under controlled irrigation in the Taihu Lake Region of China*, ATMOS. ENVIRON. 200: 69–77, 69 (“These results suggest that 20 and 40 t ha⁻¹ biochar can be utilized under controlled irrigation not only for mitigation of CH₄ and N₂O emission but also to increase rice yield, soil fertility and irrigation water productivity. Therefore, the combination of biochar amendment and controlled irrigation might be a good option for mitigating greenhouse gases emission and realizing the sustainable utilization of soil and water resources of paddy fields in the Taihu Lake Region of China.”); and Peskett M. (15 November 2021) *Reducing methane emissions from cattle and dairy farming*, FOOD AND FARMING TECHNOLOGY (“Nearly all dairy farms use effluent or slurry ponds and they are the second largest source of on-farm methane emissions. At New Zealand’s Lincoln University, scientists Emeritus Professor Keith Cameron and Professor Hong Di have developed technology that reduces the methane emissions from dairy farm effluent ponds by up to 99%. Built in conjunction with New Zealand ag solutions firm Ravensdown, the ‘EcoPond’ virtually eliminates the methane emitted from effluent ponds. A computer-controlled pump and mixing system precisely administers iron sulphate – a safe additive used in the treatment of drinking water, to neutralise methane production.”).

²⁴³ GHGSat (2 March 2022) *Cow burps seen from space*, Press Release (“On March 2nd 2022, high-resolution satellites owned and operated by GHGSat, the environmental data company, detected methane (CH₄) emissions coming from an agricultural area in California’s Joaquin Valley...This highlights the importance of tracking greenhouse gas emission from cattle farming, and the ability to do so even from space.”).

²⁴⁴ Liu L., et al. (2022) *KGML-ag: A Modeling Framework of Knowledge-Guided Machine Learning to Simulate Agroecosystems: A Case Study of Estimating N₂O Emission Using Data from Mesocosm Experiments*, GEOSCI. MODEL DEV. 15(7): 2839–2858, 2839 (“The development of KGML-ag in our study is suitable to predict not only N₂O but also other variables, such as CO₂, CH₄ and ET, with complicated generation processes relying on the historical states. To develop a capable KGML model, we need to carefully address three questions.”); *discussed in* University of Minnesota (28 April 2022) *New study could help reduce agricultural greenhouse gas emissions*, RESEARCH BRIEF (“A team of researchers led by the University of Minnesota has significantly improved the performance of numerical predictions for agricultural nitrous oxide emissions. The first-of-its-kind knowledge-guided machine learning model is 1,000 times faster than current systems and could significantly reduce greenhouse gas emissions from agriculture... Accurate, scalable, and cost-effective monitoring and reporting of greenhouse gas emissions are needed to verify what are called “carbon credits” or permits that offset greenhouse gas emissions. Farmers can be reimbursed for practices that reduce greenhouse gas emissions. The KGML-ag framework opens tremendous opportunities for quantifying the agricultural nitrous oxide, carbon dioxide, and methane emissions, helping to verify carbon credits and optimize farming management practices and policy making.”).

²⁴⁵ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 87 (“Analysis of the technical potential to mitigate methane from four separate studies shows that for 2030, reductions of 29–57 Mt/yr could be made in the oil and gas subsector, 12–

25 Mt/yr from coal mining, 29–36 Mt/yr in the waste sector and 6–9 Mt/yr from rice cultivation. Values for the livestock subsector are less consistent, ranging from 4–42 Mt/yr.”).

²⁴⁶ United States Climate Alliance (2018) *FROM SLCP CHALLENGE TO ACTION: A ROADMAP FOR REDUCING SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS TO MEET THE GOALS OF THE PARIS AGREEMENT*, 102 (“Within the waste sector, all cost abatement potential is concentrated within the solid waste subsector which has three to six times the potential found in the wastewater (sewage) subsector (Figure 4.9). Totals in the three available analyses are very similar for the full waste sector, so that the full range is captured by 32 ± 4 Mt/ yr. Hence this sector has about half the potential of the fossil sector for all cost measures and a much narrower uncertainty range. Evaluating this mitigation potential as a share of projected 2030 waste sector emissions is complicated by a large divergence between them, which were ~70 Mt/yr in the Harmsen and US EPA analyses, whereas there was a much larger value of 114 Mt/yr in the IIASA analysis. Hence although all the studies find similar abatement potential, the share of 2030 emissions from waste estimated to be abatable ranges from just 25 per cent in the IIASA analysis to ~40-50 per cent in the US EPA and Harmsen analyses. For low-cost measures in the waste sector, the analyses are again fairly consistent with all falling within the range 16 ± 5 Mt/yr.”).

²⁴⁷ United States Environmental Protection Agency (2019) *GLOBAL NON-CO₂ GREENHOUSE GAS EMISSION PROJECTIONS & MITIGATION 2015-2050*, EPA-430-R-19-010, 70 (“Collection of LFG is feasible at most engineered landfills. It prevents high concentrations of gas in the landfill, which addresses public health and facility safety concerns. After collecting LFG, the least capital-intensive way to reduce emissions is flaring, which burns off the gas. However, flaring does not deliver any economic benefits for landfill operators. Energy production represents a potential revenue stream for landfills. It includes electricity generation, anaerobic digestion, and direct use. A variety of engine types and waste-to-energy processes can achieve electricity generation. Anaerobic digestion provides CH₄ for on-site electricity or for selling to the market. Direct use implies that a landfill transports captured methane to a facility, which uses it for electricity generation, as process heat, or as an input into other processes.”).

²⁴⁸ United States Environmental Protection Agency, *Basic information about landfill gas* (last visited 29 July 2022).

²⁴⁹ United States Environmental Protection Agency (2019) *GLOBAL NON-CO₂ GREENHOUSE GAS EMISSION PROJECTIONS & MITIGATION 2015-2050*, EPA-430-R-19-010, 70 (“Energy production represents a potential revenue stream for landfills. It includes electricity generation, anaerobic digestion, and direct use. A variety of engine types and waste-to-energy processes can achieve electricity generation. Anaerobic digestion provides CH₄ for on-site electricity or for selling to the market. Direct use implies that a landfill transports captured methane to a facility, which uses it for electricity generation, as process heat, or as an input into other processes.”).

²⁵⁰ DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggestad C., & Ulanov A. (2021) *CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT*, McKinsey Sustainability, 55 (See Reference Path for modeling maximum technical opportunity by 2030 and 2050 (continued)).

²⁵¹ United States Environmental Protection Agency, *Basic information about landfill gas* (last visited 31 August 2022) (“About 69 percent of currently operational LFG energy projects in the United States generate electricity. A variety of technologies, including reciprocating internal combustion engines, turbines, microturbines and fuel cells, can be used to generate electricity for onsite use and/or sale to the grid. The reciprocating engine is the most commonly used conversion technology for LFG electricity applications because of its relatively low cost, high efficiency and size ranges that complement the gas output of many landfills. Gas turbines are typically used in larger LFG energy projects while microturbines are generally used for smaller LFG volumes and in niche applications.”). See also Fuel Cell & Hydrogen Energy Association (27 April 2020) *Reducing waste emissions by using fuel cells and hydrogen*.

²⁵² Winn Z. (2 February 2022) *Reducing methane emissions at landfills*, MIT NEWS (“Now a startup that began at MIT is aiming to significantly reduce methane emissions from landfills with a system that requires no extra land, roads, or electric lines to work. The company, Loci Controls, has developed a solar-powered system that optimizes the collection of methane from landfills so more of it can be converted into natural gas. At the center of Loci’s (pronounced “low-sigh”) system is a lunchbox-sized device that attaches to methane collection wells, which vacuum the methane up to the surface for processing. The optimal vacuum force changes with factors like atmospheric pressure and temperature. Loci’s system monitors those factors and adjusts the vacuum force at each well far more frequently than is possible with field technicians making manual adjustments.”).

²⁵³ DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggestad C., & Ulanov A. (2021) *CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT*, McKinsey Sustainability, 45–46 (“Methane emissions from solid waste could be abated by about 40 percent by 2030 and 90 percent by 2050 (Exhibit 18). Almost all of the reduction would be through diversion of organic material to secondary purposes, such as composting or biogas extraction. Organic waste could be sorted and processed through anaerobic digestion facilities to generate feedstock, fertilizer, soil enhancer, and renewable natural gas—or incinerated for energy.”). *See also* United States Environmental Protection Agency (2019) *GLOBAL NON-CO₂ GREENHOUSE GAS EMISSION PROJECTIONS & MITIGATION 2015-2050*, EPA-430-R-19-010, 70 (“Furthermore, enhanced waste diversion practices redirect biodegradable components of the waste stream from the landfill for reuse through recycling or conversion to a value-added product (e.g., energy or compost). Diverting organic waste components lowers the amount of CH₄ generated at the landfill. Other benefits from the measures under this category include the sale of recyclables, electricity, and cost savings in avoided tipping fees.”); *and* United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 87 (“Solid waste management: (residential) source separation with recycling/reuse; no landfill of organic waste; treatment with energy recovery or collection and flaring of landfill gas; (industrial) recycling or treatment with energy recovery; no landfill of organic waste.”).

²⁵⁴ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 114 (“While more than 10 per cent of the global population lives in hunger (FAO 2017) roughly a third of all food produced for human consumption turns into lost or wasted at some point along the food supply chain (Porter *et al.* 2018; Gustavsson *et al.* 2011). Many studies highlight the mitigation benefits of reducing this large volume and indicate that the potential reductions of emissions can be substantial but also diverse (FAO 2019; Springmann *et al.* 2018; Wollenberg *et al.* 2015; Bajželi *et al.* 2014). Most of these provide both base case emissions and emissions reductions estimates only in terms of carbon dioxide equivalent rather than separating the various greenhouse gases. For example, an FAO report (2019) suggests that the global carbon footprint of food loss and waste, excluding emissions from land-use change, is 3.3 gigatonnes¹² of carbon dioxide equivalent (Gt CO₂e). Similarly, an earlier report from the FAO estimated total emissions related to food loss and waste of 2.7 Gt CO₂e (FAO, 2014). Based on the source data reported in Chapter 2, methane emissions from ruminants and rice cultivation are ~145 Mt/yr. Hence if it is assumed here that loss and waste in these two categories is similar to the total across all food types, methane emissions associated with food loss and waste would be nearly 50 Mt/yr.”). *See also* DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggestad C., & Ulanov A. (2021) *CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT*, McKinsey Sustainability, 46 (“As the world accelerates its efforts to align with the 1.5°C pathway, a key lever would be to reduce the volume of organic municipal solid waste. This would mean reducing food and paper waste by changing individual behaviors (for example, broad adoption of composting) and improving efficiency in supply chains (for example, ensuring food does not rot in transit and reducing overstocking at supermarkets). Local volumes of organic waste are linked to population size, but there are actions society can take to control organic-waste volumes. Recycling of organic materials, such as paper, cardboard, and leather, as well as reduction of food waste are two effective approaches.”).

²⁵⁵ For the links between extreme heat, crop harvest losses, and cooling, *see* Parajuli R., Thoma G., & Matlock M. D. (2019) *Environmental sustainability of fruit and vegetable production supply chains in the face of climate change: A review*, *SCI. TOTAL ENVIRON.* 650(2): 2863–2879, 2875 (“The basic factors that can support sustainable supply of F&V products are climate, proximity to the producers and the growing seasons. Likewise, **logistic management**, including facility-locations in the overall supply of F&V products is also connected with the **seasonality** of production, cost of transportation and the refrigeration/preservation requirements. In the logistic management areas, understanding the relationship between storage and waste is also relevant. Only less than 12% of the reviewed study (Table 1) explicitly considered the **wastage** at some part of the supply chain. The significance of such considerations can be explained from a Brazilian study, which compared food stores, with and without refrigerated units (Garnett, 2006). The study revealed that waste generation in the un-refrigerated store was 28% higher than the refrigerated store. Furthermore, refrigeration can also assist to improve self-sufficiency of F&V product supplies, and undoubtedly it is important aspect while addressing the consequences of climate change on the food security. However, it is important to evaluate the environmental and economic costs of whether storing indigenous products beyond their growing season would outweigh the energy use and other emissions resulting from the transport of imported foods.”); *and* Kibiti B. & Strubenhoff H. (16 October 2019) *How off-grid cold storage systems can help farmers reduce post-harvest losses*, *BROOKINGS* (“It is estimated that less than 10

percent of all perishable foods is currently being refrigerated, despite the fact that post-harvest losses add up to 30 percent of food production worldwide. The cold chain innovations around decentralized renewable energy (DRE) are paramount in Africa and Asia given that access and connection to electricity in rural areas, where food is produced, is still a luxury. In Kenya, an estimated 40 to 50 percent of food is lost or wasted throughout the entire food chain as it goes from farm to fork—twice the global average. In 2017, \$1.5 billion worth of food went to waste—tossed out or left to rot—according to the [National Bureau of Statistics \(KNBS\)](#), resulting in lost earnings for farmers and others. In Nigeria, [45 percent of postharvest output spoils](#) due to the unavailability of cold storage, resulting in a 25 percent loss of income for the country's 93 million small farmers. Cold stores reduce waste, and also help to improve the negotiation power of smallholders in the market.”). *See also* Parker L. E., McElrone A. J., Ostoja S. M., & Forrestel E. J. (2020) *Extreme heat effects on perennial crops and strategies for sustaining future production*, *PLANT SCI.* 295(110397): 1–8, 1, (“Extreme heat exposure can stress plants, stunt development, and cause plant mortality, which often results in reduced quality and lower yield in agricultural crops [1]. Diminished crop yields due to extreme heat can have cascading effects on global economies and heighten concerns around food availability [[2], [3], [4]]. Recent heatwaves in Europe [2,3], Russia [4], and the central United States [5] reduced yields for [cereal crops](#), and in some instances led to significant commodity price increases and spikes in food insecurity. Warming anomalies have also caused significant losses in woody [perennial](#) cropping systems.”).

²⁵⁶ United Nations Climate Technology Centre & Network, *Biocovers of landfills (last visited 31 August 2022)* (“Landfill top covers, which optimise environmental conditions for methanotrophic bacteria and enhance biotic methane consumption, are often called ‘biocovers’ and function as vast bio-filters. Biocovers are typically spread over an entire landfill area. They are often waste materials, such as diverse composts, mechanically-biologically treated waste, dewatered sewage sludge or yard waste. Methane oxidation in compost materials shows high oxidation capacity. Manipulation of landfill covers to maximise their oxidation capacity provides a promising complementary strategy for controlling methane emissions.”). *See also* Yazdani R. & Imhoff P. (2010) *BIOCOVERS AT LANDFILLS FOR METHANE EMISSIONS REDUCTION DEMONSTRATION*, CalRecycle, 70 (“Results from laboratory and field tests indicated both fresh and aged green material could oxidize CH₄ at high rates, up to 100–200 g CH₄/m²/day in field tests. These rates are on the high end of oxidation rates reported for composts in the literature. Thus, at least for the duration of the field tests pH, P, and NO₂-N conditions did not significantly affect biocover performance. However, the biocovers were installed in relatively thick layers (~ 90 cm), and after seven months of operation with a high loading of [landfill gas] LFG (500–700 g CH₄/m²/day) thick anaerobic zones developed. The formation of these zones was undoubtedly linked to the high LFG loading and the cooler winter temperatures. In this state both materials generated significant CH₄ (> 100 g CH₄/m²/day, aged green material) and were ineffective in oxidizing CH₄. However, for the aged green material the performance was improved considerably when the loading rate was decreased to 200–250 g CH₄/m²/day. In this case the green material oxidized 50–70 g CH₄/m²/day. When both biocovers were operated at this smaller loading rate for several months, the aged green material performed reasonably well with measured CH₄ removal rates matching independent model predictions. The same was not true for the fresh green material, though, where it appeared that CH₄ continued to be generated and the biocover performance was always significantly less efficient at removing CH₄ than model predictions.”).

²⁵⁷ Franqueto R., Cabral A., Capanema M. A., & Schirmer W. N. (2019) *Fugitive Methane Emissions From Two Experimental Biocovers Constructed With Tropical Residual Soils: Field Study Using a Large Flux Chamber* *DETRITUS* 7: 119–127, 126 (“The methane oxidation capacity was quite high for both subareas (control and enriched). Oxidation efficiencies (at a depth of 0.10 m) averaged 42% for the control subarea and 80% for the enriched area. CH₄ and CO₂ surface fluxes averaged 20 g.m-2.d-1 and 316 g.m-2.d-1 in the organic-matter-enriched subarea during the monitoring period, while those measured in the control subarea averaged 34 g.m- 2.d-1 and 251 g.m-2.d-1, respectively. It is noteworthy that the surface fluxes were obtained using a custom-made 4.5-m² flux chamber, which allows for better representativeness of surface fluxes, because it allows inclusion of cracks and other imperfections that may affect measurements. The lower CH₄ fluxes and higher oxidation efficiency in the enriched subarea can be associated with the greater organic matter content in the enriched subarea, which created more favourable conditions for the development of ubiquitous methanotrophic colonies (Humer and Lechner, 2001). Temperature conditions, which ranged from 20 to 42°C at the surface and within the first 10 cm of the cover, favoured methane oxidation.”).

²⁵⁸ Chavan D. & Kumar S. (2018) *Reduction of methane emission from landfill using biocover as a biomitigation system: A review*, *INDIAN J. EXP. BIOL.* 56(7): 451–459, 456 (Table 3, “Lee et al.⁵⁴ found that rate of CH₄ oxidation of sandy biocover improved by 60 % with the addition of 100 mg-N NH₄ per kg of soil. Vegetation on biocover might affect the growth and activities of methanotrophic bacteria in different ways. Bohn and Jager⁵⁵ observed that the rate of CH₄ oxidation

could be increased by 50% through vegetation growth on landfill biocover. A vegetation root assists the process of transporting O₂ from the atmosphere into deeper soil layers.”).

²⁵⁹ Franqueto R., Cabral A., Capanema M. A., & Schirmer W. N. (2019) *Fugitive Methane Emissions From Two Experimental Biocovers Constructed With Tropical Residual Soils: Field Study Using a Large Flux Chamber* DETRITUS 7: 119–127, 119 (“This study aimed at assessing the response of two experimental passive methane oxidation biocovers (PMOB) installed in a Brazilian landfill located in Guarapuava, State of Paraná. The PMOBs covered an area of 18 m² each, and were 0.70-m-thick. The first PMOB (control subarea) was constructed using the same soil used to cover closed landfill cells, i.e. a typical residual soil. The second PMOB (enriched subarea) was constructed with a mixture of the residual soil and mature compost, with a resulting organic matter content equal to 4.5%. CH₄ and CO₂ surface fluxes were measured in a relatively large (4.5 m²) static chamber. CH₄, CO₂ and O₂ concentrations were also measured at different depths (0.10, 0.20, 0.25 and 0.30 m) within PMOBs. The concentrations from the raw biogas were also measured. Methane oxidation efficiencies (Effox) were estimated based on the CO₂/CH₄ ratio. The average CH₄ and CO₂ concentrations in the raw biogas (42% and 32%, respectively) for the 16 campaigns corroborated those typically found in Brazilian landfills. Lower CH₄ fluxes were obtained within the enriched subarea (average of 20 g.m⁻².d⁻¹), while the fluxes in the control subarea averaged 34 g.m⁻².d⁻¹. Effox values averaged 42% for the control subarea and 80% for the enriched one. The results indicate that there is a great potential to reduce landfill gas (LFG) emissions by using passive methane oxidation bio-systems composed of enriched substrates (with a higher content of organic matter).”).

²⁶⁰ United Nations Climate Technology Centre & Network, *Biocovers of landfills* (last visited 31 August 2022) (“Optimised and well-adapted biocovers are relatively less expensive in terms of operation and installation compared to a conventional gas collection system, whose cost can be high compared to the value of the captured fuel.”).

²⁶¹ Scheutz C., Olesen A. O. U., Fredenslund A. M., & Kjeldsen P. (2022) *Revisiting the passive biocover system at Klintholm landfill, six years after construction*, WASTE MANAGE. 145: 92–101, 92 (“In spite of an inhomogeneous distribution of landfill gas load to the methane oxidation layer, the performance of the biocover system had not declined over the 6–7 years since its establishment, even though no maintenance had been carried out in the intervening years.”).

²⁶² United Nations Climate Technology Centre & Network, *Biocovers of landfills* (last visited 31 August 2022) (“These biocovers have low maintenance requirements and they can be maintained by a relatively untrained person. Thus, they are suitable for both high and low income countries.”).

²⁶³ Duan Z., Kjeldsen P., & Scheutz C. (2022) *Efficiency of gas collection systems at Danish landfills and implications for regulations*, WASTE MANAGE. 139: 269–278, 277 (“This study evaluated gas collection efficiency at 23 Danish landfills with active gas collection systems, based on whole-site methane emission measurements and collection rates obtained from landfill operators. Methane emissions at Danish landfills are generally low (2.6–60.8 kg h⁻¹), which is probably due to the small amount of waste disposed, its low organic content and waste aging with declining gas generation. Gas collection efficiencies at the studied Danish sites ranged from 13 to 86%, and the average efficiency was 50% (assuming no oxidation in landfill covers). Compared to other landfills reported in the literature, gas collection efficiencies at Danish landfills are generally low, which might be attributed to gas leaks from installations, lack of or insufficient gas collection in some waste cells or incomplete coverage of landfill surfaces. Gas collection efficiency can be used as an index for judging the landfill operator’s performance in terms of managing landfill gas. For example, if a minimum efficiency of 80% is set as the methane mitigation goal, any landfill not achieving this figure will need to take remedial actions. In this regard, gas collection system optimisation or the establishment of other mitigation measures (e.g. installing engineered biocover systems) must be initiated, and landfill operators can decide which technology to use by conducting a life cycle cost (LCC) analysis.”).

²⁶⁴ Tseng E., Hanson-Lugo D., Thompson D., & Lee M. (2020) *When Viewed from Space*, MSW MAGAZINE 30(7): 18–23, 22–23 (“From the above graph, the estimated reduction in methane flux based on the NASA flyovers is approximately 60%. This significant amount of methane flux reduction also directly corresponds to the reduction in odor complaints over the same time and corresponds inversely with the increase in the volume of landfill gas being collected by the landfill. The SCL LEA separately compiled and analyzed the landfill gas collection data. These data show that there is an estimated 55% to 60% increase in the collected volume of landfill gas because of the addition of the major odor mitigation measures implemented compared to the prior period.”).

²⁶⁵ United States Climate Alliance (2018) *FROM SLCP CHALLENGE TO ACTION: A ROADMAP FOR REDUCING SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS TO MEET THE GOALS OF THE PARIS AGREEMENT*, 15 (“Significant opportunities for reducing methane emissions from landfills and capturing value can be seized by reducing food loss and waste, diverting organic waste to beneficial uses, and improving landfill management. These and other actions collectively could reduce methane emissions from waste by an estimated 40-50 percent by 2030 (Appendix A). Such efforts could add value in our states by reducing emissions of volatile organic compounds and toxic air contaminants from landfills, recovering healthy food for human consumption in food insecure communities, supporting healthy soils and agriculture, generating clean energy and displacing fossil fuel consumption, and providing economic opportunities across these diverse sectors. Many of these benefits will accrue in low-income and disadvantaged communities.”).

²⁶⁶ Cusworth D. H., Duren R. M., Thorpe A. K., Tseng E., Thompson D., Guha A., Newman S., Foster K. T., & Miller C. E. (2020) *Using remote sensing to detect, validate, and quantify methane emissions from California solid waste operations*, ENVIRON. RES. LETT. 15(5): 054012, 1–11, 1 (“Remote sensing is an avenue to quantify process-level emissions from waste management facilities. The California Methane Survey flew the Next Generation Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS-NG) over 270 landfills and 166 organic waste facilities repeatedly during 2016–2018 to quantify their contribution to the statewide methane budget. We use representative methane retrievals from this campaign to present three specific findings where remote sensing enabled better landfill and composting methane monitoring: (1) Quantification of strong point source emissions from the active face landfills that are difficult to capture by *in situ* monitoring or landfill models, (2) emissions that result from changes in landfill infrastructure (design, construction, and operations), and (3) unexpected large emissions from two organic waste management methods (composting and digesting) that were originally intended to help mitigate solid waste emissions. Our results show that remotely-sensed emission estimates reveal processes that are difficult to capture in biogas generation models. Furthermore, we find that airborne remote sensing provides an effective avenue to study the temporally changing dynamics of landfills.”).

²⁶⁷ Maasackers J. D., Varon D. J., Elfarsdóttir A., McKeever J., Jervis D., Mahapatra G., Pandey S. Lorente A., Borsdorff T., Foothuis L. R., Schuit B. J., Tol P., van Kempen T. A., van Hees R., & Aben I. (2022) *Using satellites to uncover large methane emissions from landfills*, SCI. ADV. 8(32): eabn9683, 1–8, 1 (“We use the global surveying Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) to identify large emission hot spots and then zoom in with high-resolution target-mode observations from the GHGSat instrument suite to identify the responsible facilities and characterize their emissions. Using this approach, we detect and analyze strongly emitting landfills (3 to 29 t hour⁻¹) in Buenos Aires, Delhi, Lahore, and Mumbai. Using TROPOMI data in an inversion, we find that city-level emissions are 1.4 to 2.6 times larger than reported in commonly used emission inventories and that the landfills contribute 6 to 50% of those emissions. Our work demonstrates how complementary satellites enable global detection, identification, and monitoring of methane superemitters at the facility level.”); *discussed in* Dickie G. (11 August 2022) *Landfills around the world release a lot of methane - study*, REUTERS.

²⁶⁸ Spokas K. A., Bogner J., & Corcoran M. (2021) *Modeling landfill CH₄ emissions: CALMIM international field validation, using CALMIM to simulate management strategies, current and future climate scenarios*, ELEM. SCI. ANTH. 9(00050): 1–20, 1 (“We focus on site-specific field data comparisons to CALMIM-predicted annual and monthly CH₄ emissions both without and without methanotrophic oxidation. Overall, 74% of 168 individual surface CH₄ emission measurements across 34 international sites were consistent with CALMIM-modeled annual predictions with oxidation (+ or – *SD*). Notably, the model overpredicted 30 comparisons and underpredicted 13 comparisons.”); “In order to realistically address current and future climate scenarios, updated modeling is required to focus more directly on *emissions* inclusive of soil *oxidation*, as opposed to reliance on a CH₄ *generation* model applied to all global landfills. Moreover, considering the high temporal variability of oxidation rates in individual cover soil profiles, use of a single estimated ‘% oxidation’ routinely applied to many sites is not recommended. Also, the routine use of actual CH₄ recovery data should replace the use of a hypothetical ‘% CH₄ collection efficiency.’”).

²⁶⁹ DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggstad C., & Ulanov A. (2021) *CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT*, McKinsey Sustainability, 49 (“By 2030, methane emissions from wastewater could be abated by 27 percent, and by 2050, they could be abated by 77 percent (Exhibit 19). The most effective solution would be to increase the volume of wastewater collected and treated centrally. There is also an opportunity to widen access to modern wastewater infrastructure, which is underdeveloped in many geographies.”).

²⁷⁰ United States Climate Alliance (2018) *FROM SLCP CHALLENGE TO ACTION: A ROADMAP FOR REDUCING SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS TO MEET THE GOALS OF THE PARIS AGREEMENT*, 16 (“Wastewater treatment: (residential) upgrade to secondary/tertiary anaerobic treatment with biogas recovery and utilization; wastewater treatment plants instead of latrines and disposal; (industrial) upgrade to two-stage treatment, i.e., anaerobic treatment with biogas recovery followed by aerobic treatment.”). See also DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggstad C., & Ulanov A. (2021) *CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT*, McKinsey Sustainability, 49 (“By 2030, methane emissions from wastewater could be abated by 27 percent, and by 2050, they could be abated by 77 percent (Exhibit 19). The most effective solution would be to increase the volume of wastewater collected and treated centrally. There is also an opportunity to widen access to modern wastewater infrastructure, which is underdeveloped in many geographies.”); and Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model*, ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 025004, 1–21, 16–17 (“An additional almost 10 percent of baseline emissions in 2050 could be removed at a marginal cost below 20 €/t CO₂eq by implementing proper waste and wastewater handling in China, India and the rest of South-East Asia. This would likely come with considerable co-benefits in the form of reduced air and water pollution.”).

²⁷¹ Saunio M., et al. (2020) *The Global Methane Budget 2000–2017*, EARTH SYST. SCI. DATA 12(3): 1561–1623 (“Natural methane sources include vegetated wetland emissions and inland water systems (lakes, small ponds, rivers), land geological sources (gas–oil seeps, mud volcanoes, microseepage, geothermal manifestations, and volcanoes), wild animals, termites, thawing terrestrial and marine permafrost, and oceanic sources (biogenic, geological, and hydrate).”).

²⁷² Canadell J. G., et al. (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 5–66 (“Methane release from permafrost thaw (including abrupt thaw) under high-warming RCP8.5 scenario has been estimated at 836–2614 Tg CH₄ over the 21st century and 2800–7400 Tg CH₄ from 2100–2300 (Schneider von Deimling et al., 2015), and as 5300 Tg CH₄ over the 21st century and 16000 Tg CH₄ from 2100–2300 (Turetsky et al., 2020). For RCP4.5, these numbers are 538–2356 Tg CH₄ until 2100 and 2000–6100 Tg CH₄ from 2100–2300 (Schneider von Deimling et al., 2015), and 4100 Tg CH₄ until 2100 and 10000 Tg CH₄ from 2100–2300 (Turetsky et al., 2020).”). See also Permafrost Pathways, *Course of Action: Mitigation Policy* (last visited 29 July 2022) (“Depending on how hot we let it get, carbon emissions from Arctic permafrost thaw are expected to be in the range of 30 to more than 150 billion tons of carbon (110 to more than 550 Gt CO₂) this century, with upper estimates on par with the cumulative emissions from the entire United States at its current rate. To put it another way, permafrost thaw emissions could use up between 25 and 40 percent of the remaining carbon budget that would be necessary to cap warming at the internationally agreed-upon 2 degrees Celsius global temperature threshold established in the Paris Agreement.... Despite the enormity of this problem, gaps in permafrost carbon monitoring and modeling are resulting in permafrost being left out of global climate policies, rendering our emissions targets fundamentally inaccurate. World leaders are in a race against time to reduce emissions and prevent Earth’s temperature from reaching dangerous levels. The problem is, without including current and projected emissions from permafrost, this race will be impossible to finish.... 82% [o]f IPCC models do not include carbon emissions from permafrost thaw.”); and Fritzsche N., Majka J., & Zastrozhnov D. (2021) *Methane release from carbonate rock formations in the Siberian permafrost area during and after the 2020 heat wave*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 118(32): 1–3, 1 (“In the Taymyr Peninsula and surroundings in North Siberia, the area of the worldwide largest positive surface temperature anomaly for 2020, atmospheric methane concentrations have increased considerably during and after the 2020 heat wave. Two elongated areas of increased atmospheric methane concentration that appeared during summer coincide with two stripes of Paleozoic carbonates exposed at the southern and northern borders of the Yenisey-Khatanga Basin, a hydrocarbon-bearing sedimentary basin between the Siberian Craton to the south and the Taymyr Fold Belt to the north. Over the carbonates, soils are thin to nonexistent and wetlands are scarce. The maxima are thus unlikely to be caused by microbial methane from soils or wetlands. We suggest that gas hydrates in fractures and pockets of the carbonate rocks in the permafrost zone became unstable due to warming from the surface. This process may add unknown quantities of methane to the atmosphere in the near future.”); discussed in Carrington D. (2 August 2021) *Climate crisis: Siberian heatwave led to new methane emissions, study says*, THE GUARDIAN (“The Siberian heatwave of 2020 led to new methane emissions from the permafrost, according to research. Emissions of the potent greenhouse gas are currently small, the scientists said, but further research is urgently needed. Analysis of satellite data indicated that fossil methane gas leaked from rock formations known to be large hydrocarbon reservoirs after the heatwave, which peaked at 6C above

normal temperatures. Previous observations of leaks have been from permafrost soil or under shallow seas.”), and Mufson S. (3 August 2021) *Scientists expected thawing wetlands in Siberia’s permafrost. What they found is ‘much more dangerous’*, THE WASHINGTON POST.

²⁷³ Cheng C. & Redfern S. A. T. (2022) *Impact of interannual and multidecadal trends on methane-climate feedbacks and sensitivity*, NAT. COMMUN. 13(3592): 1–11, 1 (“We identify oscillations between positive and negative feedbacks, showing that both contribute to increasing C_{CH_4} . Interannually, increased emissions via positive feedbacks (e.g. wetland emissions and wildfires) with higher land surface air temperature (LSAT) are often followed by increasing C_{CH_4} due to weakened methane sink via atmospheric $\bullet OH$, via negative feedbacks with lowered sea surface temperatures (SST), especially in the tropics. Over decadal time scales, we find alternating rate-limiting factors for methane oxidation: when C_{CH_4} is limiting, positive methane-climate feedback via direct oceanic emissions dominates; when $\bullet OH$ is limiting, negative feedback is favoured. Incorporating the interannually increasing C_{CH_4} via negative feedbacks gives historical methane-climate feedback sensitivity $\approx 0.08 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, much higher than the IPCC AR6 estimate.”). [Please double check term in green highlight]

²⁷⁴ Feng L., Palmer P. I., Zhu S., Parker R. J., & Liu Y. (2022) *Tropical methane emissions explain large fraction of recent changes in global atmospheric methane growth rate*, NAT. COMMUN. 13(1378): 1–8, 2, 5 (“Our analysis of GOSAT CH_4 column data from 2010 to 2019 shows large-scale changes in tropical CH_4 emissions that explain more than 80% of the observed global atmospheric growth rate. Over this decadal period, we find that tropical Africa plays the largest role in determining the variation of tropical emissions, followed by tropical South America and India. We find that emissions from mainland and maritime (island nations) of Southeast Asia have reduced over our study period, driven by reduced rainfall. Contrary to a previous study we find no evidence of an upward trend in Indian emissions early in the study period, instead our analysis shows large year-to-year variations that peak during the 2014–2016 El Niño and again during 2017 and 2019. We find that we can explain a significant fraction of changes in CH_4 emissions over tropical South America and tropical Africa by large-scale changes in tropical SSTs characterized by indices that describe El Niño and the Indian Ocean Dipole, respectively.”; “Our analysis over tropical Africa, in particular, represents a first step towards understanding a new positive climate feedback in the Earth system. Previous studies have reported relationships between a warming climate due to rising levels of atmospheric greenhouse gases and increases in the magnitude and variations of the IOD(28), and between the strength of the IOD and rainfall over East Africa(29) and, by extension via this study, wetland emissions of CH_4 . Future changes in the IOD will also impact the large-scale fires over maritime Southeast Asia, where there is a large reservoir of carbon-rich peat, and over Australia. The situation over tropical South America is more complicated with future Atlantic–Pacific SST patterns resulting in regional patterns of anomalous positive and negative rainfall trends over the Amazon basin(30) so that the net regional effect on wetland emissions of CH_4 is uncertain.”). See also Feng L., Palmer P. I., Parker R. J., Lunt M. F., & Boesch H. (17 June 2022) *Methane emissions responsible for record-breaking atmospheric methane growth rates in 2020 and 2021*, ATMOS. CHEM. PHYS. (preprint), 1–23, 5 (“Particularly, we find statistically significant large-scale positive correlations (typically 0.5–0.6; $p < 0.001$) for all seasons between methane and groundwater anomalies over Eastern Africa, tropical South America, and tropical Asia, but no significant correlation between methane and surface temperature anomalies. This is consistent with recent studies that have highlighted the increasing role for microbial sources in the tropical methane budget (Lunt et al. 2019; Fen et al. 2022; Wilson et al. 2020).”); and Qu Z., Jacob D., Zhang Y., Shen L., Varon D. J., Lu X., Scarpelli T., Bloom A., Worden J., & Parker R. J. (27 June 2022) *Attribution of the 2020 surge in atmospheric methane by inverse analysis of GOSAT observations*, ESSOAR (preprint), 1–14, 7–8 (“Africa shows an increase of 15 Tg a^{-1} in methane emissions from 2019 to 2020. We attribute most of the increase to wetland emissions in East Africa (30°E – 50°E , 15°S – 10°N) due to the increases in rainfall by 20% (46 mm) in the first three seasons from 2019 to 2020 according to TAMSAT (<http://www.tamsat.org.uk/index.php/data>). Consistent with the increase in rainfall, the water flows of the Congo-Oubangui River, which goes through wetlands in the Congo Basin, were much higher in 2020 than in previous years [World Meteorological Organization, 2022]. Flooding in 2020 was widespread, affecting 50% more East Africans than in 2019 [BBC, 2020].”).

²⁷⁵ Gulev S. K., et al. (2021) *Chapter 2: Changing State of the Climate System*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 2–100 (“The role of decadal to multi-decadal variability has recently emerged as an important aspect of the IOD with many indications of the effects of Pacific Ocean processes on IOD variability through atmospheric and oceanic mechanisms (Dong et al., 2016; Jin et al., 2018; Krishnamurthy & Krishnamurthy, 2016; Zhou et al., 2017). . . Positive IOD events may have increased in frequency during the second half

of the 20th century (Abram et al., 2020a,b). Earlier observations of apparent changes in the frequency and / or magnitude of the IOD events are considered unreliable, particularly prior to the 1960s (Hernández et al., 2020). ... To summarize, there is *low confidence* in any multi-decadal IOD variability trend in the instrumental period due to data uncertainty especially before the 1960s... Neither the IOD nor the IOB have exhibited behaviour outside the range implied by proxy records (*low confidence*).”). Compare with Cheng C. & Redfern S. A. T. (2022) *Impact of interannual and multidecadal trends on methane-climate feedbacks and sensitivity*, NAT. COMMUN. 13(3592): 1–11, 7 (“The feedback sensitivity, in $\text{ppb } ^\circ\text{C}^{-1}$, before 1994 initially rises under positive feedback dominance, but declines subsequently and appears to stabilize around $200 \text{ ppb } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Fig. 6a, b). This approximates $\sim 0.08 \text{ W m}^{-2} ^\circ\text{C}^{-1}$ (ref. 70) which is about four times greater than the mean net feedback estimate given in IPCC AR6 (~ 0.05 positive feedback including permafrost and -0.03 negative feedback, giving $\sim 0.02 \text{ W m}^{-2} ^\circ\text{C}^{-1}$) but agrees within uncertainty⁷. The difference could be largely due to the positive $\partial C_{\text{CH}_4}(T\&Pr)/\partial t$ from negative feedbacks following the years or decades of positive feedback. In fact, several interannual peaks of sensitivity are due to the positive contributions of lowering GMST (i.e., negative feedbacks). If we breakdown our estimated sensitivity into positive and negative feedbacks, we estimate $0.05 + 0.03 \text{ W m}^{-2} ^\circ\text{C}^{-1}$ rather than $0.05 - 0.03 \text{ W m}^{-2} ^\circ\text{C}^{-1}$. Since the $200 \text{ ppb } ^\circ\text{C}^{-1}$ long-term sensitivity is even larger than the estimated absolute maximal instantaneous sensitivity in Eq. 5 (i.e., the calibration factor α in Eqs. 3–4) at $125 (\text{ppb yr}^{-1})/(\text{ }^\circ\text{C yr}^{-1})$, the positive contributions from negative feedbacks should be viewed as lagged responses from earlier positive feedbacks due to nonlinearity. We note that the sensitivity is strongest in boreal and tropical regions (Fig. 6a) due to the positive feedbacks with wetland emissions.”).

²⁷⁶ Weldeab S., Schneider R. R., Yu J., & Kylander-Clark A. (2022) *Evidence for massive methane hydrate destabilization during the penultimate interglacial warming*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 119(35): e2201871119, 1–9, 7 (“While further studies are needed to determine the extent of methane hydrate destabilization during the weakened AMOC interval of the Eemian, the consequence of broad methane hydrate destabilization is increased atmospheric CH_4 and CO_2 concentrations. Taking age model uncertainties into consideration, during the peak in anomalously low carbon isotopes, the atmospheric CO_2 and CH_4 concentrations rose by 17 to 10 parts per million per volume and 20 parts per billion per volume, respectively (SI Appendix, Fig. S9) (49–51). Although the magnitude of this change varies between ice cores and analytical laboratories, the $\delta^{13}\text{C}$ values of atmospheric CO_2 declined by 0.3 to 0.4‰ coeval with the $\delta^{13}\text{C}$ anomaly recorded in the Gulf of Guinea sediment sequence (SI Appendix, Fig. S9) (50, 52), indicating that a source with a significantly negative $\delta^{13}\text{C}$ signature contributed to the increase of atmospheric CO_2 . Methane release and methane oxidation due to massive methane hydrate destabilization is the likely source.”).

²⁷⁷ Whiteman G., Hope C., & Wadhams P. (2013) *Vast costs of Arctic change*, NATURE 499(7459): 401–403, 401 (“We calculate that the costs of a melting Arctic will be huge, because the region is pivotal to the functioning of Earth systems such as oceans and the climate. The release of methane from thawing permafrost beneath the East Siberian Sea, off northern Russia, alone comes with an average global price tag of \$60 trillion in the absence of mitigating action — a figure comparable to the size of the world economy in 2012 (about \$70 trillion). The total cost of Arctic change will be much higher... The methane pulse will bring forward by 15–35 years the average date at which the global mean temperature rise exceeds 2°C above pre-industrial levels — to 2035 for the business-as-usual scenario and to 2040 for the low-emissions case (see 'Arctic methane'). This will lead to an extra \$60 trillion (net present value) of mean climate-change impacts for the scenario with no mitigation, or 15% of the mean total predicted cost of climate-change impacts (about \$400 trillion). In the low-emissions case, the mean net present value of global climate-change impacts is \$82 trillion without the methane release; with the pulse, an extra \$37 trillion, or 45% is added.... These costs remain the same irrespective of whether the methane emission is delayed by up to 20 years, kicking in at 2035 rather than 2015, or stretched out over two or three decades, rather than one. A pulse of 25 Gt of methane has half the impact of a 50 Gt pulse. The economic consequences will be distributed around the globe, but the modelling shows that about 80% of them will occur in the poorer economies of Africa, Asia and South America. ... The full impacts of a warming Arctic, including, for example, ocean acidification and altered ocean and atmospheric circulation, will be much greater than our cost estimate for methane release alone. To find out the actual cost, better models are needed to incorporate feedbacks that are not included”). See also Wadhams P. (2017) *A FAREWELL TO ICE: A REPORT FROM THE ARCTIC*, Oxford University Press: Oxford, United Kingdom; and Shakohva N., Semiletov I., & Chuvilin E. (2019) *Understanding the Permafrost-Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf*, GEOSCI. 9(6): 251, 1–23.

²⁷⁸ Wadham J. L., Hawkings J. R., Tarasov L., Gregoire L. J., Spencer R. G. M., Gutjahr M., Ridgwell A., & Kohfeld K. E. (2019) *Ice sheets matter for the global carbon cycle*, NAT. COMMUN. 10(1): 3567, 8 (“There are substantial uncertainties regarding the magnitude of present day sub-ice sheet CH_4 hydrate reserves because of the difficulties of

accessing sediments in subglacial sedimentary basins. Global subglacial methane hydrate stocks at the present day are likely to be dominated by those in Antarctic sedimentary basins (estimated at up to 300 Pg C as methane hydrate and free gas⁹⁵). At the LGM, the global sub-ice sheet hydrate reserve could have been much larger (>500 Pg C, 20% of the present day marine hydrate stocks), with hydrate also present beneath former northern hemisphere ice sheets^{17,18,122} (see Fig. 4 for details and calculation methods). The vulnerability of Antarctic subglacial CH₄ hydrate reserves to 27estabilization is high because of their predicted location around the continent's periphery in sedimentary basins where ice thinning in a warming climate is probable.”). *See also* Dessandier P.-A., Knies J., Plaza-Faverola A., Labrousse C., Renoult M., & Panieri G. (2021) *Ice-sheet melt drove methane emissions in the Arctic during the last two interglacials*, GEOLOGY 49(7): 799–803, 799 (“Here, we argue that based on foraminiferal isotope studies on drill holes from offshore Svalbard, methane leakage occurred upon the abrupt Eurasian ice-sheet wastage during terminations of the last (Weichselian) and penultimate (Saalian) glaciations. Progressive increase of methane emissions seems to be first recorded by depleted benthic foraminiferal $\delta^{13}\text{C}$. This is quickly followed by the precipitation of methane-derived authigenic carbonate as overgrowth inside and outside foraminiferal shells, characterized by heavy $\delta^{18}\text{O}$ and depleted $\delta^{13}\text{C}$ of both benthic and planktonic foraminifera. The similarities between the events observed over both terminations advocate a common driver for the episodic release of geological methane stocks. Our favored model is recurrent leakage of shallow gas reservoirs below the gas hydrate stability zone along the margin of western Svalbard that can be re-activated upon initial instability of the grounded, marine-based ice sheets. Analogous to this model, with the current acceleration of the Greenland ice melt, instabilities of existing methane reservoirs below and nearby the ice sheet are likely.”).

²⁷⁹ Jackson R. B., *et al.* (2021) *Atmospheric methane removal: a research agenda*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 20200454, 1–17, 1 (“Atmospheric methane removal may be needed to offset continued methane release and limit the global warming contribution of this potent greenhouse gas. Eliminating most anthropogenic methane emissions is unlikely this century, and sudden methane release from the Arctic or elsewhere cannot be excluded, so technologies for negative emissions of methane may be needed. Carbon dioxide removal (CDR) has a well-established research agenda, technological foundation and comparative modelling framework [23–28]. No such framework exists for methane removal. We outline considerations for such an agenda here. We start by presenting the technological Mt CH₄ yr⁻¹ considerations for methane removal: energy requirements (§2a), specific proposed technologies (§2b), and air processing and scaling requirements (§2c). We then outline the climate and air quality impacts and feedbacks of methane removal (§3a) and argue for the creation of a Methane Removal Model Intercomparison Project (§3b), a multi-model framework that would better quantify the expected impacts of methane removal. In §4, we discuss some broader implications of methane removal.”). *See also* Abernethy S., O’Connor F. M., Jones C. D., & Jackson R. B. (2021) *Methane removal and the proportional reductions in surface temperature and ozone*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 20210104, 1–13, 6 (“Due to the temporal nature of effective cumulative removal, comparisons between methane and carbon dioxide depend on the timescale of interest. The equivalent of MCR for carbon dioxide, the TCRE, is $0.00048 \pm 0.0001^\circ\text{C}$ per Pg CO₂ [38], two orders of magnitude smaller than our MCR estimate of $0.21 \pm 0.04^\circ\text{C}$ per effective Pg CH₄ removed (figure 2). Accounting for the time delay for carbon dioxide removal due to the lagged response of the deep ocean, the TCRE for CO₂ removal may be even lower [39]. If 1 year of anthropogenic emissions was removed (0.36 Pg CH₄ [3] and 41.4 Pg CO₂ [40]), the transient temperature impact would be almost four times larger for methane than for CO₂ (0.075°C compared to 0.02°C). Using this example, however, maintaining a steady-state response of 0.36 Pg CH₄ effectively removed would require the ongoing removal of roughly $0.03\text{Pg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$, since a removal rate of E/τ is required to maintain an effective cumulative removal of E .”).

²⁸⁰ Saunio M., *et al.* (2020) *The Global Methane Budget 2000–2017*, EARTH SYST. SCI. DATA 12(3): 1561–1623, 1561 (“For the 2008–2017 decade, global methane emissions are estimated by atmospheric inversions (a top-down approach) to be $576 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ (range 550–594, corresponding to the minimum and maximum estimates of the model ensemble). Of this total, $359 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ or $\sim 60\%$ is attributed to anthropogenic sources, that is emissions caused by direct human activity (i.e. anthropogenic emissions; range 336–376 Tg CH₄ yr⁻¹ or 50%–65%).”).

²⁸¹ Lan X., Nisbet E. G., Dlugokencky E. J., & Michel S. E. (2021) *What do we know about the global methane budget? Results from four decades of atmospheric CH₄ observations and the way forward*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 20200440, 1–14, 11 (“Explaining the renewed and accelerating increase in atmospheric CH₄ burden since 2007 remains challenging, and the exact causes are not yet clear. But, the observations we describe suggest that increased emissions from microbial sources are the strongest driver, with a relatively smaller contribution from other processes, e.g., fossil fuel exploitation. A more difficult question to answer is the one posed by this special issue: is warming feeding the warming? We cannot say for certain, but we cannot rule out the possibility that climate change is increasing CH₄

emissions. The strong signals from the tropics combined with the isotopic data are consistent with increased emissions from natural wetlands, but large [interannual variability (IAV)] and inter-decadal variability in wetland drivers like precipitation make it difficult to identify small trends. Observations are needed that will help process models capture this variability. The size of the IAV illustrates the potential scope of uncontrollable near-future change and emphasizes the urgency of reducing the global methane burden by mitigating the methane emissions that we can control, from the fossil fuel and agricultural sectors.”). However, other studies suggest a more limited increase in recent emissions from natural wetlands compared to agriculture and waste and energy production sectors. See Zhang Z., et al. (2021) *Anthropogenic emissions are the main contribution to the rise of atmospheric methane (1993-2017)*, NAT'L SCI. REV. 9(5): nwab200, 1–13, 1 (“Our emission scenarios that have the fewest biases with respect to isotopic composition suggest that the agriculture, landfill, and waste sectors were responsible for $53 \pm 13\%$ of the renewed growth over the period 2007-2017 compared to 2000-2006; industrial fossil fuel sources explained an additional $34 \pm 24\%$, and wetland sources contributed the least at $13 \pm 9\%$. The hypothesis that a large increase in emissions from natural wetlands drove the decrease in atmospheric $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ values cannot be reconciled with current process-based wetland CH_4 models. This finding suggests the need for increased wetland measurements to better constrain the contemporary and future role of wetlands in the rise of atmospheric methane and climate feedbacks. Our findings highlight the predominant role of anthropogenic activities in driving the growth of atmospheric CH_4 concentrations.”).

²⁸² Canadell J. G., et al. (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 5-66 (“Methane release from permafrost thaw (including abrupt thaw) under high-warming RCP8.5 scenario has been estimated at 836–2614 Tg CH_4 over the 21st century and 2800–7400 Tg CH_4 from 2100–2300 (Schneider von Deimling et al., 2015), and as 5300 Tg CH_4 over the 21st century and 16000 Tg CH_4 from 2100–2300 (Turetsky et al., 2020). For RCP4.5, these numbers are 538–2356 Tg CH_4 until 2100 and 2000–6100 Tg CH_4 from 2100–2300 (Schneider von Deimling et al., 2015), and 4100 Tg CH_4 until 2100 and 10000 Tg CH_4 from 2100–2300 (Turetsky et al., 2020).”). See also Secretariat of the United Nations Framework Convention on Climate Change (25 October 2021) *Nationally determined contributions under the Paris Agreement: Revised synthesis report*, FCCC/PA/CMA/2021/8/Rev.1, 29 (Figure 9, “Note: The assessed global emission ranges (including LULUCF) for the IPCC scenarios provided in the SR1.5 (table 2.4) are shown with interquartile ranges. The illustrative SSP scenarios considered in the contribution of Working Group I to the AR6 are indicated (SSP2-4.5 by a yellow solid line, with an estimated end-of-century temperature of 2.7 (2.1–3.5) °C). The total GHG emission level resulting from implementation of the latest NDCs is compared with the emission levels for three of the scenario groups in the SR1.5 scenario database: a group of scenarios in which global mean temperature rise is kept at all times below 1.5 °C relative to the 1850–1900 (“below 1.5 °C”); a group of scenarios in which warming is kept at around 1.5 °C with a potential limited overshoot and then decrease of global mean temperature rise below 1.5 °C by the end of the century (“1.5 °C with limited overshoot”); and a third group that implies warming of well below 2 °C, that is above 1.5 °C by 2100 but with a likely chance of it being below 2 °C at all times (“lower 2 °C”). The latter group features scenarios with strong emission reductions in the 2020s or only after 2030.”).

²⁸³ Abernethy S., O'Connor F. M., Jones C. D., & Jackson R. B. (2021) *Methane removal and the proportional reductions in surface temperature and ozone*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 20210104, 1–13, 6 (“Due to the temporal nature of effective cumulative removal, comparisons between methane and carbon dioxide depend on the timescale of interest. The equivalent of MCR for carbon dioxide, the TCRE, is $0.00048 \pm 0.0001^\circ\text{C}$ per Pg CO_2 [38], two orders of magnitude smaller than our MCR estimate of $0.21 \pm 0.04^\circ\text{C}$ per effective Pg CH_4 removed (figure 2). Accounting for the time delay for carbon dioxide removal due to the lagged response of the deep ocean, the TCRE for CO_2 removal may be even lower [39]. If 1 year of anthropogenic emissions was removed (0.36 Pg CH_4 [3] and 41.4 Pg CO_2 [40]), the transient temperature impact would be almost four times larger for methane than for CO_2 (0.075°C compared to 0.02°C). Using this example, however, maintaining a steady-state response of 0.36 Pg CH_4 effectively removed would require the ongoing removal of roughly $0.03 \text{ Pg } \text{CH}_4 \text{ yr}^{-1}$, since a removal rate of E/τ is required to maintain an effective cumulative removal of E .”); discussed in Jordan R. (26 September 2021) *Stanford-led research reveals potential of an overlooked climate change solution*, STANFORD WOODS INSTITUTE FOR THE ENVIRONMENT (“The analyses, published Sept. 27 in Philosophical Transactions of the Royal Society A, reveal that removing about three years-worth of human caused emissions of the potent greenhouse gas would reduce global surface temperatures by approximately 0.21 degrees Celsius while reducing ozone levels enough to prevent roughly 50,000 premature deaths annually. The findings open the door to direct comparisons with carbon dioxide removal – an approach that has received significantly more research and investment – and could help shape national and international climate policy in the future.... Under a high emissions scenario, the

analysis showed that a 40 percent reduction in global methane emissions by 2050 would lead to a temperature reduction of approximately 0.4 degrees Celsius by 2050. Under a low emissions scenario where temperature peaks during the 21st century, methane removal of the same magnitude could reduce the peak temperature by up to 1 degree Celsius.”).

²⁸⁴ Jackson R. B., *et al.* (2021) *Atmospheric methane removal: a research agenda*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 20200454, 1–17, 4 (“Here, we describe broad classes of technologies for methane removal, including photocatalysts, metal catalysts associated with zeolites and porous polymer networks, biological methane removal, including industrial approaches and approaches for managing soils in agricultural or other ecosystems, and iron-salt aerosol formation (table 2). For each of these technologies, research is needed on its cost, technological efficiency, scaling and energy requirements, social barriers to deployment, co-benefits and potential negative by-products. Research is also needed broadly on methane sorption to concentrate methane from low concentration background air; having better sorbents would make methane removal technologies more efficient generally.”).

²⁸⁵ Jackson R. B., *et al.* (2021) *Atmospheric methane removal: a research agenda*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 20200454, 1–17, 7–8 (“Enhanced microbial oxidation of methane in agricultural and other soils or in artificial substrates (e.g., biotrickling filters) is a microbially based approach for methane mitigation or atmospheric removal (e.g., [44,45]). Han *et al.* [61] showed that amendments of biochar derived from rice straw reduced methane emissions from paddy soils by 40% in microcosm experiments, a case of methane mitigation from a known source (i.e. with elevated methane concentrations in air). The decrease was attributable to both decreased activity of methanogens and increased methane oxidation activity of methanotrophs. Sulfate additions have also been shown to reduce methane emissions from rice paddies [62]. Miller *et al.* [63] demonstrated that iron and humic acid amendments significantly suppressed in situ net methane fluxes by 26% in Arctic Alaska peatland soils, likely by enhancing alternative electron acceptor availability. This example is more analogous to methane removal from the bulk air because it was not associated with a known methane source.”).

²⁸⁶ Brenneis R. J., Johnson E. P., Shi W., & Plata D. L. (2021) *Atmospheric- and Low-Level Methane Abatement via an Earth-Abundant Catalyst*, ACS ENVIRON. AU 2(3): 223–231, 223 (“Here, we describe the use of a biomimetic copper zeolite capable of converting atmospheric- and low-level methane at relatively low temperatures (e.g., 200–300 °C) in simulated air.”); *discussed in* Chandler D. L. (10 January 2022) *A dirt-cheap solution? Common clay materials may help curb methane emissions*, MIT NEWS.

²⁸⁷ de Richter R., *et al.* (11 September 2019) *Iron Salt Aerosol a natural method to remove methane & other greenhouse gases*, Institution of Mechanical Engineers Presentation, 8 (“Iron Salt Aerosol can enhance both natural sinks: the hydroxyl radical sink and the chlorine sink”).

²⁸⁸ Yoon S., Carey J. N., & Semrau J. D. (2009) *Feasibility of atmospheric methane removal using methanotrophic biotrickling filters*, APPL. MICROBIOL. BIOTECHNOL. 83: 949–956, 949 (“Here, we describe the modeling of a biotrickling filtration system composed of methane-consuming bacteria, i.e., methanotrophs, to assess the utility of these systems in removing methane from the atmosphere. Model results indicate that assuming the global average atmospheric concentration of methane, 1.7 ppmv, methane removal is ineffective using these methanotrophic biofilters as the methane concentration is too low to enable cell survival. If the concentration is increased to 500–6,000 ppmv, however, similar to that found above landfills and in concentrated animal feeding operations (factory farms), 4.98–35.7 tons of methane can be removed per biofilter per year assuming biotrickling filters of typical size (3.66 m in diameter and 11.5 m in height)... The use of methanotrophic biofilters for controlling methane emissions is technically feasible and, provided that either the costs of biofilter construction and operation are reduced or the value of CO₂ credits is increased, can also be economically attractive.”). *See also* Sly L. I., Bryant L. J., Cox J. M., & Anderson J. M. (1993) *Development of a biofilter for the removal of methane from coal mine ventilation atmospheres*, APPL. MICROBIOL. BIOTECHNOL. 39: 400–404, 400 (“The experimental biofilter utilizing a biofilm of *M. fodinarum* was shown to reduce methane levels substantially provided the residence times were sufficiently long. In the range 0.25–1.0% methane in air, commonly experienced in coal mine atmospheres, more than 70% of the methane was removed with a residence time of 15 min, with a 90% reduction at 20 min. Even at a residence time of 5 min approximately 20% of the methane in air was removed. Equal quantities of O₂ are consumed during the bacterial oxidation of methane and 1% methane is converted to 0.7% CO₂. Scale-up and alternative biofilter packings are likely to reduce the residence times in the biofilter.”).

²⁸⁹ Kebreab E. & Feng X. (2021) *Strategies to Reduce Methane Emissions from Enteric and Lagoon Sources*, California Air Resources Board, 69 (“In general, higher moisture contents in raw composting manure could enhance the CH₄ mitigation rates, however, the pH, and C/N content were not linearly related to CH₄ mitigation. Adding biochar, acids, and straw to manure could mitigate CH₄ emissions by 82.4%, 78.1%, and 47.7%, respectively. However, the data for straw is quite small so it should not be taken out of context as it may introduce a source of carbon into lagoons. The meta-analysis conducted with selected additives indicated manure additives were an effective method to reduce CH₄ emission, with biochar being the most effective. However, further studies of manure additives on CH₄ mitigation are required to support a more accurate quantitative analysis and potential impacts to water quality and crop yield after land application. Most of the research for biochar and straw is when used as additive to solid or semi solid manure so they should be interpreted in that context.”). See also Peterson C., El Mashad H. M., Zhao Y., Pan Y., & Mitloehner F. M. (2020) *Effects of SOP Lagoon Additive on Gaseous Emissions from Stored Liquid Dairy Manure*, SUSTAINABILITY 12(4): 1393, 1–17, 1 (“A variety of additives have been applied to reduce emissions from manure. Although the composition and mechanism of the emission reduction of several additives are known, information on many other commercial additives is not available because of confidentiality and limits in the marketing literature. Calcium sulfate (gypsum) can be found abundantly in nature and has been used to improve soil properties.... Different forms of gypsum have been tested for the mitigation of GHG and ammonia emissions from livestock effluents. The results have had varying results: while some studies reported a decrease in ammonia emissions after the addition of gypsum, not all have demonstrated the efficacy of gypsum in reducing the release of GHGs. Many of the results were obtained using a considerable amount of material (3% to 10% of manure wet weight) making the application not practical in real-world conditions. Borgonovo et al. first published results on this specific commercial additive (SOP LAGOON), made of gypsum processed with proprietary technology, and found that the addition of the products to fresh liquid manure has a reduction potential of 21.5% of CH₄, 22.9% of CO₂, 100% of N₂O and 100% of NH₃ emissions on day 4, even at very low dosages. It should be mentioned that similar to other commercial additives, the exact manufacturing process of SOP Lagoon is unknown due to confidentiality.”); and Yang S., Xiao Y., Sun X., Ding J., Jiang Z., & Xu J. (2019) *Biochar improved rice yield and mitigated CH₄ and N₂O emissions from paddy field under controlled irrigation in the Taihu Lake Region of China*, ATMOS. ENVIRON. 200: 69–77, 69 (“These results suggest that 20 and 40 t ha⁻¹ biochar can be utilized under controlled irrigation not only for mitigation of CH₄ and N₂O emission but also to increase rice yield, soil fertility and irrigation water productivity. Therefore, the combination of biochar amendment and controlled irrigation might be a good option for mitigating greenhouse gases emission and realizing the sustainable utilization of soil and water resources of paddy fields in the Taihu Lake Region of China.”).

²⁹⁰ Jackson R. B., Saunio M., Bousquet P., Canadell J. G., Poulter B., Stavert A. R., Bergamaschi P., Niwa Y., Segers A., & Tsuruta A. (2020) *Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources*, ENVIRON. RES. LETT. 15(7): 071002, 1–7, 6 (“Increased emissions from both the agriculture and waste sector and the fossil fuel sector are likely the dominant cause of this global increase (figures 1 and 4), highlighting the need for stronger mitigation in both areas. Our analysis also highlights emission increases in agriculture, waste, and fossil fuel sectors from southern and southeastern Asia, including China, as well as increases in the fossil fuel sector in the United States (figure 4). In contrast, Europe is the only continent in which methane emissions appear to be decreasing. While changes in the sink of methane from atmospheric or soil uptake remains possible (Turner *et al* 2019), atmospheric chemistry and land-surface models suggest the timescales for sink responses are too slow to explain most of the increased methane in the atmosphere in recent years. Climate policies overall, where present for methane mitigation, have yet to alter substantially the global emissions trajectory to date.”).

²⁹¹ International Energy Agency (2021) *DRIVING DOWN METHANE LEAKS FROM THE OIL AND GAS INDUSTRY: A REGULATORY ROADMAP AND TOOLKIT*.

²⁹² Colombia Ministry of Mines and Energy (11 February 2022) *Resolución Número 40066 de 11 Feb 2022*; discussed in Miranda-González A. & Banks J. (16 February 2022) *A Methane Champion: Colombia becomes first South American country to regulate methane from oil and gas*, Clean Air Task Force.

²⁹³ White House (22 April 2021) *FACT SHEET: President Biden Sets 2030 Greenhouse Gas Pollution Reduction Target Aimed at Creating Good-Paying Union Jobs and Securing U.S. Leadership on Clean Energy Technologies*, Statements and Releases (“Today, President Biden will announce a new target for the United States to achieve a 50-52 percent reduction from 2005 levels in economy-wide net greenhouse gas pollution in 2030 – building on progress to-date and by positioning American workers and industry to tackle the climate crisis. [...] The target is consistent with the President’s

goal of achieving net-zero greenhouse gas emissions by no later than 2050 and of limiting global warming to 1.5 degrees Celsius, as the science demands.”).

²⁹⁴ White House Office of Domestic Climate Policy (2021) *U.S. Methane Emissions Reduction Action Plan*. See also White House (2 November 2021) *FACT SHEET: President Biden Tackles Methane Emissions, Spurs Innovations, and Supports Sustainable Agriculture to Build a Clean Energy Economy and Create Jobs*, Statements and Releases.

²⁹⁵ United States Environmental Protection Agency (2 November 2021) *EPA Proposes New Source Performance Standards Updates, Emissions Guidelines to Reduce Methane and Other Harmful Pollution from the Oil and Natural Gas Industry* (“EPA is taking a significant step in fighting the climate crisis and protecting public health through a proposed rule that would sharply reduce methane and other harmful air pollution from both new and existing sources in the oil and natural gas industry. The proposal would expand and strengthen emissions reduction requirements that are currently on the books for new, modified and reconstructed oil and natural gas sources, and would require states to reduce methane emissions from hundreds of thousands of existing sources nationwide for the first time.”). The draft regulations were under review by the White House Office of Management and Budget as of 15 August 2022 and are expected to take effect for new and modified oil and gas operations in 2023 and for existing sources likely by 2026 after EPA approval of state implementation plans, according to Chemnick J. (30 August 2022) *The methane rule is under review. Here’s what it would do*, E&E NEWS (“While the EPA rule for new and modified oil and gas operations is likely to take effect next year, EPA’s guidelines for existing sources requires input from states in the form of a state implementation plan. Those must then be approved by EPA — or the agency must offer a federal alternative of its own. The process typically takes years. Schroeder said 2026 was a likely timeline for existing source rules to phase in, leaving a broad swath of onshore oil and gas sources to operate outside of EPA regulation until then.”).

²⁹⁶ United States Environmental Protection Agency (2021) *EPA’s Proposal to Reduce Climate- and Health-Harming Pollution from the Oil and Natural Gas Industry: Overview*, 2 (“Reduce methane emissions by approximately 41 million tons through 2035, the equivalent of 920 million metric tons of carbon dioxide – more than the amount of carbon dioxide emitted in 2019 from all U.S. passenger cars and commercial aircraft combined. In 2030 alone, the proposed rule would reduce methane emissions from covered sources by an estimated 74 percent compared to emissions from those sources in 2005.”).

²⁹⁷ United States Bureau of Land Management (18 November 2016) *Waste Prevention, Production Subject to Royalties, and Resource Conservation*, FED. REG. 81(223): 83008–83089, 83008, 83014 (Codified at 43 C.F.R. Parts 3100, 3160, and 3170) (“The BLM estimates that this rule would result in monetized benefits of \$209–403 million per year (calculating the monetized emissions reductions using model averages of the social cost of methane with a 3 percent discount rate).¹⁶² We estimate that the rule would reduce methane emissions by 175,000– 180,000 tpy, which we estimate to be worth \$189–247 million per year (this social benefit is included in the monetized benefit above). We estimate that the rule would reduce VOC emissions by 250,000–267,000 (this benefit is not monetized in our calculations).¹⁶³ Overall, we predict the rule will reduce methane emissions by 35% from the 2014 estimates and reduce the flaring of associated gas by 49%, when the capture requirements are fully phased in.¹⁶⁴”).

²⁹⁸ White House Office of Domestic Climate Policy (2021) *U.S. Methane Emissions Reduction Action Plan*, 7 (“As part of implementing the bipartisan PIPES Act, PHMSA is advancing a commonsense regulatory agenda that has the potential to provide annual methane reductions of as much as 20 MMT of CO₂e in methane emissions per year—a spur for new jobs for pipeline workers, welders, electricians, and other trades. The reductions will be achieved by reducing leaks throughout the gas pipeline system and by reducing the frequency and scope of ruptures. In addition to being a major safety hazard, ruptures are a particularly large source of pipeline methane emissions. More than 1,000 metric tons of methane are lost, on average, with each pipeline rupture. A single rupture from a large, high-pressure gas pipeline can release more than 1,300 metric tons of methane emissions.”).

²⁹⁹ Zibel A. (6 December 2021) *Biden’s Oil Letdown*, PUBLIC CITIZEN (“Public Citizen’s analysis¹ of federal public lands drilling permit data found: • The Bureau of Land Management has approved an average of about 336 drilling permits per month in 2021 (Figure 1) through November 30. • Excluding January, when former President Donald Trump was in office for most of the month, the agency approved 333 drilling permits per month in 2021. That average was up by more than 40% from when Trump took office in 2017, but still down by more than 25% from 2020. • Under Biden, monthly public lands permit approvals peaked at 652 in April 2021 (Figure 2) but have been below 2020 levels since summer after falling

under 300 in July.”); *discussed in* Joselow M. (6 December 2021) *Biden is approving more oil and gas drilling permits on public lands than Trump, analysis finds*, *The Climate 202*, THE WASHINGTON POST (“During Biden's first year in office so far, BLM has approved an average of 333 drilling permits per month. That figure is more than 35% higher than Trump's first year in office, when BLM approved an average of 245 drilling permits per month.”). *See also* Brown M. (12 July 2021) *US drilling approvals increase despite Biden climate pledge*, AP NEWS (“Approvals for companies to drill for oil and gas on U.S. public lands are on pace this year to reach their highest level since George W. Bush was president, underscoring President Joe Biden’s reluctance to more forcefully curb petroleum production in the face of industry and Republican resistance. The Interior Department approved about 2,500 permits to drill on public and tribal lands in the first six months of the year, according to an Associated Press analysis of government data. That includes more than 2,100 drilling approvals since Biden took office January 20.”).

³⁰⁰ White House (31 January 2022) *FACT SHEET: Biden Administration Tackles Super-Polluting Methane Emissions*, Statements and Releases (“Today, the Biden Administration is announcing new actions in line with the Methane Emissions Reduction Action Plan to tackle methane emissions and support a clean energy economy, including: • The Department of the Interior announcing \$1.15 billion for states to clean up orphaned oil and gas wells, a significant source of methane emissions. • The Department of Energy announcing the launch of a Methane Reduction Infrastructure Initiative to provide technical assistance to the orphaned well clean-up efforts of Federal agencies, states and tribes. • The Department of Transportation announcing new enforcement of the PIPES Act to requires pipeline operators to minimize methane leaks. • The Department of Agriculture highlighting ongoing research efforts and investments to reduce methane emissions from beef and dairy systems. • The White House announcing the formation of a new interagency working group to coordinate the measurement, monitoring, reporting and verification of greenhouse gas emissions and removals. • The President’s Interagency Work Group on Coal and Power Plant Communities and Economic Revitalization announcing a national workshop for energy communities on repurposing fossil fuel infrastructure, including orphan oil and gas wells, for use in new industries.”).

³⁰¹ United States Department of Energy (30 March 2022) *Repurposing Fossil Energy Assets Workshop*.

³⁰² White House Office of Domestic Climate Policy (2021) *U.S. Methane Emissions Reduction Action Plan*, 10–11 (“As a complement to EPA’s updated landfill regulations, EPA’s voluntary Landfill Methane Outreach Program (LMOP) supports development of landfill gas energy projects by providing technical support at regulated landfills and helping smaller, unregulated landfills collect and direct methane gas into the renewable gas energy marketplace.³⁹ This support includes connecting landfill owners and operators with LMOP Partners experienced in project development, providing technical tools and resources to facilitate project development. [...] Under the Biden-Harris Administration, USDA, EPA, and the U.S. Food and Drug Administration (FDA) are working more closely than ever to make the goal of 50% reduced food loss and waste by 2030 a reality. The Administration’s vision for reducing food loss and waste seeks to improve food security and nutrition, increase farmer income and rural prosperity, reduce pressure on natural resources, and meet greenhouse gas emissions reduction targets. [...] The USDA is leveraging its authority under a variety of existing programs to encourage farmers and ranchers to install or upgrade equipment and/or adopt new practices that improve manure management and can substantially reduce methane emissions, in a way that also advances environmental justice. The Natural Resources Conservation Service (NRCS), for example, will provide incentives and technical assistance through Farm Bill programs such as the Environmental Quality Incentives Program (EQIP) and the Conservation Stewardship Program (CSP) to upgrade existing anaerobic lagoons by installing covers and collecting methane for use or destruction; installing anaerobic methane digesters that collect methane for use or destruction; install solid separators that reduce methane-producing slurries; providing conservation assistance for transitions to alternative manure management systems, such as deep pits, composting, transitions to pasture, or other practices that have a lower greenhouse gas profile; and supporting rice management that reduces methane emissions, such as alternate wetting and drying.”).

³⁰³ United States Environmental Protection Agency (29 August 2016) *Emission Guidelines and Compliance Times for Municipal Solid Waste Landfills*, FED. REG. 81(167): 59276–59330, 59276, 59305 (codified at 40 C.F.R. Part 60) (“The EPA estimates that the final rule will achieve nearly an additional 3 percent reduction in NMOC from existing landfills, or 1,810 Mg/yr, when compared to the baseline, as shown in Table 2 of this preamble. The final rule would also achieve 0.285 million Mg of methane reductions (7.1 million mtCO₂e) in 2025. These reductions are achieved by reducing the NMOC threshold from 50 Mg/yr to 34 Mg/yr open landfills.”). *See also* United States Environmental Protection Agency (29 August 2016) *Standards of Performance for Municipal Solid Waste Landfills*, FED. REG. 81(167): 59332–59384, 59332, 59362 (codified at 40 C.F.R. Part 60) (“The EPA estimates that the final rule will achieve nearly an additional 3

percent reduction in NMOC from new, reconstructed, or modified landfills, or 281 Mg/yr, when compared to the baseline, as shown in Table 2 of this preamble. The final rule would also achieve 44,300 Mg/yr of methane reductions (1.1 million mtCO₂e/yr). These reductions are achieved by reducing the NMOC threshold from 50 Mg/yr to 34 Mg/yr.”).

³⁰⁴ See United States Environmental Protection Agency, *Livestock Anaerobic Digester Database* (last visited 29 July 2022) (Tracking anaerobic digester projects in the U.S.); and United States Environmental Protection Agency, *LMOP Landfill and Project Database* (last visited 29 July 2022) (Tracking U.S. landfills, including candidates for landfill gas energy projects.).

³⁰⁵ United States Department of Energy (5 August 2022) *DOE Announces \$32 Million to Reduce Methane Emissions from Oil and Gas Sector* (“The U.S. Department of Energy (DOE) today announced up to \$32 million in funding toward the research and development of new monitoring, measurement, and mitigation technologies to help detect, quantify, and reduce methane emissions across oil and natural gas producing regions of the United States.”).

³⁰⁶ United States Environmental Protection Agency, *United States 2030 Food Loss and Waste Reduction Goal* (last visited 31 August 2022) (“On September 16, 2015, the U.S. Department of Agriculture (USDA) and EPA announced the U.S. 2030 Food Loss and Waste Reduction goal, the first-ever domestic goal to reduce food loss and waste. The goal seeks to cut food loss and waste in half by the year 2030. By acting on this goal, the U.S. can reduce climate and environmental impacts associated with food loss and waste while improving food security and saving money for families and businesses. Led by EPA, USDA, and the Food and Drug Administration (FDA), the federal government is seeking to work with communities, organizations and businesses along with our partners in state, tribal and local government to achieve this goal.”).

³⁰⁷ United States Environmental Protection Agency, *About the Landfill Methane Outreach Program* (last visited 31 August 2022) (“LMOP is a voluntary program that works cooperatively with industry stakeholders and waste officials to reduce or avoid methane emissions from landfills. LMOP encourages the recovery and beneficial use of biogas generated from organic municipal solid waste (MSW). Landfill gas (LFG) and other biogas generated from MSW (collectively referred to as biogas) contain methane, a potent greenhouse gas that can be captured and used as a renewable fuel for many end uses including electricity generation, industrial heat applications and vehicle fuel. Capturing and using biogas reduces local air pollution, creates health benefits, generates revenue and jobs in the community and may also offset the use of non-renewable resources.”).

³⁰⁸ United States Environmental Protection Agency, *Coal Mine Methane – What EPA is Doing* (last visited 31 August 2022) (“Since 1994, EPA’s Coalbed Methane Outreach Program (CMOP) has worked cooperatively with the coal mining industry in the United States – and other major coal-producing countries – to reduce CMM emissions. By helping to identify and implement methods to recover and use CMM instead of emitting it to the atmosphere, CMOP has played a key role in the United States’ efforts to reduce GHG emissions and address global climate change.”).

³⁰⁹ United States Environmental Protection Agency, *What EPA is Doing: AgSTAR* (last visited 31 August 2022) (“AgSTAR promotes the use of biogas recovery systems to reduce methane emissions from livestock waste. Biogas recovery also helps achieve other social, environmental, agricultural and economic benefits. AgSTAR assists those who enable, purchase or implement anaerobic digesters by identifying project benefits, risks, options and opportunities. AgSTAR provides information and participates in events to create a supporting environment for anaerobic digester implementation.”).

³¹⁰ United States Department of Agriculture (7 February 2022) *USDA to Invest \$1 Billion in Climate Smart Commodities, Expanding Markets, Strengthening Rural America*, Press Release (“Agriculture Secretary Tom Vilsack announced today at Lincoln University that the U.S. Department of Agriculture is delivering on its promise to expand markets by investing \$1 billion in partnerships to support America’s climate-smart farmers, ranchers and forest landowners. The new [Partnerships for Climate-Smart Commodities](#) opportunity will finance pilot projects that create market opportunities for U.S. agricultural and forestry products that use climate-smart practices and include innovative, cost-effective ways to measure and verify greenhouse gas benefits.”). See also United States Department of Agriculture, *Partnerships for Climate-Smart Commodities* (last visited 29 July 2022) (“Highly competitive projects will include agricultural and forestry practices or combinations of practices, and/or practice enhancements that provide GHG benefits and/or carbon

sequestration, including but not limited to: ... Manure management; Feed management to reduce enteric emissions ... Alternate wetting and drying on rice fields....”).

³¹¹ United States Advanced Research Projects Agency-Energy (2 December 2021) *U.S. Department of Energy Awards \$35 Million for Technologies to Reduce Methane Emissions*, Press Release (“The following teams selected for the REMEDY program will work to directly address the more than 50,000 engines, 300,000 flares, and 250 mine shafts that are producing methane emissions. Natural Gas Engines: MAHLE Powertrain (Plymouth, MI) will develop a catalytic system to oxidize methane in the exhaust gas of lean-burn natural gas fired engines, (selection amount: \$3,257,089); Colorado State University (Fort Collins, CO) will develop hardware to redirect methane emissions to the engine’s turbocharger, reducing emissions and improving fuel efficiency, (selection amount: \$1,500,000); Marquette University (Milwaukee, WI) will demonstrate their Mixed Controlled Combustion (MCC) system which can be retrofitted into lean-burn engines, (selection amount: \$3,975,058); INNIO’s Waukesha Gas Engines (Waukesha, WI) will develop a new line of pistons fabricated with friction welding that reduce the space for methane to “slip” past the combustion zone in the engine and can be installed as part of normal engine maintenance programs, (selection amount: \$2,230,693); Texas A&M University (College Station, TX) will use plasma and advanced engine controls to reduce methane slip; the technology targets the large two-stroke engines used by gas pipeline companies, (selection amount: \$2,824,814); Flares: Advanced Cooling Technologies, Inc. (Lancaster, PA) will adapt their combustor design to ensure 99.5% methane destruction efficiency for the highly variable gas sent to flares; the combustors will be made of silicon carbide, which can withstand more than 2500 degrees Fahrenheit, using a new 3D printing process, (selection amount: \$3,300,000); Cimarron Energy, Inc. (Houston, TX) proposes a hybrid flare design coupled with advanced controls to ensure 99.5% destruction efficiency for flares that handle both high- and low-pressure gas streams, (selection amount: \$1,000,000); University of Michigan (Ann Arbor, MI) will use additive manufacturing and machine learning to scale up their advanced burner which will be incorporated into a new flare system design that is robust to cross winds and low load conditions which can lead to poor methane destruction efficiency, (selection amount: \$2,881,762); University of Minnesota (Minneapolis, MN) will use plasma-assisted combustion to enhance flare methane destruction efficiency, (selection amount: \$2,141,876); and Methane from Coal Mine Shafts: Johnson Matthey, Inc. (Wayne, PA) is developing new technology, which uses a noble metal catalyst to combust the dilute methane in coal mine ventilation systems, (selection amount: \$4,346,015); Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, MA) is developing a low-cost copper-based catalyst for reducing methane emissions, (selection amount: \$2,020,903); and Precision Combustion, Inc. (North Haven, CT) proposes an innovative modular system that promotes methane reaction and manages thermal loads in a novel reactor design, (selection amount: \$3,720,317).”).

³¹² United States Advanced Research Projects Agency-Energy (8 April 2021) *Reducing Emissions of Methane Every Day of the Year*, ARPA-E Programs (“Program Description: REMEDY (Reducing Emissions of Methane Every Day of the Year) is a three-year, \$35 million research program to reduce methane emissions from three sources in the oil, gas, and coal value chains: 1) Exhaust from 50,000 natural gas-fired lean-burn engines. These engines are used to drive compressors, generate electricity, and increasingly repower ships. 2) The estimated 300,000 flares required for safe operation of oil and gas facilities. 3) Coal mine ventilation air methane (VAM) exhausted from 250 operating underground mines. These sources are responsible for at least 10% of U.S. anthropogenic methane emissions. Reducing emissions of methane, which has a high greenhouse gas warming potential, will ameliorate climate change.”).

³¹³ United States Advanced Research Projects Agency-Energy (30 September 2020) *Prevention and Abatement of Methane Emissions* (“We’re open to all options – but specifically are looking for solutions that: Prevent methane emissions from anthropogenic activities. In other words, solutions which intervene before anthropogenic emissions escape to the atmosphere. Abate methane emissions at their source. Sources include vents, leaks, and exhaust stacks. Remove methane from the air. As mentioned above, methane only lasts about 9 years in the atmosphere. Nature is very good at getting rid of methane using reactions in the atmosphere and methanotrophs in the soil. Maybe we can learn from Nature, and help her out.”). See also Lewnard J. (16 November 2020) *REMEDY – Reducing Emissions of Methane Every Day of the Year*, ARPA-E Presentation, Slide 7 (“Example Potential Approaches, Not Intended to Limit or Direct... “Geo-engineering”: Accelerate tropospheric reactions; Accelerate soil/methanotroph reactions”).

³¹⁴ See *CHIPS and Science Act*, Pub. L. No. 117-167 § 10771 (2022); U.S. Senate (2022) *CHIPS and Science Act of 2022: Section-by-Section Summary*; and White House (9 August 2022) *FACT SHEET: CHIPS and Science Act Will Lower Costs, Create Jobs, Strengthen Supply Chains, and Counter China*, Briefing Room; discussed in Meyer R. (10 August 2022) *Congress Just Passed a Big Climate Bill. No, Not That One.*, THE ATLANTIC (“The bill could direct about \$12

billion in new research, development, and demonstration funding to the Department of Energy, according to RMI's estimate. That includes doubling the budget for ARPA-E, the department's advanced-energy-projects *skunk works.*"); and Ovide S. (10 August 2022) *Taxpayers for U.S. Chips*, THE NEW YORK TIMES.

³¹⁵ United States Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement (July 2022) *Guidance on the Bipartisan Infrastructure Law Abandoned Mine Land Grant Implementation*, 1 ("The BIL authorized and appropriated \$11.293 billion for deposit into the Abandoned Mine Reclamation Fund administered by the Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement (OSMRE). Of the \$11.293 billion appropriated OSMRE will distribute approximately \$10.873 billion¹ in BIL Abandoned Mine Land (AML) grants to eligible States and Tribes on an equal annual basis—approximately \$725 million a year—over a 15-year period.²").

³¹⁶ United States Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement (July 2022) *Guidance on the Bipartisan Infrastructure Law Abandoned Mine Land Grant Implementation*, 4 ("States with unreclaimed mines on the list of EPA's Methane Coal Mine Opportunities Database (<https://www.epa.gov/cmop/coal-mine-methane-abandoned-underground-mines>) are encouraged to prioritize the reclamation of such sites where eligible for BIL AML funding in a manner that eliminates methane emissions to the greatest extent possible.").

³¹⁷ United States Department of Agriculture (2022) *Request for Applications: Bioproduct Pilot Program*, Fiscal Year 2023, 6 ("The Bioproduct Pilot Program, under assistance listing 10.236, will advance development of cost-competitive bioproducts with environmental benefits compared to incumbent products. The program seeks projects that will study the benefits of using materials derived from covered agricultural commodities for production of construction and consumer products (IMPORTANT: see Definitions in Appendix III). Applications must address all the following priorities: (1) Bioproduct development and production scale-up. (2) Cost savings relative to other commonly used materials; (3) Greenhouse gas emission reductions and other environmental and climate benefits relative to other commonly used materials; (4) Landfill quantity and waste management cost reductions, including life-cycle and longevity-extending or longevity-reducing characteristics relative to other commonly used materials...").

³¹⁸ United States Department of Agriculture (28 June 2022) *Vilsack Announces Bioproduct Pilot Program Funded by Bipartisan Infrastructure Law*, Press Release ("Today, Agriculture Secretary Tom Vilsack announced the U.S. Department of Agriculture is accepting applications for a new pilot program created under President Biden's historic Bipartisan Infrastructure Law to support the development of biobased products that have lower carbon footprints and increase the use of renewable agricultural materials, creating new revenue streams for farmers. This \$10 million investment is part of the Biden-Harris Administration's ongoing work to rebuild our infrastructure and create good-paying jobs and economic opportunity in our rural communities.").

³¹⁹ *Inflation Reduction Act of 2022*, Pub. L. No. 117-169 (2022) § 60113 ("(a) INCENTIVES FOR METHANE MITIGATION AND MONITORING.—In addition to amounts otherwise available, there is appropriated to the Administrator for fiscal year 2022, out of any money in the Treasury not otherwise appropriated, \$850,000,000, to remain available until September 30, 2028. . . . In addition to amounts otherwise available, there is appropriated to the Administrator 18 for fiscal year 2022, out of any money in the Treasury 19 not otherwise appropriated, \$700,000,000, to remain 20 available until September 30, 2028, for activities described 21 in paragraphs (1) through (4) of subsection (a) at marginal conventional wells.").

³²⁰ See *Inflation Reduction Act of 2022*, Pub. L. No. 117-169 (2022) § 60112 ("(e) Charge Amount.—The amount of a charge under subsection (c) for an applicable facility shall be equal to the product obtained by multiplying—“(1) the number of metric tons of methane emissions reported pursuant to subpart W of part 98 of title 40, Code of Federal Regulations, for the applicable facility that exceed the applicable annual waste emissions threshold listed in subsection (f) during the previous reporting period; and “(2)(A) \$900 for emissions reported for calendar year 2024; “(B) \$1,200 for emissions reported for calendar year 2025; or “(C) \$1,500 for emissions reported for calendar year 2026 and each year thereafter.”); and United States Senate (28 July 2022) *Summary of the Energy Security and Climate Change Investments in the Inflation Reduction Act of 2022*; discussed in Friedman L. & Plumer B. (28 July 2022) *Surprise Deal Would Be Most Ambitious Climate Action Undertaken by U.S.*, THE NEW YORK TIMES ("The bill would also crack down on leaks of methane, a powerful greenhouse gas, from oil and gas wells, pipelines and other infrastructure. By 2026, polluters would face a penalty of \$1,500 per ton of methane that escaped into the atmosphere in excess of federal limits. The

methane fee will raise \$6.3 billion from the oil and gas industry over a decade, much of which will be reinvested in measures to help prevent methane leaks.”).

³²¹ [Inflation Reduction Act of 2022](#), Pub. L. No. 117-169 (2022) §§ 50261–50263 (“For all leases issued after the date of enactment of this Act, except as provided in subsection (b), royalties paid for gas produced from Federal land and on the outer Continental Shelf shall be assessed on all gas produced, including all gas that is consumed or lost by venting, flaring, or negligent releases through any equipment during upstream operations.”).

³²² [Inflation Reduction Act of 2022](#), Pub. L. No. 117-169 (2022) § 21001(a)(1)–(4) (“(a) Appropriations ... (1) to carry out, using the facilities and authorities of the Commodity Credit Corporation, the environmental quality incentives program under subchapter A of chapter 4 of subtitle D of title XII of the Food Security Act of 1985 (16 U.S.C. 3839aa through 3839aa-8)—(A)(i) \$250,000,000 for fiscal year 2023; (ii) \$1,750,000,000 for fiscal year 2024; (iii) \$3,000,000,000 for fiscal year 2025; and (iv) \$3,450,000,000 for fiscal year 2026 ... (II) with the Secretary prioritizing proposals that utilize diet and feed management to reduce enteric methane emissions from ruminants; and (iii) the funds shall be available for 1 or more agricultural conservation practices or enhancements that the Secretary determines directly improve soil carbon, reduce nitrogen losses, or reduce, capture, avoid, or sequester carbon dioxide, methane, or nitrous oxide emissions, associated with agricultural production; (2) to carry out, using the facilities and authorities of the Commodity Credit Corporation, the conservation stewardship program under subchapter B of that chapter (16 U.S.C. 3839aa-21 through 3839aa-25)—(A)(i) \$250,000,000 for fiscal year 2023; (ii) \$500,000,000 for fiscal year 2024; (iii) \$1,000,000,000 for fiscal year 2025; and (iv) \$1,500,000,000 for fiscal year 2026; and (B) subject to the condition on the use of the funds that the funds shall only be available for 1 or more agricultural conservation practices, enhancements, or bundles that the Secretary determines directly improve soil carbon, reduce nitrogen losses, or reduce, capture, avoid, or sequester carbon dioxide, methane, or nitrous oxide emissions, associated with agricultural production; (3) to carry out, using the facilities and authorities of the Commodity Credit Corporation, the agricultural conservation easement program under subtitle H of title XII of that Act (16 U.S.C. 3865 through 3865d) for easements or interests in land that will most reduce, capture, avoid, or sequester carbon dioxide, methane, or nitrous oxide emissions associated with land eligible for the program—(A) \$100,000,000 for fiscal year 2023; (B) \$200,000,000 for fiscal year 2024; (C) \$500,000,000 for fiscal year 2025; and (D) \$600,000,000 for fiscal year 2026; and (4) to carry out, using the facilities and authorities of the Commodity Credit Corporation, the regional conservation partnership program under subtitle I of title XII of that Act (16 U.S.C. 3871 through 3871f)—(A)(i) \$250,000,000 for fiscal year 2023; (ii) \$800,000,000 for fiscal year 2024; (iii) \$1,500,000,000 for fiscal year 2025; and (iv) \$2,400,000,000 for fiscal year 2026; and (B) subject to the conditions on the use of the funds that—(i) section 1271C(d)(2)(B) of the Food Security Act of 1985 (16 U.S.C. 3871c(d)(2)(B)) shall not apply; and (ii) the Secretary shall prioritize partnership agreements under section 1271C(d) of the Food Security Act of 1985 (16 U.S.C. 3871c(d)) that support the implementation of conservation projects that assist agricultural producers and nonindustrial private forestland owners in directly improving soil carbon, reducing nitrogen losses, or reducing, capturing, avoiding, or sequestering carbon dioxide, methane, or nitrous oxide emissions, associated with agricultural production.”).

³²³ Analyses by Princeton’s REPEAT Project, Energy Innovation, and the Rhodium Group confirm the 40% GHG reductions capability of the 2022 Inflation Reduction Act. *See* Jenkins J. D., Mayfield E. N., Farbes J., Jones R., Patankar N., Xu Q., & Schivley G. (2022) *Preliminary Report: The Climate and Energy Impacts of the Inflation Reduction Act of 2022*, REPEAT Project, Princeton University ZERO Lab, 6 (Table. Historical and Modeled Net U.S. Greenhouse Gas Emissions (Including Land Sinks); Mahajan M., Ashmoore O., Rissman J., Orvis R., & Gopal A. (2022) *Modeling the Inflation Reduction Act Using the Energy Policy Simulator*, Energy Innovation, 1 (“We find that the IRA is the most significant federal climate and clean energy legislation in U.S. history, and its provisions could cut greenhouse gas (GHG) emissions 37-41 percent below 2005 levels. If the IRA passes, additional executive and state actions can realistically achieve the U.S. nationally determined commitments (NDCs) under the Paris Agreement.”); *and* Larsen J., King B., Kolus H., Dasari N., Hiltbrand G., & Herndon W. (12 August 2022) *A Turning Point for US Climate Progress: Assessing the Climate and Clean Energy Provisions in the Inflation Reduction Act*, The Rhodium Group (“The IRA is a game changer for US decarbonization. We find that the package as a whole drives US net GHG emissions down to 32-42% below 2005 levels in 2030, compared to 24-35% without it. The long-term, robust incentives and programs provide a decade of policy certainty for the clean energy industry to scale up across all corners of the US energy system to levels that the US has never seen before. The IRA also targets incentives toward emerging clean technologies that have seen little support to date. These incentives help reduce the green premium on clean fuels, clean hydrogen, carbon capture, direct air capture, and other technologies, potentially creating the market conditions to expand these nascent industries to the level needed

to maintain momentum on decarbonization into the 2030s and beyond.”); *discussed in* Hirji Z. (4 August 2022) *How the Senate’s Big Climate Bill Eliminates 4 Billion Tons of Emissions*, BLOOMBERG.

³²⁴ *CHIPS and Science Act of 2022*, Pub. L. No. 117-167 (2022) § 10221 (“The Director, in collaboration with the Administrator of the National Oceanic and Atmospheric Administration, the Administrator of the Environmental Protection Agency, and the heads of other Federal agencies, as appropriate, shall establish a Center for Greenhouse Gas Measurements, Standards, and Information...”); *discussed in* Meyer R. (10 August 2022) *Congress Just Passed a Big Climate Bill. No, Not That One.*, ATLANTIC (“The CHIPS Act is not a comprehensive climate bill in the same way that the Inflation Reduction Act, or IRA, is. Unlike the IRA, the CHIPS bill isn’t supposed to drive immediate reductions in carbon pollution or subsidize the replacement of fossil fuels with cleaner alternatives. It probably won’t help the United States get closer to achieving its 2030 target under the Paris Agreement. Instead, the bill’s programs focus on the bleeding edge of the decarbonization problem, investing money in technology that should lower emissions in the 2030s and beyond. That’s an important role in its own right. The International Energy Association has estimated that almost half of global emissions reductions by 2050 will come from technologies that exist only as prototypes or demonstration projects today.”).

³²⁵ *S.B. 1383*, 2016 Leg. (Cal. 2016) (“The California Global Warming Solutions Act of 2006 designates the State Air Resources Board as the state agency charged with monitoring and regulating sources of emissions of greenhouse gases. The state board is required to approve a statewide greenhouse gas emissions limit equivalent to the statewide greenhouse gas emissions level in 1990 to be achieved by 2020. The state board is also required to complete a comprehensive strategy to reduce emissions of short-lived climate pollutants, as defined, in the state. This bill would require the state board, no later than January 1, 2018, to approve and begin implementing that comprehensive strategy to reduce emissions of short-lived climate pollutants to achieve a reduction in methane by 40%, hydrofluorocarbon gases by 40%, and anthropogenic black carbon by 50% below 2013 levels by 2030, as specified. The bill also would establish specified targets for reducing organic waste in landfills.”).

³²⁶ *Venting or Flaring Natural Gas*, 2 COLO. CODE REGS. § 404–1-903 (2022) (“Venting and Flaring of natural gas represent waste of an important energy resource and pose safety and environmental risks. Venting and Flaring, except as specifically allowed in this Rule 903, are prohibited.”).

³²⁷ Office of Governor Gavin Newsom (8 June 2022) *At Summit of the Americas, Governor Newsom Outlines California’s World-Leading Efforts to Cut Methane Pollution* (last visited 31 August 2022) (“The Governor’s California Climate Commitment, a historic \$47.1 billion proposal, includes \$200 million for remediating idle oil wells and \$100 million for the methane-detecting satellites. These satellites will be critical for California regulators to hold polluters accountable, and the rest of the world will benefit as well from transparent and timely access to data on leaks when they occur. The \$200 million would allow the State to quickly get to work plugging idle oil wells, especially orphaned idle wells, in anticipation of additional Federal support. The funding would also give the State the ability to expeditiously remediate wells owned by delinquent operators while regulators pursue reimbursement.”).

³²⁸ *Control of Ozone via Ozone Precursors and Control of Hydrocarbons via Oil and Gas Emissions (Emissions of Volatile Organic Compounds and Nitrogen Oxides)*, 5 COLO. CODE REGS. § 1001–1009 (2022) (“Natural Gas-Actuated Pneumatic Controllers Associated with Oil and Gas Operations”).

³²⁹ *Venting and flaring of natural gas*, N.M. CODE R. Pt. 19.15.27 (2022). *See also* YCC Team (31 May 2021) *New Mexico imposes strict rule to prevent venting, flaring of natural gas*, YALE CLIMATE CONNECTIONS (“The state recently passed a new rule that requires oil producers to capture waste natural gas. ‘The rule will lead to a 98% gas capture in the oil and gas sector by 2026,’ says Sarah Cottrell Propst, cabinet secretary of the New Mexico Energy, Minerals, and Natural Resources Department.”); New Mexico Environment Department (14 April 2022) *New Mexico adopts nationally leading oil and gas emissions rule*, Press Release (“After two and half years of collaborative public and stakeholder engagement, the Environmental Improvement Board (EIB) adopted new air quality rules that will eliminate hundreds of millions of pounds of harmful emissions annually from oil and gas operations in New Mexico. The new rule will improve air quality for New Mexicans by establishing innovative and actionable regulations to curb the formation of ground-level ozone. The new rule will reduce harmful emissions of ozone precursor pollutants – volatile organic compounds and oxides of nitrogen – by approximately 260 million pounds annually, and will have the co-benefit of reducing methane emissions by over 851 million pounds annually. Starting this summer, compliance obligations for new and existing oil and gas operations in

New Mexico counties with high ozone levels will begin to take effect. These counties are Chaves, Doña Ana, Eddy, Lea, Rio Arriba, Sandoval, San Juan, and Valencia counties.”); and State of New Mexico Environmental Improvement Board (2022) *Hearing Officer’s Report*, In the Matter of Proposed New Regulation, 20.2.50 NMAC – Oil and Gas Sector – Ozone Precursor Pollutants (discussing the methane emissions reduction co-benefit of adopting mitigation measures for volatile organic compounds (VOCs) and nitrogen oxides (NO_x) in the oil and gas sector). Compare with McDevitt, R. (14 June 2022) *Pennsylvania drops a major source of methane from new rule to limit emissions*, STATE IMPACT PENNSYLVANIA (“Pennsylvania’s environmental regulator is moving forward with a pared-down version of its rule to curb harmful emissions from existing oil and gas sites as it faces a federal deadline. The Environmental Protection Agency does not distinguish between shallower conventional oil and gas wells and deeper, fracked unconventional wells. Pennsylvania does. The Department of Environmental Protection had been developing a rule to limit emissions of volatile organic compounds and methane from both types of wells. But it dropped the conventional wells from the final rule before presenting it to the Environmental Quality Board Tuesday. . . . In December, DEP projected that the rule for both types of well sites would prevent more than 11,000 tons of VOCs per year and more than 213,000 tons of methane annually. The rule for only unconventional sites projects reductions of 2,864 tons of VOCs per year and more than 45,000 tons per year of methane. That’s about an 80 percent difference.”).

³³⁰ Oil and Gas Sector – Ozone Precursor Pollutants, N.M. CODE R. Pt. 20.2.50 (2022). See also Office of the Governor (28 July 2022) *New Mexico’s nationally leading oil and gas emissions rule becomes law*, Press Release (“A nationally leading rule over the oil and gas industry that will cut harmful air emissions by 260 million pounds is now state law – a fulfillment of one of Gov. Michelle Lujan Grisham’s first commitments made in office. The rule, which was developed with input from over 520 stakeholders representing industry, environmental groups and the public, was published in the state register this week.”).

³³¹ There are currently 24 states, plus Puerto Rico, who have joined the U.S. Climate Alliance. See United States Climate Alliance (2018) *FROM SLCP CHALLENGE TO ACTION: A ROADMAP FOR REDUCING SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS TO MEET THE GOALS OF THE PARIS AGREEMENT*, 11 (“Significant additional opportunities exist to cut methane emissions quickly and cost effectively across the U.S. Capturing the full potential of expected reduction opportunities, as described in Appendix A, could reduce methane emissions by 40-50 percent below current levels in the U.S. Climate Alliance. Existing and emerging strategies and technologies can achieve these reductions by 2030.”).

³³² United States Climate Alliance (2018) *FROM SLCP CHALLENGE TO ACTION: A ROADMAP FOR REDUCING SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS TO MEET THE GOALS OF THE PARIS AGREEMENT*, 11 (“There is an opportunity for the U.S. Climate Alliance to help fulfill the commitment by the U.S., Canada, and Mexico to implement federal regulations on new and existing sources in the oil and gas sector to reduce methane emissions by 40-45 percent below 2012 levels by 2025.”). In 2016, the U.S., Canada, and Mexico committed to reducing methane emissions in the oil and gas sector by 40–45% by 2025 (compared to 2012 levels).

³³³ United States Climate Alliance (2018) *FROM SLCP CHALLENGE TO ACTION: A ROADMAP FOR REDUCING SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS TO MEET THE GOALS OF THE PARIS AGREEMENT*, 15 (“Significant opportunities for reducing methane emissions from landfills and capturing value can be seized by reducing food loss and waste, diverting organic waste to beneficial uses, and improving landfill management. These and other actions collectively could reduce methane emissions from waste by an estimated 40-50 percent by 2030 (Appendix A). Such efforts could add value in our states by reducing emissions of volatile organic compounds and toxic air contaminants from landfills, recovering healthy food for human consumption in food insecure communities, supporting healthy soils and agriculture, generating clean energy and displacing fossil fuel consumption, and providing economic opportunities across these diverse sectors. Many of these benefits will accrue in low-income and disadvantaged communities.”).

³³⁴ United States Climate Alliance (2018) *FROM SLCP CHALLENGE TO ACTION: A ROADMAP FOR REDUCING SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS TO MEET THE GOALS OF THE PARIS AGREEMENT*, 13 (“Actions to improve manure management and to reduce methane from enteric fermentation have the potential to significantly reduce agricultural methane emissions across U.S. Climate Alliance states. . . . Promising technologies are also emerging that may cut methane emissions from enteric fermentation by 30 percent or more (Appendix A). Developing strategies that work for farmers and surrounding communities can significantly reduce methane emissions, increase and diversify farm revenues, and support water quality and other environmental benefits.”). See also Ross E. G., Peterson C. B., Carrasco A. V., Werth S. J., Zhao Y., Pan Y., DePeters E. J., Fadel J. G., Chiodini M. E., Poggianella L., & Mitloehner F. M. (2020) *Effect of SOP “STAR COW” on*

Enteric Gaseous Emissions and Dairy Cattle Performance, SUSTAINABILITY 12(24): 10250, 1–12, 1 (“The aim of this study was to investigate the efficacy of the commercial feed additive SOP STAR COW (SOP) to reduce enteric emissions from dairy cows and to assess potential impacts on milk production. ... SOP-treated cows over time showed a reduction in CH₄ of 20.4% from day 14 to day 42 ($p = 0.014$), while protein % of the milk was increased (+4.9% from day 0 to day 14 ($p = 0.036$) and +6.5% from day 0 to day 42 ($p = 0.002$)).”).

³³⁵ United States Climate Alliance (2018) *FROM SLCP CHALLENGE TO ACTION: A ROADMAP FOR REDUCING SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS TO MEET THE GOALS OF THE PARIS AGREEMENT*, 13 (“Actions to improve manure management and to reduce methane from enteric fermentation have the potential to significantly reduce agricultural methane emissions across U.S. Climate Alliance states. Improving manure storage and handling, composting manure, utilizing pasture-based systems, or installing anaerobic digesters significantly reduces methane from manure management on dairy, swine, and other livestock operations. These practices may reduce methane from manure management by as much as 70 percent in U.S. Climate Alliance states (Appendix A) and can help improve soil quality and fertility, reduce water use and increase water quality, reduce odors, and decrease the need for synthetic fertilizers and associated greenhouse gas emissions... Developing strategies that work for farmers and surrounding communities can significantly reduce methane emissions, increase and diversify farm revenues, and support water quality and other environmental benefits.”). See also Borgonovo F., Conti C., Lovarelli D., Ferrante V., & Guarino M. (2019) *Improving the Sustainability of Dairy Slurry with a Commercial Additive Treatment*, SUSTAINABILITY 11(18): 1–14, 8 (claiming that additives treating liquid manure of dairy cows, made from agricultural gypsum processed with proprietary technology [SOP LAGOON], showed significant reductions of climate emissions from waste slurry, eliminating ammonia and N₂O, and significantly reducing CH₄ and CO₂. “N₂O, CO₂, and CH₄ emissions, from the treated slurry, were respectively 100%, 22.9% and 21.5% lower than the control at T4 [Day 4] when the emission peaks were recorded.”).

³³⁶ United States Composting Council, *State Regulations* (last visited 29 July 2022) (States with yard debris bans: Arkansas, Connecticut, Delaware, Florida, Georgia, Illinois, Indiana, Iowa, Maryland, Massachusetts, Michigan, Minnesota, Missouri, Montana, Nebraska, New Hampshire, New Jersey, New York, North Carolina, Ohio, Pennsylvania, South Carolina, South Dakota, Vermont, West Virginia, Wisconsin. States with food scrap collection mandates or aggressive legislation for keeping out of landfills: California, Connecticut, Massachusetts, Montana, Rhode Island, Vermont).

³³⁷ University of California Berkeley, Center for Law, Energy & the Environment, *Methane Protocols for Reducing Emissions* (last visited 31 August 2022) (“Project Climate and CLEE are developing frameworks for methane emission reduction at the sub-national jurisdiction level for each of the main sources of anthropogenic methane: fossil fuels, agriculture, and waste. The frameworks are designed to engage sub-national governments in commitments to a jurisdiction-appropriate level of emission reduction action through inventories, baselines, target-setting, policy implementation, and information-sharing. The goal is to achieve the highest level possible of commitment to aggressive methane emission reduction with sufficient flexibility to include all relevant governments and sectors. Participation in the frameworks will then facilitate iterative policy and technology development to continually raise the bar on emission reduction.”).

³³⁸ White House (29 June 2016) *Leaders’ Statement on a North American Climate, Clean Energy, and Environment Partnership, Statements and Releases* (“Today, Mexico will join Canada and the United States in committing to reduce their methane emissions from the oil and gas sector – the world’s largest industrial methane source – 40% to 45% by 2025, towards achieving the greenhouse gas targets in our nationally determined contributions. To achieve this goal, the three countries commit to develop and implement federal regulations to reduce emissions from existing and new sources in the oil and gas sector as soon as possible. We also commit to develop and implement national methane reduction strategies for key sectors such as oil and gas, agriculture, and waste management, including food waste.”). See also White House (29 June 2016) *North American Climate, Clean Energy, and Environment Partnership Action Plan, Statements and Releases* (“Reduce methane emissions from the oil and gas sector, the world’s largest industrial methane source, 40-45% by 2025 towards achieving the greenhouse gas targets in our nationally determined contributions, and explore additional opportunities for methane reductions. The three countries commit to develop and implement federal regulations for both existing and new sources as soon as possible to achieve the target. We intend to invite other countries to join this ambitious target or develop their own methane reduction goal.”).

³³⁹ White House (29 June 2016) *Leaders' Statement on a North American Climate, Clean Energy, and Environment Partnership*, Statements and Releases (“Today, Mexico will join Canada and the United States in committing to reduce their methane emissions from the oil and gas sector – the world’s largest industrial methane source – 40% to 45% by 2025, towards achieving the greenhouse gas targets in our nationally determined contributions. To achieve this goal, the three countries commit to develop and implement federal regulations to reduce emissions from existing and new sources in the oil and gas sector as soon as possible. We also commit to develop and implement national methane reduction strategies for key sectors such as oil and gas, agriculture, and waste management, including food waste.”). See also White House (29 June 2016) *North American Climate, Clean Energy, and Environment Partnership Action Plan* (“Reduce methane emissions from the oil and gas sector, the world’s largest industrial methane source, 40-45% by 2025 towards achieving the greenhouse gas targets in our nationally determined contributions, and explore additional opportunities for methane reductions. The three countries commit to develop and implement federal regulations for both existing and new sources as soon as possible to achieve the target. We intend to invite other countries to join this ambitious target or develop their own methane reduction goal.”).

³⁴⁰ White House (12 July 2022) *President Biden and President Lopez Obrador Joint Statement*, Statements and Releases (“We commit to tackle methane emissions from oil and gas and other sectors, accelerate the transition to zero-emission vehicles, and deepen our efforts to seek nature-based solutions, enabling our two countries to become global leaders in clean energies and actions to combat climate change. In support of the Global Methane Pledge and Global Methane Pledge Energy Pathway, Mexico and Pemex, in cooperation with the U.S., will develop an implementation plan to eliminate routine flaring and venting across onshore and offshore oil and gas operations and identify priority projects for investment.”).

³⁴¹ Executive Body Working Group on Strategies and Review (30 September 2020) *Preparations for the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2020/3 – EBE/EB.AIR/WG.5/2020/3 at ¶ 20, (“As per the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond (paragraph 50), the review should look at appropriate steps towards reducing emissions of black carbon, ozone precursors not yet addressed such as methane, and emissions from shipping with due consideration for International Maritime Organization (IMO) policies and measures... In line with the priorities identified in the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond, the following should specifically be considered in answering the questions in annex I: (b) Hemispheric transport of ozone and particulate matter and their precursors and advancing efforts to address air pollution on a broader scale per paragraphs 63 and 78 of the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond; health and ecosystem impacts from outside the ECE region; I Methane and its relationship to the hemispheric transport of ozone and its contribution to ozone in the ECE region;”).

³⁴² White House (25 March 2022) *Joint Statement between the United States and the European Commission on European Energy Security*, Statements and Releases (“The United States will strive to ensure, including working with international partners, additional liquified natural gas (LNG) volumes for the EU market of at least 15 bcm in 2022 with expected increases going forward. The United States and European Commission will undertake efforts to reduce the greenhouse gas intensity of all new LNG infrastructure and associated pipelines, including through the use of clean energy to power onsite operations, the reduction of methane leakage, and the construction of clean and renewable hydrogen ready infrastructure. The United States commits to maintaining an enabling regulatory environment with procedures to review and expeditiously act upon applications to permit any additional export LNG capacities that would be needed to meet this emergency energy security objective and support the RePowerEU goals, affirming the joint resolve to terminate EU dependence on Russian fossil fuels by 2027.”).

³⁴³ United States Federal Energy Regulatory Commission (24 March 2022) *FERC Seeks Comment on Draft Policy Statements on Pipeline Certification*, News Releases (“FERC today voted to seek comments on two policy statements it issued last month that provide guidance regarding the certification of interstate natural gas pipelines and consideration of greenhouse gas (GHG) emissions in natural gas project reviews. In February, the Commission issued an update to its 1999 Certificate Policy Statement and also issued an interim policy statement focused on the Commission’s assessment of the impact of a project’s GHG emissions. After further consideration, the Commission today designated both documents as draft policy statements on which the Commission is seeking further public comment. The two draft policy statements will not apply to pending project applications or filed applications before the Commission issues any final guidance in these dockets.”); discussed in Willson M. (23 March 2022) *FERC retreats on gas policies as chair pursues clarity*, ENERGYWIRE (“The Federal Energy Regulatory Commission has rolled back sweeping new policies for large natural gas

projects, including a framework for assessing how pipelines and other facilities contribute to climate change, weeks after prominent lawmakers panned the changes. In a decision issued unanimously at the commission's monthly meeting yesterday, FERC will revert back to its long-standing method for reviewing natural gas pipeline applications — while opening changes announced in February to feedback rather than applying them immediately. While the policy changes issued in February were intended to update and improve the agency's approach for siting new gas projects, the commission has concluded that the new guidelines 'could benefit from further clarification,' said FERC Chair Richard Glick. 'I'm all for providing further clarity, not only for industry but all stakeholders in our proceedings, including landowners and affected communities,' said Glick, a Democrat who supported the initial changes.”).

³⁴⁴ Thompson R. L. & Peters G. (25 April 2022) *How achievable is the Methane Pledge?*, CICERO (“Although world leaders are rightfully concerned about the war in Ukraine, it is important that they do not forget the Methane Pledge. Tackling methane emissions now is a must in order to have a chance of limiting global warming to 1.5°C. It is technically feasible to make significant reductions by 2030 - about 24% relative to 2020 levels given the projected production increases. Achieving the Methane Pledge of 30% will be very challenging but not impossible if increases in production could be curbed as well. The deciding factor is how quickly governments, businesses and local authorities will act.”).

³⁴⁵ White House (12 May 2022) *FACT SHEET: U.S.-ASEAN Special Summit in Washington, DC*, Statements and Releases (“Reducing Methane Emissions: The United States is committed to working with the nations of Southeast Asia to reduce the region's methane emissions. The United States welcomed Indonesia, Vietnam, Malaysia, the Philippines, and Singapore joining the Global Methane Pledge at COP-26, and we are accelerating technical assistance, financial resources, and project pipeline development for methane mitigation in Global Methane Pledge countries, including through the EPA, USTDA, DFC, and EXIM, as well as the newly-created Global Methane Hub, a philanthropic fund that can support methane mitigation priorities in the region.”).

³⁴⁶ United States Department of Energy Office of International Affairs (22 August 2022) *United States and Brazil Strengthen Bilateral Cooperation on Energy and Launch a New Public Private Cooperation to Promote Clean Energy*, Press Release (“The United States of America and the Federative Republic of Brazil reaffirmed today their commitment to joint energy cooperation at the second U.S.-Brazil Energy Forum (USBEP) Ministerial in Washington, D.C. Secretary of Energy Jennifer Granholm hosted the meeting with Brazil's Minister of Mines and Energy Adolfo Sachsida. The USBEP was established as a mechanism to collaborate on technical, regulatory, and policy issues of mutual interest, as well as address critical barriers to bilateral energy trade and investment. Secretary Granholm and Minister Sachsida endorsed a bilateral cooperation plan for technical, regulatory, and policy cooperation in three areas: Carbon and Methane Management, Civil Nuclear Power, and Renewables, Energy Efficiency, and Grid Modernization: • The two governments agreed to exchange expertise in carbon and methane management, and carbon sequestration and storage. • There was also agreement to continue and expand cooperation on civil nuclear power and launch new efforts on civil nuclear regulation and new nuclear power generation. • The Ministers emphasized their interest in increasing the cooperation on renewable energy and energy efficiency, particularly on strategic sectors such as clean hydrogen, offshore wind, sustainable fuels, grid modernization and storage, and industrial energy efficiency.”).

³⁴⁷ Vasconcellos R. B. (4 August 2022) *Energy Is Up on U.S.-Brazil Relations* (last visited 31 August 2022) (“Offshore wind energy is a common priority for these two continental countries, and there is fertile ground for a productive dialogue on this topic. Wind (albeit onshore) already plays an important role as a source of energy in diversifying Brazil's energy grid, ranking second (13.4%) behind only hydropower (56.7%). Meanwhile, the U.S. contribution will come from the U.S. administration's vision of wind as a key pillar of the U.S. clean energy agenda and its work towards the deployment of 30 GW of offshore wind by 2030. Collaboration on sustainable fuels is also important for the dialogue. Brazil is known for having vehicles running on ethanol derived from sugarcane since the 1970s. On the other hand, U.S. industry, inspired by the U.S. administration's ambitious goal to rapidly increase the production of sustainable aviation fuels by 2030, has a lot of knowledge to offer to Brazil and the Latin America region.”).

³⁴⁸ The Environmental Partnership, *Taking Action* (last visited 31 August 2022) (“The Environmental Partnership has developed six separate Environmental Performance Programs for participating companies to implement and phase into their operations [a pneumatic controller program, a manual liquids unloading program, a leak detection/repair program, a compressor program, a pipeline blowdown program, and a flare management program]. These programs were designed to further reduce emissions using proven, cost-effective technologies.”). See also The Environmental Partnership, *Participants* (last visited 2 August 2022).

³⁴⁹ ONE Future Coalition, *About Us* (last visited 31 August 2022) (“The ONE Future Coalition is a group of more than 50 natural gas companies working together to voluntarily reduce methane emissions across the natural gas value chain to 1% (or less) by 2025 and is comprised of some of the largest natural gas production, gathering & boosting, processing, transmission & storage and distribution companies in the U.S. and represents more than 20% of the U.S. natural gas value chain.”).

³⁵⁰ Natural Gas Sustainability Initiative (2021) *NGSI Methane Emissions Intensity Protocol Version 1.0* (“Version 1.0 of the Natural Gas Sustainability Initiative (NGSI) protocol details a methodology for companies to consistently calculate and report methane emissions intensity. The protocol is intended to support voluntary reporting by companies operating within the natural gas supply chain in the United States from onshore production through distribution. NGSI is a voluntary, industry-led initiative to advance innovative efforts to address environmental, social and governance (ESG) issues throughout the natural gas supply chain. Launched by a CEO task force on natural gas issues convened by the Edison Electric Institute (EEI) and the American Gas Association (AGA), NGSI is working to advance a voluntary, industry-wide approach for companies to report methane emissions intensity by the segments of the natural gas supply chain in which they operate.”).

³⁵¹ United States Environmental Protection Agency (4 January 2022) *Map of US Coal Mine Methane Current Projects and Potential Opportunities* (See mapping tool on U.S. Coal Mine Methane).

³⁵² United States Environmental Protection Agency (2019) *Coal Mine Methane Recovery at Active and Abandoned U.S. Coal Mines: Current Projects and Potential Opportunities* (Total, tables of underground and abandoned mines).

³⁵³ United States Energy Information Administration (last updated 29 July 2022) *U.S. Coalbed Methane Production* (See graph on U.S. Natural Gas Gross Withdrawals from Coalbed Wells. 2008: 2,022,228 million cubic feet. 2020: 821,141 million cubic feet. A conversion from million cubic feet to billion cubic meter (bcm) makes the 2008 total 57.263 bcm and the 2020 total 23.252 bcm.).

³⁵⁴ [Commission Regulation 2021/1119](#), 2021 O.J.L. (243) Article 4(1) (“In order to reach the climate-neutrality objective set out in Article 2(1), the binding Union 2030 climate target shall be a domestic reduction of net greenhouse gas emissions (emissions after deduction of removals) by at least 55 % compared to 1990 levels by 2030.”).

³⁵⁵ European Commission (14 October 2020) *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions on an EU Strategy to Reduce Methane Emissions*, 1 (“Nevertheless, the 2030 climate target plan’s impact assessment 6 found methane will continue to be the EU’s dominant non-CO₂ greenhouse. It concluded that stepping up the level of ambition for reductions in greenhouse gas emissions to at least 55% by 2030 compared to 1990 would also require an accelerated effort to tackle methane emissions, with projections indicating a step up needed to 35% to 37% methane emission reductions by 2030 compared to 2005.”).

³⁵⁶ European Commission (14 October 2020) *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions on an EU Strategy to Reduce Methane Emissions*, 4 (“A priority objective of the strategy is to ensure that companies apply considerably more accurate measurement and reporting methodologies for methane emissions, across sectors, than is currently the case. This will contribute to a better understanding of the problem and better inform subsequent mitigation measures.”).

³⁵⁷ European Commission (14 July 2021) *European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions*, Press Release (“Today, the European Commission adopted a package of proposals to make the EU’s climate, energy, land use, transport and taxation policies fit for reducing net greenhouse gas emissions by at least 55% by 2030, compared to 1990 levels. Achieving these emission reductions in the next decade is crucial to Europe becoming the world’s first climate-neutral continent by 2050 and making the [European Green Deal](#) a reality. With today’s proposals, the Commission is presenting the legislative tools to deliver on the targets agreed in the European Climate Law and fundamentally transform our economy and society for a fair, green and prosperous future.”).

³⁵⁸ European Commission (14 July 2021) *Proposal for amending Regulation (EU) 2018/842 on binding annual greenhouse gas emission reductions by Member States from 2021 to 2030*, 17 (“Regulation (EC) 2018/842 is amended as follows: (1) In Article 1, ‘30%’ is replaced by ‘40%’”).

³⁵⁹ European Commission (14 July 2021) *Proposal for amending Regulations (EU) 2018/841 and (EU) 2018/1999*, 10 (“From 2031 onwards, the LULUCF sector will include the non-CO₂ emissions from agriculture sector and the amended Regulation will aim towards the objective to achieve climate neutrality in the Union-wide greenhouse gas emissions and removals in the combined sectors at the latest by 2035; reducing emissions to net zero by that date and generating negative emissions thereafter.”).

³⁶⁰ European Environment Agency, *EEA greenhouse gases – data viewer (last visited 2 August 2022)* (Data through 2020).

³⁶¹ van der Veen R., de Vries M., van de Pol J., van Santen W., Sinke P., de Vries J., Kampman B., & Bergsma G. (2022) *METHANE REDUCTION POTENTIAL IN THE EU BETWEEN 2020 AND 2030*, CE Delft for Changing Markets Foundation, 4 (“Because most of the fossil fuels consumed in the EU are imported from other world regions, the vast majority of emissions related to EU energy use (86%) are not emitted within the EU borders. As a result, the methane emissions share of the energy sector within the EU is limited to 13%.”).

³⁶² van der Veen R., de Vries M., van de Pol J., van Santen W., Sinke P., de Vries J., Kampman B., & Bergsma G. (2022) *METHANE REDUCTION POTENTIAL IN THE EU BETWEEN 2020 AND 2030*, CE Delft for Changing Markets Foundation, 6–7 (“Our results show that the EU methane reduction targets between 2020 and 2030 cannot be realised without implementing policies that drive the uptake of behavioural and technical measures in the livestock agriculture sector. The adoption of healthier consumer diets alone could reduce EU methane emissions by 15 to 19%, if new policy initiatives would influence all EU citizens to switch to an advised diet based on national dietary health guidelines with lower meat and dairy consumption. This makes clear that the livestock agriculture sector has an important role to play in the reduction of EU methane emissions.”).

³⁶³ European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the internal markets for renewable and natural gases and for hydrogen (recast)*, 1 (“Despite their minor contribution to the current EU energy mix, biogas, biomethane, renewable and low carbon hydrogen as well as synthetic methane (all together renewable and low carbon gases) would represent some 2/3 of the gaseous fuels in the 2050 energy mix, with fossil gas with CCS/U (carbon capture, storage and utilisation) representing the remainder.”). *See also* European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on common rules for the internal markets in renewable and natural gases and in hydrogen*.

³⁶⁴ European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on common rules for the internal markets in renewable and natural gases and in hydrogen*, § 125 (“Long-term contracts are an important part of the gas supply of Member States. However, they should not constitute a barrier to the entry of renewable and low carbon gases, which is why the duration of contracts for the supply of fossil gas will not be able to run beyond 2049. Such contracts shall always be in line with the objective of this Directive and are compatible with the TFEU, including the competition rules. It is necessary to take into account long-term contracts in the planning of supply and transport capacity of undertakings.”).

³⁶⁵ European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 12 (“1. By ... [12 months from the date of entry into force of this Regulation], operators shall submit a report to the competent authorities containing source-level methane emissions estimated.... 3. By ... [36 months from the date of entry into force of this Regulation] and by 30 March every year thereafter, operators shall submit a report to the competent authorities containing direct measurements of source-level methane emissions for operated assets.... 4. By ... [36 months from the date of entry into force of this Regulation], undertakings established in the Union shall submit a report to the competent authorities containing direct measurements of source-level methane emissions for non-operated assets.... 11. The competent authorities shall make the reports set out in this Article available to the public and the Commission, within three months from submission by operators and in accordance with Article 5(4).”).

³⁶⁶ European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 6 & Art. 10 (“1. The competent authorities shall carry out periodic inspections to check the compliance of operators or mine operators with the requirements set out in this Regulation.... 2. Inspections shall include, where relevant, site checks or field audits examination of documentation and records that demonstrate compliance....”; “Provided the interest of the Union is protected, the International Methane Emissions Observatory shall be attributed a verification role with respect to methane emissions data....”).

³⁶⁷ European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 14 & Art. 15 (“[O]perators shall submit a leak detection and repair programme to the competent authorities which shall detail the contents of the surveys to be carried out in accordance with the requirements in this Article.”; “Venting shall be prohibited except in the circumstances provided for this Article. Routine flaring shall be prohibited.”).

³⁶⁸ European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 18 (“1. By [12 months from the date of entry into force of this Regulation], Member States shall establish and make publicly available an inventory of all inactive wells on their territory or under their jurisdiction.... 2. By [12 months from the date of entry into force of this Regulation], equipment for measurement of methane emissions shall be installed on all inactive wells. 3. Reports containing the measurements referred to in paragraph 2 shall be submitted to the competent authorities.... 4. The competent authorities shall make the reports set out in this Article available to the public and the Commission.... 5. Member States shall be responsible for fulfilling the obligations laid down in paragraphs 2 and 3, except where a responsible party can be identified, in which case that party shall bear responsibility.... 6. Member States shall develop and implement a mitigation plan to remediate, reclaim and permanently plug inactive wells located in their territory. Mitigation plans shall use the inventories referred to in paragraph 1 to determine priority for activities including: (a) remediating, reclaiming and permanently plugging wells; (b) reclaiming related access roads; (c) restoring land, water and habitat impacted by wells and the prior operations; (d) yearly checks to ensure plugged wells are no longer a source of methane emissions.”).

³⁶⁹ European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 25 (“Member States shall set up and make publicly available an inventory of all closed coal mines and abandoned coal mines in their territory or under their jurisdiction.... Methane concentration measurements shall be taken in accordance with appropriate scientific standards and at least on an hourly basis.... [M]easurement equipment shall be installed on all elements listed in point (v) of Part 1 of Annex VII for closed coal mines and abandoned coal mines where operations have ceased since ... [50 years prior to the date of entry into force of this Regulation].... Reports containing estimates of yearly source-level methane emissions data shall be submitted to the competent authorities....”).

³⁷⁰ European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 26 (“1. On the basis of the inventory referred to in Article 25, Member States shall develop and implement a mitigation plan to address methane emissions from abandoned coal mines.... 2. Venting and flaring from equipment referred to in Article 25(2) shall be prohibited from 1 January 2030, unless utilisation or mitigation is not technically feasible or risks endangering environmental safety or safety of operations or personnel. In such a situation, as part of the reporting obligations set out in Article 25, mine operators or Member States shall demonstrate the necessity to opt for venting or flaring instead of utilisation or mitigation.”).

³⁷¹ European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 20 (“1. For underground coal mines, mine operators shall perform continuous ventilation air methane emissions measurement and quantification on all exhaust ventilation shafts used by the mine operator.... 2. Drainage stations operators shall perform continuous measurements of volumes of vented and flared methane.... 3. As regards surface coal mines, mine operators shall use deposit-specific coal mine methane emission factors to quantify emissions resulting from mining operations.... 5. Mine operators shall estimate coal post-mining emissions using coal post-mining emission factors....”).

³⁷² European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 20 (“1. For underground coal mines, mine operators shall perform continuous ventilation air methane emissions measurement and quantification on all exhaust ventilation shafts used by the mine operator.... 2. Drainage stations operators shall perform continuous measurements of volumes of vented and flared methane.... 3. As regards surface coal mines, mine operators shall use deposit-specific coal mine methane emission factors to quantify emissions resulting from mining operations.... 5. Mine operators shall estimate coal post-mining emissions using coal post-mining emission factors....”).

³⁷³ European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 22 (“Venting and flaring of methane from drainage stations shall be prohibited from [1 January 2025], except in the case of an emergency, a malfunction or where unavoidable and strictly necessary for maintenance....”); Art. 23 (“From [1 January 2025], drainage station operators shall notify the competent authorities of all venting and flaring events: (a) caused by an emergency or a malfunction, (b) occurring unavoidably due to maintenance of the drainage system.”).

³⁷⁴ European Commission (15 December 2021) *Questions and Answers on reducing methane emissions in the energy sector*, 2 (“The proposal does not contain specific binding target reductions. However, according to the Impact Assessment for the Climate Target Plan 2030, the EU should reduce its methane emissions from energy by 58% by 2030.”).

³⁷⁵ Mohlin K., Piebalgs A., & Olczak M. (2021) *Designing an EU methane performance standard for natural gas*, European University Institute (“A methane performance standard could take the form of a mandatory requirement that all natural gas sold on the EU internal market meets a benchmark upstream emission intensity value equivalent to 0.2%.”). See also Brower D. (19 July 2021) *US gas exporters face EU methane curbs after carbon tax reprieve*, FINANCIAL TIMES.

³⁷⁶ European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on common rules for the internal markets in renewable and natural gases and in hydrogen*, §§121–122 (“(121) Natural gas is mainly, and increasingly, imported into the Union from third countries. Union law should take account of the characteristics of natural gas, such as certain structural rigidities arising from the concentration of suppliers, the long-term contracts or the lack of downstream liquidity. Therefore, more transparency is needed, including in regard to the formation of prices. (122) Prior to the adoption by the Commission of Guidelines defining further the record-keeping requirements, ACER and the Committee of European Securities Regulators (the ‘CESR’), established by Commission Decision 2009/77/EC 20, should confer and advise the Commission in regard to their content. ACER and the CESR should also cooperate to investigate further and advise on whether transactions in gas supply contracts and gas derivatives should be subject to pre- and/or post-trade transparency requirements and, if so, what the content of those requirements should be.”).

³⁷⁷ European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 27–29 (“Article 27. Importer Requirements. 1. By ... [9 months from the date of entry into force of the Regulation] and by 31 December every year thereafter, importers shall provide the information set out in Annex VIII to the competent authorities of the importing Member State.... 2. By ... [12 months from the date of entry into force of the Regulation] and by 30 June every year thereafter, Member States shall submit to the Commission the information provided to them by importers. The Commission shall make the information available in accordance with Article 28. Article 28. Methane transparency database. (1) By ... [18 months after the date of entry into force of the Regulation] the Commission shall establish and maintain a methane transparency database containing the information submitted to it pursuant to Article 27 and Articles 12(11), 16(3), 18(4), 20(7), 23(2) and 25(5).... Article 29. Methane emitters global monitoring tool (1) By ... [two years after the date of entry into force of the Regulation], the Commission shall establish a global methane monitoring tool based on satellite data and input from several certified data providers and services, including the Copernicus component of the EU Space Programme.”).

³⁷⁸ Eurostat (2021) *Energy production and imports* (“Between 2009 and 2019, some variations were noticed on the energy dependency rate: a maximum of 60.7 % was registered in 2019, while 53.9 % was the lowest dependency registered in 2013. Looking in more detail, the highest rates in 2019 were recorded for crude oil (96.8 %) and for natural gas (89.7 %), while the latest rate available for solid fossil fuels was 44 %.”) (See Table 3 for breakdown by source.).

³⁷⁹ In 2020, the EU established “criteria for determining whether an economic activity qualifies as environmentally sustainable” for the purposes of establishing the sustainability of investments. *See* European Commission (22 June 2020) Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment, and amending Regulation (EU) 2019/2088, 2020 O.J. (L 198) 13, Art. 1 (“This Regulation establishes the criteria for determining whether an economic activity qualifies as environmentally sustainable for the purposes of establishing the degree to which an investment is environmentally sustainable.”). *See also* European Commission Delegated regulation (EU) 2022/1214 of 9 March 2022 amending Delegated Regulation (EU) 2021/2139 as regards economic activities in certain energy sectors and Delegated Regulation (EU) 2021/2178 as regards specific public disclosures for those economic activities (Text with EEA relevance) Annex I, § 4.29 (“Construction or operation of electricity generation facilities that produce electricity using fossil gaseous fuels. This activity does not include electricity generation from the exclusive use of renewable non-fossil gaseous and liquid fuels as referred to in Section 4.7 of this Annex and biogas and bio-liquid fuels as referred to in Section 4.8 of this Annex.... An economic activity in this category is a transitional activity as referred to in Article 10(2) of Regulation (EU) 2020/852 where it complies with the technical screening criteria set out in this Section..”); *discussed in* Alderman L. & Pronczuk M. (2 January 2022) *Europe Plans to Say Nuclear Power and Natural Gas Are Green Investments*, THE NEW YORK TIMES (“France led a coalition this year that included nations in Eastern Europe—the continent’s most coal-dependent region—to get nuclear energy and natural gas classified as sustainable investments. Poland, Hungary, Bulgaria and Romania are among the countries that want to attract more investment for nuclear power as they move away from fossil fuels. Germany, on the other side, along with Austria, Luxembourg, Portugal and Denmark have expressed concerns about a buildup of nuclear power plants and the radioactive waste they produce.... Tsvetelina Kuzmanova, an expert on sustainable finance and a policy adviser at E3G, a Brussels think tank, said including nuclear and natural gas in the taxonomy amounted to ‘calling something that isn’t green, green.’”).

³⁸⁰ European Commission (14 October 2020) *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions on an EU Strategy to Reduce Methane Emissions*, 11 (“The Commission will deliver legislative proposals in 2021 on: • Compulsory measurement, reporting, and verification (MRV) for all energy related methane emissions, building on the Oil and Gas Methane Partnership (OGMP 2.0) methodology. • Obligation to improve leak detection and repair (LDAR) of leaks on all fossil gas infrastructure, as well as any other infrastructure that produces, transports or uses fossil gas, including as a feedstock. (7) The Commission will consider legislation on eliminating routine venting and flaring in the energy sector covering the full supply chain, up to the point of production. (8) The Commission will work to extend the OGMP framework to more companies in the gas and oil upstream, midstream and downstream as well as to the coal sector and closed as well as abandoned sites. (9) The Commission will promote remedial work under the initiative for Coal Regions in Transition. Best-practice recommendations and/or enabling legislation will be brought forward if necessary.”).

³⁸¹ European Commission (14 October 2020) *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions on an EU Strategy to Reduce Methane Emissions*, 4 (“A priority objective of the strategy is to ensure that companies apply considerably more accurate measurement and reporting methodologies for methane emissions, across sectors, than is currently the case. This will contribute to a better understanding of the problem and better inform subsequent mitigation measures (26).”).

³⁸¹ European Commission (14 October 2020) *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions on an EU Strategy to Reduce Methane Emissions*, 3 (“In the waste sector, the main identified sources of methane are uncontrolled emissions of landfill gas in landfill sites, the treatment of sewage sludge and leaks from biogas plants due to poor design or maintenance. Emissions from the landfilling of waste fell by 47% between 1990 and 2017 (24), following better compliance with EU waste legislation on emissions from landfill. This was achieved primarily by diverting biodegradable waste to other waste treatment options higher in the waste hierarchy (25) such as composting and anaerobic digestion, as well as ensuring the stabilisation of biodegradable waste before disposal. However, more stringent compliance practices are needed to further reduce methane emissions from waste.”).

³⁸² Executive Body Working Group on Strategies and Review (30 September 2020) *Preparations for the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2020/3 – EBE/EB.AIR/WG.5/2020/3 at ¶ 20, (“As per the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond (paragraph 50), the review should look at appropriate steps towards reducing emissions of black carbon, ozone precursors

not yet addressed such as methane, and emissions from shipping with due consideration for International Maritime Organization (IMO) policies and measures... In line with the priorities identified in the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond, the following should specifically be considered in answering the questions in annex I:(b) Hemispheric transport of ozone and particulate matter and their precursors and advancing efforts to address air pollution on a broader scale per paragraphs 63 and 78 of the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond; health and ecosystem impacts from outside the ECE region; (c) Methane and its relationship to the hemispheric transport of ozone and its contribution to ozone in the ECE region;”).

³⁸³ International Energy Agency (3 March 2022) *A 10-Point Plan to Reduce the European Union’s Reliance on Russian Natural Gas*, 4 (“Europe’s reliance on imported natural gas from Russia has again been thrown into sharp relief by Russia’s invasion of Ukraine on 24 February. In 2021, the European Union imported an average of over 380 million cubic metres (mcm) per day of gas by pipeline from Russia, or around 140 billion cubic metres (bcm) for the year as a whole. As well as that, around 15 bcm was delivered in the form of liquefied natural gas (LNG). The total 155 bcm imported from Russia accounted for around 45% of the EU’s gas imports in 2021 and almost 40% of its total gas consumption.”).

³⁸⁴ European Commission (8 March 2022) *REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy*, 52022DC0108, 1 (“The EU needs to be ready for any scenario. It can reach independence from Russian gas well before the end of the decade. The sooner and more decisively we diversify our supply, accelerate the roll out of green energy technologies and reduce our demand of energy, the earlier we can substitute Russian gas. This communication sets out new actions to ramp up the production of green energy, diversify supplies and reduce demand, focusing primarily on gas, which significantly influences the electricity market and where the global market is less liquid. The focus can be extended to phasing out dependence on Russian oil and coal, for which the EU has a broader diversity of potential suppliers. Accelerating the green transition will reduce emissions, reduce dependency on imported fossil fuels, and protect against price hikes.”).

³⁸⁵ European Commission (23 March 2022) *Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Regulation (EU) 2017/1938 of the European Parliament and of the Council concerning measures to safeguard the security of gas supply and Regulation (EC) n°715/2009 of the European Parliament and of the Council on conditions for access to natural gas transmission networks*, Art. 6a (“(2) For 2022, the filling target shall be set at 80% of the capacity of all storage facilities on the territory of the respective Member States. Unless the Commission decides otherwise pursuant to paragraph 4, the filling target shall be set at 90% for the following years.”).

³⁸⁶ European Commission (23 March 2022) *Security of supply and affordable energy prices: Options for immediate measures and preparing for next winter*, Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions, 4–5 (“The Commission stands ready to create a Task Force on common gas purchases at EU level. By pooling demand, the Task Force would facilitate and strengthen EU’s international outreach to suppliers of LNG and of gas, with the view to secure well-priced LNG and gas imports ahead of next winter. The EU can better ensure LNG, gas and hydrogen at affordable prices from third countries in the short term, if it engages with those countries on the long term, setting up long-term renewable gas partnerships which would also lay the basis for future hydrogen imports Thus, the Task Force will prepare the ground for energy partnerships with key suppliers of LNG, gas and hydrogen.”).

³⁸⁷ White House (25 March 2022) *Joint Statement between the United States and the European Commission on European Energy Security*, Statements and Releases (“The United States and European Commission will undertake efforts to reduce the greenhouse gas intensity of all new LNG infrastructure and associated pipelines, including through the use of clean energy to power onsite operations, the reduction of methane leakage, and the construction of clean and renewable hydrogen ready infrastructure. The United States commits to maintaining an enabling regulatory environment with procedures to review and expeditiously act upon applications to permit any additional export LNG capacities that would be needed to meet this emergency energy security objective and support the RePowerEU goals, affirming the joint resolve to terminate EU dependence on Russian fossil fuels by 2027. The European Commission will work with the governments of EU Member States to accelerate their regulatory procedures to review and determine approvals for LNG import infrastructure, to include onshore facilities and related pipelines to support imports using floating storage regasification unit vessels, and fixed LNG import terminals.”).

³⁸⁸ White House (8 May 2022) *G7 Leaders' Statement*, Statements and Releases (“a. First, we commit to phase out our dependency on Russian energy, including by phasing out or banning the import of Russian oil. We will ensure that we do so in a timely and orderly fashion, and in ways that provide time for the world to secure alternative supplies. As we do so, we will work together and with our partners to ensure stable and sustainable global energy supplies and affordable prices for consumers, including by accelerating reduction of our overall reliance on fossil fuels and our transition to clean energy in accordance with our climate objectives.”).

³⁸⁹ European Commission (18 May 2022) *Joint Communication to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions in EU external energy engagement in a changing world*, 3 (“Before this summer, the EU aims to conclude a trilateral agreement with Egypt and Israel on supplying Europe with LNG. Japan and Korea have already redirected a number of LNG cargoes to Europe and work continues to use this option in the future. Qatar stands ready to facilitate swaps with Asian countries. In terms of pipeline gas, Norway has already increased its deliveries to Europe and both Algeria and Azerbaijan have expressed their willingness to do so as well. The EU will aim to restart the energy dialogue with Algeria and will intensify cooperation with Azerbaijan in the light of the strategic importance of the Southern Gas Corridor. Scaling up the Trans Adriatic Pipeline (TAP) capacity would increase the gas supply to the EU and the Western Balkan countries.”).

³⁹⁰ European Commission (18 May 2022) *Joint Communication to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions in EU external energy engagement in a changing world*, 4 (“The EU will aim to ensure that additional gas supplies from existing and new gas suppliers are coupled with targeted actions to tackle methane leaks and to address venting and flaring, creating additional liquidity on global markets, while ensuring significant climate benefits. To that end, the EU will cooperate with its fossil fuel supply partners to reduce methane emissions. At least 46 bcm of natural gas is lost a year to venting and flaring in the countries that could be supplying this to the EU. The technology exists to capture most of this methane (the main component of natural gas) in a sustainable and economical way. The EU stands ready to provide technical assistance to partners to set up such mutually beneficial “You collect/we buy” schemes. The EU will also convene partners such as the European Investment Bank (EIB), the European Bank for Reconstruction and Development (EBRD) and the World Bank to create incentives for the rapid collection of wasted fossil gases, including methane, bundling those losses into meaningful products that can be sold to international buyers.”).

³⁹¹ European Commission (15 June 2022) *Memorandum of Understanding on Cooperation Related to Trade, Transport, and Export of Natural Gas to the European Union*, 2 (“The Sides [European Union, Arab Republic of Egypt, and the State of Israel] will endeavour to work collectively towards enabling a stable delivery of natural gas to the EU that is consistent with long-term decarbonisation objectives and is based on the principle of market-oriented pricing, to the extent that it coincides with each Side’s domestic laws, regulations, policies and procedures.”). *See also* European Commission (18 July 2022) *EU and Azerbaijan enhance bilateral relations, including energy cooperation*, press release (“The new Memorandum of Understanding on a Strategic Partnership in the Field of Energy signed by the two Presidents today includes a commitment to double the capacity of the Southern Gas Corridor to deliver at least 20 billion cubic metres to the EU annually by 2027. This will contribute to the diversification objectives in the REPowerEU Plan and help Europe to end its dependency on Russian gas. Based on the strengthened energy cooperation, Azerbaijan is already now increasing deliveries of natural gas to the EU, from 8.1 billion cubic metres in 2021 to an expected 12 bcm in 2022.”).

³⁹² European Commission (18 May 2022) *Joint Communication to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions in EU external energy engagement in a changing world*, 5 (“In order to facilitate imports of 10 million tonnes of hydrogen into the EU, the European Commission aims to conclude hydrogen partnerships with reliable partner countries to ensure open and undistorted trade and investment relations for renewable and low carbon fuels.”).

³⁹³ European Commission (18 May 2022) *Joint Communication to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions in EU external energy engagement in a changing world*, 8 (“As the EU moves away from Russian energy supply, it will prioritise energy savings and efficiency, aiming to achieve a 5% reduction in oil and gas demand in the short term. This will decrease the price and demand pressure on the global markets. The EU will also work with international partners to make energy savings and efficiency a global priority. Together with other developed economies, the EU will in particular focus on reducing energy consumption, among other things building on the IEA Playing My Part campaign.”).

³⁹⁴ Howarth R. W. & Jacobson M. Z. (2021) *How green is blue hydrogen?*, ENERGY SCI. ENG. 9(10): 1676–1687, 1676 (“For our default assumptions (3.5% emission rate of methane from natural gas and a 20-year global warming potential), total carbon dioxide equivalent emissions for blue hydrogen are only 9%-12% less than for gray hydrogen. While carbon dioxide emissions are lower, fugitive methane emissions for blue hydrogen are higher than for gray hydrogen because of an increased use of natural gas to power the carbon capture. Perhaps surprisingly, the greenhouse gas footprint of blue hydrogen is more than 20% greater than burning natural gas or coal for heat and some 60% greater than burning diesel oil for heat, again with our default assumptions. In a sensitivity analysis in which the methane emission rate from natural gas is reduced to a low value of 1.54%, greenhouse gas emissions from blue hydrogen are still greater than from simply burning natural gas, and are only 18%-25% less than for gray hydrogen. Our analysis assumes that captured carbon dioxide can be stored indefinitely, an optimistic and unproven assumption. Even if true though, the use of blue hydrogen appears difficult to justify on climate grounds.”).

³⁹⁵ Ocko I. B. & Hamburg S. P. (2022) *Climate consequences of hydrogen leakage*, ATMOS. CHEM. PHYS. 22(14): 9349–9368, 9362, 9367 (“We found that hydrogen’s warming potency strongly depends on the time horizon and (similar to methane) can be at least 3 times more potent in the near term than in the long term relative to carbon dioxide when using the traditional GWP framework with pulses of equal emissions. If a constant emission rate is used in the calculations instead, hydrogen’s warming potency may be 50 % higher for time horizons of several decades or longer. When assessing the relative climate impacts of replacing fossil fuel technologies with their hydrogen alternatives (based on a unit of clean H₂ deployed relative to the avoided CO₂ emissions for a generic case), we found that there are vastly different climate outcomes depending on emission rates, time horizons, and production method. For example, blue hydrogen with high hydrogen and methane emissions (a 10 % and 3 % emission rate, respectively) can be worse for the climate for decades compared with fossil fuel technologies, but green hydrogen with low hydrogen emissions (1 %) can nearly eliminate climate impacts from its fossil fuel counterparts over all timescales. On the other hand, the best-case blue hydrogen alternative (1 % for both hydrogen and methane) can show roughly the same climate benefits as the worst-case green hydrogen alternative (10 % emissions) – far from climate neutral but still halving the impacts of its fossil fuel counterparts within a decade. However, the perceived benefits of clean hydrogen alternatives compared with fossil fuel technologies will depend on how much carbon dioxide and methane are avoided, which needs to be assessed on a case-by-case basis with reliable emission data. Finally, we found that a level of hydrogen demand around 800 Tg or above (which could account for around a quarter of the final energy demand in 2050) could contribute at least 0.1 °C of warming with high hydrogen leakage (10 %) and upper-bound uncertainties in hydrogen’s radiative properties.”; “If hydrogen applications supply around half of final energy demand globally in 2050 (an upper estimate by BloombergNEF (2020)), hydrogen applications could cause at least a tenth of a degree (C) of warming for 10% leakage. For context, this amount of warming could offset the avoided warming in 2050 from deploying all cost-effective options to mitigate methane emissions globally over the next decade – which otherwise could have slowed down global-mean warming rates by up to 15% (Ocko et al., 2021), or the avoided warming anticipated from the phasing out of hydrofluorocarbons (HFCs) (Xu et al., 2013). This amount of warming (~0.1 °C) is also equal to the amount of warming projected in 2100 from carbon dioxide emissions from international shipping and aviation combined in the absence of climate action (Ivanovich et al., 2019). However, if leakage does not exceed 1% the temperature response could be an order of magnitude smaller.”). See also Hamburg S. & Ocko I. (7 March 2022) *For hydrogen to be a climate solution, leaks must be tackled*, ENVIRONMENTAL DEFENSE FUND.

³⁹⁶ Warwick N., Griffiths P., Archibald A., & Pyle J. (2022) *Atmospheric implications of increased hydrogen use*, UK Met Office, 9 (“When only hydrogen increases in our model experiments, we calculate an effective radiative forcing of 0.148 W m⁻² for an increase in hydrogen of 1.5 ppm; when the methane lower boundary is increased by 340 ppb, consistent with the decrease in hydroxyl radicals, the radiative forcing approaches 0.5 W m⁻² (a warming tendency). In contrast, if there is no leakage of hydrogen into the atmosphere, and methane and other co-emissions are reduced, the change in radiative forcing is -0.29 W m⁻² (a cooling tendency). Assuming an equilibrium climate sensitivity of 0.86 K W⁻¹ m², this level of radiative forcing if sustained would lead to global-mean temperature changes of 0.12, 0.43 and -0.26 °C (without accounting for the reduced emissions of carbon dioxide that would result).”).

³⁹⁷ Government of Canada (2021) *Canada’s 2021 Nationally Determined Contribution under the Paris Agreement*, 1, 26 (“Through this submission, the Government of Canada is pleased to update its nationally determined contribution (NDC) under the Paris Agreement. Canada’s updated NDC is to reduce emissions by 40-45% below 2005 levels by 2030, a substantial increase of ambition beyond Canada’s original NDC, as previously communicated upon ratifying the Paris Agreement in 2016. Additionally, Canada is committed to reducing its emissions to net-zero by 2050. Canada’s enhanced

NDC, and accompanying information for clarity, transparency, and understanding, are further outlined in Annex 1 to this submission. Annex 2 outlines provincial and territorial climate action and Annex 3 outlines Indigenous climate action.”; “Alberta: Climate Goals: Through regulatory measures, Alberta will reduce methane emissions from upstream oil and gas production by 45%, from 2014 levels, by 2025.”). See also Government of Canada (2017) *Canada’s 2017 Nationally Determined Contribution Submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 3 (“To reduce emissions from industrial sectors, Canada is developing regulations to achieve a reduction of methane emissions from the oil and gas sector, including offshore activities, by 40–45 percent by 2025.”).

³⁹⁸ Environment and Climate Change Canada (11 October 2021) *Canada confirms its support for the Global Methane Pledge and announces ambitious domestic actions to slash methane emissions*, News Release (“The International Energy Agency has made it clear that curbing methane emissions from oil and gas operations represents one of the best near-term opportunities for limiting the worst impacts of climate change and has called on countries and companies to reduce methane emissions from the sector by 75% below 2012 levels by 2030. At the Meeting, the Minister noted the importance of the 75% goal and called on other oil-producing nations to join Canada in adopting it.”).

³⁹⁹ Environment and Climate Change Canada (2019) *Regulations Respecting Reduction in the Release of Methane and Certain Volatile Organic Compounds (Upstream Oil and Gas Sector)* (“Companies must register their facilities before April 30th, 2020, or within 120 days of when the facility begins to be covered by any of the requirements. There are also provisions in the regulations to retain information for record-keeping, inspection purposes, and for on-demand reporting to Environment and Climate Change Canada. Regulatory requirements for fugitive equipment leaks, venting from well completions, and compressors, come into force on January 1, 2020. Regulatory requirements for facility production venting restrictions and venting limits for pneumatic equipment come into force on January 1, 2023.”).

⁴⁰⁰ Environment and Climate Change Canada (6 April 2022) *Government of Canada to develop guidance for best-in-class new oil and gas projects and net-zero emissions requirements by 2050*, Press Release (“To remain competitive in a global market that is moving away from fossil fuels combustion to address climate change and enhance energy security, new Canadian oil production subject to federal impact assessment will have to meet even higher standards. New projects would have to deliver emissions performance—the amount of greenhouse gas pollution it takes to produce a barrel of oil or cubic metre of natural gas—that is best in class, and all future oil and gas projects would have to be net zero by 2050.”).

⁴⁰¹ Environment and Climate Change Canada (11 October 2021) *Canada confirms its support for the Global Methane Pledge and announces ambitious domestic actions to slash methane emissions*, News Release (“Globally, agriculture and landfills are among the largest sources of methane emissions. The 2030 objective in the Pledge is expected to help prevent over 20 million tonnes of crop losses a year by 2030 by reducing ground-level ozone pollution, caused in part by methane. The Government of Canada is committed to supporting Canadian farmers and industry partners who are taking action to reduce emissions, sequester carbon and make their operations more sustainable, productive and competitive. This includes through investments in new programs, such as the Agricultural Climate Solutions initiative and the Agricultural Clean Technology Program, which aim to help farmers adopt new, beneficial management practices and clean technologies to boost productivity and lower emissions—including from methane. The Government is also committed to developing an approach to increase the number of landfills that collect and treat methane, and ensure existing systems capture as many methane emissions as possible.”).

⁴⁰² Environment and Climate Change Canada (2019) *Taking Stock: Reducing Food Loss and Waste in Canada*, 24 (“The Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME) has traditionally played a role in promoting a coordinated approach for provincial and territorial authorities on waste issues through the Waste Reduction and Recovery Committee. Organic waste has been one area of focus in recent years.”).

⁴⁰³ Environment and Climate Change Canada (2019) *Taking Stock: Reducing Food Loss and Waste in Canada*, 24 (“British Columbia’s Climate Leadership Plan which set a food waste prevention target of 30% by 2050. Guidance prepared to support the development of Municipal Waste Management Plans required under the Environmental Management Act encourages regional districts to plan for food waste reduction as part of their waste management plans.”).

⁴⁰⁴ Environment and Climate Change Canada (2019) *Taking Stock: Reducing Food Loss and Waste in Canada*, 24 (“Ontario’s Food and Organic Waste Policy Statement includes proposed activities such as: developing awareness and education tools; directing food retailers and businesses to reduce food waste in their own operations; and working with

schools to educate children on preventing and reducing food waste. Quebec's Politique bioalimentaire 2018-2025 commits to reducing waste and food losses, and promoting food donations. Recyc-Quebec included the reduction of food loss and waste in its 2016 action plan on source reduction (with actions targeting both household waste and industry waste) to contribute to the objectives of the Quebec Residual Materials Management Policy. Recyc-Quebec has also partnered with the National Zero Waste Council (NZWC) on the Love Food Hate Waste (LFHW) campaign and works with municipalities to reduce both food and organic waste going to landfill.”).

⁴⁰⁵ Environment and Climate Change Canada (2019) *Taking Stock: Reducing Food Loss and Waste in Canada*, 6 (“Tax credits that support agricultural food donation activities are offered in British Columbia, Ontario, Quebec and Nova Scotia to help offset the cost to harvest, package, and store surplus harvest for donation.”).

⁴⁰⁶ Agriculture and Agri-Food Canada, *Agricultural Climate Solutions* (last visited 31 August 2022) (“Agricultural Climate Solutions (ACS) is a multi-stream program that will help to develop and implement farming practices to tackle climate change. Through agricultural practices, such as shelterbelts or cover crops, farmland can store carbon and reduce greenhouse gas emissions. ACS is a program under the more than \$4 billion [Natural Climate Solutions Fund](#). Agriculture and Agri-Food Canada (AAFC) is partnering with Natural Resources Canada (NRCan) and Environment and Climate Change Canada (ECCC) to develop projects that invest in natural climate solutions, including NRCan's [2 Billion Trees program](#) and ECCC's [Nature Smart Climate Solutions Fund](#). These solutions will contribute to meeting Canada's greenhouse gas reduction targets and provide benefits towards the well-being of all Canadians.”).

⁴⁰⁷ Agriculture and Agri-Food Canada, *Agricultural Clean Technology Program: Adoption Stream: Applicant Guide* (last visited 31 August 2022) (“bioeconomy solutions that use agricultural waste and by-products to generate energy or create bio-products, including: • purchase and installation of technologies and equipment to support improved manure management and processing waste into bioenergy products and other useful outputs, including: • Anaerobic digesters for processing agricultural waste into bioenergy • Bio-product boiler systems for heating greenhouses and nurseries”).

⁴⁰⁸ Canada Office of the Prime Minister (23 February 2021) *Roadmap for a Renewed U.S.-Canada Partnership* (“The leaders reaffirmed the shared commitment to reducing oil and gas methane emissions to protect public health and the environment, as guided by the best science.”).

⁴⁰⁹ Executive Body Working Group on Strategies and Review (30 September 2020) *Preparations for the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2020/3 – EBE/EB.AIR/WG.5/2020/3 at ¶ 20, (“As per the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond (paragraph 50), the review should look at appropriate steps towards reducing emissions of black carbon, ozone precursors not yet addressed such as methane, and emissions from shipping with due consideration for International Maritime Organization (IMO) policies and measures... In line with the priorities identified in the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond, the following should specifically be considered in answering the questions in annex I:(b) Hemispheric transport of ozone and particulate matter and their precursors and advancing efforts to address air pollution on a broader scale per paragraphs 63 and 78 of the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond; health and ecosystem impacts from outside the ECE region; (c) Methane and its relationship to the hemispheric transport of ozone and its contribution to ozone in the ECE region;”).

⁴¹⁰ Government of Mexico, Agency for Safety, Energy and Environment (6 November 2018) *DISPOSICIONES Administrativas de carácter general que establecen los Lineamientos para la prevención y el control integral de las emisiones de metano del Sector Hidrocarburos* (“Que la información disponible a nivel internacional y nacional ha demostrado que, implementando mejoras operativas y tecnológicas disponibles, es factible reducir las emisiones de metano en el Sector Hidrocarburos. En ese sentido, la Agencia Internacional de Energía en la publicación *Perspectiva Mundial de la Energía 2017*, concretamente en lo relativo al caso ambiental del gas natural, reconoce que, aplicando las mejores prácticas internacionales, tales como las que este instrumento regulatorio integra, es factible y posible que a nivel mundial el sector reduzca las emisiones de metano hasta en un 75%.”); *discussed in* Clean Air Task Force (13 November 2018) *Mexico Takes a Giant Leap Forward in Regulating Methane Emissions*, Press Release; and Del Rio D., Evangelista R., & Arrieta Maza M. (21 November 2018) *Mexico: Program For The Prevention And Comprehensive Management Of Methane Emissions Within The Hydrocarbon Sector (“PPCIEM”)*, MONDAQ.

⁴¹¹ Government of Mexico (2015) *Intended Nationally Determined Contribution*, 11 (“The energy and industry sectors intend to: ... 25% reduction in methane leaks, venting and controlled combustion... In the urban sector: ... methane recovery and use in municipal landfills and water treatment plans.”).

⁴¹² Government of Mexico (2015) *Intended Nationally Determined Contribution*, 22 (“Mexico is unconditionally committed to reduce its greenhouse gas (GHG) emissions by 22% and its black carbon emissions by 51% by 2030 compared to a baseline under a business-as-usual (BAU) scenario. In addition, conditional commitments would allow for increased emissions mitigation, reaching a target of up to 36% reduction of GHG emissions and 70% of black carbon emissions by 2030 compared to the BAU.”).

⁴¹³ Government of Mexico, Ministry of Environment and Natural Resources (2020) *Nationally Determined Contribution: 2020 Update*, 27 (“A partir de procesos de consulta y de transversalización de la NDC, se han identificado acciones que fomentarán la optimización de los procesos de los sistemas de refinación y procesamiento, así como la implementación de la Política de Reducción de Emisiones de Metano.”) (“Based on consultation processes and the transversalities of the NDC, actions that will promote the optimization of the processes of the refining and processing systems have been identified, including the implementation of the Methane Emissions Reduction Policy.”) (in Spanish).

⁴¹⁴ Shen L., Zavala-Araiza D., Gautam R., Omara M., Scarpelli T., Sheng J., Sulprizio M. P., Zhuang J., Zhang Y., Qu Z., Lu X., Hamburg S. P., & Jacob D. J. (2021) *Unravelling a large methane emission discrepancy in Mexico using satellite observations*, REMOTE SENS. ENVIRON. 260(112461): 1–9, 1 (“Using TROPOMI measurements from May 2018 to December 2019, our methane emission estimates for eastern Mexico are $5.0 \pm 0.2 \text{ Tg a}^{-1}$ for anthropogenic sources and $1.5 \pm 0.1 \text{ Tg a}^{-1}$ for natural sources, representing 45% and 34% higher annual methane fluxes respectively compared to the most recent estimates based on the Mexican national greenhouse gas inventory. Our results show that Mexico’s oil and gas sector has the largest discrepancy, with oil and gas emissions ($1.3 \pm 0.2 \text{ Tg a}^{-1}$) higher by a factor of two relative to bottom-up estimates—accounting for a quarter of total anthropogenic emissions.”).

⁴¹⁵ Zavala-Araiza D., et al. (2021) *A tale of two regions: methane emissions from oil and gas production in offshore/onshore Mexico*, ENVIRON. RES. LETT. 16(2): 024019, 1–11, 1 (“We use atmospheric observations to quantify methane (CH₄) emissions from Mexico’s most important onshore and offshore oil and gas production regions which account for 95% of oil production and 78% of gas production. We use aircraft-based top-down measurements at the regional and facility-levels to determine emissions. Satellite data (TROPOMI CH₄ data and VIIRS night-time flare data) provide independent estimates of emissions over 2 years. Our airborne estimate of the offshore region’s emissions is $2800 \text{ kg CH}_4 \text{ h}^{-1}$ (95% confidence interval (CI): $1700\text{--}3900 \text{ kg CH}_4 \text{ h}^{-1}$), more than an order of magnitude lower than the Mexican national greenhouse gas inventory estimate. In contrast, emissions from the onshore study region are $29\,000 \text{ kg CH}_4 \text{ h}^{-1}$ (95% CI: $19\,000\text{--}39\,000 \text{ kg CH}_4 \text{ h}^{-1}$), more than an order of magnitude higher than the inventory. One single facility—a gas processing complex that receives offshore associated gas—emits $5700 \text{ kg CH}_4 \text{ h}^{-1}$ (CI: $3500\text{--}7900 \text{ kg CH}_4 \text{ h}^{-1}$), with the majority of those emissions related to inefficient flaring and representing as much as half of Mexico’s residential gas consumption. This facility was responsible for greater emissions than the entirety of the largest offshore production region, suggesting that offshore-produced associated gas is being transported onshore where it is burned and in the process some released to the atmosphere. The satellite-based data suggest even higher emissions for the onshore region than did the temporally constrained aircraft data (>20 times higher than the inventory). If the onshore production region examined is representative of Mexican production generally, then total CH₄ emissions from Mexico’s oil and gas production would be similar to, or higher than, the official inventory, despite the large overestimate of offshore emissions.”); discussed in Glover A. (25 January 2021) *Climate Scientists Record Extremely High Methane Emissions Across the Gulf states of Mexico*, ENVIRONMENTAL DEFENSE FUND.

⁴¹⁶ United States Embassy & Consulates in Mexico (9 February 2022) *Special Presidential Envoy for Climate John Kerry Visits Mexico City*, Press Release (“The two sides agreed that they would expeditiously implement high-level dialogue on the implementation of these goals through the formation of a U.S.-Mexico Climate and Clean Energy Working Group, including key agencies on both sides. The policy focus areas will include, as listed in the October Joint Statement, accelerating renewable energy development including solar supply chains, tackling methane emissions from oil and gas, waste, and agriculture, reducing transportation emissions through electrification and other strategies, eliminating deforestation and supporting nature-based solutions, and Nationally Determined Contributions.”).

⁴¹⁷ White House (12 July 2022) *President Biden and President Lopez Obrador Joint Statement*, Statements and Releases (“We commit to tackle methane emissions from oil and gas and other sectors, accelerate the transition to zero-emission vehicles, and deepen our efforts to seek nature-based solutions, enabling our two countries to become global leaders in clean energies and actions to combat climate change. In support of the Global Methane Pledge and Global Methane Pledge Energy Pathway, Mexico and Pemex, in cooperation with the U.S., will develop an implementation plan to eliminate routine flaring and venting across onshore and offshore oil and gas operations and identify priority projects for investment.”).

⁴¹⁸ Irakulis-Loitxate I., Gorroño J., Zavala-Araiza D., & Guanter L. (2022) *Satellites Detect a Methane Ultra-emission Event from an Offshore Platform in the Gulf of Mexico*, ENVIRON. SCI. TECHNOL. LETT. 9(6): 520–25, 520 (“The study site is an offshore oil and gas production platform in the Gulf of Mexico, near the coast of Campeche, in one of Mexico’s major oil producing fields. Our data suggest that the platform vented high volumes of methane during a 17-day ultra-emission event, amounting to 0.04 ± 0.01 Tg of methane (equivalent to 3.36 million tons of carbon dioxide) released to the atmosphere if integrated over time.”). Additional emissions from the same platform were detected in August. See Eschenbacher S. (2 September 2022) *Exclusive-Scientists detect second ‘vast’ methane leak at Pemex oil field in Mexico*, REUTERS.

⁴¹⁹ Government of India, Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2021) *India: Third Biennial Update Report to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 11 (“In 2016 India’s total GHG emissions, excluding Land Use Land-Use Change and Forestry (LULUCF) were 2,838.89 million tonnes CO₂e and 2,531.07 million tonnes CO₂e with the inclusion of LULUCF. Carbon dioxide emissions accounted for 2,231 million tonnes (78.59 per cent), methane emissions for 409 million tonnes CO₂e (14.43 per cent) and nitrous oxide emissions for 145 million tonnes CO₂e (5.12 per cent”). Note for reporting purposes, India uses a GWP₁₀₀ for CH₄ of 21, per Table 2.2 (“All calculations in the present report use the Global Warming Potential (GWP) of GHGs for 100 years, IPCC AR2 (IPCC, 1995).”).

⁴²⁰ Government of India, Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2021) *India: Third Biennial Update Report to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 163 (“The main GHG emissions from the agriculture sector are methane from livestock’s enteric fermentation and rice cultivation and nitrous oxide from manure management and agriculture soil. The Agriculture sector represented 14 per cent of the total GHG emissions (4,07,821 GgCO₂e) in 2016, a decrease of 2.25 per cent since 2014.”).

⁴²¹ Government of India, Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2021) *India: Third Biennial Update Report to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 247 (“SRI is a promising and resource-saving method of rice cultivation. Studies have shown a significant increase in rice yield, with substantial savings of seeds (80-90 per cent), water (25-50 per cent), and cost (10-20 per cent) compared to conventional methods (Uphoff, 2011), and reduction in CH₄ emissions. As part of the National Food Security Mission (NFSM), SRI is being implemented in 193 districts of 24 States.”).

⁴²² Government of India, Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2021) *India: Third Biennial Update Report to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 279 (“Area covered under DSR in 2017-18 and 2018-19 is 99,964 ha. It has led to reduction of 0.099 MtCO₂e in 2017- 18 and 2018-19.”).

⁴²³ Government of India, Ministry of Environment, Forest and Climate Change, (2021) *India: Third Biennial Update Report to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 247 (“Given the high water requirement of paddy crop and consequent decline in groundwater and high energy requirement in the traditional green revolution states such as Punjab, Haryana, and Uttar Pradesh, diversification from paddy to other crops was envisaged. The main objectives of the programme are to demonstrate and promote the improved production technologies of alternate crops and to restore soil fertility through the cultivation of leguminous crops. Due to the stagnancy in crop yields, the decline in soil quality, the incidence of pests and diseases due to continuous paddy cultivation in the three States, Punjab, Haryana, and Uttar Pradesh, diversion of paddy cultivation to other crops has become essential. This enables the reduction of the CH₄ emissions associated with paddy production. The budgetary allocation for this programme during 2018-19 was INR 1.328 million. A total area of 81,816 ha has been diversified from paddy to other crops in 2017-18 and 2018-19 (DAC&FW, 2020).”).

⁴²⁴ Government of India, Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2021) *India: Third Biennial Update Report to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 250–251 (“**3.7.9 Mission for Integrated Development of Horticulture (MIDH)** The horticulture sector consists of a wide range of crops such as fruits, vegetables, flowers, spices, and nuts of which the fruit crops produce relatively higher biomass and are retained in the field for a relatively long period. This helps in sequestering carbon both above and below the ground. The area brought under the mission from 2016-17 to 2018-19 has been reported in Table 3.25. The quantum of carbon sequestered is estimated to be 108.96 MtCO₂ from 2017-18 to 2018-19.... **3.7.10 Balanced ration for livestock** The main objective of the Ration Balancing Programme (RBP) is to educate milk producers on feeding balanced ration to their animals so that the nutrients required by their milch animals are fulfilled in an optimum manner, thereby improving milk production efficiency and the economic return. The achievement under the scheme in 2018-19 has been reported in Table 3.26. The emission reduction as a result of the RBP initiatives was 0.061 MtCO₂ from 2017-18 to 2018-19.... **3.7.11 Bypass Proteins for animals** In India, crop residues that form the bulk of feed resources are of inferior quality with more degradable protein which results in lower production and higher GHG emissions. High yielding milch animals like crossbreds and graded buffaloes specially require more undegradable protein in the form of bypass protein for enhancing milk production potential of the animal. As such protein supplements are more expensive and optimizing the use of protein supplements within the ruminant system can improve milk productivity, income to the farmers, and lower greenhouse gas emissions. Commercial bypass protein technology was available with different seed meals and these bypass proteins reduce the degradability in the rumen. The main purpose of the establishment of the bypass protein units is to improve the availability of the protein and essential amino acids from feed to cattle. **3.7.12 Mitigation reduction due to various activities** The mitigation envisaged due to various initiatives of the GoI [Government of India] as well as the private initiatives are presented below in Table 3.27.”).

⁴²⁵ Government of India, Ministry of New and Renewable Energy, *New National Biogas and Organic Manure Programme (NNBOMP)* (last visited 31 August 2022) (“The Ministry of New and Renewable Energy promotes installation of biogas plants by implementing Central Sector Schemes under Off-Grid/distributed and decentralized Renewable Power. The two on going schemes are: New National Biogas and Organic Manure Programme (NNBOMP), for Biogas Plant size ranging from 1 cu.m. to 25 cu.m. per day. Biogas Power Generation (Off-grid) and Thermal energy application Programme (BPGTP), for setting up biogas plants in the size range of 30 m³ to 2500 m³ per day, for corresponding power generation capacity range of 3 kW to 250 kW from biogas or raw biogas for thermal energy / cooling applications.”); Government of India, Ministry of Drinking Water & Sanitation (30 April 2018) *Swachh Bharat Mission launches GOBAR-DHAN to promote wealth and energy from waste* (“Union Minister for Drinking Water and Sanitation, Sushri Uma Bharti, today launched the GOBAR (Galvanizing Organic Bio-Agro Resources - DHAN) scheme at the National Dairy Research Institute (NDRI) Auditorium, Karnal in the presence of the Chief Minister of Haryana, Shri Manohar Lal Khattar. The scheme aims to positively impact village cleanliness and generate wealth and energy from cattle and organic waste. The scheme also aims at creating new rural livelihood opportunities and enhancing income for farmers and other rural people.”).

⁴²⁶ Government of India, Ministry of Petroleum and Natural Gas, *Unconventional Hydrocarbons* (last visited 29 July 2022) (“The estimated CBM resources are of the order of 2,600 Billion Cubic Metres (BCM) or 91.8 Trillion Cubic Feet (TCF) spread over in 11 States in the country.”).

⁴²⁷ Government of India, Ministry of Petroleum and Natural Gas (2021) *ANNUAL REPORT 2020–21*.

⁴²⁸ Government of India, National Data Repository, Directorate General of Hydrocarbons, Ministry of Petroleum and Natural Gas, *Coal Bed Methane* (last visited 31 August 2022) (“In order to harness CBM potential in the country, the Government of India formulated CBM policy in July 1997 wherein CBM being Natural Gas is explored and exploited under the provisions of Oil Fields (Regulation & Development) Act 1948 (ORD Act 1948) and Petroleum & Natural Gas Rules 1959 (P&NG Rules 1959) administered by Ministry of Petroleum & Natural Gas (MOP&NG).”).

⁴²⁹ Government of India, National Data Repository (last updated 22 April 2021) Directorate General of Hydrocarbons, Ministry of Petroleum and Natural Gas, *Coal Bed Methane* (Table listing awarded CBM blocks).

⁴³⁰ Ministry of Environment, Forest and Climate Change, Government of India (2021) *India: Third Biennial Update Report to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 289–292 (Table 3.44, listing policies and programs that reduce methane emissions).

⁴³¹ See generally [India Coal Mine Methane / Coal Bed Methane Clearinghouse](#).

⁴³² Global Methane Initiative (2020) *India*, in [COAL MINE METHANE COUNTRY PROFILES](#), 16-5 (“A pre-drainage project for CMM at BCCL’s Moonidih underground mine with an envisaged project life of 10 years is currently under development. The Moonidih Mine is a highly gassy mine and the project has been planned to keep coal miners safe from methane outbursts, enhance coal production, and lower the cost of coking coal production. It will also reduce greenhouse gas (GHG) emissions. This will represent the first CMM production and utilization project in India.”).

⁴³³ Global Methane Initiative (2020) *India*, in [COAL MINE METHANE COUNTRY PROFILES](#), 16-5 (“The Global Environment Facility, the United Nations Development Programme, and the Government of India funded a demonstration project on CBM recovery and its commercial utilization was successfully completed in 2008, proving the efficacy of the technology in Indian geo-mining conditions (Singh, 2010) [...] Under the auspices of the Global Methane Initiative (GMI), the U.S. Environmental Protection Agency conducted three pre-feasibility studies for the Chinakuri, Sawang, and Pootkee-Bulliarly Collieries in the Damodar Valley coalfields. Through these studies, US EPA evaluated site-specific conditions for an initial assessment of potential technical and economic viability for coal mine methane project recovery and use (US EPA 2015, US EPA 2016, US EPA 2019c).”).

⁴³⁴ Fernandes S. (2 May 2022) *Three ministries to form consortium for climate-related policies*, THE HINDUSTAN TIMES (“On Monday, M Ravichandran, secretary, MoES, said that the idea of the inter-ministerial consortium is to avoid duplication of climate-related policy formulation and research, and work cohesively towards climate action and towards realising India’s Nationally Determined Contributions (NDC) under the Paris Agreement.”).

⁴³⁵ China Ministry of Foreign Affairs (22 September 2020) *Statement by H.E. Xi Jinping, President of the People's Republic of China, At the General Debate of the 75th Session of The United Nations General Assembly* (“China will scale up its Intended Nationally Determined Contributions by adopting more vigorous policies and measures. We aim to have CO₂ emissions peak before 2030 and achieve carbon neutrality before 2060.”). See also China Ministry of Foreign Affairs (1 November 2021) *Written Statement by H.E. Xi Jinping, President of the People's Republic of China, Unite for Action, To Protect the Planet, Our Shared Home, At the World Leaders Summit*, 5 (“Recently, China released two directives: Working Guidance for Carbon Dioxide Peaking and Carbon Neutrality in Full and Faithful Implementation of the New Development Philosophy, and the Action Plan for Carbon Dioxide Peaking Before 2030. Specific implementation plans for key areas such as energy, industry, construction and transport, and for key sectors such as coal, electricity, iron and steel, and cement will be rolled out, coupled with supporting measures in terms of science and technology, carbon sink[s], fiscal and taxation [measures], and financial incentives. Taken together, these measures will form a ‘1+N’ policy framework for delivering carbon peak and carbon neutrality, with clearly defined timetable, roadmap and blueprint.”); and Institute for Governance & Sustainable Development (25 October 2021) *Briefing: China Details Plans for Achieving Carbon-Peaking and Carbon-Neutrality Goals* (“On October 22 and 24, 2021, China issued two policy documents detailing its plans for achieving its carbon-peaking and carbon-neutrality goals: (1) the Working Guidance for Carbon Dioxide Peaking and Carbon Neutrality in Full and Faithful Implementation of the New Development Philosophy, and (2) the Action Plan for Achieving Carbon Peaking Before 2030.”).

⁴³⁶ [Outline of the 14th Five-Year Plan \(2021-2025\) for National Economic and Social Development and the Long-Range Objectives Through the Year 2035](#) [国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要] (China) (2021) (hyperlink to original Chinese).

⁴³⁷ People’s Republic of China (2021) *China’s Achievements, New Goals and New Measures for Nationally Determined Contributions*, submission to the Secretariat of UNFCCC. See also Institute for Governance & Sustainable Development (28 October 2021) *Ahead of COP 26, China Submits Update to NDC and Mid-Century Development Strategy* (listing actions to address non-CO₂ greenhouse gases (GHGs) incorporated into China’s updated NDCs.).

⁴³⁸ People’s Republic of China (2021) *China’s Achievements, New Goals and New Measures for Nationally Determined Contributions*, submission to the Secretariat of UNFCCC. (28 October 2021) *China’s Mid-Century, Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy*, submission to the Secretariat of UNFCCC. See also Institute for Governance & Sustainable Development (28 October 2021) *Ahead of COP 26, China Submits Update to NDC and Mid-*

Century Development Strategy (listing actions to address non-CO₂ greenhouse gases (GHGs) incorporated into China's updated NDCs.).

⁴³⁹ People's Republic of China (2021) *China's Achievements, New Goals and New Measures for Nationally Determined Contributions*, 2, 40, submission to the Secretariat of UNFCCC.

⁴⁴⁰ (28 October 2021) *China's Mid-Century, Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy*, submission to the Secretariat of UNFCCC, 8–9 (“By 2060, China will fully establish a clean, low-carbon, safe and efficient energy system, reach energy efficiency at international advanced levels, and improve the proportion of non-fossil fuels in energy consumption up to over 80%.”) (Unofficial translation.).

⁴⁴¹ China State Council (28 December 2021) *14th Five-Year Comprehensive Work Plan on Energy Conservation and Emission Reduction* [“十四五”节能减排综合工作方案] (hyperlink to original Chinese).

⁴⁴² China National Energy Administration (24 November 2016) *13th Five-Year Plan for the Development and Utilization of Coalbed Methane (Coal Mine Gas)* [煤层气（煤矿瓦斯）开发利用“十三五”规划], 12 (hyperlink to original Chinese).

⁴⁴³ Institute for Governance & Sustainable Development (28 April 2021) *China Announces Further Steps Toward Reduction of Non-CO₂ Super Climate Pollutant Emissions* (MEE issued the Emissions Standard for Coal-bed Methane / Coal Mine Gas (Trial) in 2008). See also *Emission Standard of Coal-bed Methane / Coal Mine Gas (Trial)* [煤层气（煤矿瓦斯）排放标准（暂行）] (Promulgated by China Ministry of Environmental Protection (now “Ministry of Ecology and Environment”) and the General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, April 2, 2008; effective July 1, 2008) (hyperlink to original Chinese).

⁴⁴⁴ *Working Guidance for Carbon Dioxide Peaking and Carbon Neutrality in Full and Faithful Implementation of the New Development Philosophy* [关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见] (promulgated by Central Committee of the Chinese Communist Party and the State Council, Sept. 22, 2021; effective Sept. 22, 2021) (hyperlink to original Chinese).

⁴⁴⁵ See People's Republic of China (2021) *China's Achievements, New Goals and New Measures for Nationally Determined Contributions*, 3, submission to the Secretariat of UNFCCC; (28 October 2021) *China's Mid-Century, Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy*, 13, submission to the Secretariat of UNFCCC; and Institute for Governance & Sustainable Development (22 April 2021) *World leaders to US: “Welcome back to the fight. This time I know our side will win”*, Press Release (“President Xi Jinping, China: Stresses China's commitment to ‘accept the Kigali Amendment to the Montreal Protocol’ and ‘to strengthen the control of non-CO₂ greenhouse gases’. And also to ‘strictly control the growth of coal consumption during the 14th Five-Year period’ [2021-2025] and ‘gradually reduce coal consumption in the 15th Five-Year period’ [2026-2030].”).

⁴⁴⁶ *Opinions on Strengthening the Battle for Pollution Prevention and Control* [关于深入打好污染防治攻坚战的意见] (promulgated by The Central Committee of the Chinese Communist Party and the State Council, Nov. 2, 2021; effective Nov. 2, 2021) (hyperlink to original Chinese).

⁴⁴⁷ (28 October 2021) *China's Mid-Century, Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy*, 13, submission to the Secretariat of UNFCCC. See also *Working Guidance for Carbon Dioxide Peaking and Carbon Neutrality in Full and Faithful Implementation of the New Development Philosophy* [关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见] (promulgated by Central Committee of the Chinese Communist Party and China State Council, October 22, 2021; effective October 22, 2021) (hyperlink to original Chinese); and Institute for Governance & Sustainable Development (25 October 2021) *Briefing: China Details Plans for Achieving Carbon-Peaking and Carbon-Neutrality Goals* (“On October 22 and 24, 2021, China issued two policy documents detailing its plans for achieving its carbon-peaking and carbon-neutrality goals: (1) the Working Guidance for Carbon Dioxide Peaking and Carbon Neutrality in Full and Faithful Implementation of the New Development Philosophy, and (2) the Action Plan for Achieving Carbon Peaking Before 2030.”).

⁴⁴⁸ (28 October 2021) [China's Mid-Century, Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy](#), 9, submission to the Secretariat of UNFCCC. *See also* [Action Plan for Achieving Carbon Peaking Before 2030](#) [2030年前碳达峰行动方案] (promulgated by China State Council, October 24, 2021; effective October 24, 2021) ([hyperlink to original Chinese](#)).

⁴⁴⁹ People's Republic of China (2021) [China's Achievements, New Goals and New Measures for Nationally Determined Contributions](#), 52, submission to the Secretariat of UNFCCC.

⁴⁵⁰ China National Petroleum Corporation (19 May 2021) [China Oil and Gas Methane Alliance was inaugurated](#) (“It has seven members: CNPC, SINOPEC, CNOOC, PipeChina, Beijing Gas, CR Gas and ENN Energy, with CNPC serving as its first president. At the conference, the founding members jointly announced their pledge to control methane emissions across the entire industry chain and take practical measures to push for the clean and low-carbon transformation of energy. The China Oil and Gas Methane Alliance is committed to building a high-quality and open platform for technical experience sharing and cooperation, improving methane emissions control, and actively engaging in global climate governance. It will join the global efforts to ensure systematic, regular, standardized and international methane monitoring and measurement, promote and adopt leak detection and repair (LDAR) and other effective emissions control measures throughout the industry chain, from oil and gas production, storage and transportation to sales, increase the recovery and utilization of vented gas during exploration and development, actively develop new energy sources, and reduce dependence on fossil fuels during oil and gas production... Through the China Oil and Gas Methane Alliance, member companies will incorporate methane emissions control into their carbon emissions reduction plan, comprehensively improve methane emissions control, strive to reduce the average methane intensity in natural gas production to below 0.25% by 2025”).

⁴⁵¹ [Action Plan for Achieving Carbon Peaking Before 2030](#) [2030年前碳达峰行动方案] (promulgated by China State Council, Oct. 24, 2021; effective Oct. 24, 2021) ([link to original Chinese](#)).

⁴⁵² [Opinions on Accelerating the Resource Utilization of Livestock and Poultry Farming Waste](#) [关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见] (promulgated by the General Office of China State Council, May 31, 2017; effective May 31, 2017) ([hyperlink to original Chinese](#)).

⁴⁵³ [Opinions on Strengthening the Battle for Pollution Prevention and Control](#) [关于深入打好污染防治攻坚战的意见] (promulgated by The Central Committee of the Chinese Communist Party and the State Council, Nov. 2, 2021; effective Nov. 2, 2021) ([hyperlink to original Chinese](#)).

⁴⁵⁴ [Opinions on Strengthening the Battle for Pollution Prevention and Control](#) [关于深入打好污染防治攻坚战的意见] (promulgated by The Central Committee of the Chinese Communist Party and the State Council, Nov. 2, 2021; effective Nov. 2, 2021) ([hyperlink to original Chinese](#)).

⁴⁵⁵ [Action Plan for Achieving Carbon Peaking Before 2030](#) [2030年前碳达峰行动方案] (promulgated by China State Council, October 24, 2021; effective October 24, 2021) ([hyperlink to original Chinese](#)). *See also* China National Development and Reform Commission (19 September 2014) [National Plan to Address Climate Change \(2014-2020\)](#) [国家应对气候变化规划（2014-2020年）] ([hyperlink to original Chinese](#)).

⁴⁵⁶ Climate & Clean Air Coalition (1 November 2021) [Methane Mitigation Through Manure Management is Key to Successfully Transforming China's Agricultural Sector](#) (“Research developed in partnership with the CCAC on the most effective methane mitigation strategies was presented to the group drafting the work plan and the majority of the suggestions were included. These strategies include improved manure management systems such as carefully controlling the water, fertilizer, antibiotics, and type of feed, which can not only reduce emissions but can also increase agricultural production. A key contribution of the CCAC was developing baseline emissions scenarios and projections of emissions reductions based on different policy implementations, which helped to determine the most effective methane mitigation strategies.”).

⁴⁵⁷ [Outline of the 14th Five-Year Plan \(2021-2025\) for National Economic and Social Development and the Long-Range Objectives Through the Year 2035](#) [国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要] (China) (2021) (hyperlink to original Chinese).

⁴⁵⁸ [Outline of the 14th Five-Year Plan \(2021-2025\) for National Economic and Social Development and the Long-Range Objectives Through the Year 2035](#) [国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要] (China) (2021) (hyperlink to original Chinese).

⁴⁵⁹ [Opinions on Strengthening the Battle for Pollution Prevention and Control](#) [关于深入打好污染防治攻坚战的意见] (promulgated by The Central Committee of the Chinese Communist Party and the State Council, Nov. 2, 2021; effective Nov. 2, 2021) (hyperlink to original Chinese).

⁴⁶⁰ [Implementation Plan for Carbon Peaking in Urban and Rural Development](#) [城乡建设领域碳达峰实施方案], 5, (promulgated by China Ministry of Housing and Urban-Rural Development and National Development and Reform Commission, June 30, 2022; effective June 30, 2022) (hyperlink to original Chinese).

⁴⁶¹ [Action Plan for Achieving Carbon Peaking Before 2030](#) [2030 年前碳达峰行动方案] (promulgated by China State Council, October 24, 2021; effective October 24, 2021) (hyperlink to original Chinese).

⁴⁶² China Ministry of Industry and Information Technology (15 November 2021) [14th Five-Year Plan on Industry Green Development](#) [“十四五”工业绿色发展规划], 4 (hyperlink to original Chinese).

⁴⁶³ [14th Five-Year Work Plan on the Construction of Zero-Waste Cities](#) [“十四五”时期“无废城市”建设工作方案] (Promulgated by China Ministry of Ecology and Environment, National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Finance, Ministry of Natural Resources, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ministry of Commerce, Ministry of Culture and Tourism, National Health Commission, People’s Bank of China, State Administration of Taxation, State Administration for Market Regulation, National Bureau of Statistics, National Government Offices Administration, China Banking and Insurance Regulatory Commission, State Post Bureau, and the All-China Federation of Supply and Marketing Cooperatives, December 15, 2021) (hyperlink to original Chinese).

⁴⁶⁴ [14th Five-Year Work Plan on the Construction of Zero-Waste Cities](#) [“十四五”时期“无废城市”建设工作方案] (Promulgated by China Ministry of Ecology and Environment, National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Finance, Ministry of Natural Resources, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ministry of Commerce, Ministry of Culture and Tourism, National Health Commission, People’s Bank of China, State Administration of Taxation, State Administration for Market Regulation, National Bureau of Statistics, National Government Offices Administration, China Banking and Insurance Regulatory Commission, State Post Bureau, and the All-China Federation of Supply and Marketing Cooperatives, December 15, 2021) (hyperlink to original Chinese).

⁴⁶⁵ China State Council (21 September 2021) [Full Text of Xi's Statement at the General Debate of the 76th Session of the United Nations General Assembly](#) (“China will step up support for other developing countries in developing green and low-carbon energy, and will not build new coal-fired power projects abroad.”).

⁴⁶⁶ China Ministry of Ecology and Environment and Ministry of Commerce (5 January 2022) [Guidelines on Ecological and Environmental Protection of Foreign Investment and Construction Projects](#) [对外投资合作建设项目生态环境保护指南], art. 3 (hyperlink to original Chinese). *See also* [Opinions on Promoting the Green Development of the “Belt and Road Initiative”](#) [关于推进共建“一带一路”绿色发展的意见] (Promulgated by China National Development and Reform Commission, Ministry of Foreign Affairs, Ministry of Ecology and Environment, and Ministry of Commerce, March 16, 2022) (hyperlink to original Chinese).

⁴⁶⁷ International Energy Agency, [Methane Tracker Data Explorer](#) (last visited 31 August 2022).

⁴⁶⁸ de Oliveira-Junior, M. (4 April 2022) *The Impact of the Global Methane Pledge on the Brazilian Beef Industry*, WEB ADVOCACY (“Due to its large bovine herd (220 million cattle, equivalent to 14% of the bovine global herd), Brazil is the fifth largest methane emitter in the world[3]. In 2020, it emitted almost 402,000 million metric tons of CO₂ equivalent (MMTCo₂E – around 2% of total world emissions). The heaviest methane emitter in Brazil is agriculture, which accounts for 78% of total emissions. Livestock, on its own, is responsible for 75% (300,000 MMTCo₂E) of the country’s methane emissions (primarily from enteric fermentation and manure management). Therefore, to achieve a 30% reduction below the 2020 levels, livestock emissions must fall sharply.”).

⁴⁶⁹ Global Methane Initiative, *Methane Emissions Data* (last visited 31 August 2022).

⁴⁷⁰ Bezerra L. G., Trevizan V. P., Gomes G., Negro R., & Rodrigues V. (28 March 2022) *Brazil Launches Federal Strategy to Incentivize the Sustainable Use of Biogas and Biomethane and Methane Zero Program*, Tauil, Chequer, Mayer, Brown (“On March 21, 2022, the Brazilian government enacted Decree No. 10,003/2022, creating the Federal Strategy to Incentivize the Sustainable Use of Biogas and Biomethane. The strategy is a new package of incentives and programs to reduce methane emissions, promote usage of biogas and biomethane as renewable sources of energy and fuel, and help meet the commitments Brazil made under the United Nations Framework-Convention on Climate Change, the Glasgow Climate Pact and the Global Methane Commitment.”).

⁴⁷¹ Bezerra L. G., Trevizan V. P., Gomes G., Negro R., & Rodrigues V. (28 March 2022) *Brazil Launches Federal Strategy to Incentivize the Sustainable Use of Biogas and Biomethane and Methane Zero Program*, Tauil, Chequer, Mayer, & Brown (“To enable the implementation of the Federal Strategy to Incentivize the Sustainable Use of Biogas and Biomethane, the decree established comprehensive guidelines to encourage, among other things, the development of carbon markets and sector plans, the use of biomethane as a source of sustainable energy and fuel, and scientific-technological research. It is worth noting that the decree provides a non-exhaustive list of urban and rural waste that shall be considered as sources of biogas and biomethane, including waste disposed of in landfills, generated in sewage treatment plants and derived from the sugar-energy chain. This provision is in line with Federal Law No. 12,305/2010, which created the National Policy on Waste Management and established that incentivizing environmental management systems was one of its objectives, particularly through waste-to-energy initiatives.”).

⁴⁷² Bezerra L. G., Gomes G., & Costa L. (26 March 2022) *Brazil launches Methane Zero National Program with a package of incentive measures to biogas and biomethane*, Mayer & Brown (“The new package – called Federal Strategy of Incentive to the Sustainable Use of Biogas and Biomethane – includes the Methane Zero National Program. . . One of the main targets of the incentive package – in addition to promoting research and development of new technologies allowing the reduction of methane emissions and the use of biogas and biomethane as sources of sustainable energy and fuel – is to promote the development of carbon markets, particularly introducing the methane credit. Although the package does not provide further details on such methane credits, they are supposed to represent a ton of methane that has not been emitted and are expected to be aligned with existing carbon credits markets, in the sense that the marketing of such methane credits should generate additional income to biogas and biomethane projects.”).

⁴⁷³ Bezerra L. G., Gomes G., & Costa L. (26 March 2022) *Brazil launches Methane Zero National Program with a package of incentive measures to biogas and biomethane*, Mayer & Brown (“Considering RenovaBio created a regulated market in which fossil fuel distribution companies have yearly decarbonization targets they must meet by acquiring decarbonization credits, which in turn are generated by producers of biofuels, such as ethanol, biodiesel and biomethane, it is expected that in fact the newly created methane credit will be a part of the RenovaBio market, not only reinforcing its already significant role, but also further developing such a market.”).

⁴⁷⁴ United States Department of Energy Office of International Affairs (22 August 2022) *United States and Brazil Strengthen Bilateral Cooperation on Energy and Launch a New Public Private Cooperation to Promote Clean Energy*, Press Release.

⁴⁷⁵ Vasconcellos R. B. (4 August 2022) *Energy Is Up on U.S.-Brazil Relations*, U.S. Chamber of Commerce (“Offshore wind energy is a common priority for these two continental countries, and there is fertile ground for a productive dialogue on this topic. Wind (albeit onshore) already plays an important role as a source of energy in diversifying Brazil’s energy grid, ranking second (13.4%) behind only hydropower (56.7%). Meanwhile, the U.S. contribution will come from the U.S. administration’s vision of wind as a key pillar of the U.S. clean energy agenda and its work towards the deployment

of 30 GW of offshore wind by 2030. Collaboration on sustainable fuels is also important for the dialogue. Brazil is known for having vehicles running on ethanol derived from sugarcane since the 1970s. On the other hand, U.S. industry, inspired by the U.S. administration's ambitious goal to rapidly increase the production of sustainable aviation fuels by 2030, has a lot of knowledge to offer to Brazil and the Latin America region.”).

⁴⁷⁶ UN Environment Programme (28 February 2022) *In face of climate crisis, Iraq takes on methane pollution* (“The International Energy Agency estimated that in 2019 Iraq contributed 9 per cent of all global methane emissions originating from the oil and gas sector.”).

⁴⁷⁷ Global Gas Flaring Reduction Partnership (2022) *2022 Global Gas Flaring Tracker Report*, 6–7 (“In 2021, the top 10 flaring countries (on an absolute volume basis) accounted for 75 percent of all gas flaring and 50 percent of global oil production. Seven of the top 10 flaring countries have held this position consistently for the last 10 years: Russia, Iraq, Iran, the United States, Venezuela, Algeria, and Nigeria. The remaining three; Mexico, Libya, and China, have shown significant flaring increases in recent years.”).

⁴⁷⁸ United Nations (30 September 2022) *Iraq mulls tackling its methane problem and reaping major benefits along the way*, Press Release (“Following a high-level virtual seminar co-hosted by the Iraq Ministry of Health and Environment and the United Nations Environment Programme (UNEP), Iraq's Deputy Environment Minister, Dr. Jassim Humadi, announced that the Ministries of Health and Environment and Oil have agreed to establish an inter-ministerial technical task force to better understand the nature and scale of methane emissions from the country's oil and gas sector.”).

⁴⁷⁹ Iraq (2021) *Nationally Determined Contributions of Iraq*, 11–13, 15 (“يكتسب الدعم الدولي ونقل التكنولوجيا أهمية استثنائية في منع هدر الغاز المصاحب الذي يعتبر ثروة اقتصادية مهمة في حال استثماره اضافة الى انه يحقق خفصا كبيرا في انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. وتقدر وكالة الطاقة الدولية أن تسربات غاز الميثان (المكون الأساسي للغاز الطبيعي) في العراق يمكن خفضها بنسبة تزيد عن 80٪ باستخدام التكنولوجيا الموجودة حالياً وتقدر القيمة المالية لانبعاثات الميثان في العراق بأكثر من 600 مليون دولار والتي تمثل خسارة اقتصادية كبيرة. بالإضافة إلى الفوائد الاقتصادية التي ستجلبها قطاع الطاقة -... للعراق عملية استثمار هذا الغاز فإن تقليل انبعاثات الميثان يحمي صحة الإنسان من خلال تحسين جودة الهواء على المستوى المحلي (النفط والغاز والكهرباء والنقل): ... - الاستثمار في الصناعات البترولية وتطويرها لتقليل استنزاف الموارد وخفض الانبعاثات في آن واحد، وبالأخص تحسين عن طريق التصميم الجيد، بما في ذلك عن طريق (venting) تكنولوجيا حرق الغاز المصاحب ومراقبتها لتقليل انبعاثات الميثان وتجنب "تفيس" الغاز بالتعاون مع (LDAR) إسترجاع الغاز وإعادة تدويره. - إجراء برامج للكشف الدوري لتسربات غاز الميثان في منشآت النفط والغاز لغرض القيام بأصلاحها وشركات النفط والغاز العاملة في العراق. - استخدام الدورات المركبة في زيادة إنتاج الطاقة الكهربائية - (GMA) التحالف العالمي للميثان) الشركاء الدوليين تغيير نوع الوقود السائل الى الوقود الغازي في محطات إنتاج الطاقة الكهربائية (الغازية) وتحسين نوعية الوقود المستخدم بما يساهم في خفض الانبعاثات الكربونية. -تقليل الانبعاثات باعتماد البات تحسين كفاءة الطاقة وترشيد استهلاكها. -تحويل محطات الطاقة الكهربائية التي تعمل بالوقود الثقيل إلى استخدام والغاز الجاف والذي بالإمكان توفيرهما عن طريق اصطياد الغاز المصاحب وتخفيف انبعاثات غاز الميثان... السيطرة LPG ووقود الغاز البترولي المسال الذي على زراعة المحاصيل التي تنتج كمية كبيرة من غاز الميثان مثل زراعة الرز وكذلك الحد من إستهلاكه كمية كبيرة من المياه ومحاربة إنجراف التربة وإعادة تأهيل أراضيها المتدهورة... قطاع النفايات : استثمار الميثان الناجم عن مواقع طمر النفايات في إنتاج الطاقة الكهربائية... الرصد والإبلاغ والتحقق: تحفيز (OGMP) شركات النفط والغاز العاملة في العراق على الإبلاغ عن انبعاثات غاز الميثان ضمن أطر شفافة معروفة، مثل إطار شراكة النفط والغاز والميثان التعاون في حملات للقياس المباشر لكميات الميثان المنبعثة من منشآت النفط والغاز وإستخدام بيانات الأقمار الصناعية لتحديد خط أساس مرجعي - “للانبعاثات”). (“International support and technology transfer are of exceptional importance in preventing the waste of associated gas, which is an important economic wealth if invested, in addition to achieving a significant reduction in greenhouse gas emissions. The International Energy Agency estimates that leaks of methane (the main component of natural gas) in Iraq could be reduced by more than 80% using existing technology. The financial value of methane emissions in Iraq is estimated at more than 600 million dollars, which represents a great economic loss. In addition to the economic benefits that the investment of this gas will bring to Iraq, reducing methane emissions protects human health by improving air quality at the local level.... *Energy Sector (oil, gas, electricity, and transport):*... - Investing in using methane from landfill sites in the production of electric power to reduce resource depletion and reduce emissions at the same time, in particular improving and monitoring associated gas flaring technology to reduce methane emissions and avoiding gas “venting” by using good designs, including through gas recovery and recycling. - Conducting periodic detection programs for methane gas leaks in oil and gas facilities for the purpose of repair (LDAR) in cooperation with international partners (Global Methane Alliance-GMA) and oil and gas companies operating in Iraq. - Converting heavy fuel power plants to using LPG and dry gas fuels, which can be provided by catching associated gas and reducing methane emissions.... *Agriculture sector:* - Controlling the cultivation of crops that produce a large amount of methane gas, such as rice cultivation, as well as reducing its consumption of a large amount of water as well as combating soil erosion and rehabilitating its degraded lands. *Waste sector:* - Investing methane from landfill sites in the production of electric power.” “*Monitoring, reporting and verification:* - Incentivizing oil and gas companies operating in Iraq to report methane emissions within well-known transparent frameworks, such as the Oil, Gas and Methane Partnership Framework

(OGMP). - Collaborate on campaigns to directly measure methane from oil and gas facilities and use satellite data to establish a baseline for emissions.”) (in Arabic). See also Climate & Clean Air Coalition (10 January 2022) *Iraq Includes Methane in its Nationally Determined Contributions, Citing Health and Development Benefits* (“Iraq aims to leverage international support to reduce its greenhouse gas emissions by 15 per cent by 2030, including by reducing methane emissions from its oil and gas, agriculture, and waste sectors. Iraq demonstrated its commitment for action by signing the Global Methane Pledge, a global effort to reduce methane emissions by at least 30 per cent from 2020 levels by 2030.... In 2020, Iraq developed a National Adaptation Plan (NAP) in partnership with the United Nations Environment Programme (UNEP) to help build the country’s resilience to climate change, and did work under the CCAC’s Oil & Gas Methane Partnership. It also established the Permanent National Committee on Climate Change and establishing the National Climate Change Center.”).

⁴⁸⁰ Ghaith, B. (11 June 2022) *Iraq announces roadmap to eliminate gas flaring by 2030*, THE JORDAN TIMES (“Iraq has developed a roadmap to reduce gas flaring for the upcoming years, with the target of zero flaring by 2030, the minister told The Jordan Times, noting that it is the first time Iraq has made action plan for gas flaring.... Iraq is working with the World Bank through its Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR), which is a public-private initiative to achieve zero flaring by 2030, Hammadi said.”)

⁴⁸¹ Climate & Clean Air Coalition, *Our Partners* (last visited 31 August 2022) (“The Coalition is a voluntary partnership led by states and regional integration organisations. These partners have committed to accelerate action to reduce short-lived climate pollutants through their participation in the Coalition’s activities and local action.”).

⁴⁸² Climate & Clean Air Coalition, *National policy and planning support* (last visited 31 August 2022) (“Since 2013, the CCAC has helped 16 countries develop national plans that integrate climate and clean air objectives through actions to reduce short-lived climate pollutants (SLCPs). Eight of these plans have received national endorsement and are moving towards implementation.”). See also Climate & Clean Air Coalition, *Increasing Ambition of NDCs* (last visited 31 August 2022) (“As countries update their Nationally Determined Contributions (NDCs) and enhance ambition to achieve the Paris Agreement temperature goals, the Climate and Clean Air Coalition is encouraging and supporting them to include short-lived climate pollutant (SLCP) and air pollution actions into their climate commitments.”).

⁴⁸³ United Nations Environment Programme (2021) *September 2021 Report of the Technology and Economic Assessment Panel, Volume 6: Assessment of the Funding Requirement for the Replenishment of the Multilateral Fund for the Period 2021-2023*, 59 (“The funding approved for IS support has played a paramount role in establishing and maintaining the capacity of national ozone units and is recognized as a major factor in the success of A5 parties achieving compliance with the Montreal Protocol’s control measures.120”), citing Executive Committee of the Multilateral Fund for the Implementation of the Montreal Protocol (17 April 2015) *Review of Funding of Institutional Strengthening Projects (Decision 61/43(b))*, UNEP/OzL.Pro/ExCom/74/51, ¶¶ 11–13.

⁴⁸⁴ Climate & Clean Air Coalition (9 November 2021) *Climate and Clean Air Coalition Ministers approve strategy to significantly cut short-lived climate pollutants this decade*, Press Release (“Ministers approved the implementation of a Methane Flagship, which, starting in 2022, will foster and strengthen high level commitments to reduce methane, amplify and raise awareness, support planning and delivery of strategies and plans, provide analysis and tools to support action, and scale up financing. There was strong and broad support for the recently launched Global Methane Pledge and ministers welcomed the CCAC having a leadership role in supporting its implementation.”).

⁴⁸⁵ Explore mitigation amounts and impacts at: <http://shindellgroup.rc.duke.edu/apps/methane/>.

⁴⁸⁶ Economic Commission for Europe (8 September 2015) *UNECE joins Climate and Clean Air Coalition*, Press Release (“At a Working Group meeting in Paris (8–9 September), CCAC welcomed UNECE to the Coalition. By joining the Coalition, UNECE gains access to a broad network of experts and partners. Drawing on its long-standing expertise, UNECE will contribute through exchanges of experiences, knowledge and best practices, particularly as they relate to the work under the Committee on Sustainable Energy and the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, including its amended Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone (Gothenburg Protocol).”).

⁴⁸⁷ See *Global Methane, Climate and Clean Air Forum* (last visited 31 August 2022) (“The Global Methane, Climate and Clean Air Forum is a joint event sponsored by the [Global Methane Initiative](#) (GMI) and the [Climate & Clean Air Coalition](#) (CCAC). The Forum is a premier global event that brings together policymakers, industry leaders, technical experts, and researchers from around the world to discuss opportunities to protect the climate and improve air quality with a special focus on methane.”).

⁴⁸⁸ AIM For Climate, *Innovation Sprints* (last visited 29 July 2022) (Innovation sprints with the closest link to agricultural methane include “Climate Resilience Through Crop Protection Innovation,” “Greener Cattle Initiative: Addressing Enteric Methane Emissions,” and “Satellite monitoring of quantity and quality of available biomass in pastoral livestock systems”).

⁴⁸⁹ AIM For Climate, *Partners* (last visited 29 July 2022) (List of partners).

⁴⁹⁰ United States Department of Energy (23 April 2021) *Joint Statement on Establishing a Net-Zero Producers Forum between the Energy Ministries of Canada, Norway, Qatar, Saudi Arabia, and the United States*, Press Release (“Canada, Norway, Qatar, Saudi Arabia, and the United States, collectively representing 40 percent of global oil and gas production, will come together to form a cooperative forum that will develop pragmatic net-zero emission strategies, including methane abatement, advancing the circular carbon economy approach, development and deployment of clean-energy and carbon capture and storage technologies, diversification from reliance on hydrocarbon revenues, and other measures in line with each country’s national circumstances.”).

⁴⁹¹ See e.g., World Bank, *Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR), About the Partnership* (last visited 29 July 2022).

⁴⁹² United States Department of State (17 June 2022) *U.S.-EU Joint Press Release on the Global Methane Pledge Energy Pathway*, Press Release (“The United States also intends to take the steps necessary to rejoin the World Bank Global Gas Flaring Reduction Partnership.”).

⁴⁹³ World Bank, *Zero Routine Flaring By 2030 (ZRF) Initiative* (last visited 31 August 2022) (“Launched in 2015, the ZRF Initiative commits governments and oil companies, to end routine flaring no later than 2030.”).

⁴⁹⁴ World Bank, *Zero Routine Flaring by 2030, Initiative Endorsers* (last visited 31 August 2022) (List of endorsers).

⁴⁹⁵ Global Gas Flaring Reduction Partnership (2022) *2022 GLOBAL GAS FLARING TRACKER REPORT*, World Bank, 6 (“In 2021, the top 10 flaring countries (on an absolute volume basis) accounted for 75 percent of all gas flaring and 50 percent of global oil production. Seven of the top 10 flaring countries have held this position consistently for the last 10 years: Russia, Iraq, Iran, the United States, Venezuela, Algeria, and Nigeria. The remaining three; Mexico, Libya, and China, have shown significant flaring increases in recent years.”).

⁴⁹⁶ Samir S. (17 August 2022) *Egypt launches national campaign to raise awareness of climate change impact*, EGYPT TODAY (“‘Green Africa’ is one of the essential topics that would be tackled during the COP 27 Conference, where a session will convene to discuss climate change impacts on Africa, putting forward two initiatives for the continent: one aims at reducing waste in Africa by 50 percent by 2050, while the other focuses on climate adaptation in Africa.”).

⁴⁹⁷ Arab Republic of Egypt (2022) *Global Waste Initiative 50 by 2050: From Egypt to Africa, for a global impact* (“Key Facts • Waste in Africa 20% Contribution of waste on global methane emissions”).

⁴⁹⁸ Scarlat, N., Motola, V., Dallemand, J.F., Mofnorti-Ferrario, F., & Mofor, L. (2015) *Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African urban areas*, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 50:1269–1286, 1279 (“It is also worth noticing that the future set up of landfills in Africa is expected to induce a significant increase of methane emissions, in comparison with the current methane emissions from landfills in Africa (as mentioned above, estimated at of about 1.3 Mt CH₄ for 2010) [17]. If deposited in managed landfills, waste can release significant amounts of CH₄ into the atmosphere that could be avoided by installing proper LFG recovery systems.”)

⁴⁹⁹ Arab Republic of Egypt (2022) *Global Waste Initiative 50 by 2050: From Egypt to Africa, for a global impact* (“The holistic Initiative will be implemented over all waste types and for the next 28 years, from 2022 to 2050, with an initial 5-year initiation phase until 2027, which will launch the five key missions: 1. Develop a platform for partnerships and projects to address both mitigation and adaptation effects; 2. Create transparency and align key initiatives; 3. Facilitate trade of recyclables between African nations; 4. Support knowledge and innovation transfer to Africa on recycling and infrastructure for all waste types; 5. Ensure implementation and track performance of the Initiative in the WM sector in Africa, impacting the globe”).

⁵⁰⁰ Global Methane Initiative, *About the Global Methane Initiative* (last visited 31 August 2022) (“Launched in 2004, the GMI is an international public-private initiative that advances cost-effective, near-term methane abatement and recovery and use of methane as a clean energy source in three sectors: biogas (including agriculture, municipal solid waste, and wastewater), coal mines, and oil and gas systems. Focusing collective efforts on methane emission sources is a cost-effective approach to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and increase energy security, enhance economic growth, improve air quality and improve worker safety.”).

⁵⁰¹ Global Methane Initiative, *Partner Countries* (last visited 31 August 2022) (“GMI Partner Countries account for approximately 70 percent of global manmade methane emissions. These countries offer special expertise and interest in developing solutions for mitigating methane emissions and using methane as a renewable energy source. As members of the GMI, Partner Countries are encouraged to develop and submit to the Secretariat action planning documents that outline key country activities and priorities, and provide a mechanism to advance cooperation among Partners.”).

⁵⁰² Global Methane Initiative, *Overview of Accomplishments* (last visited 31 August 2022) (“Approximately 500 MMTCO₂e emission reductions achieved through GMI projects since 2004”).

⁵⁰³ United Nations Environment Programme (24 November 2020) *Oil and Gas Industry commits to new framework to monitor, report and reduce methane emissions*, Press Release (“Crucially, the OGMP 2.0 includes not only a company’s own operations, but also the many joint ventures responsible for a substantial share of their production. The OGMP 2.0 framework applies to the full oil and gas value chain, not only upstream production, but also midstream transportation and downstream processing and refining – areas with substantial emissions potential that are often left out of reporting today.... In order to support the realization of global climate targets, OGMP 2.0 aims to deliver a 45 per cent reduction in the industry’s methane emissions by 2025, and a 60-75 per cent reduction by 2030.”).

⁵⁰⁴ European Commission (14 October 2020) *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions on an EU Strategy to Reduce Methane Emissions*, 11 (“The Commission will deliver legislative proposals in 2021 on: • Compulsory measurement, reporting, and verification (MRV) for all energy related methane emissions, building on the Oil and Gas Methane Partnership (OGMP 2.0) methodology. • Obligation to improve leak detection and repair (LDAR) of leaks on all fossil gas infrastructure, as well as any other infrastructure that produces, transports or uses fossil gas, including as a feedstock. 7. The Commission will consider legislation on eliminating routine venting and flaring in the energy sector covering the full supply chain, up to the point of production. 8. The Commission will work to extend the OGMP framework to more companies in the gas and oil upstream, midstream and downstream as well as to the coal sector and closed as well as abandoned sites. 9. The Commission will promote remedial work under the initiative for Coal Regions in Transition. Best-practice recommendations and/or enabling legislation will be brought forward if necessary.”).

⁵⁰⁵ Oil and Gas Climate Initiative, *About Us* (last visited 31 August 2022) (“OGCI member companies commit to: **Methane Intensity** -> By 2025, reduce the collective average methane intensity of aggregated upstream oil and gas operations to well below 0.20%, from a 2017 baseline of 0.30%. **Carbon Intensity** -> Reduce member companies’ aggregate upstream carbon intensity from 23 kg of greenhouse gases per barrel of oil or gas in 2017 to 17 kg by 2025. **CCUS Kickstarter** -> By 2030, help to decarbonize multiple industrial hubs and kickstart a commercial **CCUS** industry that can have a significant impact on greenhouse gas emissions. **OGCI Climate Investments** -> Invest OGCI’s \$1B+ fund over a ten-year period to deliver a tangible impact on greenhouse gas emissions through accelerated innovation across the energy and industrial sectors. **Zero Routine Flaring** -> Support explicitly the aims of Zero Routine Flaring by 2030.”).

⁵⁰⁶ World Biogas Association, *What is our mission?* (last visited 31 August 2022) (“The World Biogas Association is the global trade association for the biogas, landfill gas and anaerobic digestion (AD) sectors, dedicated to facilitating the adoption of biogas globally. We believe that the global adoption of biogas technologies is a multi-faceted opportunity to produce clean, renewable energy while resolving global issues related to development, public health and economic growth. We seek to represent all organisations working in the biogas industry at the international level across the world, including; national associations, biogas operators and developers, equipment providers, water companies, the agricultural sector, waste companies, and academic & research institutions.”).

⁵⁰⁷ World Biogas Association, *Membership benefits* (last visited 31 August 2022) (“At the same time we will support our industry members to take advantage of these growing markets through direct contact, our networking events and numerous publications. And continue to promote and develop industry standards, support best practice across all areas including health & safety and invest in research and innovation to ensure that we as an industry perform to the highest levels and deliver maximum value from the resources we process.”).

⁵⁰⁸ The World Biogas Summit, *2021 Programme* (last visited 29 July 2022).

⁵⁰⁹ Methane Guiding Principles, *The Methane Guiding Principles* (last visited 2 August 2022) (“1. Continually reduce methane emissions.... 2. Advance strong performance across the gas supply chain.... 3. Improve accuracy of methane emissions data.... 4. Advocate sound policy and regulations on methane emissions.... 5. Increase transparency....”).

⁵¹⁰ Methane Guiding Principles, *Oil and Gas Sector Toolkit for the Global Methane Pledge* (last visited 12 September 2022) (“In line with the fourth Methane Guiding Principle, this Oil and Gas Sector Toolkit supports policy makers as they develop sound policy and regulation to drive down oil and gas methane emissions. Fulfilling the Global Methane Pledge will require widespread implementation efforts, including policies aimed at reducing flaring, venting and fugitive emissions. This toolkit connects policy makers and regulators to key resources and institutions supporting these policy efforts.”).

⁵¹¹ MiQ, *The Methane Mission* (last visited 31 August 2022) (“To tackle methane emissions, companies need a granular understanding of where these are coming from, as well as robust methane mitigation practices and technology to enable them to actually address the issue. That’s where MiQ comes in. MiQ has developed a global solution for a global issue, grading gas on methane emissions to drive change in parallel with regulation through a not-for-profit and independently audited certification standard. Why? Because differentiating producers based on their methane emissions performance will incentivise businesses to improve because it simply makes good climate – and business – sense.”).

⁵¹² American Gas Association, *Natural Gas Sustainability Initiative (NGSI)* (last visited 31 August 2022) (“NGSI is a voluntary, industry-wide approach for companies to calculate methane emissions intensity by segment—the Methane Emissions Intensity Protocol (Protocol). This consistent, transparent and comparable method for measuring and reporting methane emissions throughout the natural gas supply chain will improve the quality of information available and will help companies more effectively identify ways to reduce methane emissions and communicate progress.”).

⁵¹³ For a recently-published guide for journalists on covering methane and investigating specific sources, see McIntosh T. (6 February 2022) *GJN’s Guide to Investigating Methane — A Key to Fighting Climate Change*, GLOBAL INVESTIGATIVE JOURNALISM NETWORK.

⁵¹⁴ Lee M. (25 October 2021) *The key for EPA rules? Inside the methane tech revolution*, E&E NEWS (“The laboratory, known as the Methane Emissions Technology Evaluation Center (METEC), was built five years ago at Colorado State University with a grant from the Energy Department. It has since become a central player in a boom of methane detection companies — a surge being driven partly by corporate pressure to cut emissions and looming EPA regulations. In the past four years, the number of such firms has doubled, with many testing their specialized drones and cutting-edge sensors on staged gas releases at METEC.”).

⁵¹⁵ Duran R. (2021) *Towards a multi-scale methane monitoring system of systems* (Carbon Mapper presentation at Day 2 of U.S. EPA Methane Detection Technology Workshop on August 24, 2021, starting at 5:05:00).

⁵¹⁶ Schlingler R. (15 April 2021) *Carbon Mapper launches satellite program to pinpoint methane and CO₂ super emitters*, PLANET (“Carbon Mapper, a new nonprofit organization, and its partners – the State of California, NASA’s Jet Propulsion Laboratory (NASA JPL), Planet, the University of Arizona, Arizona State University (ASU), High Tide Foundation and RMI – announced a pioneering program to help improve understanding of and accelerate reductions in global methane and carbon dioxide (CO₂) emissions. In addition, the Carbon Mapper consortium announced its plan to deploy a ground-breaking hyperspectral satellite constellation with the ability to pinpoint, quantify and track point-source methane and CO₂ emissions.”).

⁵¹⁷ Schlingler R. (15 April 2021) *Carbon Mapper launches satellite program to pinpoint methane and CO₂ super emitters*, PLANET (“Carbon Mapper, in collaboration with its public and private partners, is developing the satellite constellation in three phases. The initial study phase is complete and included two years of preliminary engineering development and manufacturing. Phase 1 is underway and includes development of the first two satellites by Planet and NASA JPL, planned to launch in 2023, accompanying data processing platforms, and ongoing cooperative methane mitigation pilot projects using aircraft in California and other US states. Phase 2, which is in development, would encompass the expansion to an operational multi-satellite constellation starting in 2025.”).

⁵¹⁸ Copernicus, *About Copernicus* (last visited 31 August 2022) (“Copernicus is the European Union's Earth observation programme, looking at our planet and its environment to benefit all European citizens. It offers information services that draw from **satellite Earth Observation and in-situ (non-space) data**.”).

⁵¹⁹ Copernicus, *About Copernicus* (last visited 31 August 2022) (“The European Commission manages the Programme. It is implemented in partnership with the Member States, the European Space Agency (ESA), the European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), EU Agencies and Mercator Océan.”).

⁵²⁰ Copernicus, *Copernicus in detail* (last visited 31 August 2022) (“Copernicus is served by a set of **dedicated satellites** (the Sentinel families) and contributing missions (existing commercial and public satellites). The Sentinel satellites are specifically designed to meet the needs of the Copernicus services and their users. Since the launch of Sentinel-1A in 2014, the European Union set in motion a process to place a constellation of almost 20 more satellites in orbit before 2030.”).

⁵²¹ Copernicus, *Atmosphere* (last visited 31 August 2022) (“The service focuses on five main areas: 1. Air quality and atmospheric composition; 2. Ozone layer and ultra-violet radiation; 3. Emissions and surface fluxes; 4. Solar radiation; 5. Climate forcing.”).

⁵²² Copernicus, *Land* (last visited 31 August 2022) (“It supports applications in a variety of domains such as spatial and urban planning, forest management, water management, agriculture and food security, nature conservation and restoration, rural development, ecosystem accounting and mitigation/adaptation to climate change.”).

⁵²³ Copernicus, *Climate Change* (last visited 31 August 2022) (“The C3S mission is to support adaptation and mitigation policies of the European Union by providing consistent and authoritative information about climate change. We offer free and open access to climate data and tools based on the best available science. We listen to our users and endeavour to help them meet their goals in dealing with the impacts of climate change.”).

⁵²⁴ MethaneSAT, *About MethaneSAT* (last visited 31 August 2022) (“MethaneSAT will locate and measure methane emissions from oil and gas operations almost anywhere on Earth, producing quantitative data that will enable both companies and countries to identify, manage, and reduce their methane emissions, slowing the rate at which our planet is warming. Other satellites can either identify emissions across large geographic areas or measure them at predetermined locations. MethaneSAT will do both. It will cover a 200-kilometer (124-mile) view path, passing over target regions every few days. Along with a wide field of view, the instrument will provide highly sensitive, high-resolution methane measurements.”).

⁵²⁵ MethaneSAT (13 January 2021) *MethaneSAT picks SpaceX as launch provider for mission to protect Earth’s climate*, Press Release (“The nonprofit MethaneSAT LLC announced today that it has signed a contract with SpaceX to deliver its

new satellite into orbit aboard a Falcon 9 rocket. Now under construction after completing an intensive design process, the MethaneSAT instrument is on schedule for a launch window that opens October 1, 2022.”).

⁵²⁶ spaceQ (9 September 2019) *GHGSat Signs Data Agreement with the Canada Space Agency and the European Space Agency* (“The deal will see GHGSat providing 5% of the GHGSat-C1 Iris satellite imaging capacity for free. The CSA and ESA will use that capacity for remote sensing, climate research, and data validation projects according to a GHGSat Tweet.”).

⁵²⁷ European Space Agency (3 November 2021) *ESA and GHGSat support new International Methane Emissions Observatory* (“The new initiative builds on the success of long-term and evolving data-sharing partnership between ESA and GHGSat, through the Canada–ESA Cooperation Agreement. Having proved the concept of high-resolution emissions monitoring from space, GHGSat launched its commercial constellation in 2019, rapidly building its capability and data archive. A *Memorandum of Intent*, between ESA, the Canadian Space Agency and GHGSat was signed that same year, with the aim of stimulating scientific uptake of this unique dataset.”).

⁵²⁸ BBC (4 May 2022) *Methane from cow burps seen from space for the first time*, NEWSROUND (“The researchers at GHG Sat decided to use satellite technology to accurately measure the levels of methane produced by farms - because previously it has been difficult to do. Looking at their results, the scientists found the amount of methane released at the farm they studied in Joaquin Valley was between 361 to 668 kilogrammes per hour. GHGSat share their findings with the United Nation’s International Methane Emissions Observatory programme (IMEO). The hope is that this information can be used to help set official targets to limit the amount of methane produced. The company is aiming to put around 10 satellites into orbit by next year to help continue their research.”). *See also* GHGSat.com.

⁵²⁹ Maasackers J. D., Varon D. J., Elfarsdóttir A., McKeever J., Jervis D., Mahapatra G., Pandey S. Lorente A., Borsdorff T., Foothuis L. R., Schuit B. J., Tol P., van Kempen T. A., van Hees R., Aben I. (2022) *Using satellites to uncover large methane emissions from landfills*, SCI. ADV. 8(32): eabn9683, 1–8, 1 (“We use the global surveying Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) to identify large emission hot spots and then zoom in with high-resolution target-mode observations from the GHGSat instrument suite to identify the responsible facilities and characterize their emissions. Using this approach, we detect and analyze strongly emitting landfills (3 to 29 t hour⁻¹) in Buenos Aires, Delhi, Lahore, and Mumbai. Using TROPOMI data in an inversion, we find that city-level emissions are 1.4 to 2.6 times larger than reported in commonly used emission inventories and that the landfills contribute 6 to 50% of those emissions. Our work demonstrates how complementary satellites enable global detection, identification, and monitoring of methane superemitters at the facility level.”); *discussed in* Dickie G. (11 August 2022) *Landfills around the world release a lot of methane - study*, REUTERS.

⁵³⁰ International Energy Forum, *IEF Methane Initiative: Methane Measurement Methodology Project* (last visited 31 August 2022) (The International Energy Forum (IEF) launched the IEF Methane Initiative in June 2021 to develop a methane emissions measurement methodology, enabling its member countries to collect standardized data to mitigate methane emissions from the energy industry and address its share of climate change goals.”).

⁵³¹ International Energy Forum, *IEF Methane Initiative: Methane Measurement Methodology Project* (last visited 31 August 2022) (“Experts estimate that currently reported methane emissions are about 10 percent of what is observed by satellite. The new methodology will allow IEF member countries to consider the best available data on methane emissions, define their historical methane baseline and set mitigation goals in a transparent and consistent manner. With these targets, IEF members would be able to present credible plans for reducing their countries’ methane emissions in their Nationally Determined Contributions (NDC) ahead of the 26th UN Climate Change Conference of the Parties (COP26) in November 2021.”).

⁵³² United Nations Environment Programme (2021) *An Eye on Methane: International Methane Emissions Observatory 2021 Report*, VI (“IMEO’s Theory of Change - IMEO has a clear proposition to catalyze change in the reality of the political economy. At the heart of IMEO’s Theory of Change is the need for an independent and trusted entity to integrate data from multiple sources, such as companies, satellites, scientific studies and national inventories. Using scientific insights, IMEO will integrate these multiple sources of heterogeneous data into a coherent and policy relevant dataset that highlights the confidence of each data element.”).

⁵³³ United Nations Environment Programme (31 October 2021) *Methane Observatory launched to boost action on powerful climate-warming gas*, Press Release (“IMEO will improve the reporting accuracy and public transparency of human-caused methane emissions. IMEO will initially focus on methane emissions from the fossil fuel sector, and then expand to other major emitting sectors like agriculture and waste.”).

⁵³⁴ United Nations Environment Programme (31 October 2021) *Methane Observatory launched to boost action on powerful climate-warming gas*, Press Release (“IMEO will provide the means to prioritize actions and monitor commitments made by state actors in the [Global Methane Pledge](#) – a US- and EU-led effort by over thirty countries to slash methane emissions by 30 per cent by 2030.”).

⁵³⁵ United Nations Environment Programme, *International Methane Emissions Observatory (last visited 31 August 2022)* (“Launched at the G20 Summit, the International Methane Emissions Observatory (IMEO) is a data-driven, action-focused initiative by the UN Environment Programme (UNEP) with support from the [European Commission](#) to catalyse dramatic reduction of methane emissions, starting with the energy sector.”).

⁵³⁶ United Nations Environment Programme (31 October 2021) *Methane Observatory launched to boost action on powerful climate-warming gas*, Press Release (“Critical to this effort are data collected through OGMP 2.0, launched in November 2020 in the framework of the Climate and Clean Air Coalition. OGMP 2.0 is the only comprehensive, measurement-based reporting framework for the oil and gas sector, and its 74 member companies represent many of the world’s largest operators across the entire value chain, with assets that account for over 30 per cent of all oil and gas production.”).

⁵³⁷ Gordon D., Koomey J., Brandt A., & Bergerson J. (2022) *Know Your Oil and Gas: Generating Climate Intelligence to Cut Petroleum Industry Emissions*, Rocky Mountain Institute, 8–9 (“The OCI+ model offers a way forward. This life-cycle assessment model was first unveiled in 2015 by the Carnegie Endowment. The OCI+ has since received significant attention and use by governments, industry, nongovernmental organizations, and academics.ⁱⁱ The OCI+ offers an alternative to opaque and overly simplistic emissions assessments done by countries and companies using equipment counts and basic emissions factors. Instead, the OCI+’s suite of advanced models, together with operational inputs and satellite data, estimates GHG emissions through the entire oil and gas supply chain. Emissions intensities can be parsed in different ways—by resource category, region, operation, pollutant, and more—to identify significant reduction potential.”). Access the Oil Climate Index plus Gas tool at: ociplus.rmi.org.

⁵³⁸ Malik N. S. (23 June 2022) *World’s Dirtiest Oil and Gas Fields Are in Russia, Turkmenistan and Texas*, BLOOMBERG (Created by researchers at RMI, Stanford University, the University of Calgary and Koomey Analytics, the OCI+ tool and an accompanying report conclude that significant fossil-fuel emissions occur not just at the point of combustion, but directly at the wellhead and during processing, refining, and transportation.”).

⁵³⁹ Malik N. S. (23 June 2022) *World’s Dirtiest Oil and Gas Fields Are in Russia, Turkmenistan and Texas*, BLOOMBERG (“Methane, a greenhouse gas that is the primary component of natural gas and a powerful global warming agent, accounts for more than half of operational emissions at sites worldwide. Curbing the flaring and venting of the gas and ensuring that oil-field equipment is working properly can help significantly reduce upstream emissions, the report says, calling methane reductions ‘the highest priority for the oil and gas sector.’”).

⁵⁴⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7 (The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report (AR6) confirms the findings of the [Global Methane Assessment](#) that “[s]ustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near-and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*).”).

⁵⁴¹ Velders G. J. M., Andersen S. O., Daniel J. S., Fahey D. W., & McFarland M. (2007) *The importance of the Montreal Protocol in protecting climate*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 104(12): 4814–4819, 4814 (“The 1987 Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer is a landmark agreement that has successfully reduced the global production, consumption, and emissions of ozone-depleting substances (ODSs). ODSs are also greenhouse gases that contribute to

the radiative forcing of climate change. Using historical ODSs emissions and scenarios of potential emissions, we show that the ODS contribution to radiative forcing most likely would have been much larger if the ODS link to stratospheric ozone depletion had not been recognized in 1974 and followed by a series of regulations. The climate protection already achieved by the Montreal Protocol alone is far larger than the reduction target of the first commitment period of the Kyoto Protocol. Additional climate benefits that are significant compared with the Kyoto Protocol reduction target could be achieved by actions under the Montreal Protocol, by managing the emissions of substitute fluorocarbon gases and/or implementing alternative gases with lower global warming potentials.”).

⁵⁴² Young P. J., Harper A. B., Huntingford C., Paul N. D., Morgenstern O., Newman P. A., Oman L. D., Madronich S., & Garcia R. R. (2021) *The Montreal Protocol protects the terrestrial carbon sink*, NATURE 596: 384–388, 384 (“Overall, at the end of the century, worldAvg warms by an additional 2.5 K (2.4–2.7 K) above the RCP 6.0 baseline in worldProj. Of this warming, 1.7 K comes from the previously explored¹⁹ additional radiative forcing due to the higher CFC concentrations in worldProj. Newly quantified here is the additional warming of global-mean air temperature of 0.85 K (0.65–1.0 K)—half as much again—that arises from the higher atmospheric CO₂ concentrations due to the damaging effect of UV radiation on terrestrial carbon stores.”).

⁵⁴³ Secretariat of the United Nations Framework Convention on Climate Change (2 November 2021) *World Leaders Kick Start Accelerated Climate Action at COP26*, Press Release (“Today is also the first time a COP in recent history has hosted a major event on methane, with 103 countries, including 15 major emitters including Brazil, Nigeria and Canada, signing up to the Global Methane Pledge.”).

⁵⁴⁴ United States Department of State (11 October 2021) *Joint U.S.-EU Statement on the Global Methane Pledge*, Press Release (“At the Major Economies Forum on Energy and Climate (MEF) on September 17, 2021, President Biden and European Commission President Ursula von der Leyen announced, with support from seven additional countries, the Global Methane Pledge—an initiative to be launched at the World Leaders Summit at the 26th UN Climate Change Conference (COP-26) this November in Glasgow, United Kingdom.”).

⁵⁴⁵ United States Department of State (11 October 2021) *Joint U.S.-EU Statement on the Global Methane Pledge*, Press Release (“Countries joining the Global Methane Pledge commit to a collective goal of reducing global methane emissions by at least 30 percent from 2020 levels by 2030 and moving towards using best available inventory methodologies to quantify methane emissions, with a particular focus on high emission sources.”).

⁵⁴⁶ United States Department of State (11 October 2021) *Joint U.S.-EU Statement on the Global Methane Pledge*, Press Release (“Countries joining the Global Methane Pledge commit to a collective goal of reducing global methane emissions by at least 30 percent from 2020 levels by 2030 and moving towards using highest tier IPCC good practice inventory methodologies to quantify methane emissions, with a particular focus on high emission sources. Successful implementation of the Pledge would reduce warming by at least 0.2 degrees Celsius by 2050.”). Note that studies that assume a declining baseline in methane emissions calculate a lower avoided warming. See Forster P., Smith C., & Rogelj J. (2021) *Guest Post: The Global Methane Pledge needs to go further to help limit warming to 1.5C*, CARBONBRIEF; and International Energy Agency (2022) *GLOBAL METHANE TRACKER 2022*, 19 (“Meeting the Global Methane Pledge target has the potential to make an enormous impact on climate change, similar to the entire global transport sector adopting net zero emission technologies (see [Methodology](#)). Action will be particularly important in the period up to 2030 because sharp cuts in methane can deliver a net cooling effect within a relatively short period. This could keep the door open to a 1.5 °C stabilisation in global average temperatures, while the world pursues lasting reductions in CO₂.”).

⁵⁴⁷ For a list of Global Methane Pledge participants, see <https://www.globalmethanepledge.org/> - pledges.

⁵⁴⁸ United States Department of State (2 November 2021) *United States, European Union, and Partners Formally Launch Global Methane Pledge to Keep 1.5°C Within Reach*, Press Release (“Today, the United States, the European Union, and partners formally launched the Global Methane Pledge, an initiative to reduce global methane emissions to keep the goal of limiting warming to 1.5 degrees Celsius within reach. A total of over 100 countries representing 70% of the global economy and nearly half of anthropogenic methane emissions have now signed onto the pledge.”).

⁵⁴⁹ (8 November 2021) *LIVE: President Obama delivers a speech at COP26 climate summit in Glasgow, Scotland*, YAHOO FINANCE, YouTube (from 23:12–23:19).

⁵⁵⁰ White House (12 May 2022) *FACT SHEET: U.S.-ASEAN Special Summit in Washington, DC*, Statements and Releases (“Reducing Methane Emissions: The United States is committed to working with the nations of Southeast Asia to reduce the region’s methane emissions. The United States welcomed Indonesia, Vietnam, Malaysia, the Philippines, and Singapore joining the Global Methane Pledge at COP-26, and we are accelerating technical assistance, financial resources, and project pipeline development for methane mitigation in Global Methane Pledge countries, including through the EPA, USTDA, DFC, and EXIM, as well as the newly-created Global Methane Hub, a philanthropic fund that can support methane mitigation priorities in the region.”).

⁵⁵¹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 9 (“Currently available measures could reduce emissions from these major sectors by approximately 180 Mt/yr, or as much as 45 per cent, by 2030. This is a cost-effective step required to achieve the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) 1.5° C target. According to scenarios analysed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), global methane emissions must be reduced by between 40–45 per cent by 2030 to achieve least cost-pathways that limit global warming to 1.5° C this century, alongside substantial simultaneous reductions of all climate forcers including carbon dioxide and short-lived climate pollutants. (Section 4.1).”).

⁵⁵² United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 8 (“Available targeted methane measures, together with additional measures that contribute to priority development goals, can simultaneously reduce human-caused methane emissions by as much as 45 per cent, or 180 million tonnes a year (Mt/yr) by 2030. This will avoid nearly 0.3°C of global warming by the 2040s and complement all long-term climate change mitigation efforts.”).

⁵⁵³ (13 November 2021) Parties to the Paris Agreement, Decision -/CP.26 ¶19, *Glasgow Climate Pact Advance unedited version*.

⁵⁵⁴ G7 (27 May 2022) *G7 Climate, Energy and Environment Ministers’ Communiqué* (“65. Methane: We highlight that in order to keep 1.5 °C within reach and to reduce the likelihood of overshoot, significant methane emission reductions must be achieved globally by 2030. In this context and in the light of the latest findings of the IPCC, we highlight the need to reduce global methane emissions by 34 percent by 2030 and by 44 percent by 2040 relative to the 2019 level to limit global warming to 1.5 °C by 2100 with no or limited overshoot. We therefore reaffirm our commitment made at COP26 to implement the Global Methane Pledge, whose endorsers are committed to collectively reduce global anthropogenic methane emissions by at least 30 percent below 2020 levels by 2030. In order to accelerate its implementation, those of us who have not already done so endeavour to implement domestic methane emission reductions by developing national climate plans and strategies and implementing accompanying measures, and we encourage those who do not yet have such plans to develop them. We stand ready to support the Climate and Clean Air Coalition as a core implementing partner of the Pledge. While the generation of waste is not encouraged, we recognise the opportunities to mitigate methane emissions from the waste sector, primarily by diversion of organic waste from landfills through best management practice and processes aiming at material and energy recovery and as appropriate by sound management of landfill sites as well as by using waste-to-fuel technologies to produce renewable methane from organic waste, agricultural residues and biomass that does not depend on arable land or cannot be utilised in a better way. The waste sector can contribute to a reduction in atmospheric methane emissions if the infrastructure in place to transport the renewable methane does not allow for intentional or unintentional venting of methane. We also recognise the opportunities to mitigate methane emissions from the energy sector by capturing and using methane from the oil and gas sector that would otherwise have been vented, wasted, flared or lost in transport, and by using best practices to minimise methane from coal mining. We further recognise that more efforts are needed to reduce agricultural methane emissions. We recognise the need to continuously improve emissions measurement, reporting and verification to inform national emissions inventories and the work of the International Methane Emissions Observatory (IMEO), launched during G20 2021 by the UN Environment Programme (UNEP) with the support from the European Union, in collecting, reconciling and verifying anthropogenic methane emissions data at a global level and encourage continued cooperation with relevant stakeholders such as the International Energy Agency. In addition to our national efforts, we highlight the importance of reducing the methane emissions associated with energy production and consumption. We therefore will consider providing increased support to methane reduction and elimination projects in developing and emerging economies. In particular, we are committed to working with other oil and gas producing countries to accelerate flaring and methane abatement projects

and strengthen policies to reduce methane emissions in the oil and gas sector.... We acknowledge that investment in this sector is necessary in response to the current crisis, in a manner consistent with our climate objectives and without creating lock-in effects. The current crisis highlights the real, urgent need and the opportunity for Europe to reduce its dependency on Russia by diversifying supply, accelerating the roll out of clean, safe and sustainable energy technologies, and critically enhancing energy efficiency, with significant progress possible by the end of the year.”).

⁵⁵⁵ United States Department of State (17 June 2022) *U.S.-EU Joint Press Release on the Global Methane Pledge Energy Pathway*, Press Release (“Today, the United States, the European Union, and 11 countries launched the Global Methane Pledge Energy Pathway to catalyze methane emissions reductions in the oil and gas sector, advancing both climate progress and energy security.... Countries and supporting organizations announced nearly \$60 million in dedicated funding to support implementation of the Pathway. Countries and supporting organizations have announced \$59 million in dedicated funding and in-kind assistance in support of the GMP Energy Pathway that was announced at today’s MEF, including: \$4 million to support the World Bank Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR). The United States intends to support the transfer by the World Bank of at least \$1.5 million in funding to the GGFR. Germany intends to provide \$1.5 million, and Norway intends to provide approximately \$1 million to GGFR. \$5.5 million to support the Global Methane Initiative (GMI). The United States will provide \$3.5 million. Guided by the recommendations of the GMI, Canada will contribute \$2 million over the next four years, as part of its global climate finance commitment, to support methane mitigation projects in developing countries including in the oil and gas sector. Up to \$9.5 million from the UNEP International Methane Emissions Observatory to support scientific assessments of methane emissions and mitigation potential in the oil and gas sector that are aligned with the Global Methane Pledge Energy Pathway. Up to \$40 million annually from the philanthropic Global Methane Hub to support methane mitigation in the fossil energy sector. These funds will be critical to improve methane measurements in the oil and gas sector, identify priority areas for methane mitigation, develop technical assessments for project development, strengthen regulator and operator capacity, support policy development and enforcement, and other essential activities to achieve reductions in methane emissions.”).

⁵⁵⁶ (17 May 2005) *Protocol to the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone*, 2319 U.N.T.S. 81 (Entered into force in accordance with article 17 which reads as follows: “1. The present Protocol shall enter into force on the ninetieth day following the date on which the sixteenth instrument of ratification, acceptance, approval or accession has been deposited with the Depository. 2. For each State and organization that meets the requirements of article 14, paragraph 1, which ratifies, accepts or approves the present Protocol or accedes thereto after the deposit of the sixteenth instrument of ratification, acceptance, approval or accession, the Protocol shall enter into force on the ninetieth day following the date of deposit by such Party of its instrument of ratification, acceptance, approval or accession.”).

⁵⁵⁷ (17 May 2005) *Protocol to the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone*, 2319 U.N.T.S. 81 (Entered into force in accordance with article 17 which reads as follows: “1. The present Protocol shall enter into force on the ninetieth day following the date on which the sixteenth instrument of ratification, acceptance, approval or accession has been deposited with the Depository. 2. For each State and organization that meets the requirements of article 14, paragraph 1, which ratifies, accepts or approves the present Protocol or accedes thereto after the deposit of the sixteenth instrument of ratification, acceptance, approval or accession, the Protocol shall enter into force on the ninetieth day following the date of deposit by such Party of its instrument of ratification, acceptance, approval or accession.”).

⁵⁵⁸ (16 May 1983) *1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution*, 1302 U.N.T.S. 217, Art. 2 (“The Contracting Parties, taking due account of the facts and problems involved, are determined to protect man and his environment against air pollution and shall endeavour to limit and, as far as possible, gradually reduce and prevent air pollution including long-range transboundary air pollution.”).

⁵⁵⁹ Economic Commission for Europe (8 September 2015) *UNECE joins Climate and Clean Air Coalition*, Press Release (“At a Working Group meeting in Paris (8–9 September), CCAC welcomed UNECE to the Coalition. By joining the Coalition, UNECE gains access to a broad network of experts and partners. Drawing on its long-standing expertise, UNECE will contribute through exchanges of experiences, knowledge and best practices, particularly as they relate to the work under the *Committee on Sustainable Energy* and the *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution*, including its amended *Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone (Gothenburg Protocol)*.”)

⁵⁶⁰ Executive Body for the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (2018) [Decision 2018/5 Long-term Strategy for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution for 2020–2030 and Beyond](#), Annex ¶ 28 (“Although peak ozone concentrations have been reduced, there is evidence of widespread damage to human health, natural vegetation, crops and forests, and some materials in the ECE region. Even with full implementation of the Gothenburg Protocol and its 2012 amendments (e.g., reducing emissions of nitrogen oxides and non-methane volatile organic compounds, both of which are ozone precursors), wide-scale problems will remain. Model simulations indicate that background levels of tropospheric ozone will begin to increase again after 2020–2030, driven progressively by methane emissions outside the ECE region. Therefore, further reduction in precursors, including methane, will be required to reduce the formation of tropospheric ozone.”). The [Task Force on Techno-Economic Issues \(TFTEI\)](#) updates and assesses emission abatement technologies to reduce emissions of many conventional air pollutants, including SO₂, NO_x, VOCs, and dust (including PM₁₀, PM_{2.5} and black carbon). Its [December 2020 report](#) on methane emissions provides information on emissions from landfill gases, the natural gas grid, and biogas facilities as well as methods of emission abatement. The TFTEI held its 7th Meeting on 29 October 2021. The 7th Meeting agenda included a discussion on its contributions to the Gothenburg Protocol review. The documents from the meeting are forthcoming. The [Task Force on Integrated Assessment Modelling \(TFIAM\)](#) brings together information gathered from the Parties and from Convention bodies on cost-effective emission-control strategies. It provides regular reports to the negotiating bodies of the Convention to assist in the development of future legal instruments and to regularly review the existing legal instruments. The Task Force is modelling future trends, impacts, and mitigation measures for methane emissions. The [Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution \(TFHTAP\)](#) has examined methane emission as part of its mandate to examine the transport of air pollution across the northern hemisphere and its impacts within and outside of the UNECE region.

⁵⁶¹ See 1984 (Geneva) Protocol on Long-term Financing of the Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe; 1985 (Helsinki) Protocol on the Reduction of Sulphur Emissions or their Transboundary Fluxes by at least 30 per cent; 1988 (Sofia) Protocol concerning the Control of Nitrogen Oxides or their Transboundary Fluxes; 1991 (Geneva) Protocol concerning the Control of Emissions of Volatile Organic Compounds or their Transboundary Fluxes; 1994 (Oslo) Protocol on Further Reduction of Sulphur Emissions; 1998 (Aarhus) Protocol on Heavy Metals; 1998 (Aarhus) Protocol on Persistent Organic Pollutants (POPs); and the 1999 (Gothenburg) Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone. See also Lawyers Responding to Climate Change (2 December 2010) [LRTAP and extending MEAs to non-party states – Part II](#) (“The initial Convention has been extended by 8 Protocols which have imposed specific measures and obligations on the parties. The 1985 Helsinki Protocol on the Reduction of Sulphur Emissions or their Transboundary Fluxes by at least 30%, as its name suggests, established a commitment on all parties to reduce their national annual sulphur emissions or their transboundary fluxes by at least 30% as soon as possible and at the latest by 1993 using 1980 levels as the basis for calculation of the reductions. Further reductions were adopted by the 1994 Oslo Protocol on ‘Further Reduction of Sulphur Emissions’. A commitment to control nitrogen oxides was addressed in the third Sofia Protocol on the ‘Control of Emissions of Nitrogen Oxides or Their Transboundary Fluxes’ in 1988. This required the reduction of ‘total annual emissions’ and introduced into international law the concept of ‘national emission standards’. It also recognised the need to create more favourable conditions for exchange of technology. The fourth Protocol in Geneva in 1991 addressed the ‘Control of Emissions of Volatile Organic Compounds (VOCs) and their Transboundary Fluxes’. In 1998 the Aarhus ‘Heavy Metals Protocol’ targeted 3 harmful heavy metals- lead, cadmium and mercury- and required the parties to reduce their emissions of those metals below the levels in a selected reference year between 1985 and 1995. The Aarhus Protocol on Persistent Organic Pollutants (POPs) was adopted at the same time with the objective of eliminating emissions and discharges of POPs to the atmosphere. This focused on 16 substances rated according to their risk to the environment The parties agreed to eliminate the production and use of some POPs and to restrict the use of others. Finally the 1999 Gothenburg Protocol to ‘Abate Acidification, Eutrophication and Ground- Level Ozone’ aimed to control and reduce anthropogenic emissions of 4 pollutants- sulphur, NO_x, ammonia and VOCs which are likely to cause adverse effects to human health, ecosystems and crops.”).

⁵⁶² Hunter D., Salzman J., & Zaelke D. (2021) [INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL LAW AND POLICY](#), Foundation Press, (6th Ed.), 529 (“Ultimately, LRTAP would require that countries develop the ‘best available technology which is economically feasible and low-and non-waste technology.’ Art. 6. The protocols to LRTAP adopt technology-based standards, targets, and timetables, as well as other policy responses. LRTAP and its protocols thus provide a good vehicle for exploring different potential policy approaches to air pollution.”).

⁵⁶³ European Monitoring and Evaluation Programme (17 June 2021) *EMEP History and Structure* (“In this process, the main objective of the EMEP programme (Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe) is to regularly provide governments and subsidiary bodies under the LRTAP Convention with qualified scientific information to support the development and further evaluation of the international protocols on emission reductions negotiated within the Convention.”).

⁵⁶⁴ (5 August 1998) *Protocol on Further Reduction of Sulphur Emissions*, 2030 U.N.T.S. 122, Art. 5(1) (“Each Party shall report, through the Executive Secretary of the Commission, to the Executive Body, on a periodic basis as determined by the Executive Body, information on: (a) The implementation of national strategies, policies, programmes and measures referred to in article 4, paragraph 1; (b) The levels of national annual sulphur emissions, in accordance with guidelines adopted by the Executive Body, containing emission data for all relevant source categories; and (c) The implementation of other obligations that it has entered into under the present Protocol, in conformity with a decision regarding format and content to be adopted by the Parties at a session of the Executive Body. The terms of this decision shall be reviewed as necessary to identify any additional elements regarding the format and/or content of the information that are to be included in the reports.”).

⁵⁶⁵ UNECE is composed of 56 member States: Albania, Andorra, Armenia, Austria, Azerbaijan, Belarus, Belgium, Bosnia and Herzegovina, Bulgaria, Canada, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Georgia, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Israel, Italy, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Latvia, Liechtenstein, Lithuania, Luxembourg, Malta, Monaco, Montenegro, The Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Republic of Moldova, North Macedonia, Romania, Russian Federation, San Marino, Serbia, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, Tajikistan, Turkey, Turkmenistan, Ukraine, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, United States of America, and Uzbekistan. See UNECE, *Member States and Member States Representatives (last visited 29 July 2022)*.

⁵⁶⁶ Monaco A., Ross K., Waskow D., & Ge M. (2021) *How Methane Emissions Contribute to Climate Change*, WORLD RESOURCES INSTITUTE (“Twelve countries are responsible for around two-thirds of global methane emissions: China, Russia, India, the United States, Brazil, the European Union, Indonesia, Pakistan, Iran, Mexico, Australia and Nigeria.”).

⁵⁶⁷ (17 May 2005) *Protocol to the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone*, 2319 U.N.T.S. 81 (Entered into force in accordance with article 17 which reads as follows: “1. The present Protocol shall enter into force on the ninetieth day following the date on which the sixteenth instrument of ratification, acceptance, approval or accession has been deposited with the Depositary. 2. For each State and organization that meets the requirements of article 14, paragraph 1, which ratifies, accepts or approves the present Protocol or accedes thereto after the deposit of the sixteenth instrument of ratification, acceptance, approval or accession, the Protocol shall enter into force on the ninetieth day following the date of deposit by such Party of its instrument of ratification, acceptance, approval or accession.”).

⁵⁶⁸ (amended 4 May 2012) *1999 Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone to the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*, ECE/EB.AIR/114, Art. 2(1) (“The objective of the present Protocol is to control and reduce emissions of sulphur, nitrogen oxides, ammonia and [non-methane] volatile organic compounds that are caused by anthropogenic activities and are likely to cause adverse effects on human health, natural ecosystems, materials and crops, due to acidification, eutrophication or ground-level ozone as a result of long-range transboundary atmospheric transport....”).

⁵⁶⁹ Fiore A. M., Jacob D. J., Field B. D., Streets D. G., Fernandes S. D., & Jang C. (2002) *Linking ozone pollution and climate change: The case for controlling methane*, GEOPHYS. RES. LETT. 29(19): 25-1–25-4, 25-1 (“Methane is a known major source of the tropospheric O₃ background, but is not generally considered a precursor to regional O₃ pollution episodes in surface air because of its long lifetime (8–9 years)... Our global 3-D model analysis shows that reducing CH₄ emissions enables a simultaneous pursuit of O₃ air quality and climate change mitigation objectives. Whereas reductions in NO_x emissions achieve localized decreases in surface O₃ concentrations, reductions in CH₄ emissions lower the global O₃ background and improve surface air quality everywhere.”). See also United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 45 (“Next, the linearity of the response to different magnitudes of methane concentration change was examined. At the national level, population weighted ozone changes are extremely linear across a range of methane increases and decreases (Figure 3.4). Though the response itself varies from country to country (i.e. the slopes are

different), the ozone change at the national level is directly proportional to the methane concentration change regardless of the ozone metric chosen. This result is consistent with prior studies which also indicate that the ozone/methane relationship is approximately linear (Fiore *et al.* 2008) but its magnitude depends on the local availability of nitrogen oxides, and, through nitrogen oxides, of hydroxyl (West *et al.* 2006; Wang and Jacob 1998).”).

⁵⁷⁰ (amended 4 May 2012) 1999 Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone to the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, ECE/EB.AIR/114, Art. 1(11 quater) (“Ozone precursors’ means nitrogen oxides, volatile organic compounds, methane and carbon monoxide”).

⁵⁷¹ Executive Body for the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (2018) *Decision 2018/5 Long-term Strategy for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution for 2020–2030 and Beyond*, Annex ¶ 28 (“Although peak ozone concentrations have been reduced, there is evidence of widespread damage to human health, natural vegetation, crops and forests, and some materials in the ECE region. Even with full implementation of the Gothenburg Protocol and its 2012 amendments (e.g., reducing emissions of nitrogen oxides and non-methane volatile organic compounds, both of which are ozone precursors), wide-scale problems will remain. Model simulations indicate that background levels of tropospheric ozone will begin to increase again after 2020–2030, driven progressively by methane emissions outside the ECE region. Therefore, further reduction in precursors, including methane, will be required to reduce the formation of tropospheric ozone.”).

⁵⁷² Executive Body Working Group on Strategies and Review (30 September 2020) *Preparations for the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2020/3–EBE/EB.AIR/WG.5/2020/3 at ¶ 20 (“As per the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond (paragraph 50), the review should look at appropriate steps towards reducing emissions of black carbon, ozone precursors not yet addressed such as methane, and emissions from shipping with due consideration for International Maritime Organization (IMO) policies and measures. . . . In line with the priorities identified in the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond, the following should specifically be considered in answering the questions in annex I: (b) Hemispheric transport of ozone and particulate matter and their precursors and advancing efforts to address air pollution on a broader scale per paragraphs 63 and 78 of the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond; health and ecosystem impacts from outside the ECE region; (c) Methane and its relationship to the hemispheric transport of ozone and its contribution to ozone in the ECE region;”).

⁵⁷³ Executive Body Working Group on Strategies and Review (30 September 2020) *Preparations for the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2020/3–EBE/EB.AIR/WG.5/2020/3 at ¶ 14 (Item 6.3(d) in Annex I stating the question “how methane could be addressed in a future instrument?”).

⁵⁷⁴ Executive Body Working Group on Effects & Steering Body to the Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe (2 July 2021) *2021 Joint progress report on contribution to the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone*, ECE/EB.AIR/GE.1/2021/3–ECE/EB.AIR/WG.1/2021/3 at ¶ 79 (“79. Methane proves to be the main driver behind increasing background ozone levels. CIAM has identified cost-effective measures to reduce methane emissions in world regions. In Europe, measures in the waste sector have the largest potential. In eastern Europe and central Asia, measures in oil and gas sector, and in the US measures in (unconventional) gas production can deliver most of the abatement potential. In all regions, emissions from agriculture (especially from cattle) tend to be a source with a low technical abatement potential. United Nations Environment’s Global Methane Assessment estimates that reduced dairy and meat consumption could give a significant contribution to avoiding warming, ozone related deaths, morbidity as well as crop losses.”).

⁵⁷⁵ Working Group on Strategies and Review (30 September 2020) *Preparations for the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2020/3–EBE/EB.AIR/WG.5/2020/3 at ¶ 16, Annex II (Setting out the work schedule for preparation of the Gothenburg Protocol review reports and specifying that the review should be concluded by December 2022).

⁵⁷⁶ Working Group on Strategies and Review (30 September 2020) *Preparations for the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2020/3–

EBE/EB.AIR/WG.5/2020/3 at ¶ 13, 14–15 (Annex I sets out the questions to subsidiary bodies of the Convention for the review of the Gothenburg Protocol and specifying that TFHTAP and MSC-W Review should be completed by Fall 2021 and that the TFIAM, TFTEI, TFRN, WGSR, and WGE review should be completed by Spring 2021 and Spring 2022).

⁵⁷⁷ Executive Body (24 September 2021) *Draft report on the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone, as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2021/4, at ¶ 96 (“To limit negative effects of air pollution on climate change, more focus is needed on reducing emissions of air pollutants that have a warming effect, such as BC and O₃ precursors. CH₄ reduction plays a key role in reaching synergetic effects, as CH₄ is both a greenhouse gas and an increasing determinant of O₃ formation.”).

⁵⁷⁸ Samuelsson E. (13 December 2021) *Change in the Air: Promising direction for Air Convention Protocol revision*, META, European Environmental Bureau (“Last week’s meeting of the Air Convention agreed to include methane in its analysis for the revision of the Protocol, which is a promising first step for including methane in the protocol in the future.”).

⁵⁷⁹ Gothenburg Protocol Review Group (28 March 2022) *Potential options for addressing methane as an ozone precursor under the Air Convention Gothenburg Protocol Review*, Informal Document, 3–4 (“These options are provided for information only and are not exhaustive. These are not in priority order but rather presented as technical/data, reductions/abatement, and voluntary/capacity building. Each option could be stand-alone or used in combination or as a package. • Option 1: Compiling, reviewing and improving methane emissions information: issues include consistency/non-duplication of efforts with UNFCCC reporting, could result in creation of shareable database across MEAs *Considerations: Access to data for scientific and technical analysis; need for additional resources/expertise in the Convention* • Option 2: Minimum requirements for monitoring and reporting of data: issues could include requirements for leak detection, remote sensing. *Considerations: Access to data, verification of emission trends; potential for duplication of efforts* • Option 3: Adoption of national emission reduction targets/optimized national/regional methane reduction commitments: issues include binding or non-binding, national or collective using low-cost measures. *Considerations: First emission reduction commitment on methane, sets an example for other regions, may include a smaller number of countries; may reduce flexibility/cost-efficiency in implementing climate change targets addressing all GHGs (policies and measures)* • Option 4: Methane emission limit values for certain activities: issues include different requirements by sector; a new technical annex including emission limits & BAT, and guidance documents on best practices for major activities in certain sectors such as landfills, coal mining, oil and gas and agriculture. *Considerations: Guidance documents could be shared with other MEAs and initiatives; could incentivize/support and increase efficiency of biogas production and facilitate the uptake of renewable gases, technical annexes could be too stringent or result in barriers to implementation; key sources of CH₄ differ between subregions of UNECE area: uniform requirements on all CH₄ producing activities may be less cost-effective to achieve certain emission reductions* • Option 5: Voluntary programs (such as BACA): for example, agricultural best practices, consumer outreach, industry trade groups, behavioural and non-technical measures (could include guidance documents from Option 4) *Considerations: Could leverage resources with other initiatives with voluntary programs addressing methane and ozone, could duplicate efforts under GMI or CCAC; monitoring.* • Option 6: Capacity building programs, especially in Eastern Europe and Central Asia: supporting GMI, CCAC and coordination with the Forum (Task Force on International Cooperation on Air Pollution). *Considerations: Could apply resources directly to a country or a sector and achieve emission reductions more quickly; could leverage engagement mechanisms that are unique to UNECE, could overlap with existing efforts under GMI or CCAC (depending on how this is coordinated, this could be a pro or a con); may require additional resources (funding).”*).

⁵⁸⁰ Executive Body (2019) *Decision 2019/5 Establishment of the forum for international cooperation on air pollution* (“The Executive Body, Recognizing the importance of cooperation beyond the ECE region, Recalling the Long-term strategy for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution for 2020–2030 and beyond (decision 2018/5, annex), Recalling also that it agreed at its thirty-eighth session (Geneva, 10–14 December 2018) to establish a forum for collaboration on reducing air pollution (ECE/EB.AIR/142, para. 68 (b)), 1. Welcomes the establishment of the Forum in line with the proposal attached to the report of the Executive Body on its thirty-ninth session (see ECE/EB.AIR/144, Annex I);”). *See also* United Nations Economic Commission for Europe, *International Cooperation (last visited 31 August 2022)* (“The purpose of the forum is to provide a shared response to help address the threat to human health and ecosystems from air pollution. It also provides a platform for exchange and mutual learning and a repository of technical information.”).

⁵⁸¹ Executive Body (24 September 2021) *Draft report on the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone, as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2021/4, at ¶ 100 (“At its sixtieth session, the Working Group on Strategies and Review plans to discuss the need, best approach and potential options to address CH₄ in a future instrument: e.g., if and how to include CH₄ in the Protocol, which emission sources to focus on, and how to link with the forum for international collaboration on air pollution, the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Global Methane Initiative.”).

⁵⁸² Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution (30 June 2021) *Report prepared by the Co-Chairs of the Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution*, ECE/EB.AIR/GE.1/2021/8–ECE/EB.AIR/WG.1/2021/19 at ¶ 12(a), ¶ 13(b)(i) (“The Task Force will continue implementation of the 2020–2021 workplan with a focus on: (a) Updating the Task Force contribution to the review of the Gothenburg Protocol taking into account insights from the Climate and Clean Air Coalition global methane assessment, ongoing tagging and shipping analyses and review of methane mitigation scenarios; Given the progress under the current workplan, the needs of the ongoing review of the Gothenburg Protocol and the science needs expressed in the Convention’s Long-term strategy for 2020–2030 and beyond,⁸ the contribution of the Task Force to the Convention’s 2022–2023 workplan might be organized around three themes identified below that build on the current work. The Task Force leadership team invites discussion with the EMEP Steering Body on the prioritization of work in the following areas: (b) Global-regional model evaluation and intercomparison. Under this theme, the Task Force would continue to evaluate and intercompare global-regional models for ozone, particulate matter, mercury and POPs, with a focus on improving our confidence in estimating source-receptor relationships at intercontinental scales. Specifically, the Task Force might include organizing examinations of: (i) The regional ozone response to global methane reductions, working with the Meteorological Synthesizing Centre-West and the Task Force on Measurements and Modelling;”).

⁵⁸³ United States Department of State (10 November 2021) *U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s*, Press Release (“2. The United States and China, alarmed by reports including the Working Group I Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report released on August 9th, 2021, further recognize the seriousness and urgency of the climate crisis. They are committed to tackling it through their respective accelerated actions in the critical decade of the 2020s, as well as through cooperation in multilateral processes, including the UNFCCC process, to avoid catastrophic impacts.”).

⁵⁸⁴ United States Department of State (10 November 2021) *U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s*, Press Release (“8(C)(II). In addition to its recently communicated NDC, China intends to develop a comprehensive and ambitious National Action Plan on methane, aiming to achieve a significant effect on methane emissions control and reductions in the 2020s.”).

⁵⁸⁵ United States Department of State (10 November 2021) *U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s*, Press Release (“8(D). The United States and China intend to convene a meeting in the first half of 2022 to focus on the specifics of enhancing measurement and mitigation of methane, including through standards to reduce methane from the fossil and waste sectors, as well as incentives and programs to reduce methane from the agricultural sector.”).

⁵⁸⁶ United States Department of State (10 November 2021) *U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s*, Press Release (“16. The two sides intend to establish a ‘Working Group on Enhancing Climate Action in the 2020s,’ which will meet regularly to address the climate crisis and advance the multilateral process, focusing on enhancing concrete actions in this decade. This may include, inter alia, continued policy and technical exchanges, identification of programs and projects in areas of mutual interest, meetings of governmental and non-governmental experts, facilitating participation by local governments, enterprises, think tanks, academics, and other experts, exchanging updates on their respective national efforts, considering the need for additional efforts, and reviewing the implementation of the Joint Statement and this Joint Declaration.”).

⁵⁸⁷ People’s Republic of China (2021) *China’s Achievements, New Goals and New Measures for Nationally Determined Contributions*, submission to the Secretariat of the UNFCCC. See also Institute for Governance & Sustainable Development (28 October 2021) *Ahead of COP 26, China Submits Update to NDC and Mid-Century Development Strategy* (listing actions to address non-CO₂ greenhouse gases (GHGs) incorporated into China’s updated NDCs.).

⁵⁸⁸ European Parliament (21 October 2021) [Resolution on an EU strategy to reduce methane emissions](#), 2021/2006(INI) (“The European Parliament ‘calls on the Commission and the Member States to suggest and negotiate a binding global agreement on methane mitigation at the COP26 meeting in Glasgow in line with the modelled pathways that limit global warming to 1,5°C from the IPCC 1,5°C Special Report, the IPCC Sixth Assessment Report and the UNEP Global Methane Assessment. . . .’ It also ‘[p]oints to the lack of global leadership on the mitigation of methane emissions, with very little action being taken on methane internationally; calls on the Commission to make methane emissions reduction a top priority in its climate diplomacy and to take action, notably through a UN-based pathway, within the framework of the EU’s diplomatic and external relations in order to spearhead an international agreement on methane mitigation, promoting coordinated action to reduce methane emissions, as well as updating methane mitigation requirements”).

⁵⁸⁹ Velders G. J. M., Andersen S. O., Daniel J. S., Fahey D. W., & McFarland M. (2007) *The importance of the Montreal Protocol in protecting climate*, PROC. NAT. ACAD. SCI. 104(12): 4814–4819, 4816 (“In contrast, without the early warning of the effects of CFCs (MR74 scenario), estimated ODS emissions would have reached 24–76 GtCO₂-eq yr⁻¹ in 2010. Thus, in the current decade, in a world without ODS restrictions, annual ODS emissions using only the GWP metric could be as important for climate forcing as those of CO₂.”).

⁵⁹⁰ (16 September 1987) [Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer](#), 26 I.L.M. 1541 (entered into force 1 January 1989). For a discussion of the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, see generally Miller A. S., Zaelke D., & Andersen S. O. (2021) [RESETTING OUR FUTURE: CUT SUPER CLIMATE POLLUTANTS NOW! THE OZONE TREATY’S URGENT LESSONS FOR SPEEDING UP CLIMATE ACTION](#), John Hunt Publishing; and Andersen S., Zaelke D., Taddonio K., Ferris R., & Sherman N. (2021) *Ozone Layer, International Protection*, in MAX PLANCK ENCYCLOPEDIA OF PUBLIC INTERNATIONAL LAW, Oxford University Press, Peters A., & Wolfrum R. (eds.).

⁵⁹¹ (16 September 1987) [Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer](#), 26 I.L.M. 1541 (entered into force 1 January 1989). See also UN General Assembly (1992) [REPORT OF THE UNITED NATIONS CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT \(Rio Declaration on Environment and Development\)](#), A/CONF.151/26 (Vol. I), Principle 7 (“States shall cooperate in a spirit of global partnership to conserve, protect and restore the health and integrity of the Earth’s ecosystem. In view of the different contributions to global environmental degradation, States have common but differentiated responsibilities. The developed countries acknowledge the responsibility that they bear in the international pursuit of sustainable development in view of the pressures their societies place on the global environment and of the technologies and financial resources they command.”); and (9 May 1992) [UN Framework Convention on Climate Change](#), 1771 U.N.T.S. 107, 31 I.L.M. 849, Art. 3(1) (“The Parties should protect the climate system for the benefit of present and future generations of humankind, on the basis of equity and in accordance with their common but differentiated responsibilities and respective capabilities Accordingly, the developed country Parties should take the lead in combating climate change and the adverse effects thereof.”).

⁵⁹² (16 September 1987) [Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer](#), 26 I.L.M. 1541 (entered into force 1 January 1989).

⁵⁹³ Parties to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer (1990) [Decision II/8: Financial Mechanism](#). See also Miller A. S., Zaelke D., & Andersen S. O. (2021) [RESETTING OUR FUTURE: CUT SUPER CLIMATE POLLUTANTS NOW! THE OZONE TREATY’S URGENT LESSONS FOR SPEEDING UP CLIMATE ACTION](#), John Hunt Publishing, 83 (“The Multilateral Fund is replenished every three years by the developed countries, most recently at around \$550 million. The fund has been extremely cost-effective. Considering only the climate benefits, the Multilateral Fund has reduced CO₂ at a cost of less than \$0.10 a ton.”).

⁵⁹⁴ United Nations Environment Programme, [National Ozone Officers’ Capacity Building](#) (last visited 31 August 2022) (“Since 1991, UN Environment OzoneAction has devoted itself to supporting and strengthening National Ozone Units in all 147 developing countries. The [Compliance Assistance Programme \(CAP\)](#) uses a participatory approach that draws on the experience of numerous NOOs, guidance from international agencies and individual experts. UN Environment promotes learning and skill growth through sharing the collective wisdom of the wider community of Ozone Officers who are leading National Ozone Units.”).

⁵⁹⁵ United Nations Environment ProgrammeOzone Secretariat, [Scientific Assessment Panel \(SAP\)](#) (last visited 31 August 2022) (“The Scientific Assessment Panel (SAP) assesses the status of the depletion of the ozone layer and relevant

atmospheric science issues. Pursuant to Article 6 of the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, a report is prepared every three or four years by the SAP which consists of hundreds of top scientists from around the world.”).

⁵⁹⁶ United Nations Environment Programme Ozone Secretariat, *Technical and Economic Assessment Panel* (last visited 31 August 2022) (“In 1990 the Technology and Economic Assessment Panel was established as the technology and economics advisory body to the Montreal Protocol Parties. The Technology and Economic Assessment Panel (TEAP) provides, at the request of Parties, technical information related to the alternative technologies that have been investigated and employed to make it possible to virtually eliminate use of Ozone Depleting Substances (such as CFCs and halons), that harm the ozone layer.”).

⁵⁹⁷ Parson E. (2006) *Chapter 11: Ground for Hope: Assessing Technological Options to Manage Ozone Depletion*, in ASSESSMENTS OF REGIONAL AND GLOBAL ENVIRONMENTAL RISKS: DESIGNING PROCESSES FOR THE EFFECTIVE USE OF SCIENCE IN DECISIONMAKING, Resources for the Future, Farrell A. & Jager J. (eds.), 231 (“A series of design decisions made in these initial consultations were decisive for the subsequent effectiveness of the panels. Most importantly, organizational decisions made in the interests of fast work had the effect of substantially reducing the political control over the panels from what was originally envisioned in Protocol negotiations. Rather than authorizing a political body to supervise and integrate the work ... each of these four groups operated with substantial independence under its chair.”). See also Kuijpers L., Tope H., Banks J., Brunner W., & Woodcock A. (1998) *Scientific Objectivity, Industrial Integrity, and the TEAP Process*, in PROTECTING THE OZONE LAYER: LESSONS, MODELS, AND PROSPECTS, Springer, Le Prestre P. G., Reid J. D., & Morehouse E. T. (eds.), 167 (“The principles of scientific objectivity and industrial integrity are critical to the TEAP’s ability to provide useful policy-relevant, technical information to the Parties to the Montreal Protocol.... Reports are developed through a consensus approach and this leads to the quality technical data on which the parties can rely.... In many cases members are drawn from industry with direct experience in the use of ODS and their alternatives. It is important to have individuals with the integrity to remain independent despite the funding they receive from their sponsoring organisations or companies.”).

⁵⁹⁸ (22 March 1985) *Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer*, 26 I.L.M. 1516 (entered into force 22 September 1988) (“The Vienna Convention, among other things, provides that: Parties shall take appropriate measures in accordance with the provisions of this Convention and of those protocols in force to which they are party to protect human health and the environment against adverse effects resulting or likely to result from human activities which modify or are likely to modify the ozone layer. Article 2(1). To this end the Parties shall, in accordance with the means at their disposal and their capabilities: a. Co-operate by means of systemic observations, research and information exchange in order to better understand and assess the effects of human activities on the ozone layer and the effects on human health and the environment from modification of the ozone layer; b. Adopt appropriate legislative or administrative measures and co-operate in harmonizing appropriate policies to control, limit, reduce or prevent human activities under their jurisdiction or control should it be found that these activities have or are likely to have adverse effects resulting from modification or likely modification of the ozone layer; c. Co-operate in the formulation of agreed measures, procedures and standards for the implementation of this Convention, with a view to the adoption of protocols and annexes; d. Co-operate with competent international bodies to implement effectively this Convention and protocols to which they are party.”).

⁵⁹⁹ Miller A. S., Zaelke D., & Andersen S. O. (2021) *RESETTING OUR FUTURE: CUT SUPER CLIMATE POLLUTANTS NOW! THE OZONE TREATY’S URGENT LESSONS FOR SPEEDING UP CLIMATE ACTION*, John Hunt Publishing, 82 (“The Montreal Protocol’s sectoral approach can be thought of as a series of frames or lenses to look at the other super climate pollutants and gain insights that can help change climate strategy—themes we explore in the concluding section of this chapter. Another benefit of a sectoral approach is that it can make it easier to address the challenge of keeping the playing field level for businesses. No company wants to be put at a competitive disadvantage because it is the only one following the rules. All the companies in a sector need to follow the rules and need to help police one another. The sectoral focus has allowed the Parties to develop the expertise they need to solve their specific part of the climate problem, and this has given them the confidence to strengthen their treaty continuously.”).

⁶⁰⁰ Jackson R. B., Solomon E. I., Canadell J. G., Cargnello M., & Field C. B. (2019) *Methane removal and atmospheric restoration*, NAT. SUSTAIN. 2: 436–438, 436 (“In contrast to negative emissions scenarios for CO₂ that typically assume hundreds of billions of tonnes removed over decades and do not restore the atmosphere to preindustrial levels, methane concentrations could be restored to ~750 ppb by removing ~3.2 of the 5.3 Gt of CH₄ currently in the atmosphere. Rather

than capturing and storing the methane, the 3.2 Gt of CH₄ could be oxidized to CO₂, a thermodynamically favourable reaction.... In total, the reaction would yield 8.2 additional Gt of atmospheric CO₂, equivalent to a few months of current industrial CO₂ emissions, but it would eliminate approximately one sixth of total radiative forcing. As a result, methane removal or conversion would strongly complement current CO₂ and CH₄ emissions-reduction activities. The reduction in short-term warming, attributable to methane's high radiative forcing and relatively short lifetime, would also provide more time to adapt to warming from long-lived greenhouse gases such as CO₂ and N₂O.”). Klaus Lackner critiqued the Jackson *et al.* article in a published response, arguing that implementing zeolite mechanisms to facilitate CH₄ removal is not practical. Lackner noted CH₄ removal faces the challenge of extreme dilution in the atmosphere, so “the amount of air that would need to be moved [to facilitate CH₄ removal] would simply be too great” to be economically feasible. However, Lackner did note passive methods of CH₄ removal through the use of zeolites may still be a viable solution. Lackner further argues that N₂O may be a more worthy target for removal due to its long lifetime in the atmosphere. See Lackner K. S. (2020) *Practical Constraints on Atmospheric Methane Removal*, NAT. SUSTAIN. 3: 357. Jackson *et al.* published a response to Lackner, acknowledging his stature in the greenhouse gas removal field and his concerns about the feasibility and energy requirements of their proposed mechanism, offering additional explanation about alternative options for use of the captured methane instead of just converting it to CO₂ as suggested in the original study. See Jackson R. B., Solomon E. I., Canadell J. G., Cargnello M., Field C. B., & Abernethy S. (2020) *Reply to: Practical constraints on atmospheric methane removal*, NAT. SUSTAIN. 3: 358–359. Another study looking at removing non-CO₂ GHGs investigated the potential of using solar chimney power plants (SCPPs) with select photocatalysts (depending on what GHGs desired to be captured). While the SCPP serves as a source of renewable energy that could remove methane and nitrous oxide among other atmospheric pollutants, scaling up the prototype would require a massive amount of land area (roughly 23 times the size of the entire Beijing municipality) and a chimney stretching 1000–1500 m into the air, which limits how practical the existing technology may be. See de Richter R., Tingzhen M., Davies P., Wei L., & Caillol S. (2017) *Removal of non-CO₂ greenhouse gases by large-scale atmospheric solar photocatalysis*, PROG. ENERGY COMBUST. SCI. 60: 68–96 (“Large-scale atmospheric removal of greenhouse gases (GHGs) including methane, nitrous oxide and ozone-depleting halocarbons could reduce global warming more quickly than atmospheric removal of CO₂. Photocatalysis of methane oxidizes it to CO₂, effectively reducing its global warming potential (GWP) by at least 90%.”). See also Methane Action (16 April 2021) *Scientists’ Statement on Lowering Atmospheric Methane Concentrations* (“To deal with methane emissions that can’t otherwise be mitigated, to reduce the overall methane burden, and to get atmospheric methane levels to a range consistent with meeting climate goals, we must combine prevention and mitigation of new methane emissions with actively lowering the concentration of methane already in the atmosphere.”); Jackson R. B. & Wysham D. (28 September 2021) *Focus on methane is timely and appropriate*, THE HILL; and Nisbet E. G., Dlugokencky E. J., Fisher R. E., France J. L., Lowry D., Manning M. R., Michel S. E., & Warwick N. J. (2021) *Atmospheric methane and nitrous oxide: challenges along the path to Net Zero*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(20200457): 1–24, 10 (“Methane potentially provides many good near-future (this decade) mitigation targets. Cutting methane emission is broadly cost-effective compared to methane removal from ambient air [94], though with appropriate technology in appropriate high methane settings, removal may indeed be an option [95,96]. Jackson et al. [97] point in particular to the need to more research into removal methods.”).

⁶⁰¹ Molina M., Zaelke D., Sarma K. M., Andersen S. O., Ramanathan V., & Kaniaru D. (2009) *Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 106(49): 20616–20621, 20616 (“Current emissions of anthropogenic greenhouse gases (GHGs) have already committed the planet to an increase in average surface temperature by the end of the century that may be above the critical threshold for tipping elements of the climate system into abrupt change with potentially irreversible and unmanageable consequences. This would mean that the climate system is close to entering if not already within the zone of ‘dangerous anthropogenic interference’ (DAI). Scientific and policy literature refers to the need for ‘early,’ ‘urgent,’ ‘rapid,’ and ‘fast-action’ mitigation to help avoid DAI and abrupt climate changes. We define ‘fast-action’ to include regulatory measures that can begin within 2–3 years, be substantially implemented in 5–10 years, and produce a climate response within decades.”). See also Molina M., Ramanathan V. & Zaelke D. (2020) *Best path to net zero: Cut short-lived climate pollutants*, BULLETIN OF THE ATOMIC SCIENTISTS (“And let us be clear: By ‘speed,’ we mean measures—including regulatory ones—that can begin within two-to-three years, be substantially implemented in five-to-10 years, and produce a climate response within the next decade or two.”).

⁶⁰² Drijfhout S., Bathiany S., Beaulieu C., Brovkin V., Claussen M., Huntingford C., Scheffer M., Sgubin G., & Swingedouw D. (2015) *Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 112(43): E5777–E5786, E5777 (“Abrupt transitions of regional climate in response to the gradual rise

in atmospheric greenhouse gas concentrations are notoriously difficult to foresee. However, such events could be particularly challenging in view of the capacity required for society and ecosystems to adapt to them. We present, to our knowledge, the first systematic screening of the massive climate model ensemble informing the recent Intergovernmental Panel on Climate Change report, and reveal evidence of 37 forced regional abrupt changes in the ocean, sea ice, snow cover, permafrost, and terrestrial biosphere that arise after a certain global temperature increase. Eighteen out of 37 events occur for global warming levels of less than 2°, a threshold sometimes presented as a safe limit.”). *See also* Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, NATURE 575(7784): 592–595, 593 (“A further key impetus to limit warming to 1.5 °C is that other tipping points could be triggered at low levels of global warming. The latest IPCC models projected a cluster of abrupt shifts between 1.5 °C and 2 °C, several of which involve sea ice. This ice is already shrinking rapidly in the Arctic....”); Arias P. A., *et al.* (2021) *Technical Summary*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), TS-71–TS-72 (“It is likely that under stabilization of global warming at 1.5°C, 2.0°C, or 3.0°C relative to 1850–1900, the AMOC will continue to weaken for several decades by about 15%, 20% and 30% of its strength and then recover to pre-decline values over several centuries (*medium confidence*). At sustained warming levels between 2°C and 3°C, there is limited evidence that the Greenland and West Antarctic Ice Sheets will be lost almost completely and irreversibly over multiple millennia; both the probability of their complete loss and the rate of mass loss increases with higher surface temperatures (*high confidence*). At sustained warming levels between 3°C and 5°C, near-complete loss of the Greenland Ice Sheet and complete loss of the West Antarctic Ice Sheet is projected to occur irreversibly over multiple millennia (*medium confidence*); with substantial parts or all of Wilkes Subglacial Basin in East Antarctica lost over multiple millennia (*low confidence*). Early-warning signals of accelerated sea-level-rise from Antarctica, could possibly be observed within the next few decades. For other hazards (e.g., ice sheet behaviour, glacier mass loss and global mean sea level change, coastal floods, coastal erosion, air pollution, and ocean acidification) the time and/or scenario dimensions remain critical, and a simple and robust relationship with global warming level cannot be established (*high confidence*).... The response of biogeochemical cycles to anthropogenic perturbations can be abrupt at regional scales and irreversible on decadal to century time scales (*high confidence*). The probability of crossing uncertain regional thresholds increases with climate change (*high confidence*). It is very unlikely that gas clathrates (mostly methane) in deeper terrestrial permafrost and subsea clathrates will lead to a detectable departure from the emissions trajectory during this century. Possible abrupt changes and tipping points in biogeochemical cycles lead to additional uncertainty in 21st century atmospheric GHG concentrations, but future anthropogenic emissions remain the dominant uncertainty (*high confidence*). There is potential for abrupt water cycle changes in some high-emission scenarios, but there is no overall consistency regarding the magnitude and timing of such changes. Positive land surface feedbacks, including vegetation, dust, and snow, can contribute to abrupt changes in aridity, but there is only low confidence that such changes will occur during the 21st century. Continued Amazon deforestation, combined with a warming climate, raises the probability that this ecosystem will cross a tipping point into a dry state during the 21st century (*low confidence*). {TS3.2.2, 5.4.3, 5.4.5, 5.4.8, 5.4.9, 8.6.2, 8.6.3, Cross-chapter Box 12.1}”); Lee J. Y., *et al.* (2021) *Chapter 4: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 4-96 (Table 4.10 lists 15 components of the Earth system susceptible to tipping points); and Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) *Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points*, SCIENCE 377(6611): eabn7950, 1–10, 7 (“The chance of triggering CTPs is already non-negligible and will grow even with stringent climate mitigation (SSP1-1.9 in Fig. 2, B and C). Nevertheless, achieving the Paris Agreement’s aim to pursue efforts to limit warming to 1.5°C would clearly be safer than keeping global warming below 2°C (90) (Fig. 2). Going from 1.5 to 2°C increases the likelihood of committing to WAIS and GrIS collapse near complete warm-water coral die-off, and abrupt permafrost thaw; further, the best estimate threshold for LABC collapse is crossed. The likelihood of triggering AMOC collapse, Boreal forest shifts, and extra-polar glacier loss becomes non-negligible at >1.5°C and glacier loss becomes likely by ~2°C. A cluster of abrupt shifts occur in ESMs at 1.5 to 2°C (19). Although not tipping elements, ASSI loss could become regular by 2°C, gradual permafrost thaw would likely become widespread beyond 1.5°C, and land carbon sink weakening would become significant by 2°C.”).

⁶⁰³ *See* Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.); and Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) CLIMATE CHANGE 2022:

IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY, *Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., et al. (eds.).

⁶⁰⁴ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#).

⁶⁰⁵ The Arctic Council has two working groups and two expert groups that work on controlling methane emissions. These two working groups, the Arctic Contaminants Action Program (ACAP) and Arctic Monitoring & Assessment Programme (AMAP), each have an SLCP-specific expert group: the Expert Group on Short-Lived Climate Pollutants (within ACAP) and the Expert Group on Black Carbon and Methane (within AMAP). See Arctic Council, [Black Carbon and Methane Expert Group](#) (last visited 29 July 2022); Arctic Council, [Arctic Contaminants Action Program](#) (last visited 29 July 2022); and Arctic Council, [AMAP and the Arctic Council](#) (last visited 29 July 2022).

⁶⁰⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change (28 February 2022) [Climate change: a threat to human wellbeing and health of the planet. Taking action now can secure our future](#), Newsroom (“Any further delay in concerted anticipatory global action on adaptation and mitigation will miss a brief and rapidly closing window of opportunity to secure a liveable and sustainable future for all, said [AR6 WGII co-chair] Hans-Otto Pörtner.”). See also Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) [Summary for Policymakers](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change](#), Pörtner H.-O., et al. (eds.), SPM-11, SPM-13 (“Approximately 3.3 to 3.6 billion people live in contexts that are highly vulnerable to climate change (*high confidence*).”; “Levels of risk for all Reasons for Concern (RFC) are assessed to become high to very high at lower global warming levels than in AR5 (*high confidence*). Between 1.2°C and 4.5°C global warming level very high risks emerge in all five RFCs compared to just two RFCs in AR5 (*high confidence*). Two of these transitions from high to very high risk are associated with near-term warming: risks to unique and threatened systems at a median value of 1.5°C [1.2 to 2.0] °C (*high confidence*) and risks associated with extreme weather events at a median value of 2°C [1.8 to 2.5] °C (*medium confidence*). Some key risks contributing to the RFCs are projected to lead to widespread, pervasive, and potentially irreversible impacts at global warming levels of 1.5–2°C if exposure and vulnerability are high and adaptation is low (*medium confidence*).”; “SPM.B.3 Global warming, reaching 1.5°C in the near-term, would cause unavoidable increases in multiple climate hazards and present multiple risks to ecosystems and humans (*very high confidence*). The level of risk will depend on concurrent near-term trends in vulnerability, exposure, level of socioeconomic development and adaptation (*high confidence*).”).

⁶⁰⁷ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 17 (“Mitigation of methane is very likely the strategy with the greatest potential to decrease warming over the next 20 years.”).

⁶⁰⁸ Based upon IGSD’s research involving the [UNFCCC NDC Registry](#), 184 NDCs directly reference methane. Of these, 28 NDCs include quantitative sectoral or economy-wide methane-reduction targets. See [IGSD NDC tracker](#) (last updated 23 August 2022).

⁶⁰⁹ White House (17 September 2021) [Meeting of the Major Economies on Energy and Climate September 17 2021: Chair’s Summary](#), Press Release (“Recognizing that methane is a powerful, short-lived climate pollutant that already accounts for about half of 1.0 degrees C of net warming to date, the Global Methane Pledge, an effort co-initiated by the United States and the European Union, will involve a collective goal of reducing global methane emissions by at least 30 percent below 2020 levels by 2030 and implementation of related domestic actions. There was broad recognition at the meeting of the importance of rapidly reducing methane emissions, and many MEF members, including the European Union, Argentina, Indonesia, Italy, Mexico, the United Kingdom, and the United States, declared their intention to join. It was reported that non-MEF countries, including Ghana and Iraq, have also signaled intent to join the Global Methane Pledge. These early supporters of the Pledge include six of the top 15 methane emitters globally and together account for over one-fifth of global methane emissions and nearly half of the global economy.”).

⁶¹⁰ For a list of Global Methane Pledge participants, see <https://www.globalmethanepledge.org/#pledges>.

⁶¹¹ White House (18 September 2021) *Joint US-EU Press Release on the Global Methane Pledge*, Statements and Releases (“The European Union and eight countries have already indicated their support for the Global Methane Pledge: Argentina / European Union / Ghana / Indonesia / Iraq / Italy / Mexico / United Kingdom / United States”).

⁶¹² G20 (31 October 2021) *Rome Leaders’ Declaration*, 8 (“We commit to significantly reduce our collective greenhouse gas emissions, taking into account national circumstances and respecting our NDCs. We acknowledge that methane emissions represent a significant contribution to climate change and recognize, according to national circumstances, that its reduction can be one of the quickest, most feasible and most cost-effective ways to limit climate change and its impacts. We welcome the contribution of various institutions, in this regard, and take note of specific initiatives on methane, including the establishment of the International Methane Emissions Observatory (IMEO). We will further promote cooperation, to improve data collection, verification, and measurement in support of GHG inventories and to provide high quality scientific data.”).

⁶¹³ (30 June 2021) *Commission Regulation 2021/1119*, 2021 O.J.L. 243, Art. 4(1) (“In order to reach the climate-neutrality objective set out in Article 2(1), the binding Union 2030 climate target shall be a domestic reduction of net greenhouse gas emissions (emissions after deduction of removals) by at least 55 % compared to 1990 levels by 2030.”).

⁶¹⁴ European Commission (14 October 2020) *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on an EU strategy to reduce methane emissions*, 16 (“As the largest importer of oil and gas, the EU has the leverage to promote energy-related methane emission reductions globally. Estimates show that the external carbon or methane emissions associated with EU fossil gas consumption (i.e. the emissions released outside the EU to produce and deliver fossil gas to the EU) are between three to eight times the quantity of emissions occurring within the EU. The Commission therefore intends to mobilise a coalition of key import countries to coordinate efforts on energy sector methane emissions. Moreover, the EU will leverage its leadership in the circular economy and its advanced agricultural practices that balance animal welfare with productivity to accelerate international action. The Commission will also support international data sharing on methane emissions through the foreseen international methane emissions observatory as well as by making EU satellite data available to global partners. In this way, the EU will lead by example in international collaboration on data sharing.”).

⁶¹⁵ See (amended 4 May 2012) *1999 Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone to the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution* (“Gothenburg Protocol”), ECE/EB.AIR/114, Art. 1(11 quarter) (“Ozone precursors’ means nitrogen oxides, volatile organic compounds, methane and carbon monoxide”); and Executive Body Working Group on Strategies and Review (30 September 2020) *Preparations for the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2020/3 – EBE/EB.AIR/WG.5/2020/3 at ¶ 20, (“As per the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond (paragraph 50), the review should look at appropriate steps towards reducing emissions of black carbon, ozone precursors not yet addressed such as methane, and emissions from shipping with due consideration for International Maritime Organization (IMO) policies and measures.... In line with the priorities identified in the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond, the following should specifically be considered in answering the questions in annex I: (b) Hemispheric transport of ozone and particulate matter and their precursors and advancing efforts to address air pollution on a broader scale per paragraphs 63 and 78 of the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond; health and ecosystem impacts from outside the ECE region; I Methane and its relationship to the hemispheric transport of ozone and its contribution to ozone in the ECE region;”).

⁶¹⁶ Climate & Clean Air Coalition (9 November 2021) *Climate and Clean Air Coalition Ministers approve strategy to significantly cut short-lived climate pollutants this decade*, Press Release (“Ministers approved the implementation of a Methane Flagship, which, starting in 2022, will foster and strengthen high level commitments to reduce methane, amplify and raise awareness, support planning and delivery of strategies and plans, provide analysis and tools to support action, and scale up financing. There was strong and broad support for the recently launched Global Methane Pledge and ministers welcomed the CCAC having a leadership role in supporting its implementation.”).

⁶¹⁷ United States Department of State (10 November 2021) *U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s*, Media Note (“8. Recognizing specifically the significant role that emissions of methane play in increasing temperatures, both countries consider increased action to control and reduce such emissions to be a matter of necessity in the 2020s. To this end: A. The two countries intend to cooperate to enhance the measurement of methane

emissions; to exchange information on their respective policies and programs for strengthening management and control of methane; and to foster joint research into methane emission reduction challenges and solutions.”).

⁶¹⁸ Institute for Governance & Sustainable Development (25 November 2021) *China Announces Next Steps on Methane Emissions Control During the 14th Five-Year Period*, Press Release (“China’s Ministry of Ecology and Environment (MEE) announced next steps for methane emissions control during the 14th Five-Year period (2021-2025), at its monthly press conference in November 2021. These steps are intended to support China’s targets for achieving net-zero emissions of all greenhouse gases (GHGs) by 2060 and implement the U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s.”).

⁶¹⁹ Good K. (22 August 2022) *Drought Negatively Impacting China, the U.S. and Europe, as Ukrainian Black Sea Exports Continue*, Farm Policy News (“Parts of China are experiencing their longest sustained heat wave since record-keeping began in 1961, according to China’s National Climate Center, leading to manufacturing shutdowns owing to lack of hydropower. The drought affecting Spain, Portugal, France and Italy is on track to be the worst in 500 years, according to Andrea Toreti, a climate scientist at the European Commission’s Joint Research Center. In the American West, a drought that began two decades ago now appears to be the worst in 1,200 years, according to a study led by the University of California, Los Angeles.”).

⁶²⁰ Environment and Climate Change Canada (2019) *Regulations Respecting Reduction in the Release of Methane and Certain Volatile Organic Compounds (Upstream Oil and Gas Sector)* (“Companies must register their facilities before April 30th, 2020, or within 120 days of when the facility begins to be covered by any of the requirements. There are also provisions in the regulations to retain information for record-keeping, inspection purposes, and for on-demand reporting to Environment and Climate Change Canada. Regulatory requirements for fugitive equipment leaks, venting from well completions, and compressors, come into force on January 1, 2020. Regulatory requirements for facility production venting restrictions and venting limits for pneumatic equipment come into force on January 1, 2023.”).

⁶²¹ Government of Mexico Agency for Safety, Energy and Environment (6 November 2018) *DISPOSICIONES Administrativas de carácter general que establecen los Lineamientos para la prevención y el control integral de las emisiones de metano del Sector Hidrocarburos* (“Que la información disponible a nivel internacional y nacional ha demostrado que, implementando mejoras operativas y tecnológicas disponibles, es factible reducir las emisiones de metano en el Sector Hidrocarburos. En ese sentido, la Agencia Internacional de Energía en la publicación Perspectiva Mundial de la Energía 2017, concretamente en lo relativo al caso ambiental del gas natural, reconoce que, aplicando las mejores prácticas internacionales, tales como las que este instrumento regulatorio integra, es factible y posible que a nivel mundial el sector reduzca las emisiones de metano hasta en un 75%.”); *discussed in* Clean Air Task Force (13 November 2018) *Mexico Takes a Giant Leap Forward in Regulating Methane Emissions*, Press Release; and Del Rio D., Evangelista R., & Arrieta Maza M. (21 November 2018) *Mexico: Program For The Prevention And Comprehensive Management Of Methane Emissions Within The Hydrocarbon Sector ("PPCIEM")*, MONDAQ.

⁶²² White House (29 June 2016) *Leaders’ Statement on a North American Climate, Clean Energy, and Environment Partnership*, Statements and Releases (“Today, Mexico will join Canada and the United States in committing to reduce their methane emissions from the oil and gas sector – the world’s largest industrial methane source – 40% to 45% by 2025, towards achieving the greenhouse gas targets in our nationally determined contributions. To achieve this goal, the three countries commit to develop and implement federal regulations to reduce emissions from existing and new sources in the oil and gas sector as soon as possible. We also commit to develop and implement national methane reduction strategies for key sectors such as oil and gas, agriculture, and waste management, including food waste. Finally, we pledge to continue collaborating with one another and with international partners as we commit to significant national actions to reduce black carbon emissions in North America, and promote alternatives to highly polluting hydrofluorocarbons.”).

⁶²³ *See, e.g., Greenhouse Gas Emission Standards for Crude Oil and Natural Gas Facilities*, Cal. Code Regs. Tit. 17, §§ 95665–95677.

⁶²⁴ New Mexico Administrative Code (26 July 2022) *Venting and Flaring of Natural Gas*, NMAC 19.15.27.8; *discussed in* Evans B. (26 March 2021) *New Mexico regulator puts in place rule requiring operators to eliminate gas flaring*, S&P GLOBAL (“The New Mexico Oil Conservation Commission finalized the rules to eliminate venting and flaring at new and existing wells across the state on March 25. Routine flaring occurs when operators burn off gas produced from oil-directed

wells instead of capturing it because of limitations in gathering and processing capacity. New Mexico joins Colorado in becoming the first states in the Lower 48 to end flaring.”). *See also* New Mexico Environment Department (14 April 2022) *New Mexico adopts nationally leading oil and gas emissions rule*, Press Release (“After two and half years of collaborative public and stakeholder engagement, the Environmental Improvement Board (EIB) adopted new air quality rules that will eliminate hundreds of millions of pounds of harmful emissions annually from oil and gas operations in New Mexico. The new rule will improve air quality for New Mexicans by establishing innovative and actionable regulations to curb the formation of ground-level ozone. The new rule will reduce harmful emissions of ozone precursor pollutants – volatile organic compounds and oxides of nitrogen – by approximately 260 million pounds annually, and will have the co-benefit of reducing methane emissions by over 851 million pounds annually. Starting this summer, compliance obligations for new and existing oil and gas operations in New Mexico counties with high ozone levels will begin to take effect. These counties are Chaves, Doña Ana, Eddy, Lea, Rio Arriba, Sandoval, San Juan, and Valencia counties.”); *and* State of New Mexico Environmental Improvement Board (2022) *Hearing Officer’s Report*, 20.2.50 NMAC – Oil and Gas Sector – Ozone Precursor Pollutants (*discussing* the methane emissions reduction co-benefit of adopting mitigation measures for volatile organic compounds (VOCs) and nitrogen oxides (NOx) in the oil and gas sector).

⁶²⁵ *Drilling units - pooling interests*, Colo. Rev. Stat. § 34-60-116 (2020) (“To prevent or to assist in preventing waste, to avoid the drilling of unnecessary wells, or to protect correlative rights, the commission, upon its own motion or on a proper application of an interested party, but after notice and hearing as provided in this section, may establish one or more drilling units of specified size and shape covering any pool or portion of a pool.”). *See also* *Venting or Flaring Natural Gas*, 2 Colo. Code Regs. § 404-1-903 (2022).

⁶²⁶ British Columbia (2021) *CLEANBC: ROADMAP TO 2030*, 51 (“With this Roadmap, we are committed to building on that research and applying it across the industrial sector to achieve our goal of zero emissions from methane – or as close to zero as possible – by 2035, and to reduce methane emissions in the oil and gas sector by 75% (compared to 2014) by 2030, consistent with the federal commitment. Methane from industrial wood waste landfills can be converted to less-harmful greenhouse gases through landfill management.”).

⁶²⁷ C40 Cities, *Waste Management* (*last visited* 31 August 2022) (“Waste disposal is responsible for 3-5% of the overall direct GHG emissions in cities and those are projected to increase from 1.12 billion tonnes today to 2.38 billion tonnes of CO₂e per year by 2050. 97% of those emissions are in the form of methane, an extremely powerful greenhouse gas and climate forcer, emitted when organic waste breaks down in open dumps or landfills without gas collection. Because methane is a short-lived greenhouse gas, reducing its emissions would see impact within this generation. This is a particularly urgent opportunity for Global South cities where the organics content of waste is highest, and action taken here will improve its economic development, reduce social and climate vulnerability, reduce operational and opportunity costs, while extending the operational lifetime of disposal sites.”).

⁶²⁸ Climate Group, Under2 Coalition, *Methane Project* (*last visited* 31 August 2022) (“A forum for state and regional governments to share effective ways to reduce methane emissions, beginning with a focus on the oil and gas sector.”).

⁶²⁹ Schlingler R. (15 April 2021) *Carbon Mapper launches satellite program to pinpoint methane and CO₂ super emitters*, PLANET (“Carbon Mapper, in collaboration with its public and private partners, is developing the satellite constellation in three phases. The initial study phase is complete and included two years of preliminary engineering development and manufacturing. Phase 1 is underway and includes development of the first two satellites by Planet and NASA JPL, planned to launch in 2023, accompanying data processing platforms, and ongoing cooperative methane mitigation pilot projects using aircraft in California and other US states. Phase 2, which is in development, would encompass the expansion to an operational multi-satellite constellation starting in 2025.”).

⁶³⁰ United Nations Environment Programme (31 October 2021) *Methane Observatory launched to boost action on powerful climate-warming gas*, Press Release (“IMEO will improve the reporting accuracy and public transparency of human-caused methane emissions. IMEO will initially focus on methane emissions from the fossil fuel sector, and then expand to other major emitting sectors like agriculture and waste.”).

⁶³¹ Global Methane Initiative, *About the Global Methane Initiative* (*last visited* 31 August 2022) (“Launched in 2004, the GMI is an international public-private initiative that advances cost-effective, near-term methane abatement and recovery and use of methane as a clean energy source in three sectors: biogas (including agriculture, municipal solid waste, and

wastewater), coal mines, and oil and gas systems. Focusing collective efforts on methane emission sources is a cost-effective approach to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and increase energy security, enhance economic growth, improve air quality and improve worker safety.”).

⁶³² Oil and Gas Climate Initiative, *About Us* (last visited 31 August 2022) (“OGCI member companies commit to: **Methane Intensity** -> By 2025, reduce the collective average methane intensity of aggregated upstream oil and gas operations to well below 0.20%, from a 2017 baseline of 0.30%. **Carbon Intensity** -> Reduce member companies’ aggregate upstream carbon intensity from 23 kg of greenhouse gases per barrel of oil or gas in 2017 to 17 kg by 2025. **CCUS Kickstarter** -> By 2030, help to decarbonize multiple industrial hubs and kickstart a commercial **CCUS** industry that can have a significant impact on greenhouse gas emissions. **OGCI Climate Investments** -> Invest OGCI’s \$1B+ fund over a ten-year period to deliver a tangible impact on greenhouse gas emissions through accelerated innovation across the energy and industrial sectors. **Zero Routine Flaring** -> Support explicitly the aims of Zero Routine Flaring by 2030.”).

⁶³³ MiQ, *The Methane Mission* (last visited 31 August 2022) (“To tackle methane emissions, companies need a granular understanding of where these are coming from, as well as robust methane mitigation practices and technology to enable them to actually address the issue. That’s where MiQ comes in. MiQ has developed a global solution for a global issue, grading gas on methane emissions to drive change in parallel with regulation through a not-for-profit and independently audited certification standard. Why? Because differentiating producers based on their methane emissions performance will incentivise businesses to improve because it simply makes good climate – and business – sense.”).

⁶³⁴ American Gas Association, *Natural Gas Sustainability Initiative (NGSI)* (last visited 31 August 2022) (“NGSI is a voluntary, industry-wide approach for companies to calculate methane emissions intensity by segment—the Methane Emissions Intensity Protocol (Protocol). This consistent, transparent and comparable method for measuring and reporting methane emissions throughout the natural gas supply chain will improve the quality of information available and will help companies more effectively identify ways to reduce methane emissions and communicate progress.”).

⁶³⁵ See Kaniaru D., Shende R. & Zaelke D, (2008) *Landmark Agreement to Strengthen Montreal Protocol Provides Powerful Climate Mitigation*, SUSTAIN. DEV. LAW POL. 8(2): 46–50, 46 (“The HCFC agreement and its climate benefits were possible largely because of the Montreal Protocol’s unique history of continuous adjustment to keep pace with scientific understanding and technological capability. The Parties to the Protocol generally regard the treaty as fair, due to its objective technical assessment bodies and its effective financial mechanism, the Multilateral Fund. These features and others have made the Protocol the world’s most successful multilateral environmental agreement, phasing out ninety-five percent of global production of ozone-depleting substances in just twenty years and placing the ozone layer on a path to recovery.”); and Parson E. (2006) *Chapter 11: Ground for Hope: Assessing Technological Options to Manage Ozone Depletion*, in ASSESSMENTS OF REGIONAL AND GLOBAL ENVIRONMENTAL RISKS: DESIGNING PROCESSES FOR THE EFFECTIVE USE OF SCIENCE IN DECISIONMAKING, Resources for the Future, Farrell A. & Jager J. (eds.), 228 (“Indeed, although technical option assessments have been less frequently undertaken, less frequently effective, and less prominent in policy debate than scientific assessments of environmental risk, [the case of the Montreal Protocol TEAP] suggests that they may hold far greater prospect for exercising decisive influence on policy debate and action to manage environmental risks—if the factors contributing to their strong influence in this case can be repeated elsewhere.”).

⁶³⁶ See Breitmeier H., Underdal A., & Young O. R. (2011) *The Effectiveness of International Environmental Regimes: Comparing and Contrasting Findings from Quantitative Research*, INT’L. STUD. REV. 13(4): 579–605, 584 (“Although the nature of the project makes it somewhat harder to tease out findings of a general nature about effectiveness, the overall message that AIER generates is that regimes frequently do matter; sometimes they matter a lot.”); Miles E. L., Andresen S., Carlin E. M., Skjærseth J. B., Underdal A., & Wettestad J. (2001) *ENVIRONMENTAL REGIME EFFECTIVENESS: CONFRONTING THEORY WITH EVIDENCE*, MIT Press; and Breitmeier H., Young O. R., & Zürn M. (2006) *ANALYZING INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL REGIMES: FROM CASE STUDY TO DATABASE*, MIT Press.

⁶³⁷ Weiss E. B. (2009) *Introductory Note on the Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer and Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*, United Nations Audiovisual Library of International Law (“A working group under UNEP began negotiations on a protocol, and the Montreal Protocol was concluded in September, 1987, only nine months after the formal diplomatic negotiations opened in December, 1986. It went into effect on January 1, 1989.”).

⁶³⁸ United Nations Environment Assembly (2 March 2022) *Draft Resolution: End plastic pollution: Towards an international legally binding instrument*, UNEP/EA.5/L.23/Rev.1 (“... Underlining that further international action is needed by developing an international legally binding instrument on plastic pollution, including in the marine environment, 1. Requests the Executive Director to convene an intergovernmental negotiating committee, commencing its work during the second half of 2022, with the ambition of completing its work by the end of 2024; 2. Acknowledges that some legal obligations arising out of a new international legally binding instrument will require capacity building and technical and financial assistance in order to be effectively implemented by developing countries and countries with economies in transition; 3. Decides that the intergovernmental negotiating committee is to develop an international legally binding instrument on plastic pollution, including in the marine environment henceforth referred to as the instrument, which could include both binding and voluntary approaches, based on a comprehensive approach that addresses the full lifecycle of plastic, taking into account among other things, the principles of the Rio Declaration on Environment and Development, as well as national circumstances and capabilities....”).

⁶³⁹ William and Flora Hewlett Foundation (2 November 2021) *20+ philanthropies join to provide \$328M to dramatically reduce methane emissions* (Remarks by Larry Kramer, “*The speed with which the pledge came together has been remarkable—something for which we must thank the extraordinary leadership of Presidents Biden and von der Leyen. Now we must match that speed with similar speed in implementing and fulfilling it. And for that, I am proud (and humbled) to speak on behalf of the more than 20 philanthropies that likewise came together quickly to compile a fund well in excess of \$325 million to assist nations that have taken the pledge. This flexible philanthropic aid can be used to provide technical assistance to countries that need it and to develop and deploy innovative new solutions. This means grant dollars that can be moved quickly and nimbly for feasibility studies, project development, and other efforts needed to create the conditions to scale investment in methane reduction now.*”).

⁶⁴⁰ William and Flora Hewlett Foundation (2 November 2021) *20+ philanthropies join to provide \$328M to dramatically reduce methane emissions* (Remarks by Larry Kramer, “*The speed with which the pledge came together has been remarkable—something for which we must thank the extraordinary leadership of Presidents Biden and von der Leyen. Now we must match that speed with similar speed in implementing and fulfilling it. And for that, I am proud (and humbled) to speak on behalf of the more than 20 philanthropies that likewise came together quickly to compile a fund well in excess of \$325 million to assist nations that have taken the pledge. This flexible philanthropic aid can be used to provide technical assistance to countries that need it and to develop and deploy innovative new solutions. This means grant dollars that can be moved quickly and nimbly for feasibility studies, project development, and other efforts needed to create the conditions to scale investment in methane reduction now.*”).

⁶⁴¹ Global Methane Hub (23 March 2022) *Former environment minister of Chile, Marcelo Mena, named CEO of the newly formed Global Methane Hub* (“Funding from The Global Methane Hub will support and sustain action from civil society, government, and private industry, including in the more than 100 countries that have signed on to the Pledge by meaningfully investing in methane reduction solutions. Initiatives have already begun by developing sector-based strategies for waste, agriculture, and fossil fuels. In addition, The Global Methane Hub is currently forming a comprehensive Monitoring, Evaluation, and Learning (MEL) framework for strategy and grantmaking applications. This approach will focus on monitoring performance, evaluating activities, and supporting continuous learning.”).

⁶⁴² Rosane P., Naran B., Pastor A. O., Connolly J., & Wignarajah D. (2022) *The Landscape of Methane Abatement Finance*, Climate Policy Initiative & Global Methane Hub, 9 (“Methane abatement solutions are severely underfunded considering their climate change mitigation potential. While also underfunded, other climate change solutions with similar mitigation potential, such as low-carbon transport, received 15 times the investment of methane abatement measures, while solutions such as solar and wind received 26 times the investment. Wind and solar energy have an average of 8.35 GtCO_{2e} mitigation potential (CO₂) by 2030, and received USD 296 billion in 2019/2020, while targeted methane abatement solutions received only USD 6.3 billion with an average mitigation potential of 3.3 GtCO_{2e} – the ratio of investment flows to mitigation potential was almost 20 times lower than that of the renewable energy sector (Figure 4). Estimated mitigation potential of methane abatement solutions is 3 GtCO_{2e} by 2030 over a 100-year timeframe (GWP₁₀₀). However, if a 20-year timeframe (GWP₂₀) is considered, the mitigation potential would be substantially higher.”).

⁶⁴³ Rosane P., Naran B., Pastor A. O., Connolly J., & Wignarajah D. (2022) *The Landscape of Methane Abatement Finance*, Climate Policy Initiative & Global Methane Hub, 8, 11 (“Total tracked targeted methane abatement finance

amounted to USD 11.6 billion in 2019/2020. Although methane emissions are responsible for almost half of global warming, targeted methane abatement finance represented about 2% of total climate finance tracked in CPI's Global Landscape of Climate Finance (Buchner et al., 2021). Even with data gaps factored in (see discussion on data limitations in Chapter 2), this initial stocktake indicates that actions to reduce methane are not in line with necessary actions to meet climate goals (Figure 3)."; "Estimates suggest targeted methane abatement finance falls well short of the average USD 119 billion needed each year through 2050 under a +2C of warming scenario (Harmsen et al., 2019): a 10-fold increase from currently tracked investments. Fossil fuel, at USD 32 billion per year, and AFOLU, at USD 43 billion per year, are the two sectors where the gap with current levels is the greatest."). *Citing Harmsen J. H. M., van Vuuren D. P., Nayak D. R., Hof A. F., Höglund-Isaksson L., Lucas P. L., Nielsen J. B., Smith P., & Stehfest E. (2019) Long-term marginal abatement cost curves of non-CO₂ greenhouse gases, ENVIRON. SCI. POLICY 99 136–49.*

⁶⁴⁴ Rosane P., Naran B., Pastor A. O., Connolly J., & Wignarajah D. (2022) *The Landscape of Methane Abatement Finance*, Climate Policy Initiative & Global Methane Hub, 10, 11 ("As shown in Figure 6, almost two-thirds of methane abatement funding is concentrated in the waste and water sector, whereas 82% of emission sources comes from the AFOLU and energy sectors which only received 33% of the total tracked funding."); "As shown in Figure 6, almost two-thirds of methane abatement funding is concentrated in the waste and water sector, whereas 82% of emission sources comes from the AFOLU and energy sectors which only received 33% of the total tracked funding."; "Estimates suggest targeted methane abatement finance falls well short of the average USD 119 billion needed each year through 2050 under a +2C of warming scenario (Harmsen et al., 2019): a 10-fold increase from currently tracked investments. Fossil fuel, at USD 32 billion per year, and AFOLU, at USD 43 billion per year, are the two sectors where the gap with current levels is the greatest.").

⁶⁴⁵ Dietz S., Rising J., Stoerk T., & Wagner G. (2021) *Economic impacts of tipping points in the climate system*, PROC. NAT. ACAD. SCI. 118(34): e2103081118, 1–9, 1 ("We provide unified estimates of the economic impacts of all eight climate tipping points covered in the economic literature so far using a meta-analytic integrated assessment model (IAM) with a modular structure. The model includes national-level climate damages from rising temperatures and sea levels for 180 countries, calibrated on detailed econometric evidence and simulation modeling. Collectively, climate tipping points increase the social cost of carbon (SCC) by ~25% in our main specification. The distribution is positively skewed, however. We estimate an ~10% chance of climate tipping points more than doubling the SCC. Accordingly, climate tipping points increase global economic risk. A spatial analysis shows that they increase economic losses almost everywhere. The tipping points with the largest effects are dissociation of ocean methane hydrates and thawing permafrost. Most of our numbers are probable underestimates, given that some tipping points, tipping point interactions, and impact channels have not been covered in the literature so far; however, our method of structural meta-analysis means that future modeling of climate tipping points can be integrated with relative ease, and we present a reduced-form tipping points damage function that could be incorporated in other IAMs."); 2 ("Combining all eight tipping points increases the expected SCC by 24.5%. As discussed below, this should be seen as a probable underestimate, given the literature we synthesize has yet to cover some tipping points, and misses possible impact channels and interactions even for those it does cover. Fig. 1 shows that the distribution of expected increases in the SCC is positively skewed. The median percentage increase in the SCC from all tipping points combined is 18.8%; the 75th percentile is 22.5%, and the 99.5th percentile is 132.2%.")

⁶⁴⁶ Bennett V. (2 November 2021) *World Leaders in Global Methane Pledge*, European Bank for Reconstruction and Development ("President Odile Renaud-Basso endorsed the declaration on behalf of the European Bank for Reconstruction and Development (EBRD), saying: 'The Bank is supporting the economies in which it invests in increasing their environmental sustainability, including by supporting methane abatement across the agribusiness, waste and energy sectors. We are committed to working closely with the signatories of the Global Methane Pledge to help achieve the important target it sets.'").

⁶⁴⁷ Bennett V. (2 November 2021) *World Leaders in Global Methane Pledge*, European Bank for Reconstruction and Development ("The EBRD has been at the forefront of efforts to reduce methane gas emissions. The Bank has historically financed projects of around €650 million per year in sub-sectors that are directly responsible for the vast majority of methane emissions, including energy and natural resources, municipal infrastructure and agribusiness.").

⁶⁴⁸ Renaud-Basso O. (2 November 2021) *Launch of Global Methane Pledge*, Speech ("Today, we are committing to supporting our countries of operation to advance their domestic methane emission reduction efforts. We will provide

technical assistance to support the development of effective inventories, policies, regulations, and standards. And we stand ready to provide funding for methane abatement projects across key sectors of the economy. You can count on our support.”).

⁶⁴⁹ European Commission (2 November 2021) *Launch by United States, the European Union, and Partners of the Global Methane Pledge to Keep 1.5 Within Reach*, Statement (“The U.S. and EU are also proud to announce a significant expansion of financial and technical support to assist implementation of the Pledge. [Global philanthropies have committed \\$328 million](#) in funding to support scale up of these types of methane mitigation strategies worldwide. The European Bank for Reconstruction and Development, the European Investment Bank, and the Green Climate Fund have committed to support the Pledge through both technical assistance and project finance. The International Energy Agency will also serve as an implementation partner.”).

⁶⁵⁰ United Nations Environment Programme (2021) *REPORT OF THE TECHNOLOGY AND ECONOMIC ASSESSMENT PANEL, Volume 6: Assessment of the Funding Requirement for the Replenishment of the Multilateral Fund for the Period 2021-2023*, 59 (“The funding approved for IS support has played a paramount role in establishing and maintaining the capacity of national ozone units and is recognized as a major factor in the success of A5 parties achieving compliance with the Montreal Protocol’s control measures.¹²⁰”); *citing* Paragraphs 11 to 13 of UNEP/OzL.Pro/ExCom/74/51 (Review of Funding of Institutional Strengthening Projects (Decision 61/43(b)) (April 2015)).

⁶⁵¹ As of 1 September 2022, the [SDR exchange rate of reference](#) was 0.768104 SDR per USD.

⁶⁵² White House (13 June 2021) *Carbis Bay G7 Summit Communiqué*, Statements and Releases (“65. We welcome the agreement by G7 Finance Ministers and Central Bank Governors to support a new \$650 billion allocation of IMF Special Drawing Rights, urging implementation by the end of August 2021 accompanied by transparency and accountability measures. We encourage the IMF to work quickly with all relevant stakeholders to explore a menu of options for channeling SDRs to further support health needs, including vaccinations, and to help enable greener, more robust recoveries in the most affected countries, supporting the poorest and most vulnerable countries in tackling these urgent challenges. G7 countries are actively considering options that we can take as part of a global effort to magnify the impact of this general allocation for countries most in need, especially in Africa, including through voluntarily channeling SDRs and/or budget loans, in line with national circumstances and legal requirements. This includes scaling up financing to the IMF’s Poverty Reduction and Growth Trust and the IMF’s review of concessional financing and policies to strengthen its capacity to support low-income countries. To support our aim to reach a total global ambition of \$100 billion, we call for contributions from other countries able to do so, alongside the G7. We task G7 Finance Ministers and Central Bank Governors to urgently consider the detail of this, including by working with the G20 and other stakeholders.”).

⁶⁵³ G20 (31 October 2021) *Rome Leaders’ Declaration*, 4 (“10. Support to vulnerable countries. We welcome the new general allocation of Special Drawing Rights (SDR), implemented by the International Monetary Fund (IMF) on 23 August 2021, which has made available the equivalent of USD 650 billion in additional reserves globally. We are working on actionable options for members with strong external positions to significantly magnify its impact through the voluntary channeling of part of the allocated SDRs to help vulnerable countries, according to national laws and regulations. We welcome the recent pledges worth around USD [45] billion, as a step towards a total global ambition of USD 100 billion of voluntary contributions for countries most in need. We also welcome the ongoing work to significantly scale up the Poverty Reduction and Growth Trust’s lending capacity and call for further voluntary loan and subsidy contributions from countries able to do so. We also call on the IMF to establish a new Resilience and Sustainability Trust (RST) – in line with its mandate – to provide affordable long-term financing to help low-income countries, including in the African continent, small island developing states, and vulnerable middle-income countries to reduce risks to prospective balance of payments stability, including those stemming from pandemics and climate change. The new RST will preserve the reserve asset characteristics of the SDRs channeled through the Trust. Our Finance Ministers look forward to further discussion of surcharge policy at the IMF Board in the context of the precautionary balances interim review.”).

⁶⁵⁴ International Monetary Fund (18 April 2022) *IMF Executive Board Approves Establishment of the Resilience and Sustainability Trust*, Press Release (“Challenges from the pandemic, spillovers from geopolitical shocks, and long-standing structural problems pose an enormous impediment for balance of payments stability and resilient and sustainable growth, especially for low-income and vulnerable middle-income countries. In this context, on April 13, 2022, the Executive Board of the International Monetary Fund (IMF) approved the establishment of the Resilience and

Sustainability Trust (RST) with effect from May 1, 2022. The RST will complement the IMF's existing lending toolkit by focusing on longer-term structural challenges—including climate change and pandemic preparedness—that entail significant macroeconomic risks and where policy solutions have a strong global public good nature.”).

⁶⁵⁵ International Monetary Fund (11 April 2022) *Proposal to Establish a Resilience and Sustainability Trust*, 8 (“The proposed RST would complement the IMF’s existing lending toolkit by focusing on longer-term structural challenges. The RST’s goal is to enhance economic resilience and sustainability thereby contributing to prospective balance of payments stability. This will be achieved by providing eligible members affordable, longer-maturity financing to (i) support reforms (including by covering BoP costs associated with them) that reduce macro-critical risks associated with select longer-term structural challenges and (ii) augment policy space and financial buffers to mitigate the risks arising from such longer-term structural challenges. This financing would complement traditional IMF support that focuses on resolving more near-term balance of payments difficulties.”).

⁶⁵⁶ International Monetary Fund (11 April 2022) *Proposal to Establish a Resilience and Sustainability Trust*, 11–12 (“The RST adds to the lending toolkit by helping members address risks to prospective BoP stability stemming from select macro-critical longer-term structural challenges. While not necessarily posing imminent BoP problems, longer-term challenges such as climate change make countries more prone to severe BoP problems in the longer run by raising the likelihood and impact of future shocks and undermining growth prospects. Policy inaction—including on account of scarce financing—to address these challenges could increase these risks and jeopardize *prospective BoP stability*, as defined in ¶9. Helping member countries to address such risks through policy support and financing is consistent with the Fund’s mandate to support members’ BoP stability.”).

⁶⁵⁷ International Monetary Fund (11 April 2022) *Proposal to Establish a Resilience and Sustainability Trust*, 12 (“Longer-term structural challenges create a range of possible BoP needs. These needs that could be financed under the RST are typically multidimensional and can materialize over the short-, medium- or longer-term. In the case of climate change, potential sources of such needs—associated with adaptation, transition, and mitigation policies including energy security policies—include, *inter alia*¹⁰: • Costs of climate-related public and/or private investments, such as green energy generation, coastal protection infrastructure, energy-efficient retrofitting of existing building; • Costs associated with climate-focused reforms, such as transitioning to green technologies; • Offsetting the costs of policies typically required to enable a just transition, such as augmenting targeted social assistance in tandem with the unwinding of carbon subsidies;¹¹ and, • Building up policy space and buffers necessary to mitigate risks to longer-term BoP stability, such as establishing and augmenting disaster funds, establishing and financing a multi-layered financial framework for disaster resilience, and augmenting international reserves to face financial stability implications of climate change.”).

⁶⁵⁸ International Monetary Fund (11 April 2022) *Proposal to Establish a Resilience and Sustainability Trust*, 63–64 (“RST measures would be informed and expected to be consistent with country diagnostics developed in both institutions relevant to the RST’s purposes. On climate change, the Bank’s Country Climate and Development Reports (CCDR), if available, will be a critical input, complemented with other products such as the Fund’s Climate Change Policy Assessments (CCPAs) and its potential successor instrument, Climate Macroeconomic Assessments Programs (CMAPs). In practice, Bank and Fund staff will coordinate the production of CCDRs and CMAPs to complement and ensure consistent advice between the two products for member countries, in line with the agreed coordination between Bank and Fund staff on CCDRs and CMAPs. Fund staff are expected to discuss with their Bank counterparts areas of the CCDR or other diagnostics that they intend to include in the RST program to ensure complementarity. In instances where countries already have an advanced climate change framework, Fund staff could use these inputs flexibly as part of the analytics informing the RST program.”).

⁶⁵⁹ International Monetary Fund (18 April 2022) *IMF Executive Board Approves Establishment of the Resilience and Sustainability Trust*, Press Release (“The RST will be a loan-based trust, with resources mobilized on a voluntary basis. About three quarters of the IMF’s membership will be eligible for longer-term affordable financing from the RST, including all low-income countries, all developing and vulnerable small states, and lower middle-income countries. Access will be based on the countries’ reforms strength and debt sustainability considerations and capped at the lower of 150 percent of quota or SDR 1 billion. The loans will have a 20-year maturity and a 10½-year grace period, with borrowers paying an interest rate with a modest margin over the three-month SDR rate, with the most concessional financing terms provided to the poorest countries.”).

⁶⁶⁰ International Monetary Fund (11 April 2022) *Proposal to Establish a Resilience and Sustainability Trust*, 67 (“1. The RST is a loan-based trust administered by the IMF, with a financial structure broadly similar to that of the PRGT. In particular, and similar to the PRGT, RST resources would be mobilized based on voluntary contributions from members, including those wishing to channel SDRs for the benefit of low-income and vulnerable middle-income members.”).

⁶⁶¹ International Monetary Fund (18 April 2022) *IMF Executive Board Approves Establishment of the Resilience and Sustainability Trust*, Press Release (“The RST will stand ready to commence lending operations once a critical mass of resources from a broad base of contributors is achieved and once sufficiently robust financial systems and processes are in place, which is anticipated to occur by the end of the year. Fundraising toward the estimated total resource needs of about SDR 33 billion (equivalent to US\$45 billion) will be initiated immediately.”).

⁶⁶² Department of State, Foreign Operations, and Related Programs Appropriations Act, 2023, S. 4662, 117th Cong., Title V (“For contribution to the Poverty Reduction and Growth Trust (PRGT) or to the proposed Resilience and Sustainability Trust (RST) of the International Monetary Fund (IMF) by the Secretary of the Treasury, \$20,000,000, to remain available until September 30, 2031: *Provided*, That such funds shall be available to cover the cost, as defined in section 502 of the Congressional Budget Act of 1974, of loans made by the Secretary of the Treasury to the PRGT or the RST of the IMF: *Provided further*, That such funds shall be available to subsidize gross obligations for the principal amount of direct loans not to exceed \$21,000,000,000 in the aggregate, and the Secretary of the Treasury is authorized to make such loans: *Provided further*, That the Exchange Stabilization Fund (ESF) and the financing account corresponding to transactions with the IMF are authorized to enter into such transactions as necessary to effectuate loans from resources held in the ESF to the PRGT or RST of the IMF.”).

⁶⁶³ Yi W. (18 August 2022) *The Eighth Ministerial Conference of the Forum on China-Africa Cooperation*, Speech (“We are prepared to, through the IMF’s two Trusts, re-channel 10 billion US dollars of its SDR to Africa, and encourage the IMF to direct China’s contributions to Africa.”).

⁶⁶⁴ Gold S. (18 April 2022) *IMF aims to operationalize new RST fund by October*, News (“The International Monetary Fund intends to operationalize its new Resilience and Sustainability Trust by October, and officials say they expect donors to announce significant contributions this week during the institution’s yearly Spring Meetings.”).

⁶⁶⁵ World Bank (3 December 2018) *World Bank Group Announces \$200 billion over Five Years for Climate Action*, Press Release (“The World Bank Group today announced a major new set of climate targets for 2021-2025, doubling its current 5-year investments to around \$200 billion in support for countries to take ambitious climate action. The new plan significantly boosts support for adaptation and resilience, recognizing mounting climate change impacts on lives and livelihoods, especially in the world’s poorest countries. The plan also represents significantly ramped up ambition from the World Bank Group, sending an important signal to the wider global community to do the same.”).

⁶⁶⁶ World Bank (3 December 2018) *World Bank Group Announces \$200 billion over Five Years for Climate Action*, Press Release (“The \$200 billion across the Group is made up of approximately \$100 billion in direct finance from the World Bank (IBRD/IDA), and approximately \$100 billion of combined direct finance from the International Finance Corporation (IFC) and the Multilateral Investment Guarantee Agency (MIGA) and private capital mobilized by the World Bank Group.”).

⁶⁶⁷ World Bank Group (2021) *CLIMATE ACTION PLAN*, 13 (“Climate change and ecosystems degradation combined, in turn, push the planet ever closer to irrevocable tipping points.”).

⁶⁶⁸ Abernethy S. & Jackson R. B. (2022) *Global temperature goals should determine the time horizons for greenhouse gas emission metrics*, ENVIRON. RES. LETT. 17(2): 024019, 1–10, 7 (“Although NDCs and long-term national pledges are currently insufficient to keep warming below 2 °C, let alone 1.5 °C [50–52], the time horizons used for emission metrics should nevertheless be consistent with that central goal of the Paris Agreement. We therefore support the use of the 20 year time horizon over the 100 year version, when binary choices between these two must be made, due to the better alignment of the former with the temperature goals of the Paris Agreement. The 50 year time horizon, not yet in widespread use but now included in IPCC AR6, is in fact the only time horizon that the IPCC presents that falls within the range of time horizons that align with the Paris Agreement temperature goals (24–58 years). However, to best align

emission metrics with the Paris Agreement 1.5 °C goal, we recommend the use of the 24 year time horizon, using 2045 as the end point time, with its associated $GWP_{1.5^{\circ}C} = 75$ and $GTP_{1.5^{\circ}C} = 41$.”).

⁶⁶⁹ White House (19 May 2012) *Fact Sheet: G-8 Action on Energy and Climate Change*, Statements and Releases (“Commission the World Bank to prepare a report on ways to integrate reduction of near-term climate pollution into their activities and ask the World Bank to bring together experts from interested countries to evaluate new approaches to financing projects to reduce methane, including through pay-for-performance mechanisms.”).

⁶⁷⁰ World Bank (2013) *METHANE FINANCE STUDY GROUP REPORT: USING PAY-FOR-PERFORMANCE MECHANISMS TO FINANCE METHANE ABATEMENT*, 19 (“The Study Group encourages all interested donors to consider this innovative and highly attractive approach which combines immediate impact and maximum cost-effectiveness. Various implementation options can be envisaged. A fund could be established within an international financial institution, allowing interested funders to pool resources for maximum efficiency. A number of bilateral donors have developed deep in-house expertise on methane mitigation and carbon offsets and could implement such mechanisms rapidly. A sub-theme of the Green Climate Fund private sector facility may also be devoted to these approaches.”).

⁶⁷¹ Pilot Auction Facility, *About the PAF* (last visited 31 August 2022) (“In 2013, the G8 requested for innovative pay-for-performance approaches to addressing methane. A report by the Methane Finance Study Group supported the establishment of the facility. In its design and development phase, the facility benefited from the support of the [Climate and Clean Air Coalition](#). ... The PAF auctions are supported by Germany, Sweden, Switzerland (through a joint contribution of the State Secretariat of Economic Affairs (SECO) and the Climate Cent Foundation), and the United States..”).

⁶⁷² Pilot Auction Facility, *About the PAF* (last visited 31 August 2022) (“The PAF completed three auctions to allocate a guaranteed price for future carbon credits in the form of a tradable put option. Two auctions (July 2015 and May 2016) addressed methane abatement from landfill, animal waste, and wastewater sites, and one auction (January 2017) addressed nitrous oxide emissions from nitric acid (not adipic acid) production. The three auctions allocate up to \$54 million with the potential to abate 20.6 million metric tons of CO₂ equivalent.”).

⁶⁷³ The Energy Sector Management Assistant Program (ESMAP) is another example. ESMAP is the home for the Sustainable Cooling Facility that received \$157 million from the GCF for work in nine countries. See Green Climate Fund, *Projects & Programmes: FPI77 Cooling Facility* (last visited 29 July 2022).

⁶⁷⁴ International Finance Corporation (2022) *New CWI Landfill Gas* (last visited 31 August 2022) (“IFC funds will be used to finance 24 identified LFGE projects (the “Project”) which include ten sites that are currently under operation (Gaizhou, Lianyuan, Liling, Zhijiang, Nanning, Shanghang, Changting, Wuping, Dingnan, and Yangxin), three sites where construction has started or will commence soon (Wafangdian, Ankang, Shaowu), and one site where the development agreement with the landfills was recently signed (Jingchuan). NCWI is in discussion with landfill operators at multiple other locations to sign project development agreements. IFC funds will also be used for projects at ten of the sites where NCWI is currently in discussions for project development[.]”).

⁶⁷⁵ International Finance Corporation (2022) *New CWI Landfill Gas* (last visited 24 August 2022) (“LFGE projects capture methane in the landfill gas and convert it to CO₂ while also generating electricity. This has a positive impact on resource efficiency and contributes to GHG emission reduction. The project’s gross carbon emission (for all 24 sites taken together) is estimated as 1,903,000 tCO₂e per year, but with methane capture, the project is estimated to reduce about 3,428,900 tCO₂e GHG.”).

⁶⁷⁶ International Finance Corporation (2022) *Green Bond Framework*, 5–8 (see table of activities that are “potentially eligible for IFC Green Bond finance”).

⁶⁷⁷ Multilateral Investment Agency (2021) *Annual Report — 2021*, 28 (“To increase its climate action, the World Bank Group announced a new Climate Change Action Plan (CCAP) to guide its interventions from 2021 through 2025. The CCAP provides a bold strategic road map for tackling climate change and helping client countries to fully integrate their climate and development goals. MIGA’s products have helped cross-border investors protect their long-term investments in climate mitigation and adaptation activities across diverse markets and regions. As one of the few institutions that

provides long-maturity guarantees, MIGA will be instrumental in fostering the lock-in of transformational climate action.”).

⁶⁷⁸ Austin S. (1 November 2021) *Prime Minister Mottley: Closing of Gaps Required*, Barbados Government Information Service.

⁶⁷⁹ Austin S. (1 November 2021) *Prime Minister Mottley: Closing of Gaps Required*, Barbados Government Information Service.

A Primer on Cutting Methane: The Best Strategy for Slowing Warming in the Decade to 2030

19 March 2024*



Institute for Governance & Sustainable Development

*Subsequent, specific updates were made to this Primer on 12 April 2024, including on the EU methane regulation and IEA Global Methane Tracker 2024; on 30 May 2024, to reflect the finalized EU methane regulation; and on 25 July 2024, to incorporate updates on atmospheric methane removal and sinks.

Suggested citation

Institute for Governance & Sustainable Development (2024) A PRIMER ON CUTTING METHANE: THE BEST STRATEGY FOR SLOWING WARMING IN THE DECADE TO 2030.

Lead Authors

Richard “Tad” Ferris, Gabrielle Dreyfus, Durwood Zaelke.

Contributing Authors

Selena Bateman, Trina Chiemi, Valerie Fajardo, Caitlan Frederick, Erika Gerstenberger, Alyssa Hull, Eoin Jackson, Julie Miller, Amelia Murphy, Champion Olatunji, Zerin Osho, Romina Picolotti, Xiaopu Sun, Olanrewaju Suraju.

Previous Version Contributing Authors

Kiran Gosh, Naomi Jennings, Connor Schiff, Jon Turner.

Acknowledgments

We thank Laura Bloomer, Ken Alex, Gil Damon, Daniel Taillant, and all readers for comments that allow us to continue to update and improve this *Primer*.

**Institute for Governance & Sustainable Development**

Unless otherwise indicated, all content in the *Primer on Cutting Methane* carries a Creative Commons license, which permits non-commercial re-use of the content with proper attribution. Copyright © 2024 Institute for Governance & Sustainable Development.

About the Institute for Governance & Sustainable Development

IGSD's mission is to promote fast climate mitigation to slow near-term warming and self-propagating climate feedbacks, avoid or at least delay catastrophic climate and societal tipping points, and limit global temperatures to 1.5 °C—or at least keep this temperature guardrail in sight and limit overshoot.

IGSD's research confirms that decarbonization alone is insufficient to slow near-term warming to keep us below 1.5 °C or even the more dangerous 2 °C guardrail and that the fastest and most effective strategy is to combine the marathon to zero out carbon dioxide (CO₂) emissions from decarbonizing the energy system with the sprint to rapidly cut non-CO₂ super climate pollutants and protect carbon sinks. The super climate pollutants include four short-lived climate pollutants (SLCPs)—methane (CH₄), hydrofluorocarbons (HFCs), black carbon soot, and tropospheric ozone (O₃)—as well as the longer-lived nitrous oxide (N₂O).

Combining the fast mitigation sprint with the decarbonization marathon also helps address the ethical issues of intra-generational equity by giving societies urgently needed time to adapt to unavoidable changes and build resilience. The latest science suggests that the window for exceeding the 1.5 °C guardrail could close as soon as the early 2030s, making this the decisive decade for fast action to slow warming.

The fastest way to reduce near-term warming in the next decade or two is to cut SLCPs. Because they only last in the atmosphere from days to 15 years, reducing them will prevent 90 percent of their predicted warming within a decade. Strategies targeting SLCP reductions can avoid four times more warming at 2050 than targeting CO₂ alone. Reducing HFCs can avoid nearly 0.1 °C of warming by 2050 and up to 0.5 °C by the end of the century. The initial HFC phasedown schedule in the Kigali Amendment to the Montreal Protocol will capture about 90 percent of this. Parallel efforts to enhance the energy efficiency of air conditioners and other cooling appliances during the HFC phasedown can double the climate benefits at 2050. Cutting methane emissions can avoid nearly 0.3 °C by the 2040s, with the potential for significant avoided warming from emerging technologies to remove atmospheric methane faster than the natural cycle.

Combining the fast mitigation sprint with the decarbonization marathon would reduce the rate of global warming by half from 2030 to 2050, slow the rate of warming a decade or two earlier than decarbonization alone, and make it possible for the world to keep the 1.5 °C guardrail in sight and reduce overshoot. It would also reduce the rate of Arctic warming by two-thirds. This would help slow self-amplifying climate feedbacks in the Arctic, and thus avoid or at least delay the cluster of projected tipping points beyond 1.5 °C. Reducing climate risks and staying within the limits to adaptation are critical to building resilience.

IGSD approaches to fast mitigation includes science, technology, law and policy, and climate finance. IGSD works at the global, regional, national, and subnational levels.

A Primer on Cutting Methane: The Best Strategy for Slowing Warming in the Decade to 2030

March 2024

Executive Summary	i
1. Introduction: Building on the Global Methane Pledge	1
2. The need for speed: Winning the sprint to 2030 is critical to avoiding climate catastrophe ..	6
A. Current climate impacts are bad, and worse is on the horizon from the growing risk of self-propagating feedback loops pushing the planet past tipping points	7
B. Reducing fossil-fuel burning is essential but does not slow near-term warming	8
3. Cutting methane emissions is the fastest and best way to slow warming in the near-term.....	9
A. Pursuing all available methane mitigation measures is the only plausible way to limit warming over the next 20 years	9
B. Anthropogenic sources are responsible for about 60% of global methane emissions.....	11
4. The technologies exist to cut nearly half of anthropogenic methane emissions from the energy production, waste, and agriculture sectors	15
A. Energy production sector.....	16
B. Agriculture sector	19
C. Waste sector	26
5. Natural sources of methane are responsible for about 40% of global emissions and research is underway on removing atmospheric methane and preventing methane formation	27
6. Major-emitting countries are pursuing and must strengthen methane mitigation measures..	29
A. Australia	30
B. Brazil	31
C. Canada.....	32
D. China	34
E. European Union.....	36
F. India.....	40
G. Iraq	42
H. Mexico.....	43
I. Nigeria.....	44
J. United Kingdom.....	46
K. United States.....	48
7. International collaboration is critical for combatting methane emissions	56
A. Governmental and Quasi-governmental organizations and initiatives.....	56
B. Industry-led initiatives.....	62
C. Performance rating and certification initiatives	65

8. Monitoring, data, and measurement systems add transparency and accountability	66
A. Carbon Mapper.....	66
B. Copernicus.....	67
C. Climate Trace	67
D. Data to Methane Action Campaign	67
E. Earth Surface Mineral Dust Source	67
F. Environmental Defense Fund’s MethaneSAT.....	67
G. GHGSat	68
H. Greenhouse Gas Observing Satellite	68
I. International Energy Forum’s Methane Initiative and Methane Measurement Methodology Project.....	68
J. International Methane Emissions Observatory	68
K. Oil and Climate Index Plus	69
L. U.S. Greenhouse Gas Center	69
M. Veritas	69
N. Waste Methane Assessment Program	69
9. Building an accountability and enforcement strategy using robust emissions monitoring systems	70
10. International efforts, including the COP28 Methane Summit and the Global Methane Pledge, are catalyzing bilateral and multilateral actions to curb methane.....	71
A. The Global Methane Pledge, the COP28 first Global Stocktake Agreement, and the Global Methane Pledge’s Energy, Agriculture and Food, and Waste Pathways	72
B. Methane action under the Gothenburg Protocol to the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution.....	77
C. U.S.-China Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis and the Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s.....	79
D. A Global Methane Agreement to Address the Climate Emergency and Promote Peace and Security.....	81
11. Financial and philanthropic organizations can provide crucial financial support for methane ambition and action.....	86
A. Global Methane Hub	89
B. The Methane Finance Sprint	89
C. International Monetary Fund-World Bank Climate Advisory Group	90
D. International Monetary Fund.....	90
E. World Bank Group	92
F. Private Investment.....	94
G. Global Methane Tax/Fee	95
H. A Global Financial Strategy to Tackle the Climate Emergency including Methane	95
12. Conclusion	96
Acronyms	98
References	102

Table of Boxes, Figures, and Tables

Box 1.	Methane’s contribution to current warming	1
Box 2.	Self-propagating feedbacks and tipping points	3
Box 3.	Time and temperature methane metrics: GWP ₂₀ is an improvement, temperature is even better!	5
Box 4.	Self-amplifying methane emissions from natural sources and sinks	14
Box 5.	Risks and limited climate benefits from switch to hydrogen	40
Box 6.	Subnational governments demonstrating leadership on methane mitigation	54
Figure 1.	Contributions to observed warming in 2010–2019 relative to 1850–1900	2
Figure 2.	Decarbonization-only strategies accelerate near-term warming by reducing both CO ₂ and cooling aerosols (SO ₂) compared to mitigation strategies targeting methane reductions that result in avoiding warming in the near term	9
Figure 3.	Temperature response to methane abatement from 2020–2050 based on mitigation levels consistent with 1.5 °C scenarios.....	10
Figure 4.	Average methane emissions for 2008–2017 in Mt CH ₄ per year for 18 continental regions..	11
Figure 5.	Indicative baseline emissions in 2030 and mitigation potential from technical and additional measures consistent with a 1.5 °C pathway	12
Figure 6.	Mitigation pathways by sector consistent with the Global Methane Pledge target.....	18
Figure 7.	Methane emissions reduction potential by sector, innovation category and region.....	20
Table 1.	GWP values for methane from IPCC reports.....	6
Table 2.	Emissions control measures by sector.....	16
Table 3.	Key emerging mitigation technologies for livestock methane, their applicability and key constraints across systems, relative emissions reduction, impact on animal performance, estimated global mitigation potential including constraints on adoption, and timing and confidence in commercial availability.....	21

Executive Summary

It's already too hot. 2023 was likely the warmest year in 125,000 years¹ and warming is expected to accelerate and pass the 1.5 °C guardrail within 10 years or less.² Methane* is a super-potent planet-warming gas—a kilogram of methane (CH₄) emissions has over 80 times the warming power of a kilogram of carbon dioxide (CO₂) emissions over 20 years. The fastest way we know to slow warming is to make rapid and deep cuts to methane and other super climate pollutants.

The IGSD *Primer on Cutting Methane* provides the scientific and policy rationale for decision-makers to achieve the “strong, rapid, and sustained” cuts to methane emissions needed to slow global warming in the near term,³ and limit the risk of triggering climate, economic, and social tipping points. While methane is the focus of this *Primer*, slowing warming in the near term also requires deep cuts to the other similarly potent non-CO₂ super climate pollutants,⁴ which include the “short-lived climate pollutants” (SLCPs) with atmospheric lifetimes of, on average, under 15 years—black carbon soot, hydrofluorocarbons (HFCs, primarily used as refrigerants), and tropospheric ozone (O₃)—as well as the longer-lived nitrous oxide (N₂O). Deep cuts in these super climate pollutants, including methane, will also reduce the build-up of heat in the ocean that otherwise would continue adding to warming for decades to centuries, extending the warming influence of SLCPs long beyond their atmospheric lifetime.⁵ While cutting CO₂ emissions is essential to limit our warming commitment over the long term, strategies that pair decarbonization with aggressively cutting super climate pollutants can slow warming one to two decades sooner than CO₂-focused strategies alone and avoid nearly four times more warming by 2050.⁶ Rapidly implementing strategies that target super climate pollutants could cut the rate of global warming in half to avoid, or at least delay, self-amplifying feedbacks and tipping points.⁷

Topics addressed in the *Methane Primer* include the science establishing the need for methane mitigation; current and emerging mitigation opportunities by sector; national, regional, and international efforts building momentum to achieve fast and deep methane reduction; and financing initiatives to secure support for fast methane reduction. The *Methane Primer* also highlights the need for research and development of technologies to remove methane from the atmosphere at scale. Through in-depth analysis of methane science, law, policy, and governance, this *Primer* provides the path for more international collaboration to move away from voluntary commitments and towards a binding global methane agreement.

Key messages in this *Primer* include:

- Every increment of additional warming matters.⁸ We are already experiencing a climate emergency with extreme events occurring sooner and with greater severity than anticipated. Because extreme climate impacts depend on the *rate of warming* as well as the total warming,⁹ the continued and growing emissions of CO₂ and other super climate pollutants are particularly troubling. Record-shattering extreme events will become increasingly likely as the rate of warming accelerates and more severe as new levels of warming are reached (*see Section 2*).¹⁰

* Natural gas is composed of 70–90% methane. Energy production (extraction of oil, gas, and coal), agriculture (livestock and rice), and waste (landfills and wastewater) are the three main sources of methane emissions from human activity.

- Without fast action to slow warming, *global warming*^{*} could exceed the 1.5 °C guardrail by the end of the current decade¹¹ and 2 °C by 2050 due to rising emissions, declining particulate air pollution that masks existing warming, and natural climate variability.¹² Continuing record climate emissions means that the rate of warming could increase from the 0.2 °C per decade trend of the past 40 years to 0.25–0.32 °C per decade over the next 20 years.¹³
 - There is a 66% chance that annual average near-surface global temperatures will exceed 1.5 °C for at least one year between 2023 and 2027 and a 32% chance that the five-year mean from 2023 to 2027 will exceed this threshold.¹⁴ At +1.44 °C above the pre-industrial period,¹⁵ 2023 was likely the hottest year in 125,000 years.¹⁶ With the continuing El Niño, 2024 will likely be as warm,¹⁷ if not warmer (see **Section 2**).¹⁸
 - Exceeding the 1.5 °C guardrail increases the risk that self-amplifying feedbacks further accelerate rising temperatures and trigger a cascade of irreversible tipping points in the climate system (**Box 2**).¹⁹
 - Over 3 billion people live in vulnerable circumstances. Impacts from warming above 1.5 °C pose very high risks and potentially irreversible impacts to unique and threatened human and natural systems and increase risk from extreme weather.²⁰
 - Limiting warming to 1.5 °C would prevent most of the tropics from exceeding the combined heat and humidity conditions beyond the survival limit.²¹ Warming of 2.7 °C by the end of the century would leave about one-third of the global population outside of the climate niche (2–2.5 billion people), while limiting warming to 1.5 °C would halve the number of people exposed to unprecedented heat.²²
- Methane is the second largest contributor to global warming after CO₂, responsible for nearly 45% of current net warming.²³
 - Methane pollution has already caused 0.51 °C of the 1.06 °C of total observed warming (2010–2019) compared to pre-industrial.²⁴
 - Warming caused by methane will continue to increase if methane emissions continue to rise. Under current policy scenarios, anthropogenic methane emissions are expected to increase by 24–30% by 2050.²⁵
 - The rate of growth in atmospheric methane concentrations in 2020 and 2021 more than doubled from the 2007–2019 average.²⁶ Recent studies have attributed the surge of atmospheric methane concentrations to continued growth in anthropogenic emissions together with increasing emissions from wetlands and a reduced capacity of the atmosphere to remove methane.²⁷ Methane concentrations increased 14 ppb in 2022 to reach an average of 1,912 ppb, more than two and half times pre-industrial levels (**Box 1**).²⁸

* The Intergovernmental Panel on Climate Change defines the time when global warming exceeds a temperature threshold as “the midpoint of the first 20-year period during which the average [global surface air temperature] exceeds the threshold.”

- Cutting methane emissions is the biggest and fastest strategy for slowing warming and keeping the 1.5 °C guardrail* within reach.²⁹ Pursuing all methane mitigation measures this decade is the only known way to avoid nearly 0.3 °C of warming by the 2040s and slow warming by 30%.³⁰
 - The International Energy Agency finds in the *Global Methane Tracker 2024* that cutting methane emissions from fossil fuels by 75% by 2030 is “vital to limit warming to 1.5 °C.”³¹ The International Energy Agency estimates that if all existing methane policies and pledges made by countries and companies are implemented, methane emissions would only decline by 50% by 2030.³²
 - The *Global Methane Assessment* from the United Nations Environment Programme and the Climate & Clean Air Coalition finds that cutting methane emissions is the fastest strategy for slowing warming in the near term.³³
 - The Intergovernmental Panel on Climate Change *Sixth Assessment Report (AR6)* confirms that “strong, rapid, and sustained methane reductions” are key to limiting warming in the near- and longer-term (*see Section 3*).³⁴
 - AR6 Working Group III further finds that “[d]eep [greenhouse gas] emissions reductions by 2030 and 2040, particularly reductions of methane emissions, lower peak warming, reduce the likelihood of overshooting warming limits and lead to less reliance on net negative CO₂ emissions that reverse warming in the latter half of the century.... Due to the short lifetime of CH₄ in the atmosphere, projected deep reduction of CH₄ emissions up until the time of net zero CO₂ in modelled mitigation pathways effectively reduces peak global warming. (*high confidence*).”³⁵
 - Limiting warming to 1.5 °C with no or limited overshoot requires reducing global anthropogenic (human-caused) methane emissions by 34% in 2030 and 44% in 2040 relative to modelled 2019 levels, in addition to cutting global CO₂ emissions in half in 2030 and by 80% in 2040, and deep cuts to other SLCPs and N₂O.³⁶
 - Estimates of the remaining carbon budget (*i.e.*, the total net amount of CO₂ that can still be emitted while keeping global warming to below 1.5 °C with limited overshoot) assume anthropogenic methane emissions are reduced by 51% between 2020 and 2050.³⁷ Without these deep reductions in methane, the carbon budget will be further reduced.
- Cutting methane is the fastest way to offset the near-term accelerated warming associated with declining particulate air pollution that masks existing warming.³⁸
 - Air pollution that is co-emitted with CO₂ when sulfur-containing coal and oil are burned results in particles that reflect sunlight. These co-emitted sulfate cooling particles currently “mask” warming of about 0.5 °C; and while the accumulated CO₂ in the atmosphere will continue to cause warming for decades to centuries, the cooling particles fall out of the atmosphere within days to months once they are stopped at the source, unmasking more of the existing warming (*see Section 3*).³⁹

* Keeping the 1.5 °C guardrail within reach requires limiting the magnitude of the temperature peak and how long 1.5 °C is exceeded as part of temporary overshoot.

- The transition away from fossil fuels will not only reduce CO₂ but also will reduce these cooling particles. The loss of this cooling effect will offset reductions in warming from decarbonization until around 2050 and even accelerate warming over the first decade following decarbonization or longer.⁴⁰
- Cutting methane and other SLCPs is key to counteracting this increased rate of warming in the near term.⁴¹ When excluding consideration of unmasking of reflective particles, strategies that target super climate pollutants could avoid as much as 0.6 °C by 2050 compared to 0.1–0.2 °C for CO₂-focused strategies alone.⁴²
- Only 13% of methane emissions are covered by direct methane mitigation policies.⁴³ Measures specifically targeting methane sources are essential, as broader decarbonization measures can only achieve 30% of the needed methane reductions (*see Section 4*).⁴⁴ Moving from voluntary to more binding commitments and expanding coverage and enforcement of methane mitigation policies is essential to achieving the climate benefits of cutting methane. This could include building on, strengthening, and coordinating existing national measurement, monitoring, reporting, and verification schemes and/or border adjustment and methane-fee mechanisms (*see Section 6*).
- The *Global Methane Pledge* launched by the U.S. and EU in 2021 established a collective target to reduce global anthropogenic methane emissions by at least 30% from 2020 levels by 2030.⁴⁵ Achieving this target would reduce warming by at least 0.2 °C by 2050 and keep the planet on a pathway consistent with staying below 1.5 °C.⁴⁶
- Around 60% of global methane emissions come from human activities in three main sectors: energy production (oil, gas, and coal), agriculture (livestock and rice), and waste (landfill and wastewater).⁴⁷ Energy production accounts for about 35% of anthropogenic methane emissions (*see Section 4A*),⁴⁸ agriculture accounts for about 40% (*see Section 4B*),⁴⁹ and waste accounts for about 20% (*see Section 4C*),⁵⁰ with biomass burning and biofuels as minor sources.
- Technologies exist to cut methane emissions from energy production, agriculture, and waste by 45% by 2030 (*Table 2*) to achieve nearly 0.3 °C in avoided warming by the 2040s (*see Section 4*).⁵¹
 - Roughly 60% of the available targeted measures have low mitigation costs (defined as less than US\$21 per tonne of carbon dioxide equivalent (CO₂e) based on a 100-year global warming potential (GWP₁₀₀) and US\$7 per tonne of CO₂e for GWP₂₀).⁵² Over 50% of those measures have negative costs in that they pay for themselves.⁵³
 - The International Energy Agency’s *Global Methane Tracker 2024* finds that methane mitigation in the fossil fuel industry is one of the “most pragmatic and lowest cost options” to reduce greenhouse gas emissions.⁵⁴ Low-cost technology options are available now to curb more than 75% of methane emissions from oil and gas operations.⁵⁵ The International Energy Agency calculates that if all countries achieved the intensity of methane emissions (emissions per unit of production) similar to Norway’s performance, methane emissions from oil and gas operations would fall by more than 90%.⁵⁶ Norway’s performance can be attributed to strict regulation of the oil and gas sector,⁵⁷ as well as the imposition of a methane fee within its broader carbon taxes.⁵⁸

- In the energy production sector, the greatest potential for mitigation is in the oil and gas sector.⁵⁹ In the waste sector, reducing and managing solid waste holds the most promise.⁶⁰ And in the agriculture sector, measures to reduce methane emissions from livestock could have the greatest impact.⁶¹
- Methane mitigation can also support geographically diverse and well-paying jobs, as shown in U.S. states that are leading methane mitigation efforts for positions ranging from field technicians to chemical engineers to data scientists.⁶²
- Cutting methane also increases resilience and promotes environmental justice.⁶³ By slowing near-term warming and reducing associated hazards, methane mitigation provides climate-vulnerable communities with more time to adapt while also decreasing communities' adaptation burdens.⁶⁴ Additionally, because methane is oxidized in the atmosphere to form tropospheric ozone (also known as photochemical smog), cuts to methane reduce harm to public health,⁶⁵ as well as to crops, supporting food security (*see Section 4*).⁶⁶
 - Achieving net-zero CO₂ emissions by accelerating the transition to clean energy is essential to stabilizing the climate. In addition, during the time it takes for a just and equitable transition to a net-zero economy, it is essential to stop methane leaks to slow warming, protect the health of local communities, and ensure food security.⁶⁷
- About 40% of global methane emissions are from natural sources.⁶⁸ These natural sources include tropical wetlands, peatlands, and Arctic permafrost, all of which are warming and appear to be increasing emissions as part of self-propagating feedbacks as microbes increase their methane-producing activity and wildfires accelerate thaw.⁶⁹ In addition to the need to slow the rate of warming to reduce emissions from natural sources and lower risks associated with the release of seabed methane hydrates, research is underway on atmospheric methane removal (*see Section 5*).⁷⁰
- Many national and subnational governments,⁷¹ including major methane-emitting countries and regional organizations, are already pursuing mandatory and voluntary methane mitigation measures (*see Section 6*). In addition, public and private organizations and initiatives around the world are collaborating on methane mitigation. These international, regional, and national efforts strengthen and expand methane mitigation action and leadership, but more action is needed at the international level (*see Section 7*).
- Systems to measure and monitor methane emissions already exist and others are under development. Satellite-based systems are rapidly increasing our understanding of major emitting sources, including a small number of “ultra-emitters” who are responsible for 8–12% of global oil and gas sector methane emissions (*see Section 8*).⁷² These monitoring systems, when coupled with an accountability and enforcement strategy, are essential to ensuring the world is on track to secure maximum reductions in methane emissions. This includes encouraging use of accurate metrics that better reflect temperature impacts of strategies to stay below 1.5 °C, such as the 20-year global warming potential (GWP₂₀) for methane and other SLCPs (**Box 3**) (*see Section 9*).⁷³
- Securing the appropriate funding and finance is essential to support governments and organizations committed to fast methane reductions. Private philanthropies, multilateral banks, governments, and other financial sector stakeholders all have roles to play in

enabling fast methane mitigation to respond to the climate emergency. Methane mitigation solutions, however, remain severely underfunded.⁷⁴ At the 28th Conference of the Parties (COP28) in Dubai, governments, philanthropies, and the private sector announced more than \$1 billion in new grant funding for methane reduction had been mobilized since COP27.⁷⁵ Yet, as the *Global Methane Tracker 2024* emphasizes, more is needed to bridge the current funding gap in methane finance to deliver the required reductions this decade. In the fossil fuel industry, the International Energy Agency estimates that around US\$170 billion in spending is needed to deliver methane mitigation to stay below 1.5 °C (around US\$100 billion in the oil and gas sector and US\$70 billion in the coal industry).⁷⁶

- COP29 should establish a global methane fund of at least \$10 billion a year for the next five years. The fund should be capable of adapting to the needs of international, regional, national, and subnational actors, as well as non-state actors, to provide the funds necessary to pursue policies, initiatives, and projects to rapidly reduce methane (*see Section 11*).
- As cutting methane emissions is the single most important action humanity can take to slow near-term warming, multilateral action must move from pledges to mandatory measures.⁷⁷ Governments should build on the national, regional, and international efforts that establish a robust technical and policy foundation for global methane control. Key international efforts include the Global Methane Pledge (endorsed by 156 countries and the European Union),⁷⁸ the Nationally Determined Contributions (NDCs) under the Paris Agreement from 95% of countries that directly reference or plan to reference methane mitigation,⁷⁹ and bilateral agreements such as the *U.S.-China Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis* (“Sunnylands Statement”).⁸⁰
 - The COP28 *Summit on Methane and Non-CO₂ Greenhouse Gases* (“COP28 Methane Summit”) was a significant step forward in building momentum towards a global methane agreement.⁸¹ The final decision outcome of COP28 on the Global Stocktake (“Global Stocktake Agreement”) further illustrates the inevitability of a global methane agreement, recognizing the urgent need to accelerate and substantially reduce “non-carbon-dioxide emissions globally ... in particular methane emissions by 2030” (*see Section 10A*).⁸²
- The approach to the design of a global methane agreement should take inspiration from the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, widely acknowledged as the best environmental agreement ever created,⁸³ while adapting to the geopolitical dynamics of the climate emergency. Similar to the Montreal Protocol, a global agreement could begin with a framework methane agreement and a parallel protocol on the energy sector.⁸⁴ Separate protocols could then follow on the waste and agricultural sectors. Any agreement must also embrace mandatory targets in a way that accounts for emerging crises for peace, democracy, and food security (*see Section 10D*).
- Bilateral and multilateral climate events, particularly COP29, offer opportunities to build upon the progress made at COP28 and move towards a global methane agreement. This international collaboration should involve unprecedented speed and ensure mandatory commitments are science-based, equitable, and effective. Rapid and aggressive methane mitigation must occur this decade; it is the only way to keep the critical temperature threshold of 1.5 °C within reach.⁸⁵

1. Introduction: Building on the Global Methane Pledge

The world is in a state of climate emergency requiring fast-acting solutions that move beyond current paradigms of inadequate climate action. Ending dependence on fossil fuels, including fossil gas, by shifting to clean energy is essential to protect the climate and ensure peace and security. But during the time it takes to shift the world's energy system to clean energy, it is essential to simultaneously reduce methane emissions as fast as possible to address the climate emergency. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [Sixth Assessment Report \(AR6\)](#) affirms this, stating that “[s]trong, rapid and sustained reductions in methane emissions can limit near-term warming and improve air quality by reducing global surface ozone. (*high confidence*).”⁸⁶

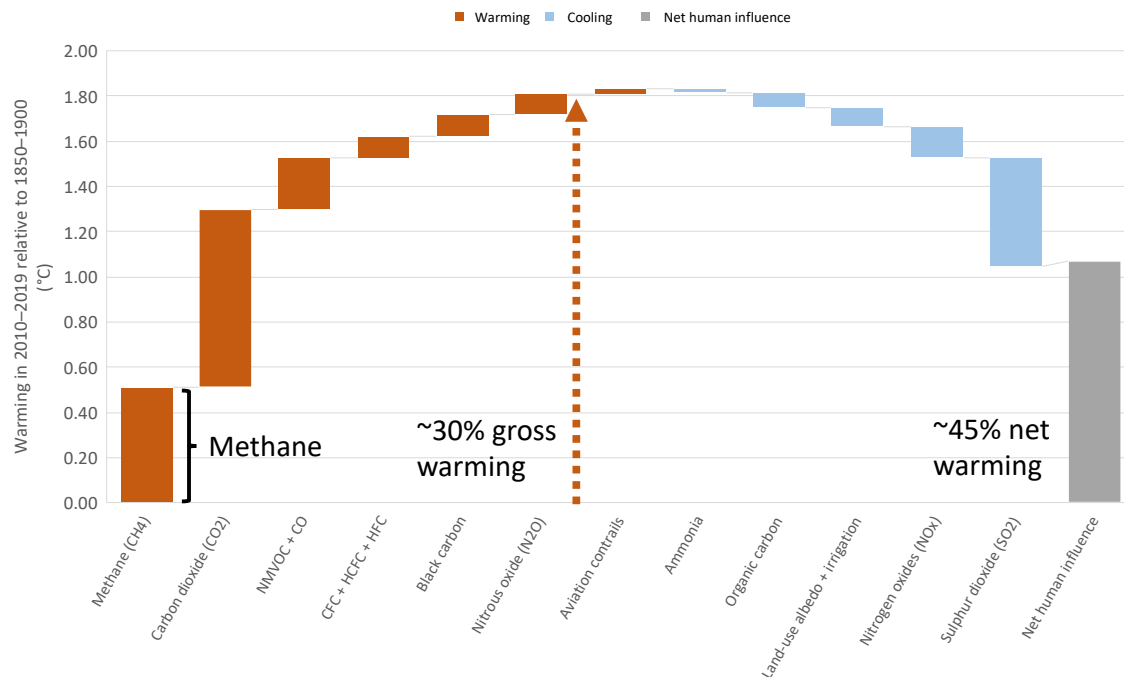
Methane (CH₄) is a super-potent planet-warming greenhouse gas with over 80 times the warming power of carbon dioxide (CO₂) over 20 years ([Box 3](#)).⁸⁷ As described in the *Financial Times*, “[i]f you think of fossil fuel emissions as putting the world on a slow boil, methane is a blow torch that is cooking us today.”⁸⁸ Methane is also a major precursor of tropospheric ozone, an air pollutant responsible for millions of premature deaths, billions of dollars' worth of crop losses annually,⁸⁹ and weakening of carbon sinks.⁹⁰

Methane pollution has already caused 0.51 °C of the total observed warming in 2010–2019 of 1.06 °C compared to 1850-1900 ([Box 1](#));⁹¹ and warming will increase, if methane emissions continue to rise. Methane concentrations peaked above 1,900 ppb for the first time in September 2021,⁹² and reached an average of 1,912 ppb in 2022, more than two and half times pre-industrial levels.⁹³ As noted in the joint U.S.-EU press release on the Global Methane Pledge, “Methane is a potent greenhouse gas [GHG] and, according to the latest report of the IPCC, accounts for about half of the 1.0 °C net rise in global average temperature since the pre-industrial era.”⁹⁴

Box 1. Methane's contribution to current warming

Methane emissions from human activity are responsible for nearly 45% of current net warming.⁹⁵ According to the IPCC AR6, methane pollution caused 0.51 °C (0.29–0.84 °C) of warming in 2010–2019 relative to 1850–1900, and CO₂ caused 0.79 °C (0.52–1.25 °C) of warming ([Figure 1](#)). The total current net anthropogenic warming is about 1.06 °C (0.88–1.21 °C) through 2019.⁹⁶ While emissions of greenhouse gases and black carbon aerosols contribute about 1.8 °C of warming, about 0.7 °C of this warming is currently masked due to the cooling effect of reflective aerosols that are primarily co-emitted along with CO₂ during coal and diesel combustion. This assessed net warming of 1.07 °C is very close to the observed warming of 1.06 °C (0.88–1.21 °C). If we don't account for these cooling aerosols and only consider gross warming due to greenhouse gas emissions in terms of radiative forcing (how much extra heat do the added gases trap in the atmosphere), methane contributes about 30% of anthropogenic radiative forcing (approximately 1.2 out of 3.8 Watts per square meter, Wm⁻²). This emissions-based radiative forcing of methane of 1.2 (0.90 to 1.51) Wm⁻² accounts for the direct effect of methane emissions (0.54 Wm⁻²) and for indirect positive forcing from the contribution of methane emissions to increased background tropospheric ozone and stratospheric water vapor;⁹⁷ it also reduces the formation of cooling sulfate aerosols by acting as a sink for the hydroxy radical (OH).⁹⁸ Methane from fossil fuel sources has slightly higher emissions metric values than those from biogenic sources.⁹⁹

Figure 1. Contributions to observed warming in 2010–2019 relative to 1850–1900



Adapted from Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), Data for Figure SPM.2 (v20210809). See also NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis (2021).

Cutting methane emissions is the fastest and best strategy to slow warming and keep 1.5 °C within reach.¹⁰⁰ Limiting warming to 1.5 °C would prevent most of the tropics from exceeding the combined heat and humidity conditions beyond the survival limit.¹⁰¹ Warming of 2.7 °C by the end of the century would leave about one-third of the global population outside of the climate niche (2–2.5 billion people), while limiting warming to 1.5 °C would halve the number of people exposed to unprecedented heat.¹⁰²

The *Global Methane Assessment* from the Climate & Clean Air Coalition (CCAC) and United Nations Environment Program (UNEP) concludes that currently available mitigation measures could reduce human-caused methane emissions by 45% by 2030, compared to projected business-as-usual 2030 levels, and avoid nearly 0.3 °C warming by the 2040s.¹⁰³ Fast and aggressive methane mitigation is critical because the window to reduce warming enough to slow self-amplifying feedbacks and avoid tipping points may close by the end of this decade.¹⁰⁴ Many feedbacks are showing signs of activation, and there is evidence that we are nearing or have already crossed multiple climate tipping points.¹⁰⁵

The IPCC defines a “tipping point” as “a critical threshold beyond which a system reorganizes, often abruptly and/or irreversibly.”¹⁰⁶ The “evidence from tipping points alone suggests that we are in a state of planetary emergency: both the risk and urgency of the situation are acute,” according to Tim Lenton and colleagues.¹⁰⁷ Earth system models project a cluster of six such abrupt shifts between 1 °C and 1.5 °C of warming and another eleven between 1.5 °C and 2 °C,¹⁰⁸ as confirmed by two IPCC Special Reports.¹⁰⁹ A 2022 assessment finds that exceeding 1.5 °C

increases the likelihood of triggering or committing to six self-amplifying climate tipping points.¹¹⁰ Domino-like interactions among these systems risk triggering a global cascade of tipping points.¹¹¹ Climate models either ignore or under-estimate key feedbacks and tipping point risks.¹¹² Additionally, climate models do not account for other circumstances that have been shown to lower thresholds for triggering tipping points, including increasing rates of warming,¹¹³ pressure from multiple drivers (like droughts, wildfires, deforestation), or increased variability in a single driver.¹¹⁴ Further, as-yet-undiscovered tipping points are possible due to limitations in current models and the exclusion from these models of certain processes, including those related to biogeochemical feedbacks involved in processes such as permafrost thaw.¹¹⁵

Box 2. Self-propagating feedbacks and tipping points

AR6 defines a *climate feedback* as “an interaction in which a perturbation in one *climate* quantity causes a change in a second and the change in the second quantity ultimately leads to an additional change in the first.” AR6 examples of climate feedbacks include carbon cycle feedback, cloud feedback, and ice-albedo feedback, among others. AR6 defines a *tipping point* as “a critical threshold beyond which a system reorganizes, often abruptly and/or irreversibly.”¹¹⁶ Some feedbacks, like the ice-albedo feedback, are self-propagating: initial warming reduces the volume and extent of reflective Arctic summer sea ice, exposing the darker ocean surface that absorbs more heat, and providing an additional feedback that sustains the loop through further reduction of the sea ice. Key elements of the climate system have tipping points that, once exceeded, commit the system to change, even if this change is projected to take decades to hundreds of years to fully play out, as in the case of melting of the Greenland Ice Sheet.¹¹⁷ Other systems may tip abruptly. An example would be the shift of the terrestrial biosphere from a net sink for CO₂ to a net source of CO₂ as warming increases respiration rates and decreases photosynthesis rates.¹¹⁸

For a fuller discussion of feedbacks and tipping points and fast-mitigation solutions, *see* Institute for Governance & Sustainable Development (2023) [THE NEED FOR FAST NEAR-TERM CLIMATE MITIGATION TO SLOW FEEDBACKS AND TIPPING POINTS](#).

Decarbonizing the energy system and achieving net-zero CO₂ emissions is critical for stabilizing the climate and keeping temperatures below 1.5 °C by the end of this century.¹¹⁹ However, phasing out CO₂-emitting fossil fuels, such as coal and diesel, also stops emissions of co-emitted cooling aerosols such as sulfur dioxide (SO₂).¹²⁰ Unlike CO₂, which remains in the atmosphere for decades to centuries, these cooling aerosols fall out of the atmosphere within days to months. The loss of this cooling effect will offset reductions in warming from decarbonization until around 2050 and *likely even accelerate warming over the first decade of decarbonization or longer*.¹²¹

“The removal of air pollution, either through air quality measures or because combustion processes are phased out to get rid of CO₂, will result in an increase in the resulting rate of warming... The only measures that can counteract this increased rate of warming over the next decades are methane reductions.” -- IPCC author Joeri Rogelj¹²²

The *Global Methane Assessment* and IPCC AR6 both highlight “strong, rapid, and sustained methane reductions” as key to counteracting this increased rate of warming from unmasking over

the next decades.¹²³ Further, AR6 finds that reducing methane emissions is key to effectively reducing peak warming and lowering the costs of climate change in the near term by limiting the likelihood of overshooting 1.5 °C.¹²⁴

As noted, in addition to causing global warming on its own, methane is also a major precursor to tropospheric ozone,¹²⁵ which also causes warming and is linked to significant human respiratory and cardiovascular morbidity and mortality,¹²⁶ and agricultural crop damage (estimated at US\$63 billion annually in East Asia alone).¹²⁷ Damage to plants due to increased tropospheric ozone may reduce their ability to absorb carbon and may negate some of the carbon fertilization effect from increased CO₂ concentrations with a potentially significant effect on indirect radiative forcing.¹²⁸ A recent study estimated methane's contribution to the present-day tropospheric ozone burden at 35%.¹²⁹ Methane is likely to play a greater role in tropospheric ozone formation as emissions of other precursors decrease due to air pollution controls.¹³⁰ Reducing global methane emissions by 45% by 2030 would prevent 255,000 premature deaths, 775,000 asthma-related hospital visits, 73 billion hours of lost labor from extreme heat, and 26 million tonnes of crop losses globally.¹³¹ Eliminating all anthropogenic methane emissions could avoid 690,000 premature deaths per year in 2050.¹³² Each tonne of methane reduced generates US\$4,300 in health, productivity, and other benefits.¹³³ In addition, methane mitigation strategies provide further cost reductions and efficiency gains in the private sector, create jobs, stimulate technological innovation, and help reduce climate vulnerability in the most disadvantaged communities.

The *COP28 Methane Summit*, convened by the United States, China, and United Arab Emirates on 2 December 2023,¹³⁴ recognized methane's essential role in rapidly cutting emissions to ensure peak-warming reduction and limit the likelihood of overshooting 1.5 °C. In addition, the first Global Stocktake Agreement recognizes “the need for deep, rapid, and sustained reductions” in GHG emissions to stay below 1.5 °C, including accelerating and substantially reducing methane emissions by 2030.¹³⁵ These recent developments build upon an impressive and increasingly strong foundation for methane mitigation, as detailed in this *Primer*, at the subnational, national, regional, and international levels. Many of these efforts are discussed in this *Primer*, including:

- Research on the best approaches for the removal of methane from the atmosphere (**Section 5**);
- Domestic efforts, including from major-emitting countries, to implement methane measures, including border adjustment mechanisms (**Section 6**);
- Governmental, quasi-governmental, and private sector initiatives, including methane metrics and monitoring programs (**Section 7** and **Box 6**);
- Multilateral and bilateral methane initiatives (**Section 10**); and
- Key international financial initiatives addressing methane mitigation (**Section 11**).

Yet, the majority of existing efforts to cut methane are not mandatory and are not sufficient to cut warming quickly enough¹³⁶ to avoid tipping points that would lock in devastating global warming and make it much more difficult to avoid an existential threat to a liveable planet Earth.¹³⁷ Governments must fully implement¹³⁸ and build on these existing commitments and initiatives to further open the door for a global methane agreement drawing inspiration from treaties such as the Montreal Protocol¹³⁹ and responding to a growing chorus of calls for such actions.¹⁴⁰

This *Primer* provides an overview of the science underpinning the need for fast climate-mitigation action this decade, why cutting methane emissions is the fastest and best way to slow climate change in the near term, and the natural sources of methane and related atmospheric removal research. The *Primer* also reviews methane emissions in the energy production, agricultural, and waste sectors, as well as the current technologies to cut nearly half of these emissions. Further, the *Primer* outlines methane mitigation efforts in selected major methane-emitting countries and reviews the methane-abatement-related activities of governmental, quasi-governmental, and industry-led organizations and initiatives. A summary of methane-emissions monitoring systems follows, as does a summary of key elements that are needed to build an accountability and enforcement strategy using such monitoring information. The *Primer* then describes international efforts, including the Global Methane Pledge and recent *COP28 Methane Summit*, that are catalyzing other bilateral and multilateral actions to curb methane, including calls for mandatory national and multilateral methane emissions mitigation measures. This is followed with a summary of key financial and philanthropic organizations initiatives to provide crucial financial support for methane ambition and action.

Although this *Primer* focuses on methane, deep cuts to similarly potent short-lived climate pollutants (SLCPs)—including black carbon soot, hydrofluorocarbons (HFCs), and tropospheric ozone (for which methane is a major precursor) are also critical to slowing warming in the near term.¹⁴¹ Such cuts will reduce the build-up of heat in the ocean that otherwise will continue adding to warming for decades to centuries, long after the lifetime of the pollutant.¹⁴²

Box 3. Time and temperature methane metrics: GWP₂₀ is an improvement, temperature is even better!

Reducing the risks associated with accelerating warming requires mitigation strategies that can slow warming in the near term, like cutting methane emissions. Assessing how strategies affect near-term warming requires considering individual emissions by pollutant in units of mass, as required under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) reporting guidelines and recommended by climate scientists.¹⁴³ It also requires accounting for co-emissions by source, since policies act on sources, not on individual pollutants.

An ideal option for assessing temperature impact is to convert emissions by source in terms of pollutant and co-emissions to temperature impacts using tools such as the [Assessment of Environmental and Societal Benefits of Methane Reductions Tool](#) or the [CCAC Temperature Pathway Tool](#). Alternatively, using the 20-year global warming potential (GWP₂₀) better captures near-term warming impact than the 100-year GWP, in addition to being more aligned with meeting the 1.5 °C target.¹⁴⁴ While the UNFCCC currently requires using the GWP₁₀₀ metric when reporting aggregated emissions or removals, which systematically undervalues the near-term climate impact of methane, reporting Parties may use other metrics in addition, such as GWP₂₀ or absolute temperature potentials.¹⁴⁵ Indeed, using GWP₁₀₀ alone systematically underestimates the importance of methane emissions and “can lead to suboptimal policies and priorities by misleading climate actors from the top levels of governments (e.g., U.S. NDC) to grassroots organizations.”¹⁴⁶

Box 3 continued

IPCC AR6 has updated the metrics for methane as follows: GWP₂₀ is 81.2 and GWP₁₀₀ is 27.9.¹⁴⁷ **Table 1** below summarizes GWP values for methane from IPCC reports.

Table 1. GWP values for methane from IPCC reports

		AR6	AR5		AR4	TAR	SAR
Methane (CH ₄)	GWP ₂₀	81.2	84	86*	72	62	56
	GWP ₁₀₀	27.9	28	34*	25	23	21
Fossil CH ₄	GWP ₂₀	82.5 ± 25.8	85		--	--	--
	GWP ₁₀₀	29.8 ± 11	30		--	--	--
Non-fossil CH ₄	GWP ₂₀	80.8 ± 25.8	--		--	--	--
	GWP ₁₀₀	27.2 ± 11	--		--	--	--

* With carbon cycle feedback. All methane AR6 values include carbon cycle feedback.

AR6 = 2021 *Sixth Assessment Report* WGI (Table 7.SM.7; Table 7.15); **AR5** = 2013 *Fifth Assessment Report* WGI (Table 8.A.1; Table 8.7); **AR4** = 2007 *Fourth Assessment Report* (Table 2.14); **TAR** = 2001 *Third Assessment Report* (Table 6.7); **SAR** = 1995 *Second Assessment Report* (Table 2.9).

Most aggregation metrics are designed for comparison with long-lived CO₂. Metrics such as CO₂-equivalence in terms of GWP and GWP* (“GWP star”) are based on mathematical relationships that are intended to make SLCPs like methane comparable to the longer-term warming impact of CO₂ emissions.¹⁴⁸ These aggregate metrics generally ignore co-emitted pollutants with significant near-term climate impacts such as cooling aerosols. The GWP* metric seeks to account for the shorter lifetime of methane by differentiating historical emissions from changes in the rate of emissions.¹⁴⁹ One criticism of this approach is that it essentially “grandfathers” historical emissions, so when applied at the scale of regional or individual methane emitters, sources with high historical emissions can claim negative GWP* by reducing their rate of emissions. This is the case even if their emissions in a given year are equivalent to a new source with no historical emissions. This has led to misuse of these metrics to claim that some sectors with large historical emissions and stable or decreasing current rates of emissions have contributed less to global warming.¹⁵⁰

For these reasons, this *Methane Primer* follows the convention of the *Global Methane Assessment* in using mass-based metrics, such as million metric tonnes of methane (Mt CH₄), and temperature impacts rather than GWP metrics where possible.

2. The need for speed: Winning the sprint to 2030 is critical to avoiding climate catastrophe

Every increment of additional warming matters.¹⁵¹ We are already experiencing the climate emergency, with extreme events occurring sooner and with greater severity than anticipated. As the rate of warming accelerates, record-shattering extreme events will become increasingly common and more dangerous.¹⁵² We have, at most, until the end of the decade, and probably less, to radically slow global warming or face an existential threat to a liveable planet Earth. The world could hit the 1.5 °C guardrail by 2030 because of rising emissions, declining particulate air pollution that unmask existing warming, and natural climate variability.¹⁵³

While the 20-year average temperature is not expected to exceed 1.5 °C before 2030, there is a 66% chance that annual average near-surface global temperatures will exceed 1.5 °C for at least one year between 2023 and 2027 and a 32% chance that the five-year mean from 2023–2027 will exceed this threshold, according to the World Meteorological Organization (WMO).¹⁵⁴ The 2011–2020 temperature average over land has already crossed the 1.5 °C threshold,¹⁵⁵ and warming has been increasing at an unprecedented rate of over 0.2 °C per decade since the mid-2010s.¹⁵⁶

According to the Copernicus weather service, “we have already entered uncharted territory” in global temperature extremes.¹⁵⁷ At +1.44 °C above the pre-industrial average,¹⁵⁸ 2023 was the warmest year in the historical record,¹⁵⁹ likely from a combination of natural variabilities (such as the start of warmer El Niño conditions in the middle of the year) and external forcing (from continuing climate emissions and declining aerosol pollution).¹⁶⁰ 2024 will likely be as warm, with the potential for exceeding 1.5 °C at least temporarily.¹⁶¹

Speed must become a key factor in the selection of climate solutions, to quickly limit warming, slow self-propagating feedbacks, avoid tipping points, and protect the most vulnerable people and ecosystems. Therefore, we need fast climate solutions, meaning measures that can begin within two to three years, be substantially implemented within five to ten years, and produce a climate response within the next decade or two.¹⁶² These strategies also are critical to increasing resilience by providing communities more time to adapt to global warming and by reducing the amount of adaptation needed.¹⁶³

The scientific community has failed to adequately communicate the need for speed. As Yangyang Xu, V. Ramanathan, and David Victor noted in their Comment in *Nature*,¹⁶⁴

“[The IPCC Special Report on 1.5 °C] underplays another alarming fact: global warming is accelerating. Three trends—rising emissions, declining air pollution [which is quickly reducing the reflective sulfate particles that mask warming], and natural climate cycles—will combine over the next 20 years to make climate change faster and more furious than anticipated. In our view, there is a good chance that we could breach the 1.5 °C level by 2030, not by 2040 as projected in the special report.... The climate-modelling community has not grappled enough with the rapid changes that policymakers care most about, preferring to focus on longer-term trends and equilibria.”

A. Current climate impacts are bad, and worse is on the horizon from the growing risk of self-propagating feedback loops pushing the planet past tipping points

Rapid warming over the near term threatens to accelerate a vicious cycle—self-propagating feedbacks where the planet starts to warm itself. These feedback mechanisms could set off a domino-like cascade of tipping points in the Arctic and elsewhere, many of them irreversible and potentially catastrophic,¹⁶⁵ and could lead to uncontrollable warming, becoming the dominant force regulating the climate system.¹⁶⁶

A prestigious group of climate scientists, in their 2019 *Nature* Comment, *Climate Tipping Points—Too Risky to Bet Against*, explain that “the clearest emergency would be if we were approaching a global cascade of tipping points” and that such “cascading effects might be common.”¹⁶⁷

Evidence from the latest review of feedbacks and tipping points suggests that we are already “in a state of planetary emergency: both the risk and urgency of the situation are acute.”¹⁶⁸ At about 1.2 °C of warming, there is a non-negligible risk that one or more cryosphere tipping points have already been passed.¹⁶⁹ Best estimates indicate that critical thresholds for the Greenland Ice Sheet, West Antarctic Ice Sheet, warm-water corals, and abrupt permafrost thaw occur around ~1.5 °C.¹⁷⁰ Limiting warming below 2 °C and the duration, or overshoot, of warming above 1.5 °C may avoid collapse of the ice sheets and prevent tipping of the Amazon.¹⁷¹

The melting Greenland Ice Sheet is the largest single contributor to the rate of global sea-level rise,¹⁷² and is already committed to lose 110 trillion tons of ice by the end of the century, which would raise global sea levels by nearly a foot.¹⁷³ Recent observations have shown that the rate of retreat was as high as 610 m per day during the last interglacial period, and current levels of ocean-driven melting can trigger 100 m of ice sheet loss each day.¹⁷⁴ The IPCC’s AR6 Working Group I report (AR6 WGI) was unable to exclude the possibility of sea level rise of up to 7.5 feet (2.3 meters) by 2100 due to uncertainties in ice sheet processes.¹⁷⁵

Delaying mitigation increases the risk of crossing one or more temperature thresholds from higher peak temperatures. More importantly, stabilization of temperatures above 1.5 °C dramatically increases the risk of crossing multiple climate tipping points.¹⁷⁶ At 2 °C of warming the risks of triggering “relatively large, abrupt and sometimes irreversible changes in systems” become high, according to IPCC AR6.¹⁷⁷ Fast action to slow warming in both the near- and longer-term is critical to avoid committing the planet to weather and climate extremes that pose an existential threat to civilization.¹⁷⁸

B. Reducing fossil-fuel burning is essential but does not slow near-term warming

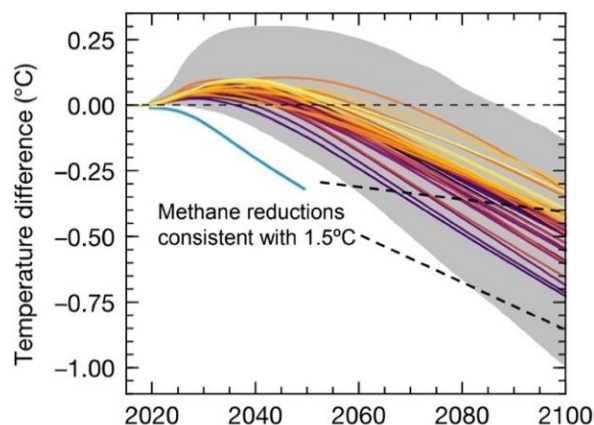
Decarbonizing the energy system and achieving net-zero CO₂ emissions is critical for stabilizing the climate and keeping temperatures below 1.5 °C by the end of this century, but cutting CO₂ alone is not able to achieve this target.¹⁷⁹ In fact, reducing the burning of fossil fuels like coal and diesel also cuts co-emitted cooling aerosols, primarily in the form of sulfates and nitrates. Co-emitted cooling aerosols are reflective particles that currently mask warming of about 0.5 °C.¹⁸⁰ While the accumulated CO₂ in the atmosphere will continue to cause warming for decades to centuries, these cooling aerosols fall out of the atmosphere in days to months, which “unmasks” or offsets reductions in warming from decarbonization until around 2050 and even adds warming over the first decade following decarbonization or longer (**Figure 2**).¹⁸¹ Even without accounting for the unmasked warming from reducing cooling aerosols, peaking CO₂ emissions in 2030 and reaching carbon neutrality in the 2060s would only avoid 0.1 °C of warming by 2050,¹⁸² although the benefits of this strategy accrue quickly starting around 2060 through the end of the century.

AR6 confirms that the shift from fossil fuels to clean energy is unmasking hidden warming of up to 0.5 °C¹⁸³ that cancels out the cooling benefits of decarbonization until around 2050, underscoring the importance of cutting non-CO₂ super climate pollutants (**Figure 1**):

“Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*).... Additional [methane] and

[black carbon] mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with [sulfur dioxide] reductions that would accompany decarbonization (*high confidence*).”¹⁸⁴

Figure 2. Decarbonization-only strategies accelerate near-term warming by reducing both CO₂ and cooling aerosols (SO₂) compared to mitigation strategies targeting methane reductions that result in avoiding warming in the near term



Source: Shindell D. (25 May 2021) *Benefits and Costs of Methane Mitigation*, Presentation at the CCAC Working Group Meeting. Updating Figure 3d from Shindell D. & Smith C. J. (2019) *Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels*, NATURE 573: 408–411.

3. Cutting methane emissions is the fastest and best way to slow warming in the near-term

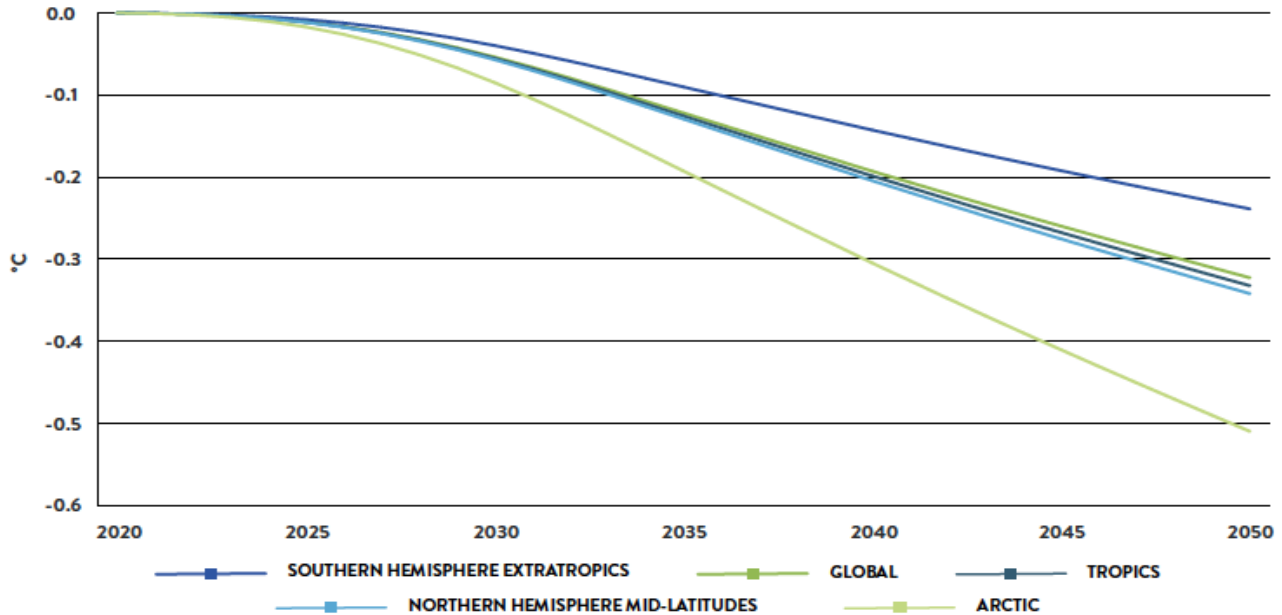
The *Global Methane Assessment* confirms that cutting methane emissions is the fastest strategy to limit warming over the next 20 years.¹⁸⁵ Pursuing all methane mitigation measures this decade is the only known way to avoid nearly 0.3 °C of warming by the 2040s and slow warming by 30%.¹⁸⁶ AR6 confirms that “strong, rapid, and sustained methane reductions” are key to limiting warming in the near- and longer-term.¹⁸⁷ Further, the most recent IPCC AR6 Working Group III contribution (AR6 WGIII) on climate solutions reinforces that deep and rapid cuts to methane emissions are essential to limiting warming in the near-term and shaving peak warming from overshooting 1.5 °C.¹⁸⁸ Limiting warming to 1.5 °C with no or limited overshoot requires reducing emissions by 34% below 2019 levels in 2030 and 44% below 2019 levels in 2040.¹⁸⁹

A. Pursuing all available methane mitigation measures is the only plausible way to limit warming over the next 20 years

The *Global Methane Assessment* calculated that strategies to cut methane emissions 40–45% by 2030 could avoid nearly 0.3 °C by the 2040s, and 0.5 °C in the Arctic by 2050, 60% more than the global average (**Figure 3**).¹⁹⁰ This is consistent with AR6, which confirmed that cutting methane (by 35% or more) together with other SLCPs could slow warming globally by 0.2 °C (0.1–0.4 °C) in 2040.¹⁹¹ Strategies to cut methane emissions achieve 60% more avoided warming in the Arctic than the global average, with the potential to avoid 0.5 °C by 2050.¹⁹² Every 10-year delay in

methane mitigation after 2040 would cause further peak warming of around 0.1 °C, and would further amplify surface air temperature levels due to biogeochemical feedbacks.¹⁹³

Figure 3. Temperature response to methane abatement from 2020–2050 based on mitigation levels consistent with 1.5 °C scenarios



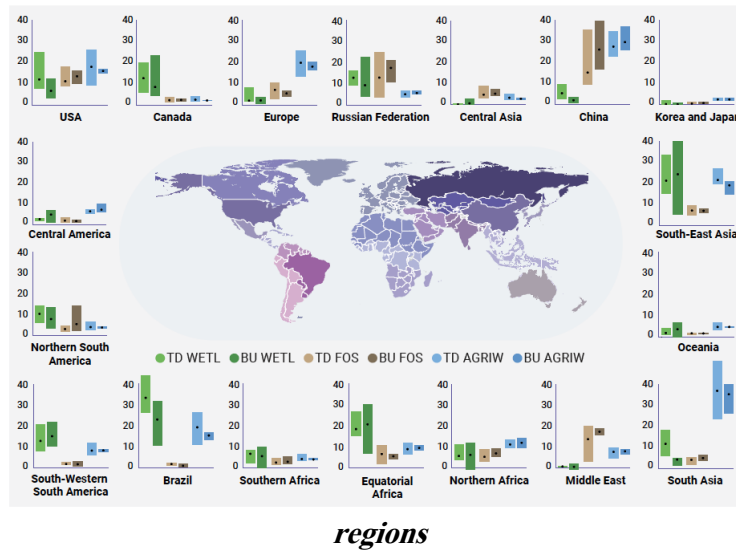
Source: United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, Figure 5.1. Note: In addition to global mean responses, values are given for the southern hemisphere extratropics (90–28 °S), the tropics (28 °S–28 °N), the northern hemisphere mid-latitudes (28–60 °N) and the Arctic (60–90 °N).

Current climate pollutant emission levels place global average temperatures on a trajectory to exceed 2 °C by 2050, with anthropogenic methane emissions accounting for up to one-third of the temperature increase.¹⁹⁴ The 2011 *Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone* calculated that fully implementing measures targeting methane and black carbon could reduce the rate of global warming by half and reduce Arctic warming by two-thirds.¹⁹⁵ Pursuing all available methane mitigation measures would cut the global rate of warming by 30% by mid-century.¹⁹⁶ If all anthropogenic methane emissions were eliminated, surface methane levels could drop below pre-industrial levels within 15 years.¹⁹⁷

Rapid reductions in methane emissions this decade could also reduce the risk of losing all of the summer Arctic sea ice.¹⁹⁸ The former “ecosystem of ice” in the Arctic no longer exists: half of the Arctic’s September sea ice is already gone,¹⁹⁹ and the rest could disappear within 10 to 15 years.²⁰⁰ If Arctic summer sea ice were to disappear for the sunlit months, as could happen as early as mid-century,²⁰¹ it would be the warming equivalent of 1,000 billion tonnes of CO₂ and up to three times this if cloud cover dissipates.²⁰²

In sum, due to the long lifetime of CO₂ and the unmasking of warming associated with decarbonization, cutting methane together with the other SLCPs is the only plausible way to limit warming in the near term,²⁰³ absent solar radiation management or other still speculative climate interventions.

Figure 4. Average methane emissions for 2008–2017 in Mt CH₄ per year for 18 continental



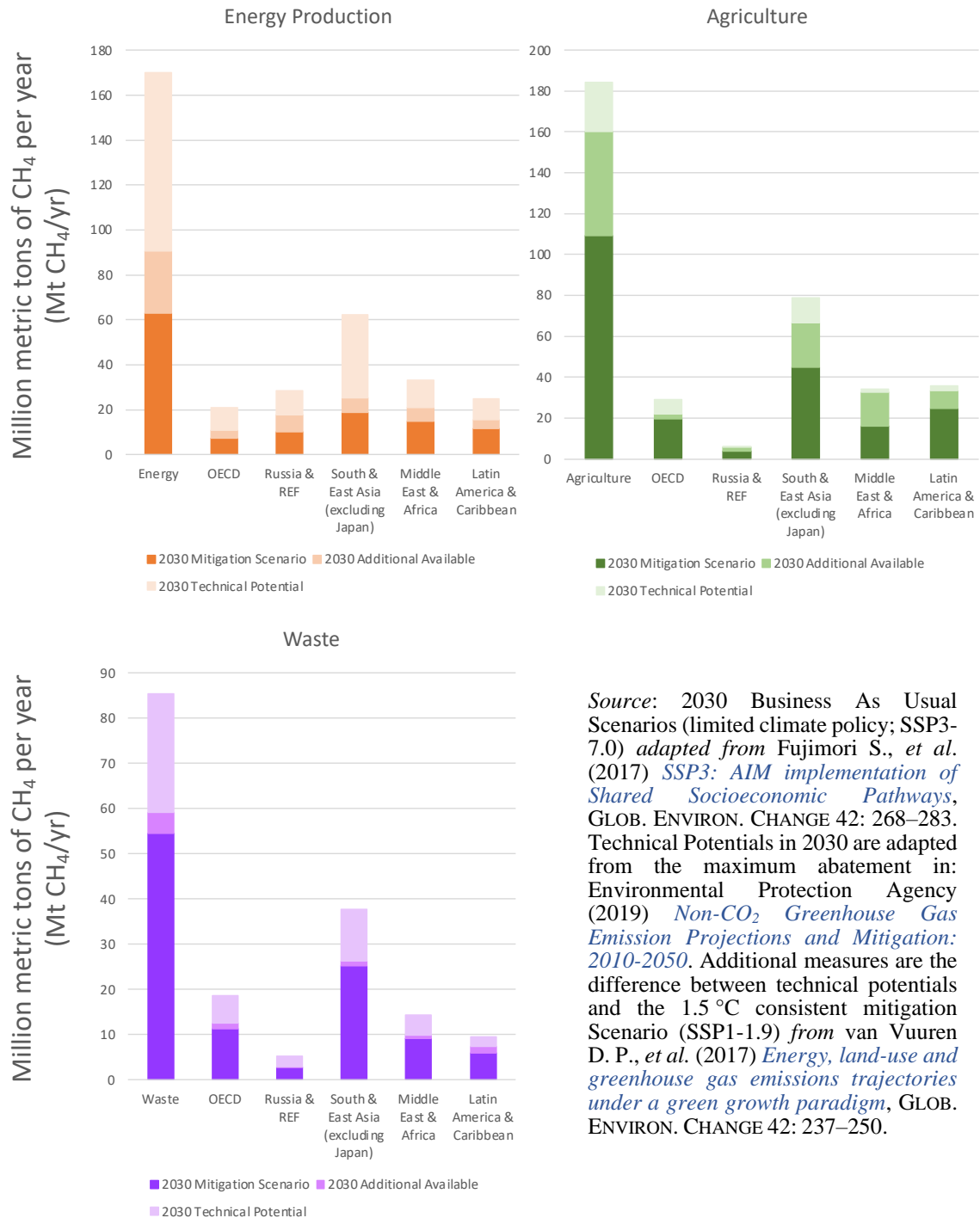
Source: United Nations Environment Programme (2021) *EMISSIONS GAP REPORT 2021: THE HEAT IS ON – A WORLD OF CLIMATE PROMISES NOT YET DELIVERED*, Figure 6.1. Note: Emissions are shown for three main emission categories: wetlands (WETL), fossil fuel-related (FOS) and agriculture and waste (AGRIW). Colored bars represent the minimum and maximum range of available estimates from top-down (TD) and bottom-up (BU) approaches. Black dots show the average for each approach (based on Sauniois *et al.* 2020 data sets). The colors in the map indicate regions only.

B. Anthropogenic sources are responsible for about 60% of global methane emissions

Human activity is responsible for about 60% (estimates range from 50–65%) of total global methane emissions.²⁰⁴ Three sectors are primarily responsible: energy production (~35%), agriculture (~40%), and waste (~20%), with regional differences and uncertainties in estimates shown in **Figure 4**.²⁰⁵ In comparison, biomass burning and biofuels are minor sources.²⁰⁶ Currently available mitigation measures could reduce emissions from these sectors by about 180 million metric tonnes of methane per year (Mt/yr), approximately 45%, by 2030 (

Figure 5). Of those reductions, around 75 Mt (roughly 60%) could be reduced at no or low cost (less than US\$600 per tonne of methane reduced, or about US\$21 per tonne of CO₂-equivalent using 100-year GWP of 28) (**Box 3**).²⁰⁷ While anthropogenic emissions are likely the main cause of increasing atmospheric methane levels over the last two decades, natural sources of methane appear to be increasing emissions as part of wetlands and permafrost feedbacks.²⁰⁸ Recent studies attribute the record-breaking increase of methane emissions in 2020, when the average rate of methane concentration growth doubled from the 2007–2019 average, to reduced oxidative capacity of the atmosphere and increased wetland emissions, in addition to anthropogenic emissions; the cause of the surge in atmospheric methane concentration continued in 2021 and is under investigation.²⁰⁹ (**Section 5** discusses important early-stage research underway on removing methane from the atmosphere.)

Figure 5. Indicative baseline emissions in 2030 and mitigation potential from technical and additional measures consistent with a 1.5 °C pathway



Source: 2030 Business As Usual Scenarios (limited climate policy; SSP3-7.0) adapted from Fujimori S., et al. (2017) *SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways*, GLOB. ENVIRON. CHANGE 42: 268–283. Technical Potentials in 2030 are adapted from the maximum abatement in: Environmental Protection Agency (2019) *Non-CO₂ Greenhouse Gas Emission Projections and Mitigation: 2010-2050*. Additional measures are the difference between technical potentials and the 1.5 °C consistent mitigation Scenario (SSP1-1.9) from van Vuuren D. P., et al. (2017) *Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm*, GLOB. ENVIRON. CHANGE 42: 237–250.

i. The energy production sector accounts for ~35% of anthropogenic methane emissions

About 35% of anthropogenic methane emissions come from energy production activities related to oil, gas, and coal.²¹⁰ Emissions in 2020 were estimated at close to 130 Mt CH₄ globally, with about 80 Mt CH₄ from oil and gas and 40 Mt from coal, with the IEA estimating a 5% increase in emissions in 2021.²¹¹ Each fuel is similarly responsible for around one-third of methane emissions associated with energy production.²¹² Most emissions from oil and gas come from onshore extraction, followed by downstream activities such as refining and distribution.²¹³ These emissions include accidental leaks as well as purposeful venting of methane. When these leaks and fugitive emissions (gas that escapes during the drilling, extraction, and transportation process)²¹⁴ are considered, methane emissions from the energy production sector are about 70% higher than in reported data.²¹⁵ Note, however, these estimates generally do not include likely significant emissions from abandoned coal mines and oil and gas wells.²¹⁶

Methane occurs naturally in coal mines and many mitigation measures are taken to ensure worker safety, including those mentioned in **Section 6**. Emissions occur from active underground mines, abandoned mines that continue to leak methane, and some surface mines.²¹⁷ Recent analysis of coal mine emissions from Australia, including surface mines, found that methane emissions had been significantly underestimated in official reporting.²¹⁸ Even in the case of forecasted declining coal production,²¹⁹ methane from coal is expected to remain an important focus of mitigation efforts, because absent intervention, emissions from abandoned mines will increase as more mines are abandoned.²²⁰ The IEA estimates that methane emissions from operating coal mines in 2020 had a larger short-term impact on climate than the European Union's combined CO₂ emissions, and that coal power generation would need to be reduced by 75% by 2030 to limit warming to 1.5 °C.²²¹ However, coal demand is on track to meet the 2023 annual record and set a new, all-time high in 2023, as the result of extreme heatwaves and the continuing replacement of Russian gas in Europe.²²²

Abandoned coal mine methane can also be a significant source of methane, making up 12.5% of methane emissions from coal mining in the U.S.²²³ These emissions may be underestimated as typical aerial surveillance of methane emissions is not as effective with abandoned mines, and certain parameters needed to estimate methane emissions are not available for each abandoned coal mine.²²⁴

ii. The agriculture sector accounts for ~40% of anthropogenic methane emissions

Agriculture accounts for around 40% of anthropogenic emissions. These agricultural emissions arise primarily from livestock and rice cultivation.²²⁵ The largest contribution within agriculture is from cattle, sheep, and other ruminant animals that generate methane through their digestion processes (enteric fermentation),²²⁶ with cattle accounting for 77% of these emissions.²²⁷ Current manure management practices, especially for pigs and cattle, also release methane.²²⁸ Emissions in 2020 were estimated at approximately 117 Mt CH₄ from livestock and manure management.²²⁹ Population increases will continue to drive agricultural emissions, particularly from livestock, which are expected to rise to about 11 million tonnes per year by 2030 (range 6–23 million tonnes).²³⁰

Flooded fields used for rice cultivation are another major source of methane, especially in regions with high rice production.²³¹ In Asia, rice cultivation contributes around 20% of the region's methane emissions.²³² In 2020, emissions from global rice cultivation were estimated at around 30 Mt CH₄.²³³

iii. The waste sector accounts for ~20% of anthropogenic methane emissions

Approximately 20% of anthropogenic emissions come from the waste sector.²³⁴ This includes both landfills and wastewater treatment where decomposition of organic waste produces methane. Waste sector emissions in 2017 are approximately 68 Mt CH₄.²³⁵ However, traditional methods likely continue to underestimate emissions from landfills. A recent multi-satellite study found that city-level methane emissions in Buenos Aires, Delhi, Lahore, and Mumbai were 1.4 to 2.6 times larger than estimated, with landfill emissions contributing 6% to 50% of those emissions.²³⁶ Currently, an estimated 2.0 billion metric tons of global municipal solid waste is generated annually, and this amount is expected to increase by 70% to 3.4 billion metric tons by 2050.²³⁷

Box 4. Self-amplifying methane emissions from natural sources and sinks

In addition to anthropogenic sources, warming-driven feedbacks, such as thawing of permafrost, wetland emissions, and seabed methane hydrates increase atmospheric concentrations of methane; Arctic amplification, increased wildfires, and other biogeochemical processes can accelerate these emissions.

- Permafrost contains nearly twice the amount of carbon than is already in the atmosphere and is found below about a quarter of the N. Hemisphere’s land area.²³⁸ The thawing of permafrost,²³⁹ a process which releases methane, could amplify warming over a century or longer,²⁴⁰ is irreversible at a human time-scale.²⁴¹ For each °C of global warming at 2100, the permafrost feedback could release 66 Gt CO₂ (11 to 150) and 10 Gt CO₂-eq (2.6 to 27) of methane, in addition to nitrous oxide (N₂O), which model-based estimates do not account for.²⁴² This has the potential to add 0.05–0.7 °C of warming by 2100, of which 50% would be due to methane emissions.²⁴³ The magnitude of the permafrost carbon feedback strengthens under a high-emissions scenario.²⁴⁴
 - According to AR6 WGI, permafrost CO₂ feedback can be as high as 4.1 billion tonnes through 2100.
 - Of the approximately 15 million square kilometers of permafrost on land,²⁴⁵ 3.4 million square kilometers have already thawed; and with a warming of 1.5 °C approaching, another 4.8 million square kilometers could thaw gradually.²⁴⁶
- In addition, up to 20% of the permafrost area accounting for half of permafrost carbon could experience abrupt local thaw events, such as the deep sinkholes observed in the Beaufort Sea.²⁴⁷ These abrupt thaw events could cumulatively emit up to nearly 11 Gt carbon in the form of CO₂ (40 Gt CO₂) and 6.8 Gt carbon in the form of CH₄ (9 Gt CH₄) by 2100, in addition to the 92 Gt carbon that could be released by gradual thaw over this period under a high-emission scenario.²⁴⁸
 - Some of the emissions from thawing permafrost are expected to be offset by the expanded growth of biomass, only if human emissions are curbed.²⁴⁹
 - In addition to accelerating soil carbon feedbacks due to permafrost thaw, heatwaves in the Siberian Arctic (such as those in 2020 that peaked at 6 °C above normal temperatures) may be causing “surprise” fossil methane gas to leak from rock formations.²⁵⁰
 - Increasingly frequent Arctic wildfires are accelerating permafrost thaw.²⁵¹

Box 4 continued

- Another concern is the risk that warming ocean waters will destabilize seabed methane hydrates.²⁵²
 - Such destabilization likely occurred off the coast of Guinea 125,000 years ago during the previous interglacial, with ice core records suggesting a sufficient amount of methane was released to the atmosphere to affect CO₂ and CH₄ concentrations.²⁵³
 - With a rapidly warming Arctic, the shallow seabed of the East Siberian Arctic Shelf poses significant concerns due to its potential to speed up other global warming impacts.²⁵⁴
 - Although there is debate on the possibility and rate of a potential release,²⁵⁵ it has been confirmed that the rate of methane release in the Chukchi Sea, a marginal sea of the Arctic Ocean, was higher in the 2010s compared to the 1990s.²⁵⁶
 - The release of land-based methane hydrates as glaciers recede could further amplify the permafrost feedback.²⁵⁷
- Recent studies have also identified feedback mechanisms from natural sources and sinks, which accelerated the growth of methane in 2020 and 2021, including increased emissions from wetlands and reduced capacity of the atmosphere to remove methane.²⁵⁸

4. The technologies exist to cut nearly half of anthropogenic methane emissions from the energy production, waste, and agriculture sectors

According to the CCAC, currently available measures could reduce anthropogenic methane emissions from the energy production, waste, and agriculture sectors by 45% by 2030.²⁵⁹ The Global Methane Pledge commits participants to collectively reduce anthropogenic methane emissions across all sectors by at least 30% reductions below 2020 levels by 2030, equivalent to at least 150 Mt CH₄ reduction below 2030 baseline levels (**Figure 6**).²⁶⁰ Measures specifically targeting methane sources are essential, as broader decarbonization measures can only achieve 30% of the needed methane reductions.²⁶¹ Roughly 60% of the available targeted measures have low mitigation costs (less than US\$21 per tonne of CO₂e for GWP₁₀₀ and US\$7 per tonne of CO₂e for GWP₂₀), and just over 50% of those have negative costs in that the measures pay for themselves.²⁶² In the IEA net zero emissions by 2050 scenario, total methane emissions from human activity are reduced by 45% and the energy sector by 75% between 2020 and 2030, costing less than 3% of net income from oil and gas in 2022.²⁶³ Methane mitigation also supports geographically diverse and well-paying jobs as shown in U.S. states that are leading methane mitigation efforts, for positions ranging from field technicians to chemical engineers to data scientists.²⁶⁴

Table 2 summarizes technical and additional methane emissions control measures by sector. There are many compilations of technology-based solutions and costs, including reports by the International Institute for Applied Systems Analysis, the International Energy Agency, the U.S. Environmental Protection Agency, McKinsey, and others.²⁶⁵ Several groups are tracking and assessing novel and innovative approaches, such as the Solar Impulse Foundation's compilation of 1000+ efficient, clean, and profitable solutions for the environment.²⁶⁶

Table 2. Emissions control measures by sector

Technical Controls		
Fossil Fuels	Waste	Agriculture
<p>Oil and gas: upstream and downstream leak detection and repair (LDAR); blowdown capture; recovery and utilization of vented gas with vapor recovery units and well plungers; installation of flares.</p> <p>Oil and gas by existing devices: replace pressurized gas pumps and controllers with electric or air systems; replace gas-powered pneumatic devices and gasoline/diesel engines with electric motors; early replacement of devices with lower-release versions; replace compressor seals; cap unused wells.</p> <p>Coal mining: flooding abandoned mines; pre-mining degasification; air methane oxidation with improved ventilation.</p>	<p>Municipal solid waste: composting; source separation with recycling and reuse; no landfill of organic waste; use of biocovers; treatment with energy recovery or collection of landfill gas.</p> <p>Industrial solid waste: recycling or treatment with energy recovery; no landfill of organic waste.</p> <p>Residential wastewater: upgrade primary treatment to secondary/tertiary anaerobic treatment with biogas recovery and utilization; use wastewater treatment plants instead of latrines and disposal.</p> <p>Industrial wastewater: upgrade to two-stage treatment, <i>i.e.</i>, anaerobic treatment with biogas recovery followed by aerobic treatment.</p>	<p>Enteric fermentation (cattle, sheep, & other ruminants): feed changes and supplements; breeding to improve productivity, animal health, and fertility.</p> <p>Manure management (ruminants & pigs): treatment in biogas digesters; decreased manure storage time; improved manure storage covering, housing systems and bedding; manure acidification.</p> <p>Rice cultivation: improved water management or alternate flooding/drainage wetland rice; direct wet seeding; phosphogypsum and sulphate addition to inhibit methanogenesis; composting rice straw; use of alternative hybrids.</p> <p>Agricultural waste burning: bans and enforcement of existing bans.</p>
Behavioral and Technological Changes		
Fossil Fuels	Waste	Agriculture
<ul style="list-style-type: none"> - Emissions pricing - Fuel switching to renewables - Energy demand management - Energy efficiency improvement 	<ul style="list-style-type: none"> - Emissions pricing - Reduced food waste 	<ul style="list-style-type: none"> - Emissions pricing - Reduced crop losses and food waste - Dietary change

Adapted from United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 107 (Table 4.1 Emissions control measures included in at least one of the mitigation analyses).

A. Energy production sector

The greatest potential for mitigating methane emissions from energy production is in the oil and gas sector, where the mitigation potential is 29–57 Mt CH₄/yr,²⁶⁷ representing 20–40% of the reductions needed to meet the Global Methane Pledge target in 2030 (Figure 6). Together with additional mitigation from coal, the fossil fuel sector represents slightly more than half of the emissions reductions to meet the Global Methane Pledge target. The IEA identified pathways for achieving 75% reductions from the energy production sector, as called for in the IEA’s Net Zero Emissions by 2050 (NZE) Scenario,²⁶⁸ with 40–50% of the measures having no net cost, based on average energy prices in 2023.²⁶⁹ If methane leaks from fossil fuel operations in 2021 had been captured and marketed, the additional 180 billion cubic meters (bcm) of gas would have been equivalent to all the gas used in Europe’s power sector and significantly eased price pressures.²⁷⁰ The IEA highlights in the *Global Methane Tracker 2024* that while methane emissions intensity of oil and gas production varies widely, high emissions intensities are not inevitable and can be addressed cost effectively

through a combination of best practice high operational standards, policy action, and technology deployment.²⁷¹ The IEA calculates that if all countries achieved the intensity of methane emissions (emissions per unit of production) similar to Norway's performance, methane emissions from oil and gas operations would fall by more than 90%.²⁷² The IEA has also reported that in the NZE Scenario, emissions fall by over 60 Mt (a 75% reduction) to 2030.²⁷³ One-third of this drop would occur because of reductions in oil and gas use to 2030 in the NZE Scenario, with the remaining two-thirds stemming from widespread efforts across all parts of the supply chain to reduce the emissions intensity of oil and gas operations (the methane emissions intensity of oil and gas production falls by more than 70% to 2030).²⁷⁴ By 2030, the IEA predicts that under this scenario, all oil and gas producers have an emissions intensity similar to the world's best operators today.²⁷⁵

Additionally, a report from the Global Climate and Health Alliance has found that implementing solutions to reduce methane emissions in the energy production sector would have significant co-benefits for human health, such as by avoiding respiratory and cardiovascular illness.²⁷⁶

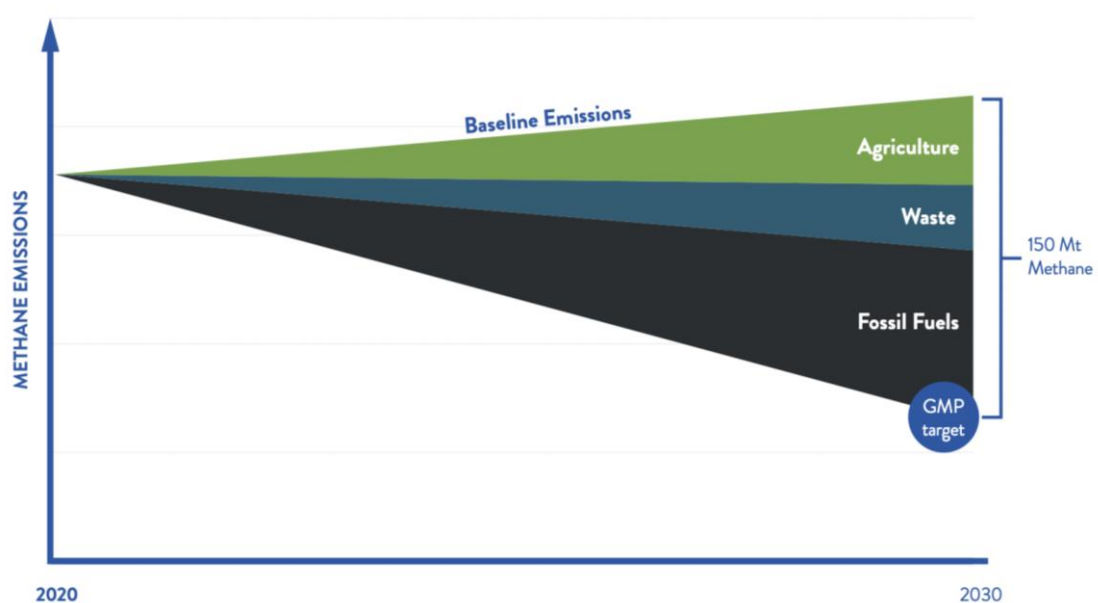
Measures to address leaks,²⁷⁷ and reduce flaring and venting,²⁷⁸ of methane are critical to lowering absolute methane emissions, and methane intensity, in the oil and gas sector.²⁷⁹ These actions include ramping up leak detection and repair programs (LDAR) and replacing leaking devices and older equipment with modern low-emitting equipment.²⁸⁰ Prohibiting venting of natural gas at oil wells can reduce emissions by 95%.²⁸¹ The World Bank Global Gas Flaring Reduction Partnership estimates that 144 bcm of gas was wastefully flared in 2021, an amount that, if captured, could power all of sub-Saharan Africa.²⁸² In 2020, the top 100 U.S. oil and gas producers contributed to 74% of reported methane emissions and 77% of reported GHG emissions, led by Hilcorp Energy, Exxon Mobil, Occidental Petroleum, and ConocoPhillips, according to an analysis by Ceres and the Clean Air Task Force.²⁸³ This analysis confirmed that equipment operations relating to flaring and venting is a major determinant of emissions intensity, with pneumatic controllers comprising 62% of reported methane emissions and gas flaring and venting comprising 58% of total reported GHG emissions in the Williston basin.²⁸⁴ The Oil and Gas Methane Partnership 2.0 Reporting Framework requires companies to report methane emissions from sources across the entire oil and gas value chain with a target to reduce emissions by 50–75% by 2030.²⁸⁵ At COP28, the World Bank re-launched the Global Gas Flaring Reduction Partnership as the Global Flaring and Methane Reduction Partnership and set as a requirement to access project development and financing support a commitment through the Oil and Gas Methane Partnership 2.0 framework to achieve near-zero absolute methane emissions by 2030 by reducing methane intensity to below 0.2%, and to achieve zero-routine flaring by 2030.²⁸⁶ These initiatives are discussed further in [Section 7](#).

Reducing fugitive emissions of methane and associated air pollutants also promotes environmental justice. For example, over 18 million people in the U.S. live within one mile of wells and they are disproportionately marginalized groups; unemployment near wells is also found to be 4 to 12 times higher than the national average.²⁸⁷ Efforts to plug and decommission the millions of abandoned and idle oil and gas wells would further reduce emissions while creating jobs and smoothing the energy transition.²⁸⁸

To reduce methane emissions from the oil and gas sector, it is critical to update and improve monitoring of methane emissions to identify hot spots and super-emitters. This is particularly important when considering that methane emissions from this sector are likely significantly higher than currently estimated, especially when estimates are based on inventory methods using

emissions factors.²⁸⁹ An airborne study of the Permian Basin in New Mexico estimated emissions 6.5 times larger than in an emissions factor-based inventory.²⁹⁰ New satellite data revealed a significant amount of leaking methane from Australia’s largest coal mines, raising concerns of a “large underreporting of methane emissions in the national inventory.”²⁹¹ Satellites have also observed over 1800 “ultra-emitters” from 2019–2020, primarily associated with the oil and gas production sector, with a total emissions contribution equivalent to 8 to 12% (about 8 million metric tons of methane per year) of global oil and gas production methane emissions.²⁹² Taking satellite observations and scaled emissions intensities into consideration, IEA estimates that emissions from the energy sector were 70% higher than officially reported.²⁹³ Researchers from the Rocky Mountain Institute (RMI), Stanford University, the University of Calgary, and Koomey Analytics developed the Oil and Climate Index Plus (OCI+) tool, which determined that the most climate-damaging oil and gas fields were in Russia’s Astrakhanskoye field, Turkmenistan’s South Caspian Basin, and the U.S. Permian Basin in Texas.²⁹⁴ One challenge to reconciling these estimates is identifying how to integrate “top-down” measurements with “bottom-up” approaches to estimating methane emissions to allow for a more accurate depiction of overall emissions.²⁹⁵ Under-reporting of methane emissions in NDCs from leading emitters can also lead to an underestimation of methane emissions, which in turn justifies greater monitoring efforts.²⁹⁶ Methane monitoring efforts are discussed further in [Section 8](#).

Figure 6. Mitigation pathways by sector consistent with the Global Methane Pledge target



Reproduced from United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2022) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: 2030 BASELINE REPORT*, 10 (Figure ES6: “Illustrative example of the GMP-consistent methane emissions reduction pathway to 2030. Mitigation in all three main anthropogenic sectors is required to achieve the GMP target in 2030 with slightly more than half of the mitigation expected to come from the fossil fuels sector.”).

In addition to reductions in the oil and gas sector, measures to cut emissions from coal mining can provide additional mitigation of 12–25 Mt CH₄/yr.²⁹⁷ Methane released due to mining activity can come from coalbed methane, a production method that taps coal seams and coal mine methane.²⁹⁸ Coalbed methane can be linked to leakage in gas supply chains, while coal mine methane is attributed

to coal production systems.²⁹⁹ The IEA estimates that eliminating the worst performing quartile of operating coal mines would remove about 25 Mt CH₄ by 2050.³⁰⁰ The primary methods for reducing coal emissions from active underground coal mines are oxidation of ventilation air methane and the recovery and use of methane through pre-mining degasification.³⁰¹ Although methane is recoverable before mining operations begin, the methane vented from mines is dilute and thus more expensive to use.³⁰² Additionally, because abandoned mines continue to leak methane, the CCAC recommends the flooding of abandoned coal mines to eliminate these emissions.³⁰³ In some situations, abandoned mine methane can be recovered and used before flooding occurs.³⁰⁴ In some limited instances, abandoned coal mine methane may be appropriate to use as a clean or alternative source of energy.³⁰⁵ Efforts to mitigate methane emissions from abandoned mines can ameliorate negative health and environmental impacts for the local community.³⁰⁶

The climate and economic benefits of reducing methane emissions from the energy production sector are significant. Transitioning to renewable energy and addressing methane from abandoned fossil fuel facilities³⁰⁷ are essential to reducing methane emissions in the coming decades.³⁰⁸

B. Agriculture sector

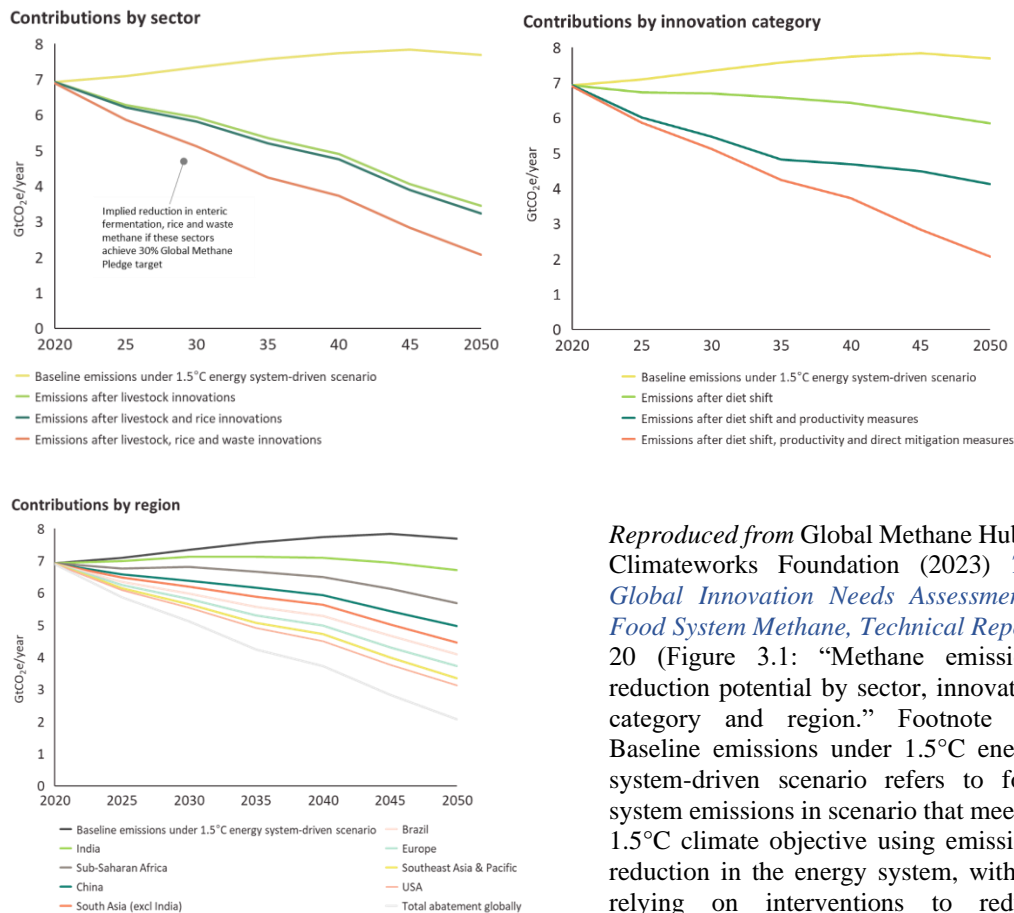
The agriculture sector can provide mitigation of 4–50 Mt CH₄/yr from the livestock subsector and 6–9 Mt CH₄/yr from rice cultivation,³⁰⁹ representing 7–39% of the reductions needed to meet the GMP target in 2030 (**Figure 6**).³¹⁰ Across the entire food system, from agricultural production to food's end-of-life stages and every step in between, methane emissions could be further reduced by up to 75% by 2050 (7).³¹¹ There is a considerable range in these projected mitigation percentages because the magnitude of methane mitigation from each subsector largely depends on a variety of factors—including farm type, variations among local and regional markets, and local and regional socio-economic considerations. The low end of the range assumes limited adoption of productivity, direct mitigation abatement measures and no shift in diets. Nonetheless, mitigation of methane in food systems is achievable, and aggressive strategies are needed as part of a comprehensive strategy to slow warming in the near term. Future projections show that food consumption emissions alone could add nearly 1 °C to warming by 2100, largely driven by high-methane foods (60% of the increase).³¹² It is especially important to consider vulnerabilities across the sector and regional differences in order to design and implement effective, equitable mitigation strategies. For example, smallholder farmers (who produce over one-third of food for global consumption)³¹³ commonly live under the poverty line and experience food insecurity.³¹⁴ This socio-economic precarity is in stark contrast to multinational farming operations.

While the food system is a major contributor to climate change (30% of global GHG emissions),³¹⁵ and a major methane emitter (60% of anthropogenic methane emissions when food waste is included),³¹⁶ it is also a sector that is vulnerable to the impacts of climate change. This vulnerability severely impacts food security. The 2023 United Nations Food and Agriculture Organization (FAO) annual report on food security indicates that global hunger levels are rising, exacerbated by climate change shocks and other factors.³¹⁷ At COP28, the FAO released part one of a series of publications outlining a roadmap to sustainably achieve an end to world hunger (Sustainable Development Goal 2), including a target of reducing methane emissions from livestock by 25% of 2020 levels by 2030.³¹⁸ Methane emissions can significantly harm food production, in particular. As an illustration of this harm, methane, as a precursor to ozone, can contribute to the annual loss of ~580 million tonnes of staple crops like rice and maize.³¹⁹

Furthermore, the entire food system will come under increasing stress in the next three decades, necessitating a system-wide transformation to meet the needs of future generations. Due to emissions impacts, expected population increases,³²⁰ food-demand increases of 30–62% by 2050,³²¹ and expansion of global trade to address rising protein demands,³²² the food system is not expected to adequately provide for the needs of future generations. Only by adopting aggressive mitigation strategies can we reduce the risk that emissions from food systems will cause an overshoot of the 1.5 °C guardrail by 2050.³²³ Key aggressive mitigation strategies include diet shifts; increases in productivity, efficiency, and food-systems resilience (such as improving soil health); direct mitigation (through feed and manure additives); and reductions in food loss and waste.³²⁴

We provide further detail below on measures to mitigate methane in livestock production, rice production, and outline prospects for agricultural methane mitigation in general.

Figure 7. Methane emissions reduction potential by sector, innovation category and region



Reproduced from Global Methane Hub & Climateworks Foundation (2023) [The Global Innovation Needs Assessments: Food System Methane, Technical Report](#), 20 (Figure 3.1: “Methane emissions reduction potential by sector, innovation category and region.” Footnote 28: Baseline emissions under 1.5°C energy system-driven scenario refers to food system emissions in scenario that meets a 1.5°C climate objective using emissions reduction in the energy system, without relying on interventions to reduce emissions in the food system.”).

i. Livestock operations constitute a majority of food system methane emissions

Meat and animal products generate a majority of the GHG emissions (>60%) from the food system.³²⁵ After 2030, consumption of meat and animal products will contribute more than half of food-consumption warming through the end of the century.³²⁶ This large contribution comes from enteric-fermentation and manure-management methane emissions, as well as the land-use impacts from raising livestock.³²⁷ Reducing methane emissions in the livestock sector can therefore mitigate the majority of food-system warming.


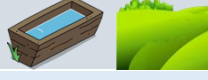








Mitigation measures in this sector are divided below into “productivity,” “direct mitigation,” and “behavioral” strategies. Productivity measures aim to generate more products per animal to lower methane emissions intensity; direct mitigation aims to inhibit methanogenesis (the process by which methane is generated) in the animal’s stomach or manure; and behavioral strategies change either the supply- or demand-side of animal product market and consumption. Further strategies are summarized in **Table 3**. To accurately evaluate the mitigation potential of each livestock sector strategy, it is necessary to consider the local context, as the solutions best suited to each farm may vary substantially,³²⁸ and to measure both the total methane abatement across the chain of production and any related environmental and emissions impacts.³²⁹ It is also critical to consider the potentially perverse economic incentives to expand and further industrialize the meat and dairy sectors.³³⁰

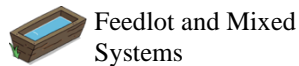
a. Productivity strategies for cattle to reduce methane-emissions intensity

Increasing animal productivity, so that the same amount of milk or meat is produced with fewer cattle, can be an effective strategy to reduce the methane emissions intensity (emissions per kg of milk or meat).³³¹ The overall effectiveness of productivity measures depends largely upon their implementation in the local context.³³² In addition to methane mitigation, improving animal productivity generally may support countries’ food security and other development goals.³³³

Key methods to increase animal productivity include improving feed digestibility, animal health and breeding, and grazing management.³³⁴ Improving feed digestibility by reducing lignin (an organic polymer cattle cannot digest) can increase cattle consumption of feed, resulting in greater production of milk and meat per animal unit, reducing methane emissions per animal.³³⁵ Maintaining high animal health standards, including by reducing heat stress,³³⁶ minimizes the need to replace diseased, low-producing animals³³⁷ and can directly reduce methane emissions by lowering methane emissions per product.³³⁸ Breeding improvement schemes, such as breeding selectively for genes that increase productivity and reduce methane emissions, are another effective strategy.³³⁹ Adopting new grazing strategies may improve feed digestibility, which in turn increases animal productivity. Some of these strategies may be more effective at reducing methane emissions when implemented at certain life stages of livestock, because the metabolic needs of meat and dairy production change over the animal’s life cycle.³⁴⁰ However, the climate and environmental impacts of novel grazing strategies are particularly dependent on local context. In some contexts, implementing these strategies can lead to unintended negative consequences, including land-use changes that defoliate native flora and exacerbate climate change.³⁴¹ In other contexts, the implementation of these strategies can lead to net-positive results, such as improving feed by decreasing total production costs.³⁴² When paired with livestock herd reduction, productivity increases may lead to reduced methane emissions intensity and an overall reduction of methane emissions.³⁴³

Table 3. Key emerging mitigation technologies for livestock methane, their applicability and key constraints across systems, relative emissions reduction, impact on animal performance, estimated global mitigation potential including constraints on adoption, and timing and confidence in commercial availability

Technology	Applicability	Key Constraint	Relative Emissions Reduction [†]	Impact on Animal Performance	Mitigation Potential in 2050 [‡]	Widespread Commercial Availability [§]
Rumen Modification						
CH ₄ inhibitors ^{a,b}	 *	cost, regulatory approval	30%	no/limited effect ^b	0.8	2025 (<i>high</i>)
		cost	20–30%		5–8	2030 (<i>medium</i>)
CH ₄ vaccine ^a		“sustained R&D, veterinary services, cost” ^b	30% (assumed) ^a	--	11–28	2050 (<i>medium</i>)
nitrate electron sink ^b		effect on enteric and manure N ₂ O emissions, potential negative animal health, cost	15 ^b –42% ^c	neutral effect: ^b decreased intake & increased milk yield	not assessed	--
seaweed ^a	 *	“global-scale production, cost, toxicology, regulatory and market acceptance” ^a	20–50%	unknown ^b	0.5–1	2030 (<i>insufficient to determine</i>)
					1–10	
Diet Formulation						
tanniferous forages ^b		effect on manure CH ₄ , decreased palatability and feed intake, and incomplete digestion ^c	10 ^a –32% ^c	no/limited effect ^b	not assessed	--
oil/oilseeds and fat inclusion ^b		effect on manure CH ₄ , cost, impaired feed digestibility, ^d effect on upstream emissions	14–15%	negative effect ^b (at high inclusion levels)	not assessed	--
decreasing dietary forage-to-concentrate ratio ^b		disease risk, risk of producing volatile fatty acids in the rumen, ^c feed over food competition	9% (intensity)	positive effect: ^b increased weight gain & milk yield	not assessed	--
Animal and Feed Management						
increasing feeding level ^b		effect on manure CH ₄	17% (intensity)	positive effect: ^b increased weight gain & digestibility	not assessed	--
decreasing grass maturity ^b		effect on manure N ₂ O	13% (intensity)	positive effect: ^b increased milk yield & digestibility	not assessed	--
low-emissions breeding ^b		breeding programme	15 ^a –31% ^c	limited positive effect ^b	2–9	sheep: 2030 (<i>high</i>) cattle: 2035 (<i>medium</i>)



Feedlot and Mixed Systems



Grassland Systems

* intensive grazing systems^a ‡ in Mt CH₄ yr⁻¹
† absolute unless noted § confidence level

Adapted from ^a Reisinger A., et al. (2021) *How necessary and feasible are reductions of methane emissions from livestock to support stringent temperature goals?*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210); ^b Arndt C., et al. (2022) *Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5 °C target by 2030 but not 2050*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 119(20); ^c Harmsen M., et al. (2023) *Uncertainty in non-CO₂ greenhouse gas mitigation contributes to ambiguity in global climate policy feasibility*, NAT. COMMUN. 14(2949); and

^d Palangi V., et al. (2022) *Strategies to Mitigate Enteric Methane Emissions in Ruminants: A Review*, SUSTAINABILITY 14(20). Relative emissions reductions are assessed as CH₄ per unit of feed dry matter intake, g kg⁻¹.

b. Direct mitigation measures, like feed and manure additives, can reduce absolute methane emissions

New feed and manure additives, and other new technologies, are being developed to improve livestock health and productivity, manage enteric fermentation, and directly reduce emissions from manure.³⁴⁴ The UK has also proposed the feeding of insect protein to animals to reduce overall GHG emissions from feed production.³⁴⁵ Several of these new technologies are described below. See also **Section 6** for more information on additives acting to prevent methane emissions.

Enteric fermentation accounts for the majority of methane emissions from the agricultural sector. **Table 3** presents the main types of technologies that are being explored to reduce enteric fermentation, including feed and vaccine interventions on the rumen, such as red algae (*Asparagopsis taxiformis*) and methane-inhibitor 3-nitrooxypropanol (3-NOP, marketed as Bovaer[®]), and other dietary interventions. These technologies show promise but multiyear studies are needed to observe sustained effects, including effects that are potentially negative to cattle and human health, efficiencies, and the additives' production streams.³⁴⁶ Meanwhile regulators have begun approving use of proprietary versions of these technologies in several geographies but face hurdles in others,³⁴⁷ and some additive-fed meat and dairy products are on the market.³⁴⁸ This is a rapidly developing area of research that received a \$200 million public-private coordinated investment as part of the Enteric Fermentation R&D Accelerator announced at COP28.³⁴⁹

Manure additives, such as biochar (black carbon produced from the heating of organic material),³⁵⁰ acids,³⁵¹ straw,³⁵² and SOP[®] Lagoon technology (based on calcium sulphate dihydrate, also known as gypsum)³⁵³ can also reduce methane and other pollutant emissions such as ammonia, while storing the manure for a longer period. Manure emissions can also be addressed via anaerobic digestion (*i.e.*, a technology that converts organic waste to methane biogas and nutrient-rich digestate that may be used for fertilizer application),³⁵⁴ and alternative management options (*i.e.*, separating sludge into solid and liquid components, and speedy removal of manure from barns).³⁵⁵ However, the implementation of anaerobic digestion technology or alternative management measures should be assessed based on the characteristics of individual farms.³⁵⁶ Any use of biogas technology must also be monitored to prevent leaks and to address climate and environmental justice concerns. This is critical as biogas production facilities extend fossil fuel infrastructure and potentially increase pollution and odor.³⁵⁷

c. Supply and demand-side behavior changes can further promote methane reductions in the food system

Behavioral changes in livestock producers and consumers can also mitigate methane emissions in the sector. These changes include producer decreases in herd sizes and consumer shifts of diets from traditional high-methane intensive animal proteins (*e.g.*, red meat and milk) to alternative proteins. Changing various farming practices can achieve significant methane mitigation if done at a sufficiently large scale. For example, incentivizing operators to use organic farming practices may result in fewer methane emissions compared to large, intensified operations (also known as “feedlots” or concentrated animal feeding operations).³⁵⁸

On the demand side, a shift to lower meat consumption, especially in countries and regions with higher than health-recommended meat consumption rates, would reduce methane emissions from livestock by decreasing herd size and associated land use emissions and avoid 0.19°C by the end of the century.³⁵⁹ Cultivating alternative proteins—plant-based, fermentation-derived, and cultivated meats—alleviates some of the greatest climate impacts of traditional animal agriculture (unsustainable land use, methane emissions, length of supply chain, etc.).³⁶⁰ For example, replacing half of traditional animal proteins with alternatives by 2050 could decrease agriculture and land use emissions (*i.e.*, methane, nitrous oxide, carbon dioxide) by 31%.³⁶¹ While studies continue to demonstrate the reduced GHG impact of alternative protein diets versus traditional animal-sourced diets,³⁶² regional differences in meat consumption and protein-deficiencies must be considered to ensure a more equitable and sustainable approach to diet shifts globally.

Alternative proteins could contribute to achieving large-scale dietary shifts away from animal-based proteins while meeting global protein demand.³⁶³ However, alternative proteins face several challenges on the way to scale to levels compatible with significant emissions avoidance.³⁶⁴ In many countries there is a considerable gap in price between alternative and traditional proteins, although the gap is narrowing.³⁶⁵ In addition to the challenge of meeting taste and price parity with animal-based proteins to achieve consumer acceptance, some cultivated and fermentation-derived alternative proteins face regulatory and research and development (R&D) hurdles.³⁶⁶ Achieving taste and price parity at scale for alternative proteins will require massive investment but could deliver large net climate, job, and economic benefits.³⁶⁷

Governments at the national and subnational levels, as well as non-profit and private-sector organizations, have introduced mechanisms to inform consumers and incentivize industry to minimize methane emissions from beef and dairy operations. For example, the U.S. Department of Agriculture certifies some products which implement methane reduction strategies as “climate-smart.”³⁶⁸ California has awarded several grants directed to climate-smart animal production projects specifically addressing methane.³⁶⁹ The private sector is creating mechanisms to reduce livestock methane emissions as part of a company’s “Scope 3” GHG emission reduction reporting. (Scope 3 includes indirect GHG emissions from parts of the corporate value chain that the company does not control).³⁷⁰ Large livestock operators, including Danone, have submitted targets to reduce methane emissions across all operations.³⁷¹ The U.S.-based think tank, the Institute of Agriculture and Trade Policy, has called for independent verification of these operations to ensure methane reductions are aligned with the Global Methane Pledge.³⁷² Use of GWP* to claim climate neutrality from large methane emitters is a misuse of this metric, which should only be used at the global level to relate sustained changes in methane emissions to additional warming beyond a reference level.³⁷³

ii. Rice production is the next highest methane-emitting activity in the food system

Rice production constitutes a smaller proportion of global methane-emitting activities from food production when compared with livestock production.³⁷⁴ However, there are several strategies to improve rice production and future resiliency, while mitigating rice cultivation emissions. For rice paddy fields, improved water management, alternate flooding and drainage of wetland rice, direct seeding, and improved yield gains can greatly reduce emissions and improve productivity.³⁷⁵ Although the key mitigation strategy is to reduce the time that fields are flooded,³⁷⁶ this strategy requires tracking of responsive increases in N₂O emissions—another powerful GHG.³⁷⁷ Experts

estimate that alternate wetting and drying of fields (as opposed to continuous flooding during the growing season) could reduce methane emissions by as much as 48%.³⁷⁸ Rice yield gains may be improved through crop breeding (to select for breeds that are more productive) and the application of biochar to crops,³⁷⁹ as well as mechanization of what is otherwise manual work.³⁸⁰ A 2021 study estimates that for every 1% increase in rice yield, methane emissions are reduced by 1%.³⁸¹ In addition to offering methane mitigation, selective breeding for rice can also offer adaptive benefits, such as increasing productivity in areas that will face worsened drought conditions in a changing climate.³⁸² Removal of rice straw may also reduce methane emissions.³⁸³

Certain strategies outlined above may be eligible to receive assistance through regulatory programs such as California's Air Resource Board Compliance Offset Protocol.³⁸⁴ Several international projects have been deployed to sustainably produce rice, including the United Nations Development Programme (UNDP)'s alternative wetting and drying projects in Ghana,³⁸⁵ and the World Bank's loan to Hunan province in China to pursue improved irrigation techniques and produce climate-resilient rice.³⁸⁶

iii. Future prospects for agricultural methane mitigation include new research, strengthening monitoring systems, and setting commitments and implementing policies aligned with the Global Methane Pledge

A wide range of research is assessing prospects for agricultural methane mitigation, including:

- adoption of indigenous practices;³⁸⁷
- use of regenerative agriculture (*e.g.*, silvopasture, agroecology,³⁸⁸ and solar grazing³⁸⁹);
- integration of rice and animals³⁹⁰ or animals and other crops;³⁹¹
- introducing certain additives and processes to manure lagoons;³⁹²
- application of dung beetles³⁹³ or worms (vermifiltration)³⁹⁴ to cattle dung;
- use of electricity to convert livestock waste into fertilizer with reduced methane emissions;³⁹⁵
- use of captured methane as fish food;³⁹⁶
- use of brewer's yeast to suppress enteric methane while promoting animal growth;³⁹⁷
- genetically modifying yeast to inhibit methanogenic activity in the rumen;³⁹⁸
- application of anti-methanogenic vaccines to cattle;³⁹⁹ *and*
- use of CRISPR, or gene-editing technology, to culture soil microbes in labs to better understand soil interactions that produce methane in rice paddy fields.⁴⁰⁰

Apart from measures derived from Indigenous practices, each of the above measures is still at an early stage of development and all are yet to be formally scientifically evaluated.

Improving monitoring systems across the agricultural sector is critical to measure and verify the impact of all mitigation measures (*see Section 8* on monitoring systems, including satellite and data integration). For example, methane emissions from cattle were observed for the first time in

California's San Joaquin Valley via GHGSat.⁴⁰¹ Machine-learning algorithms are also becoming faster at estimating GHG emissions, including N₂O (which has previously been difficult to quantify), from complex interactions in the soil.⁴⁰² Research is also finding systematic errors in current monitoring approaches for rice paddies, informing the implementation of new approaches that more accurately quantify and assess emissions from rice production.⁴⁰³ Further improvements in monitoring systems are continuing to identify emitters in the agricultural sector, which are small in number but great in the magnitude of methane emissions.⁴⁰⁴

To develop effective methane mitigation plans in the agriculture sector, local and regional contexts and potential increases in other GHGs must be considered. While more countries have been including food system GHG mitigation in their NDCs,⁴⁰⁵ more work needs to be done to include food system methane mitigation commitments. These commitments must be targeted, ambitious, and aligned with the Global Methane Pledge and Paris Agreement targets. In particular, these methane mitigation strategies must be designed to take account of both adaptation and mitigation needs at a regional and local level.⁴⁰⁶ In some cases, tackling mitigation of emissions in one part of the food system could result in increased emissions from another part of the food system,⁴⁰⁷ which could detract from overall climate goals.

C. Waste sector

The waste sector can provide mitigation of 29–36 Mt CH₄/yr,⁴⁰⁸ representing 19–24% of the reductions needed to meet the Global Methane Pledge target in 2030 (**Figure 6**). Solid waste mitigation makes up the bulk of the mitigation potential from the waste sector.⁴⁰⁹ Landfill operators can capture and convert to energy the methane emitted from existing landfills.⁴¹⁰ Collecting landfill gas requires costly equipment (*e.g.*, extraction wells and internal dumpsite piping)⁴¹¹ construction and operation, although there are financial benefits in producing a biogas product fit for energy use.⁴¹² McKinsey estimates that the maximum technical opportunity for inclusion of capture technology where applicable may lead to 4.50 Mt CH₄/year abatement by 2030.⁴¹³ As an alternative to combustion, which can contribute to air pollution, landfill gas can generate electricity using fuel cells.⁴¹⁴ In addition, improvements to landfill methane gas capture are emerging to optimize such capture while minimizing infrastructural needs and frequent human intervention.⁴¹⁵ Such technology should be assessed per landfill basis, as infrastructural needs may make landfill gas capture development more costly.

Discarded food and other organic waste releases methane as it decomposes in landfills under low-oxygen (anaerobic) conditions. The diversion of organic waste from landfills can significantly reduce methane emissions.⁴¹⁶ Programs to reduce food waste can decrease methane emissions from the food system, including both the waste and agriculture sectors.⁴¹⁷ Recent studies find that halving food loss and waste could result in the equivalent of quartering the total emissions from the global food system.⁴¹⁸ This can be done by promoting strategies to manage extreme heat exposure and increasing cooling access for small-scale farm managers to reduce food waste from earlier harvests caused by warmer weather,⁴¹⁹ and by turning food waste into chicken feed.⁴²⁰ Emissions from food loss and waste are expected to rise in the future, due to increased population and consumption of food, and increased international trade, which lengthens the food supply chain, but may be combatted with compost and anaerobic digestion.⁴²¹ Cutting food loss and waste in half, combined with improving crop and livestock productivity, will also help to improve global food security.⁴²² More broadly, improving solid waste management reduces methane emissions

and provides tremendous co-benefits for health including helping to close the nutritional gap between diet and optimal nutrient intake, especially for marginalized and vulnerable populations that reside close to waste treatment or disposal sites, or work in the waste sector.⁴²³

For organic waste already present in a landfill, biologically active covers or “biocovers,” composed of greenwaste/compost, limit methane emissions by stimulating microbial methane oxidation.⁴²⁴ Methane oxidation rates range depending on landfill type, location, and composition/thickness of biocover, but use of biocovers may yield impressive results—studies yielded over 60% improvements, and in some cases nearly 80% improvements,⁴²⁵ in methane oxidation.⁴²⁶ Biocovers may be used in inactive landfills as a control technology for remaining methane emissions following closure.⁴²⁷ Due to their relatively low cost (compared to landfill gas collection), simple technical applicability,⁴²⁸ and potential lifetime of 6–7 years with limited performance declines,⁴²⁹ biocovers may be a solution to reduce methane emissions in landfills operated in low-income countries with limited management.⁴³⁰ Biocovers have also proved to be successful in developed jurisdictions, such as in Denmark, with landfill gas capture technology employed simultaneously to optimize methane reductions.⁴³¹ Additional landfill biocover studies are underway, including at the University of California, Berkeley’s Center for Law, Energy, and the Environment.⁴³² Odor mitigation measures have also been found to correlate with reduced methane emissions.⁴³³ When combined with improved landfill management, these measures could reduce landfill emissions in the U.S. by 50% by 2030.⁴³⁴

Aerial remote sensing is a proven option for landfill methane monitoring that is more likely to accurately quantify emissions that are difficult to capture in traditional models.⁴³⁵ In particular, aerial remote sensing is more flexible with landfill infrastructure changes and can identify important trends in emissions that could lead to new mitigation strategies.⁴³⁶ Recent satellite data has found that landfill emissions in Buenos Aires, Delhi, Lahore, and Mumbai have been underestimated in common emissions inventory calculations.⁴³⁷ The Waste Methane Assessment Platform (WasteMAP) launched in November 2022 will provide an open-source platform with information and best practices for operators, policymakers, and financiers.⁴³⁸ Landfill methane emissions estimates and monitoring could also be improved by incorporating site-specific factors and cover-soil qualities into model estimates.⁴³⁹

For wastewater, McKinsey estimates that mitigation measures could reduce wastewater emissions by 27% by 2030 and 77% by 2050.⁴⁴⁰ Methods to achieve this emissions reduction include improving the treatment of wastewater through upgraded processes, infrastructure, and technology.⁴⁴¹

5. Natural sources of methane are responsible for about 40% of global emissions and research is underway on removing atmospheric methane and preventing methane formation

Natural sources of methane contribute approximately 40% (35–50%) of emissions and include wetlands and other freshwater systems, thawing permafrost, geological seeps, wild animals, forests, and oceanic sources including seabed methane hydrates.⁴⁴² While increasing anthropogenic emissions were likely the main cause of rising atmospheric concentrations over the past two decades,

increases in emissions from natural sources are likely a major contributor to the recent rapid growth in methane concentrations.⁴⁴³ As discussed in **Section 3**, the rate of growth of atmospheric methane concentrations surged in 2020 and 2021,⁴⁴⁴ with evidence of increasing emissions from natural sources of methane principally in warmer and wetter wetlands over the Northern Hemisphere, accounting for about half of the increase.⁴⁴⁵ AR6 WGI assesses that the methane release from a permafrost feedback could be as high as 4.1 billion tonnes through 2100 under current climate commitments.⁴⁴⁶ The higher estimate is consistent with consideration of abrupt thaw that could affect half of permafrost carbon with about 20% released as methane, noting that models considering only gradual permafrost thaw likely underestimate carbon emissions by 40%.⁴⁴⁷

Some of these natural sources of methane are expected to increase and act as self-propagating feedbacks to human-caused warming.⁴⁴⁸ While the permafrost methane feedback is well-established if poorly constrained,⁴⁴⁹ new feedbacks have been suggested to explain the recent acceleration in atmospheric methane concentration. This includes a combination of strengthened positive feedbacks due to interactions between surface temperature, wetland emissions and wildfires, as well as reduced methane removal through negative hydroxyl radical feedbacks.⁴⁵⁰ In addition, recent studies find that tropical wetland sources may explain more than 80% of the rapid increase in atmospheric methane concentrations over 2010–2019, potentially the result of a feedback between warming and strength in the Indian Ocean dipole and rainfall over East Africa.⁴⁵¹ However, AR6 WGI finds *low confidence* in multi-decadal trends in the Indian Ocean dipole due to limited data prior to the 1960s.⁴⁵²

Another concern is the risk that warming ocean waters will destabilize seabed methane hydrates. Such destabilization likely occurred off the coast of Guinea 125,000 years ago during the previous interglacial, with ice core records suggesting a sufficient amount of methane was released into the atmosphere to affect CO₂ and CH₄ concentrations.⁴⁵³ With a rapidly warming Arctic, the shallow seabed of the East Siberian Arctic Shelf poses significant concerns due to its potential to speed up other global warming impacts.⁴⁵⁴ Release of land-based methane hydrates as glaciers recede could further amplify the permafrost feedback.⁴⁵⁵

Research is underway on the best approach for removing methane directly from the free atmosphere.⁴⁵⁶ Such a strategy could prove vital as a means of addressing growing methane from natural sources and their self-amplifying feedbacks, as well as from hard-to-abate anthropogenic sources.⁴⁵⁷ On a molecular basis, methane is 220 times more dilute than CO₂ in the free atmosphere,⁴⁵⁸ but its high global warming potential and the relative simplicity of accelerating the natural degradation of methane to CO₂ without carbon storage make it an attractive target,⁴⁵⁹ with the potential to reduce warming much faster than CO₂ removal.⁴⁶⁰ Removing methane, as a precursor of tropospheric ozone, also benefits public health, agriculture, and natural ecosystems, in a way that CO₂ removal does not.⁴⁶¹ However, care would need to be taken to avoid unintended atmospheric chemistry effects.⁴⁶²

A Stanford University-led modeling study calculates that removing the equivalent of three years' worth of current anthropogenic methane emissions (and continuing to remove about 10% of current annual emissions) would reduce warming by 0.21 °C; further, removing one year's worth of methane emissions would reduce transient warming almost four times more than removing one year's worth of CO₂ emissions (0.07 °C for methane compared to 0.02 °C for CO₂).⁴⁶³

Potential approaches for removing methane are listed below:⁴⁶⁴

- **Atmospheric oxidation enhancement** includes approaches that would accelerate the natural conversion of methane to CO₂ by enhancing the oxidative capacity of the atmosphere. For example, iron salt aerosols have been proposed as a cost-effective mechanism for augmenting the natural chlorine sink to oxidize atmospheric methane.⁴⁶⁵ Additional early-stage proposals for this approach include hydrogen peroxide dispersal and photocatalytic aerosols.
- **Terrestrial methanotrophy enhancement** considers the potential to safely enhance ecosystem methane sinks. The approach includes soil management practices such as soil amendments and engineered methanotrophs.⁴⁶⁶ Experiments with filters containing methane-eating microbes have been used to process relatively concentrated methane, such as that found in coal mines and above landfills and manure lagoons.⁴⁶⁷
- **Methane reactors** pass air through catalytic systems using heat, sunlight, or radicals to break down methane. Photoreactors are being tested for low-concentration waste methane sources.⁴⁶⁸ A research group at MIT identified a clay material capable of oxidizing atmospheric levels of methane at relatively low temperatures.⁴⁶⁹ Gathering and flaring natural emissions or using more efficient thermal oxidation designs could also develop into viable strategies at higher methane concentrations near sources.⁴⁷⁰
- **Surface treatments** consider application of photocatalysts to surfaces, building on approaches that have been investigated to improve air quality.⁴⁷¹

Many strategies and technologies are being explored within each category, with most in early stages of research. It is important to distinguish between methane removal technologies that have the potential to remove methane from the atmosphere and have the potential to contribute to drawing down atmospheric methane concentrations from technologies applied to reducing emissions from methane sources. Reducing emissions from sources should be considered methane mitigation as opposed to atmospheric methane removal.

The U.S. National Academies of Sciences, Engineering and Medicine is in the process of writing a consensus report on Atmospheric Methane Removal: Development of a Research Agenda.⁴⁷²

6. Major-emitting countries are pursuing and must strengthen methane mitigation measures

National and subnational governments are increasingly developing and implementing methane mitigation policies and initiatives.⁴⁷³ However, these measures must be expanded and strengthened to achieve the 50% reduction in methane emissions by 2050 assumed in calculations of the remaining carbon budget for 1.5°C.⁴⁷⁴ A recent study has found that only 13% of methane emissions are covered by direct methane mitigation policies.⁴⁷⁵ Governments can strengthen methane mitigation policies by implementing readily available technologies, laws, and governance structures to their fullest and considering ways to expand methane mitigation through other available avenues. The IEA produced a Regulatory Roadmap and a Toolkit on Driving Down

Methane Leaks from the Oil and Gas Industry.⁴⁷⁶ The IEA policies database includes methane abatement policies from its member countries around the world.

Examples of specific methane mitigation measures in Australia, Brazil, Canada, China, the European Union, India, Iraq, Mexico, Nigeria, the United Kingdom, and the United States are described below. These countries' policies are included because of their status as major emitters and in most cases, noteworthy ambition in the context of methane mitigation. Also noteworthy is Colombia's finalization of regulations in February 2022, making it the first country in South America to regulate emissions from oil and gas.⁴⁷⁷ In light of border adjustment and methane-fee initiatives in the U.S., EU, and elsewhere, as described in this section, it is useful to note the 2023 XV BRICS Summit declaration (comprising Brazil, Russia, India, China, South Africa, Egypt, Ethiopia, Iran, and the United Arab Emirates) signaling that members of the BRICS organization oppose "trade barriers introduced under the pretext of tackling climate change."⁴⁷⁸

A. Australia

Australia contributes to approximately 1.6% of global methane emissions.⁴⁷⁹ These emissions primarily derive from agriculture (44%), energy (44%), and waste (8.7%).⁴⁸⁰ While these are the official figures, a report released in August 2023 found that Australia is vastly underestimating its emissions from the oil and gas sector.⁴⁸¹ Fugitive methane emissions from coal mining and oil and gas supply have likely been grossly underestimated to date—by about 80% for coal and 90% for oil and gas.⁴⁸²

Australia joined the Global Methane Pledge in October 2022.⁴⁸³ Australia also passed the Climate Change Act in 2022. This Act legislates Australia's targets to reduce greenhouse gas emissions by 43% on 2005 levels by 2030 and net zero greenhouse gas emissions by 2050.⁴⁸⁴ Australia does not have a higher or more specific domestic methane emission reduction target than the 30% reduction set out in the Global Methane Pledge.⁴⁸⁵ However, recent amendments to climate legislation passed in March 2023 place greenhouse gas emissions caps on major oil, gas, coal, and other polluting facilities and mandates that these facilities reduce their emissions by a minimum of 4.9% per year.⁴⁸⁶ The New South Wales State Parliament has also legislated a target to reduce greenhouse gas emissions by 70% by 2035.⁴⁸⁷

In energy, flaring and venting is predominantly regulated at the State and Territory level.⁴⁸⁸ In Queensland, venting is only allowed where flaring is not technically possible or for safety reasons.⁴⁸⁹ In Northern Territory, the code of practice for petroleum producers mandates that venting and flaring should be either eliminated or minimized to as low as reasonably practicably.⁴⁹⁰ However, in Western Australia, which is the primary source of Australia's domestic petroleum production,⁴⁹¹ emissions from venting and flaring need to be reported, but there is no further policy or regulation to mandate that these emissions be reduced and eliminated.⁴⁹²

In agriculture, Australia is funding the \$6 million Methane Emissions Reduction in Livestock (MERiL) Stage 1 program to support research and development of methane-reducing livestock feed technologies.⁴⁹³ The federal government is providing a further \$5 million to Stage 2 of MERiL, which consists of grants to develop and determine the feasibility of low emission delivery technologies.⁴⁹⁴ Further, the federal government is providing \$15 million to Stage 3 of MERiL, which allocates grants to undertake trials to validate the delivery technology and demonstrate its

emissions reduction and productivity impacts.⁴⁹⁵ The federal government is also providing \$8.1 million to support the commercialization of seaweed as a low emissions feed technology and lower barriers to market entry.⁴⁹⁶ An additional \$9.3 million is being directed to scale-up production of the red seaweed, *Asparagopsis*.⁴⁹⁷

In waste, the 2018 National Waste Policy pledged to reduce organic waste, including garden and food waste, by avoiding their generation and supporting diversion away from landfill into soils and other uses, supported by appropriate infrastructure.⁴⁹⁸ The government has set the goal to halve Australia's food waste, and halve the amount of organic waste sent to landfill by 2030.⁴⁹⁹

Policies that have been implemented to achieve this goal include:

- State and Territory governments expanded Garden Organic and Food Organics and Garden Organics curbside collection services to households and businesses in Australia.⁵⁰⁰
- Stop Food Waste Australia began working to deliver a voluntary commitment program called the Australian Food Pact. It will work with organizations across the food supply chain to develop tailored plans to help them achieve their food waste goals.⁵⁰¹
- The National Food Waste for Healthy Soils Fund was announced, to support recycling infrastructure that will create consistent, safe, and high-quality recycled organic products for use in soil.⁵⁰²
- New South Wales ran a pilot *Scrap Together* campaign, drawing on results of bin audits and social research, to improve the rate of food waste recycling in three council areas. The pilot campaign increased food waste recycling by an average of 10% and the campaign has since been expanded to other council areas.⁵⁰³
- South Australia released a State Food Waste Strategy 2020–2025 to reduce and divert household and business food waste, outlining 38 actions including policy measures, behavioral change actions and continued support for industry across three program areas to capture material and return to productive use.⁵⁰⁴
- South Australian implemented a Kerbside Performance Plus Food Organics Incentives Program, which provided financial support for local government to roll out area-wide high performing food waste diversion systems.⁵⁰⁵

B. Brazil

Brazil is the fifth largest methane emitter in the world,⁵⁰⁶ owing to its cattle industry, which accounts for 14% of the global bovine herd.⁵⁰⁷ Brazil's total methane emissions amounted to approximately 400 Mt CO₂e in 2020, with ~285 Mt CO₂e coming from the livestock sector alone.⁵⁰⁸

Brazil is a signatory to the GMP. To fulfill its obligations in the GMP and the UNFCCC, Brazil enacted a decree in 2022 that created the Federal Strategy to Incentivize the Sustainable Use of Biogas and Biomethane.⁵⁰⁹ The decree establishes guidelines to encourage the development of carbon markets, the use of biomethane as a renewable energy and fuel source, and investment in scientific-technological research.⁵¹⁰ Further, it provided a non-exhaustive list of urban and rural waste that may be used to produce biogas and biomethane, including waste disposed in landfills.⁵¹¹

The Federal Strategy, which includes the Methane Zero Program, will introduce methane credits into existing market mechanisms.⁵¹² Methane credits representing tons of methane not emitted will generate additional income for biogas and biomethane projects. Prior to the Methane Zero Program, Brazil encouraged development of biofuels through RenovaBio, a regulated market for decarbonization credits that require fossil fuel distribution companies to meet their targets by investing in biofuel enterprises.⁵¹³

In 2019, the U.S. and Brazil launched the U.S.-Brazil Energy Forum as a mechanism for cooperation in carbon and methane management, civil nuclear power, renewable energy, energy efficiency, and grid modernization. In its second ministerial meeting in 2022, the two governments agreed to “exchange expertise in carbon and methane management, and carbon sequestration and storage.”⁵¹⁴ More recently, in August 2022, the U.S. and Brazil also launched the Clean Energy Industry Dialogue to collaborate on renewable energy and sustainable fuels, including offshore wind energy and clean hydrogen.⁵¹⁵

At COP28, Brazil announced that its National Council of Energy Policy will establish guidelines on methane reduction in the oil and gas sector by the end of 2024, and that the National Agency for Petroleum, Natural Gas, and Biofuels aims to finalize regulations by the end of 2025 based on these guidelines.⁵¹⁶

C. Canada

Canada committed to reduce emissions by 40–45% below 2005 levels by 2030, including a 40–45% reduction in methane emissions from the oil and gas sector, and reach net-zero emissions by 2050.⁵¹⁷ As part of its participation in the GMP, Canada aims to reduce oil and gas methane emissions by 75%.⁵¹⁸ Current Canadian regulations, issued in 2018, cover new and existing upstream oil and gas facilities, and include enhanced leak detection and repair requirements, and when fully implemented, quantitative limits on natural gas venting.⁵¹⁹ In November 2022, the Canadian government proposed a regulatory framework to reduce oil and gas emissions in line with the 2030 target.⁵²⁰ The proposed regulation will require methane destruction to operate at a control efficiency of 99% or higher,⁵²¹ prohibit flaring at all oil sites,⁵²² and require all facilities to have a fugitive emission management plan with monthly inspections.⁵²³ In advance of COP28, the federal government indicated that it would announce new methane regulations and funding.⁵²⁴ These regulations are intended to ensure a reduction of methane emissions in the upstream oil and gas sector by at least 75% below 2012 levels by 2030.⁵²⁵ This would be achieved by expanding the scope of the current regulations, introducing a focus on maximizing emission reductions, removing some exclusions, and ensuring all practical actions to lower emissions that are considered both achievable and cost effective are in place by 2030.⁵²⁶

Canada governs its oil and gas methane emissions primarily through provincial-level regulations that supplant the national regulation in accord with equivalency agreements. The Canadian federal government has equivalency agreements in place with the provinces of Alberta, British Columbia, and Saskatchewan,⁵²⁷ which together produce about 99.8% of Canada’s gas, and more than 92% of its oil.⁵²⁸ Most gas comes from Alberta, which produces nearly twice as much as British Columbia, and more than 25 times as much as third-place Saskatchewan.⁵²⁹

Alberta has set a goal for 45% reduction in methane emissions by 2025 across all sectors, and an additional goal of reducing methane emissions from conventional oil and gas by 75–80% by 2030.⁵³⁰ Alberta is reported to be on track to surpass the 2025 target.⁵³¹ In order to reach its target, Alberta has established a Methane Working Group comprised of academic and industry experts, as well as members of indigenous communities to assess the effectiveness of methane policies.⁵³² Additionally, Alberta has developed the Alberta Methane Emissions Program to support methane emission reductions in the oil and gas industries.⁵³³ This program is funded by Alberta's Technology Innovation and Emissions Reduction Fund.⁵³⁴ The Alberta Methane Emissions Program is a three-year \$17 million initiative to promote technology and data sharing for the purpose of developing methane-efficient technology for the oil and gas sector.⁵³⁵ With continued reliance on the Methane Working Groups' assessments and the MTIP's support, Alberta hopes to achieve its 2030 target, though studies show that current estimates of methane emissions in Alberta differ from independent estimates.⁵³⁶

Saskatchewan has implemented its own Methane Action Plan in 2019 with the target of 40% methane emission reductions by 2025.⁵³⁷ Currently, Saskatchewan reports that it has surpassed these targets with emission reductions of 60%.⁵³⁸ Despite the national pledge and target, studies have suggested that oil and gas emissions in Alberta and Saskatchewan are 60% higher than reported in Canada's national inventory, due to inconsistencies found in short-scale testing used by the national inventory.⁵³⁹

For landfills, Canada has committed to increasing the number of landfills that collect and effectively capture methane, as well as to pilot improved monitoring systems in these landfills.⁵⁴⁰ The federal government in Canada works with provincial and local governments to bring awareness to food waste and disposal options with the goal of reducing the amount of organic waste that is landfilled.⁵⁴¹ In turn, local and provincial governments developed goals,⁵⁴² plans,⁵⁴³ and tax incentives⁵⁴⁴ to reduce food waste.

Furthermore, the federal government implements programs to incentivize climate-smart agriculture and reductions in agricultural GHG emissions. Canada's Agricultural Climate Solutions program invests in natural climate solutions, such as increasing carbon storage on farms.⁵⁴⁵ The Agricultural Clean Technology Program supports methane reductions in the agricultural sector by investing in green energy and technologies that use manure and other waste for energy.⁵⁴⁶ In December 2023, Canada announced its Reducing Enteric Methane Emissions from Beef Cattle (REME) protocol which will offer offset credits at beef cattle operations for actions which either directly decrease methane, or the methane intensity of the national herd, such as animal diet improvements, animal management improvements, and reduction of waste.⁵⁴⁷ Canada has also recently announced market authorization for Bovaer, a methane reducing feed ingredient for cattle.⁵⁴⁸

In February 2021, Canada and the U.S. declared a “shared commitment to reducing oil and gas methane emissions to protect public health and the environment, as guided by the best science.”⁵⁴⁹ Additionally, Canada is a Party to the LRTAP Convention, which is examining the impacts of methane on ozone formation, as explained further in [Section 10](#).⁵⁵⁰

D. China

During the September 2020 UN General Assembly, China announced its target of achieving carbon neutrality before 2060.⁵⁵¹ This longer-term goal covers all GHGs, including methane. For the near term, China's Outline of the 14th Five-Year Plan (2021–2025) for National Economic and Social Development and the Long-Range Objectives Through the Year 2035 provides that China will “strengthen the control of other GHGs such as methane, HFCs, and perfluorocarbons (PFCs).”⁵⁵² The prominent mention of methane in this Plan provides China's national ministries and agencies with authority to include detailed requirements for methane in their 14th Five-Year implementation plans covering the period 2021–2025. Additionally, China has made the commitment to include actions/targets to address economy-wide emissions of all GHGs in its 2035 Nationally Determined Contributions (NDCs) in the *Sunnylands Statement*.⁵⁵³ In this regard, recall also that the U.S. and China mentioned that “[b]oth countries intend to communicate 2035 NDCs in 2025” in the *U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s* (“*Joint Glasgow Declaration*”).⁵⁵⁴

More specifically on methane, China released the Methane Emissions Control Action Plan in November 2023.⁵⁵⁵ This Action Plan highlights as key priorities the improvement of the monitoring, reporting, and verification (MRV) system for methane emissions, as well as methane emissions control actions in the energy, agriculture, and waste sectors. It is also noteworthy that the Action Plan aims to strengthen the synergistic control of methane and other pollutants, such as volatile organic compounds. As an incentive mechanism, the Action Plan also promotes the inclusion of methane mitigation and reutilization projects in the greenhouse gas voluntary emission trading system.⁵⁵⁶

China's annual utilization of coal mine gas will reach 6 billion cubic meters by 2025.⁵⁵⁷ This indicates a decrease from the coal-mine gas utilization goal by 2020. China's targets for the 13th Five-Year period include: “by 2020, the coalbed methane (coal-mine gas) extraction volume shall reach 24 bcm, within which the production of on-ground coalbed methane shall reach 10 bcm with a utilization rate of over 90%; and the extraction of coal-mine gas shall reach 14 bcm with a utilization rate of over 50%.”⁵⁵⁸ At a State Council press conference on 27 April 2021, the Ministry of Ecology and Environment announced a plan to revise emission standards for coalbed methane and coal mine gas.⁵⁵⁹ The Chinese government has also been providing special funding to support coalbed methane extraction and utilization projects during 2023–2025.⁵⁶⁰ At the provincial level, Shanxi Province announced that it had extracted 7.16 billion cubic meters of coalbed methane in the first eight months of 2023, a record high for the January–August period.⁵⁶¹

Importantly, China's methane emissions reduction success or failure is closely linked to its ability to transition away from fossil fuels, including coal. For example, China has announced that it will strictly control coal consumption during 2021–2025 and gradually reduce coal consumption during 2026–2030.⁵⁶² Key regional targets include reducing the coal consumption in Beijing, Tianjin, Hebei, and surrounding areas by about 10%, reducing the coal consumption in the Yangtze River Delta region by about 5%, and achieving negative growth in coal consumption in the Fenwei Plain region by 2025.⁵⁶³ In China's updated NDCs, China incorporated its goal of increasing the share of non-fossil fuels in primary energy consumption to around 25% by 2030 and noted that funds have already been expended on a major project, “Development of Large Oil and Gas Fields and Coal-Bed Methane.”⁵⁶⁴ In its Mid-Century, Long-Term Low Greenhouse Gas Emission

Development Strategy, China included its target of further increasing the percentage of non-fossil fuels to over 80% by 2060.⁵⁶⁵

For the oil and gas sector, China sets targets to reach the plateau stage for oil/petroleum consumption during 2026–2030,⁵⁶⁶ and aims to peak land-transportation petroleum consumption by 2030.⁵⁶⁷ Additionally, China aims to have the collection rate of associated gas from oilfields be on par with international advanced standards by 2030.⁵⁶⁸ China's updated NDCs incorporate actions to reduce methane emissions in this sector, including through deployment of technologies for the recovery of associated gas.⁵⁶⁹ The China Oil and Gas Methane Alliance, an association of seven Chinese companies, has pledged to reduce the companies' average methane emissions intensity in natural gas production to below 0.25% by 2025, and cooperate and share technical experience on methane-emissions control, including LDAR and gas-recovery systems.⁵⁷⁰ However, China has not yet applied mandatory methane intensity requirements to fossil oil and gas production and import. Additionally, China's efforts to promote green and clean transportation are also expected to reduce petroleum consumption and contribute to methane emissions mitigation. Examples of key targets in the transportation sector are to increase new-energy and clean-energy powered transportation to about 40% of total new transportation per year in 2030 and to achieve a deployment rate of no less than 70% for green transportation in cities with populations of one million or more by 2030.⁵⁷¹

For the agriculture sector, China set targets for achieving “comprehensive reutilization” of over 80% of livestock and poultry manure nationwide by 2025.⁵⁷² China's Methane Emissions Control Action Plan further raises the goal to over 85% by 2030.⁵⁷³ Furthermore, China will increase the efficiency of chemical fertilizers and pesticides to 43% by 2025,⁵⁷⁴ which may also have implications for methane emissions reduction. To help address GHG emissions from cropland, China also aims to achieve zero growth in the use of chemical fertilizers and pesticides for major crops and achieve comprehensive utilization of 85% of crop straw by 2020.⁵⁷⁵ China lays out key action items for emissions reduction and carbon sequestration in the agriculture sector as part of China's efforts to peak carbon emissions by 2030 and achieve carbon neutrality by 2060. These key actions include, among others, reducing methane emissions from rice farming and livestock manure management, promoting the replacement of fossil fuel with biogas, and improving methane emissions monitoring from agricultural sources.⁵⁷⁶ Importantly, China is also looking into low-carbon compensation mechanisms to incentivize methane mitigation action in the agricultural sector.⁵⁷⁷ Additionally, the CCAC is working together with China to, among other things, research and develop effective methane mitigation strategies “such as carefully controlling the water, fertilizer, antibiotics, and type of feed, which can not only reduce emissions but can also increase agricultural production.”⁵⁷⁸

For the waste sector, China set targets including reaching, by 2025, 90% harmless disposal of urban sludge,⁵⁷⁹ 25% sewage resource utilization in water-scarce cities at the prefectural level and above,⁵⁸⁰ 40% domestic sewage treatment in rural areas,⁵⁸¹ and more than 95% of county sewage treatment.⁵⁸² Furthermore, by 2030, the national average utilization rate of urban recycled water will be increased to 30%.⁵⁸³ For selected regions, China is requiring that, by 2025, the utilization rate of recycled water shall reach over 35% in the Beijing, Tianjin and Hebei regions, and strive to reach a utilization rate of 30% in water-scarce cities at the prefecture level and above in the middle and lower reaches of the Yellow River basin.⁵⁸⁴ Additionally, China committed to increase

the reutilization of urban household waste to around 60% by 2025 and 65% by 2030.⁵⁸⁵ By the end of 2025, China plans to reach a domestic waste incineration treatment capacity in cities and townships of about 800,000 tonnes per day; about 65% of this incineration treatment capacity is for treatment of domestic waste in cities.⁵⁸⁶ China is also promoting the recycling and reuse of industrial solid waste with the goal of increasing the comprehensive reutilization rate of bulk industrial solid waste to 57% by 2025.⁵⁸⁷ At the subnational level, China announced a plan to build 100 zero-waste cities by 2025.⁵⁸⁸ The construction of zero-waste cities will contribute to methane emissions reduction through planned improvements in solid waste disposal in industrial sources, reduction of household waste landfills, management and reuse of livestock waste, and control of chemical fertilizer and pesticide application.⁵⁸⁹

China's Methane Emissions Control Action Plan also prioritizes the improvement of the MRV system in the current 14th Five-Year period (2021–2025) and the upcoming 15th Five-Year period (2026–2030).⁵⁹⁰ This Action Plan lays out the plan for establishing a sky-earth methane monitoring system, including ground-based monitoring, unmanned aerial vehicles, and satellite remote sensing. To support the development and implementation of national methane mitigation policies and targets, China has announced the plan to strengthen satellite remote sensing technology development and deployment for GHG emission data monitoring,⁵⁹¹ and launched a number of emissions monitoring pilots involving enterprises, municipalities, and regions.⁵⁹² Particularly, these include pilot projects in the coal mining, oil and gas production, and waste sectors focused on methane emissions monitoring. During its January 2023 press conference, China's Ministry of Ecology and Environment (MEE) noted that the oil and gas industry pilots have established a methane leakage detection mechanism that involves an integrated "satellite + unmanned aerial vehicle + cruise" monitoring system for tracking methane leakage in production processes. For the coal mining industry pilots, MEE observed that a collaborative methane emissions monitoring technology has been developed using existing coal mine safety monitoring systems. MEE also commented that it has established a preliminary understanding of the concentrations and the spatial and temporal distributions of global methane emissions through analysis of satellite remote sensing data.⁵⁹³ The China Council for International Cooperation on Environment and Development also commissioned IGSD to provide methane metrics and measurement research for MEE and other Chinese government authority and expert consideration.⁵⁹⁴

In addition to the national methane-emission reduction policies and targets described above, China has taken several steps to mitigate the climate and other environmental impacts of its overseas investments. These include the commitment to stop building new coal-fired power plants⁵⁹⁵ and the issuance of government guidelines recommending that Chinese enterprises comply with prevailing international standards or China's own standards if the country receiving the Chinese investment: 1) lacks environmental standards applicable to the investment and project in question; or 2) has in place environmental standards for the investment or project in question that are lower than prevailing international standards or those applied to such investments and projects in China.⁵⁹⁶

E. European Union

The European Union (EU) addresses methane in its existing policies and is working to strengthen them. The European Climate Law includes a binding target for Europe to become climate-neutral by 2050 with an interim target to reduce all greenhouse gas emissions by 55% by 2030, compared to 1990 levels.⁵⁹⁷ The European Commission presented a methane strategy in October 2020 and

noted that the 55% target would require that the European Union reduce methane emissions by 35–37% by 2030.⁵⁹⁸ Additionally, the methane strategy prioritizes ensuring more accurate measurement and reporting of private-sector emissions.⁵⁹⁹

In July 2021, the European Commission adopted a set of proposals, known as the “Fit for 55” package, that would achieve the 55% GHG reduction target by 2030.⁶⁰⁰ The Fit for 55 package would enhance ambition for sectors not covered by the Emissions Trading System, including waste management, buildings, and agriculture, by increasing the overall emissions-reduction target from 30% to 40%.⁶⁰¹ The package also would amend the EU Land Use, Land-Use Change and Forestry regulation to include non-CO₂ emissions, including methane, by 2031.⁶⁰² More than half of the European Union’s domestic methane emissions occur in the agriculture sector,⁶⁰³ with most methane emissions from energy use occurring abroad.⁶⁰⁴ Some analysts have concluded that the European Union will not achieve large reductions in domestic methane emissions without “policies that drive the uptake of behavioral and technical measures in the livestock agriculture sector.”⁶⁰⁵

In December 2021, the Commission proposed regulations and a directive⁶⁰⁶ based on a proposed 2050 energy mix in which biogas, biomethane, renewable and low-carbon hydrogen (*see Box 5*), and synthetic methane would represent two-thirds of gaseous fuels, with the remainder from fossil gas accompanied with carbon capture and storage (a reduction from the 95% share of fossil gas in 2021). The directive proposes to limit long-term natural gas contracts from running beyond 2049.⁶⁰⁷

The Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942 for the fossil fuel sector would require operators to report on source-level methane emissions, including a phase-in of direct measurements and site-level measurements of non-operated assets.⁶⁰⁸ The regulations would also require operators to institute LDAR programs, and ban routine venting and flaring.⁶⁰⁹ Regulatory inspections and information from relevant internationally available sources would verify compliance with these regulations.⁶¹⁰

Furthermore, the proposed regulations would require that Member States publicly inventory inactive oil and gas wells. They would also require that either Member States or other responsible parties monitor methane emissions and develop mitigation plans for remediation, reclamation, and permanent plugging.⁶¹¹ The regulations would similarly compel Member States to publicly inventory closed and abandoned coal mines, and require that Member States with jurisdiction over abandoned mines and operators of closed mines monitor and report methane concentrations at those closed or abandoned within the previous 50 years.⁶¹²

The proposed regulations also specify that underground coal mines and drainage stations perform continuous emission measurements, whereas surface mines would be required to employ deposit-specific emission factors to quantify emissions.⁶¹³ Underground and surface mines estimate post-mining emissions based on relevant factors and report all emissions to regulators.⁶¹⁴ Underground mines would be prohibited from routine venting and flaring with a destruction efficiency below 98%, except during exigent situations, and required to report flare events.⁶¹⁵ A report from Ember has identified that new amendments that increased the venting thresholds for thermal coal, and delayed action on coking coal will only cut methane emissions from coal mines by around 47%, well below the stated climate goal of a 58% reduction.⁶¹⁶

The proposed regulations do not include specific, binding target reductions.⁶¹⁷ The EU instead reiterated a call for transparency and referred the matter to the Agency for the Cooperation of Energy Regulators and Committee of European Securities Regulators.⁶¹⁸ The proposed regulations would require EU importers to report additional information on exporters' and producers' methane mitigation efforts, and establish a Methane Transparency Database and global methane monitoring tool.⁶¹⁹ Additionally, the proposed regulation would empower the Commission to pursue appropriate legislative amendments to extend reporting requirements to third countries, following a report on the impact of the extension on the energy supply chain and the production of imported fossil fuels.⁶²⁰ The regulations will also ensure that equivalent monitoring, reporting, and verification measures should be applied by exporters to the EU by 1 January 2027, and maximum methane intensity values by 2030.⁶²¹ Importers will face financial penalties if they buy from foreign suppliers that don't comply with the limit—effectively imposing a fee on non-compliant fuels.⁶²²

In 2023, the European Parliament adopted a series of amendments to the Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942. Key amendments include heightened leak and detection requirements,⁶²³ an expansion of monitoring requirements to the petrochemical sector,⁶²⁴ and requiring that from 2026, importers of coal, oil, and gas demonstrate that exporters of coal, oil, and gas into the EU comply with the regulatory requirements for the measurement, monitoring, reporting and verification, leak detection and repair, and venting and flaring.⁶²⁵

In November 2023, the Council of Europe reached a provisional agreement with the European Parliament on the final version of these regulations, paving the way for their enactment and implementation.⁶²⁶ The European Parliament formally adopted the regulations on 10 April 2024, followed by the Council of Europe on 27-28 May 2024.⁶²⁷ As part of implementation of the regulations, equivalent monitoring, reporting and verification measures should be applied by exporters to the EU by 1 January 2027, and maximum methane intensity values by 2030.⁶²⁸

The EU has also made broader efforts to regulate methane emissions from landfills. The EU Landfill Directive requires Member States to separate biodegradable waste and establishes a target to landfill only 10% of municipal solid waste by 2035.⁶²⁹ Requirements to divert organic waste helped to achieve a 47% drop in EU landfill emissions between 1990 and 2017.⁶³⁰

The 2023 launch of the EU's revised Common Agriculture Policy (CAP) increases emphasis on climate actions within the agriculture sector and dedicate 40% of funding to climate-related measures.⁶³¹ The specific goals within the CAP, as reflected in CAP Strategic Plans, include increasing targets to reduce food waste, and a focus on methane reducing ruminants.⁶³²

The newly adopted Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), designed to prevent outsourcing of carbon-intensive industries and incentivize sustainable practices abroad,⁶³³ does not address imported methane. However, some have called for methane to be addressed in future measures.⁶³⁴ CBAM entered into effect on a transitional basis in October 2023, only applying during this transitional phase to imports of cement, iron and steel, aluminum, fertilizers, electricity and hydrogen.⁶³⁵ CBAM and similar measures like the proposed U.S. carbon border adjustment charge discussed above are opposed by many developing countries.⁶³⁶ CBAM may evolve in time to allow for broader EU-U.S. alignment on a global methane border adjustment mechanism.⁶³⁷

Prior to the February 2022 Russian invasion of Ukraine, the European Union imported more than 40% of its total gas consumption from Russia.⁶³⁸ In 2019, the European Union imported nearly 90% of its natural gas, mostly from Russia.⁶³⁹ A July 2022 regulation controversially allowed the certification, under limited circumstances, of some natural gas under the EU sustainable investment taxonomy.⁶⁴⁰ The European Union has responded to this changing geopolitical situation by announcing the acceleration of its transition from fossil energy.⁶⁴¹ On 23 March 2022, the European Commission tabled a legislative proposal to increase its gas storage levels to 80% by November 2022.⁶⁴² Further, it issued a communication stating its plans to form a Task Force on Common Gas Purchases that will “prepare the ground for energy partnerships with key suppliers of LNG, gas, and hydrogen in the Mediterranean, Africa, the Middle East, and the U.S.”⁶⁴³ On 25 March 2022, the White House and European Commission on European Energy Security announced that they would ensure expeditious regulatory procedures for LNG infrastructure, but also emphasized their efforts to reduce the emissions intensity of such infrastructure.⁶⁴⁴ Notably, on 8 May 2022, the G7 committed “to phase out our dependency on Russian, energy, including phasing out or banning the import of Russian oil,” but did not specifically mention gas.⁶⁴⁵

Additionally, the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) is studying methane’s role as a precursor for ozone formation in the UNECE region as part of its work under LRTAP.⁶⁴⁶ The UNECE includes all of Europe, as well as countries in North America, Central Asia, and Western Asia. For more information, *see* [Section 10](#).

The Joint Communication on EU External Energy Engagement, which was published on 18 May 2022, outlines the region’s current efforts and plans to diversify its energy supply. This includes partnerships to increase imports of liquefied natural gas from other countries, like Egypt, Israel, Japan, and Korea,⁶⁴⁷ and a commitment to “ensure that gas supplies from existing and new gas suppliers are coupled with targeted actions to tackle methane leaks and to address venting and flaring.”⁶⁴⁸ The European Union has since signed memoranda of understanding on energy cooperation with Israel, Egypt, and Azerbaijan, aimed “enabling a stable delivery of natural gas to the EU that is consistent with long-term decarbonization objectives and is based on the principle of market-oriented pricing.”⁶⁴⁹ The European Union does not yet specify any intent to promulgate regulations to control methane emissions from energy imports, but will increase support to develop a global hydrogen market, beginning with partnerships with “reliable partner countries to ensure open and undistorted trade and investment relations for renewable and low carbon fuels.”⁶⁵⁰ Further, it will prioritize energy savings and energy efficiency to achieve its target of 5% reduction in short-term demand for oil and gas.⁶⁵¹ The European Union has also committed to a Memorandum of Understanding alongside Egypt and Israel, in which it pledged to promote the reduction of methane leakages, and in particular examine new technologies for reducing venting and flaring and explore possibilities for the utilization of captured methane throughout the entire supply chain.⁶⁵²

In a Joint Statement released by the EU and U.S. in April 2023 following a meeting of the EU-U.S. Energy Council, the Council confirmed their intention to continue advancing the reduction of global methane emissions.⁶⁵³ The Council stated that they intend to promote domestic and international measures for reinforced monitoring, reporting, and verification, as well as transparency, for methane emissions data in the fossil energy sector, such as through the Oil and Gas Methane Partnership 2.0 (OGMP 2.0) standard (*see* [Section 7](#)) and the development of a common tool for life cycle analysis (LCA) of methane emissions for hydrocarbon suppliers and purchasers.⁶⁵⁴

Box 5. Risks and limited climate benefits from switch to hydrogen

Hydrogen is being proposed as a clean energy alternative, especially for hard-to-decarbonize sectors like heavy industry, shipping, and aviation. The climate benefits of hydrogen as a replacement for fossil fuels depends on several factors: 1) the source of the energy used to generate the hydrogen and its emissions and extent of carbon capture in the case of “blue hydrogen” (natural gas with carbon capture); 2) leakage rate of methane if used as the source of hydrogen or energy source, with even low methane leakage rates of about 1% resulting in higher GHG emissions than burning natural gas for power;⁶⁵⁵ and 3) the leakage rate of the hydrogen itself, which can contribute to warming by extending the lifetime of methane and other GHGs, significantly reducing the climate benefits of even “green hydrogen” (renewable-based electrolysis).⁶⁵⁶ Similar concerns apply to net climate benefits of proposed “green e-methane” (synthetic methane produced from “green hydrogen” and captured CO₂).⁶⁵⁷ Preliminary estimates suggest that a 10% leakage rate of hydrogen under a high deployment scenario could cause at least 0.1 °C of warming, potentially offsetting the avoided warming in 2050 from deploying all currently cost-effective methane mitigation options globally.⁶⁵⁸ High hydrogen leakage combined with increasing methane emissions could add as much as 0.4 °C of warming.⁶⁵⁹

F. India

According to India’s third Biennial Update Report (BUR) to the UNFCCC, methane accounted for 19.5 million tonnes (409 Mt CO₂e, using GWP₁₀₀ of 21 per Indian reporting), or 14.43% of India’s total GHG emissions in 2016.⁶⁶⁰ The agriculture sector accounted for 73.96% of India’s methane emissions (14.4 million tonnes), the waste sector 14.46% (2.8 million tonnes), the energy sector 10.62% (2.0 million tonnes), and industrial processes and product uses accounted for 0.96% (0.1 million tonnes).⁶⁶¹

India is working to cut methane emissions across key sectors, particularly in the agriculture sector. Two methods of rice cultivation in India aim to reduce water usage and methane emissions: the system of rice intensification and direct-seeded rice. The system of rice intensification is being used in 24 of India’s 28 states,⁶⁶² and cultivation using the direct-seeded rice method is being deployed in India on nearly 100,000 hectares of land.⁶⁶³ India also is shifting land used for paddy crops to other crops that require less water and thus enable reductions of methane emissions.⁶⁶⁴ Furthermore, India is implementing methods, including feed additives, that increase productivity of milk-producing animals and reduce GHG emissions.⁶⁶⁵

India’s strategy to reduce methane emissions from the energy sector appears focused on transitioning to renewable energy and improving energy efficiency.⁶⁶⁶ Under the 2022 *U.S.-India Strategic Clean Energy Partnership*, the U.S. and India agree to abate methane emissions from oil and gas, and specifically in India’s city gas distribution sector, through the public-private U.S.-India Low Emissions Gas Task Force.⁶⁶⁷ The Low Emissions Gas Task Force is led by the U.S. Department of Energy and the Indian Ministry of Petroleum and Natural Gas,⁶⁶⁸ and aims to implement best practices for natural gas development as India strives to achieve its goal of increasing the share of natural gas in the primary energy supply to 15% by 2030.⁶⁶⁹

India has also launched a pair of biogas programs, called Galvanising Organic Bio-Agro Resources (Gobar-Dhan) and the New National Biogas and Organic Manure Programme.⁶⁷⁰ Prime Minister Narendra Modi launched the Global Biofuels Alliance (GBA) on the sidelines of the G20 Summit in New Delhi in September 2023, aiming to bring together the biggest consumers and producers of biofuels as a key to energy transition.⁶⁷¹ Such biorefinery programs may address challenges of waste disposal and fertilizer shortages aligned to the structure of farms in India.⁶⁷²

In addition to methane from oil and gas, India is working to reduce methane from coal. India's coalbed methane amount is estimated to be 91.8 trillion cubic feet spread over 11 states.⁶⁷³ Further, India identified 233.30 trillion cubic feet of shale gas and oil, the commercialization of which can dramatically increase methane emissions.⁶⁷⁴

The Government of India formulated its Coal Bed Methane (CBM) policy in July 1997 to harness CBM potential in the country and reduce methane emissions from coal mining. Through this policy, CBM is converted to natural gas under the provisions of the Ministry of Petroleum and Natural Gas 1948 Oil Fields (Regulation & Development) Act and the 1959 Petroleum and Natural Gas Rules.⁶⁷⁵ To harness CBM potential, coalbed methane-producing blocks have been offered to companies through competitive bidding. Thus far, India awarded 30 CBM blocks under four rounds of bidding to national, private, and joint venture companies.⁶⁷⁶

India reported 17 Mt CO₂e of fugitive emissions from coal mining and post-mining operations as of 2016 in its Third Biennial Update Report to the UNFCCC (2021 BUR).⁶⁷⁷ The U.S. EPA used India's 2016 emissions data to project 22 Mt CO₂e of Indian coal mine methane emissions annually at 2020, and 48 Mt CO₂e of such emissions at 2050.⁶⁷⁸ According to the 2021 BUR, fugitive methane emissions dropped 2 percent between 2014 and 2016, "mainly due to a relative reduction in underground mining activities."⁶⁷⁹ The 2021 BUR estimates that, between 2014 and 2016, methane emissions from surface mining increased 7 percent, whereas emissions from underground mining decreased by 3 percent. India's data on fugitive methane emissions is based on country-specific emissions factors on file at the IPCC Emission Factor Database.⁶⁸⁰

The 2021 BUR further mentions that "the upcoming projects of [CBM] extraction will also reduce the liberation of methane into the atmosphere during coal mining, which will be taken up in future."⁶⁸¹ Furthermore, Coal India Limited, the largest coal-mining company in India and the world, refers in its 2020-2021 environmental, social, and governance (ESG) report to three "clean coal" strategies: coal mine methane, coalbed methane, and coal-to-liquid (coal liquefaction) technology.⁶⁸²

Planned coal mine methane and coalbed methane exchanges, training, and projects are aimed at further reducing methane.⁶⁸³ A pre-drainage project is under development at one underground mine,⁶⁸⁴ and studies have been conducted to determine the feasibility of additional coal mine methane abatement projects.⁶⁸⁵ Despite these efforts to reduce coal bed methane, India announced the auction of 67 new coal mines in 2021,⁶⁸⁶ with an estimated 36 billion tons of coal.⁶⁸⁷ These blocks represent fewer than a third of the 214 that the Ministry of Coal is statutorily obligated to develop.

Other methane reduction policies include comprehensive waste management. There are various policies in India, including the National Action Plan on Climate Change,⁶⁸⁸ Swachh Bharat

Mission,⁶⁸⁹ Solid Waste Management Rules 2016,⁶⁹⁰ and National Clean Air Program,⁶⁹¹ that play a role in reducing methane emissions from the waste sector through climate change adaptation and mitigation, universal sanitation coverage, and segregation and minimization of waste. Although these policies do not explicitly address methane, they include goals such as making urban areas garbage-free,⁶⁹² segregating waste at source,⁶⁹³ and capturing GHGs at landfills—each of which are directly or indirectly reducing methane emissions.⁶⁹⁴ Moreover, Swachh Bharat Mission 2.0 has been instrumental in promoting scientific treatment of all the fractions of municipal solid waste and remediation of existing dumpsites.⁶⁹⁵ More than 87 million tonnes of waste has been remediated all over the country, reclaiming 3,440 acres of land.⁶⁹⁶

In May 2022, the Indian government made an announcement that may have implications for enhanced methane mitigation, given the critical role of methane mitigation in meeting the goals of the Paris Agreement.⁶⁹⁷ This announcement was that three ministry-level authorities—the Ministry of Earth Sciences, the Department of Science and Technology, and the Ministry of Environment, Forest and Climate Change—will form a consortium to “work cohesively towards climate action and towards realizing India’s Nationally Determined Contributions under the Paris Agreement.”⁶⁹⁸

According to Schedule 7 of the Indian Constitution,⁶⁹⁹ India is a quasi-federal nation, meaning that ultimately all the commitments made by the Government of India on the international stage have to be implemented by the Indian states. In 2009, the Government of India directed all state governments and union territories to prepare State Action Plans on Climate Change, consistent with the strategy outlined in the 2008 National Action Plan on Climate Change.⁷⁰⁰ All States have since prepared State Action Plans on Climate Change, and some have published multiple iterations. While most states have identified methane as a more potent gas than carbon dioxide, a few have included strategies to reduce methane emissions in their State Action Plans. Haryana,⁷⁰¹ Goa,⁷⁰² Odisha⁷⁰³ and Jammu & Kashmir have included methane reduction strategies as part of their state plans in the agricultural sector.⁷⁰⁴ The states of Kerala,⁷⁰⁵ Karnataka⁷⁰⁶ and Rajasthan have additionally identified strategies to improve methane emissions from livestock, agriculture and landfills.⁷⁰⁷ In addition to the State Action Plans, States’ Vision 2047 policies guide their overall policy development towards 2047, the centennial of Indian independence. Punjab’s 2047 vision document recommends a dual strategy focusing on CO₂ and SLCP reduction measures across highest emitting sectors.⁷⁰⁸ These include strategies for SLCP emissions reduction in rice cultivation and biomass burning in the agricultural sector, manure management and enteric emissions in industries, solid waste from landfill sites and wastewater in the waste sector, specifically for methane.

G. Iraq

Iraq’s oil and gas sector is a large contributor of methane emissions, amounting to approximately 9% of global methane emissions from the sector in 2019.⁷⁰⁹ Iraq has also been among the top 9 flaring countries for the last 10 years.⁷¹⁰

In 2020, Iraq announced that its Ministry of Health and Ministry of Environment and Oil will establish an inter-ministerial technical task force to focus on the nature and scale of methane emissions from the country’s oil and gas sector.⁷¹¹ Since then, Iraq has included methane in its NDC submission, joined the CCAC’s Oil and Gas Methane Partnership, and became a signatory

to the GMP.⁷¹² In 2022, Iraq’s Ministry of Environment announced that they are working with the World Bank’s Global Gas Flaring Reduction Partnership to develop its roadmap with a target of zero flaring in oil and gas production by 2030.⁷¹³ The Iraqi government reportedly introduced a new law in October 2022 to encourage investment in producing electricity from methane gas generated by solid waste.⁷¹⁴

In February 2023, diplomats from the U.S. and Canada expressed their interest in assisting Iraq with reducing flaring.⁷¹⁵ They expressed a commitment from the U.S. and Canada to investing in gas capture technology, to boost power production and reduce the adverse health implications of the methane emissions.⁷¹⁶

In a statement at COP28 to S&P Global Commodity Insights, Abdulbaqi Alsait, energy adviser to the Iraq Ministry of Oil, indicated that Iraq is focused on eliminating gas flaring by 2028 and reducing methane output by 30% by 2030.⁷¹⁷ Alsait also stated that it is “impossible” for Iraq to eliminate methane output by 2030 and that Iraq was opposed to a phaseout or phasedown of fossil fuels.⁷¹⁸

H. Mexico

In addition to the methane targets arising from the 2016 North American Climate, Clean Energy, and Environment Partnership, in 2018, Mexico published comprehensive regulations for methane emissions reductions in the oil and gas sector that acknowledge the potential to reduce emissions in the sector by up to 75% by 2025.⁷¹⁹ These regulations include standards for quarterly leak detection and repair, the use of vapor-recovery systems to capture gas, the move to low- and zero-bleed pneumatics, and less-wasteful practices.

Mexico also joined the Global Methane Pledge and participates in the Global Methane Pledge Energy Pathway.⁷²⁰ In July 2022, President Lopez Obrador agreed with U.S. president Joe Biden to cooperate with Mexico’s national oil company, Petróleos Mexicanos (PEMEX), to eliminate routine flaring and venting.⁷²¹ In January 2023, however, PEMEX was identified as lagging behind its obligations to identify, report, and mitigate methane emissions from its installations.⁷²²

Mexico’s most recent NDC under the Paris Agreement include goals to capture and manage biogas from livestock waste, and to improve waste management to reduce methane emissions.⁷²³ The NDC also mentions intent to develop a Gas Exploitation Strategy, which will include using 98% of fugitive methane gas in new and existing oil and gas fields.⁷²⁴ These goals are part of Mexico’s commitment to reduce GHG emissions by at least 35% and up to 75% below projected business-as-usual scenario by 2030.⁷²⁵

A priority for methane reductions in Mexico is to improve methane monitoring for accurate emissions reporting. For example, recent satellite-based measurements found 45% higher emissions from anthropogenic sources than estimated in the national GHG inventory, with the largest discrepancy between inferred and estimated emissions coming from the oil and gas sector.⁷²⁶ A separate Environmental Defense Fund (EDF)-led study found that for onshore processing facilities, methane leaks were 10 times higher than reported, while offshore processing facilities had emissions that were 90 percent lower than reported. According to EDF, this finding suggests that the offshore gas was piped inland, where it later would be flared or leaked. Emissions

from a single facility that received offshore gas were found to emit the equivalent of half of Mexico’s residential gas consumption.⁷²⁷

President Andrés Manuel López Obrador and other Mexican officials met with Special Presidential Envoy for Climate John Kerry on 9 February 2022 to continue the U.S.-Mexico dialogue on climate collaboration and clean energy action. During this visit, the two sides agreed that the policy focus of their actions “will include tackling methane emissions from oil and gas, waste, and agriculture,” among other areas.⁷²⁸ In June 2022, President López Obrador announced that PEMEX will be spending \$2 billion to lower its methane emissions by up to 98%.⁷²⁹ The following month, the U.S. and Mexico committed to “tackle methane emissions from oil and gas and other sectors,” and for the U.S. to cooperate with Mexico and PEMEX on a plan to eliminate routine flaring and venting.⁷³⁰ Satellites recently detected large methane plumes from an offshore oil platform in one of Mexico’s major oil-producing fields, highlighting the urgency of tackling these emissions.⁷³¹

I. Nigeria

Nigeria is at the forefront of countries experiencing climate change, as it has been for more than 50 years.⁷³² Nigeria’s ongoing and increasing climate crisis is prominently reflected in the farmer-herder crisis resulting in huge loss of lives and livelihoods across the country. For example, Nigeria’s development and adoption of a national strategy for transforming the Nigeria livestock sub-sector to address the impacts of climate change resulting in the migration of herders induced desertification of the north of the country, which led to conflicts with farmers and deadly violence.⁷³³ It is appropriate, then, that Nigeria became the first African country to regulate methane emissions in its energy sector.⁷³⁴ At the same time, Nigeria—together with Sudan, the Democratic Republic of Congo, and Egypt—contribute to half of the African continent’s total methane emissions.⁷³⁵

Nigeria has made broad progress beyond security and economic programs to respond to international climate mitigation agreements and policies. For instance, to fulfill its responsibilities under the UNFCCC and its Kyoto Protocol and Paris Agreement, Nigeria enacted the national Climate Change Act in 2021⁷³⁶ to help drive responses to the need for climate change adaptation and mitigation, including cutting methane.⁷³⁷

During the period leading up to and following the passage of the National Climate Change Act, efforts were made at formulating climate-related policies and plans, including those relevant to cutting climate super pollutants such as methane. These include the 2017 National Gas Policy,⁷³⁸ 2018 National Action Plan to Reduce Short-Lived Climate Pollutants,⁷³⁹ National Climate Change Policy 2021–2030,⁷⁴⁰ and the 2050 Long-Term Vision for Nigeria.⁷⁴¹

Key sector-specific legal measures that are in progress, or that have been issued and are important for assessment of methane-reduction activities, include:

- 2004 Associated Gas Re-injection Act (“AGRA”),⁷⁴²
- 2016 Nigerian Gas Flare Commercialization Program (“NGFCP”);⁷⁴³

- 2023 Gas Flaring, Venting and Methane Emissions (Prevention of Waste and Pollution) Regulations;⁷⁴⁴
- 2023 Midstream Gas Flare Regulations;⁷⁴⁵
- 2021 Petroleum Industry Act;⁷⁴⁶
- 2020 Gas Flaring (Prohibition and Punishment) Bill (draft, which has recently passed through its second reading in the Nigerian Senate);⁷⁴⁷ *and*
- 2022 Guidelines for Management of Fugitive Methane and Greenhouse Gases Emissions in the Upstream Oil and Gas Operations in Nigeria.⁷⁴⁸

The World Bank 2022 Global Gas Flaring Tracker Report indicated that of the top 10 flaring countries, seven of the countries have held the top 10 position consistently for the previous decade, including Nigeria.⁷⁴⁹ Nevertheless, this report also noted that Nigeria reduced its flaring, a major source of methane contribution to the planet, by 31% between 2012 and 2021, placing Nigeria in the “promising reduction” category.⁷⁵⁰

Nigeria has been a CCAC partner since 2012.⁷⁵¹ It was one of the original 31 countries that joined the GMP in 2021.⁷⁵² Largely in response to their partnership with the CCAC, Nigeria developed its National Action Plan to Reduce Short-Lived Climate Pollutants, which includes the incorporation of targets for the oil and gas sector to eliminate 100% of routine gas flaring by 2020,⁷⁵³ control fugitive methane emissions and leakage by 50%, and reduce methane leakage by 50%, by 2030.⁷⁵⁴ Targets for the waste sector include recovering 50% of methane from landfills by 2030 and achieving a 50% reduction in open burning of waste by 2030. For the agriculture sector, the Plan contains targets such as achieving a 30% reduction in methane emissions intensity from enteric fermentation by 2030.

However, while Nigeria did reduce its flaring emissions by 70% between 2000 and 2020, it did not achieve its target of an overall 100% reduction in flaring.⁷⁵⁵ In August 2022, Nigeria launched its Energy Transition Plan outlining its plan to achieve net zero emissions by 2060.⁷⁵⁶ This plan focused on reducing emissions across five prominent areas: power, cooking, oil and gas, transport and industry.⁷⁵⁷ It aims to achieve a 100% reduction of flaring emissions by 2030.⁷⁵⁸

At COP27, Nigeria announced new Guidelines for Management of Fugitive Methane and Greenhouse Gases Emissions in the Upstream Oil and Gas Operations. The Guidelines established Nigeria’s place as the first African country to regulate methane emissions in the energy sector, and contained revised targets for elimination of routine gas flaring (100% of gas flaring eliminated by 2030) and control of fugitive emissions and leakages (60% methane reduction by 2030).⁷⁵⁹ Notably, these targets are subject to the Petroleum Industry Act (also mentioned above), which provides exemptions in Section 104 and 107 (e.g., for emergencies, exemptions granted by Commission, acceptable safety practice under established regulations, and where Commission or Authority grants permit to licensee or lessee to allow flaring or venting of natural gas for a specific period where required for facility start-up or for strategic operational reasons, including testing). It should be noted that Nigeria has repeatedly revised its flaring elimination targets shifting them first in 2004, then in 2008, then in 2012, and now in 2020.⁷⁶⁰ Achieving the flaring target will thus require greater action on behalf of the government to ensure that this is the final time that the target needs to be revised.⁷⁶¹

Nigeria's methane mitigation ambition also figures prominently in its NDCs. Zero gas flaring by 2030 is included in Nigeria's 2021 update to its NDC.⁷⁶² The updated NDC integrates measures from Nigeria's National Action Plan to Reduce Short-Lived Climate Pollutants aiming to reduce black carbon, methane, and hydrofluorocarbon emissions by 42%, 28% and 2%, respectively, by 2030 compared to a baseline scenario.⁷⁶³

At COP28, Nigeria showcased major steps taken this year under the Nigeria Gas Flare Commercialization Program, including advancing projects it estimates will capture over half of all gas flaring volumes in Nigeria.⁷⁶⁴

In January 2024, the Nigerian Upstream Petroleum Regulatory Commission announced that it had entered a partnership with the Climate & Clean Air Coalition.⁷⁶⁵ This collaboration will encompass a multifaceted approach, including knowledge sharing, technological support, and joint research efforts aimed at devising effective methane mitigation strategies.⁷⁶⁶

While it remains to be seen if Nigeria will meet all its targets, including those in its NDCs, Nigeria's ambition, provided it accompanies its targets with the implementation of best practices, is helpful to other developing countries seeking leadership models and inspiration from an African methane mitigation champion.

J. United Kingdom

Methane emissions make up 13% of the United Kingdom's total greenhouse gas emissions.⁷⁶⁷ The majority of methane emissions in the United Kingdom stem from agriculture (53%), waste (32%), and the energy sector (15%).⁷⁶⁸

The United Kingdom was one of the first countries to sign the GMP.⁷⁶⁹ The United Kingdom is also a state partner of the CCAC, and a member of the Oil and Gas Methane Partnership Steering Group.⁷⁷⁰ It has also committed to the World Bank's Zero Routine Flaring by 2030 initiative.⁷⁷¹ The UK government has aligned domestic policy with the Global Methane Pledge target of a 30% reduction in methane by 2030,⁷⁷² and has not set a higher or stricter target.

In the six years from 2015 to 2021, methane emissions have fallen by an average of 1.5% per year.⁷⁷³ According to the Climate Change Committee, an independent non-departmental public body formed under the Climate Change Act 2008, this reduction will need to accelerate to 4% per year if the United Kingdom is to achieve the target of a 30% reduction by 2030.⁷⁷⁴ However, in 2023, a study from researchers at Princeton University and Colorado State University found that the current method for estimating methane emissions from offshore oil and gas production in the United Kingdom systematically and severely underestimate methane emissions.⁷⁷⁵ The study finds that about five times more methane is being emitted from UK oil and gas production than what the government has reported.⁷⁷⁶ This may mean that existing figures, estimates, and policies need to be revised and reconsidered.

In 2022, the UK government published a Methane Memorandum, which outlined how the 1.5% annual reduction in methane emissions had been achieved.⁷⁷⁷ In March 2023, the UK government published its Carbon Budget Delivery Plan, which outlined in further detail, current and future policies for additional reductions in greenhouse gas emissions, including methane.⁷⁷⁸

In the energy sector, the UK government has adopted an Iron Mains Risk Reduction Programme (IMRRP), which is a plan to upgrade the gas network from iron pipes to plastic pipes.⁷⁷⁹ This reduces leakages of methane where the pipes have been changed.⁷⁸⁰ In 2021, the North Sea Transition Authority, which regulates flaring and venting for UK energy operators, laid out new guidelines for flaring and venting to align with the UK's wider Net Zero Strategy.⁷⁸¹ These new guidelines stipulate that all operators should have, or work towards, credible plans to achieve zero routine flaring and venting by 2030 or sooner,⁷⁸² and that all new all new developments should be planned and developed on the basis of zero routine flaring and venting.⁷⁸³ The government has stated that it will not accelerate the end to routine flaring from 2030 to 2025, citing the difficulty with the cost and technological associated with a quicker end to flaring, as well as the “maturity” of the North Sea basin.⁷⁸⁴

For the waste sector, a landfill tax has been in place since October 1996 and is levied on disposal of waste in landfills, with very limited exemptions.⁷⁸⁵ The UK government has indicated that additional policies will be needed to meet the aim of preventing biodegradable waste from going to landfill, still the largest source of emissions in the sector.⁷⁸⁶ Some of these proposed policies involve further R&D to refine emissions estimates,⁷⁸⁷ to explore further methane gas capture from landfill, and new collection and packaging reforms to support the reduction of biodegradable municipal waste going to landfills.⁷⁸⁸

For the agriculture sector, proposals have been announced to increase the use of robust Monitoring, Reporting and Verification (MRV) of GHG emissions,⁷⁸⁹ to burn methane emitted generated during storage of liquid manure to convert it to carbon dioxide,⁷⁹⁰ and the feeding of insect protein to animals to reduce overall global emissions from feed production.⁷⁹¹ There are additional plans to mandate retrofitting slurry tanks with a permeable or impermeable cover,⁷⁹² to employ genetic testing to improve livestock breeding goals and deliver permanent low emissions traits,⁷⁹³ and to encourage the use of methane suppressing feed products to reduce methane emissions from livestock.⁷⁹⁴

In a parliamentary report prepared by the Climate Change Committee, the UK government was criticized for a “weak” contribution to progress on the Global Methane Pledge.⁷⁹⁵ The report further noted that “the Government has not set out a UK-specific 30% reduction on 2020 levels by 2030 commitment to support the Global Methane Pledge and the Methane Memorandum brought forward high-level intentions rather than detailed plans for sectoral reductions.”⁷⁹⁶ Under current plans, it is unlikely to meet its commitments under the Global Methane Pledge.⁷⁹⁷

The parliamentary report lays out a series of recommendations to ensure that the UK meets its international commitments. These recommendations include:

- Set out plans for reducing domestic methane emissions in line with the collective aims of the GMP and announce an intention to set a longer-term pathway for these emissions.⁷⁹⁸
- Strengthen and bring forward targets for methane flaring and venting. For all facilities that will remain in operation post 2030, flaring and venting should only be permitted beyond 2025 when necessary for safety reasons.⁷⁹⁹
- Introduce regulations under the Clean Air Strategy to reduce enteric methane emissions, specifically under environmental permitting to the dairy and intensive beef sector.⁸⁰⁰

- Set out how methane capture and oxidization rates at landfill sites will be improved.⁸⁰¹

In December 2023, the UK government announced that it would implement a carbon pricing mechanism by 2027.⁸⁰² Similar to the EU CBAM, goods imported into the UK from countries with a lower or no carbon price will have to pay a levy by 2027, ensuring products from overseas face a comparable carbon price to those produced in the UK.⁸⁰³ As of now, the proposed mechanism makes no mention of methane, but, similar to the EU border adjustment mechanisms, it may evolve in time to apply a similar methane fee.⁸⁰⁴

K. United States

The U.S. has set a target of reaching net-zero GHG emissions by no later than 2050, with an interim target of reaching 50–52% reduction from 2005 levels of GHG emissions by 2030.⁸⁰⁵ This section will first discuss domestic methane mitigation efforts before turning to the wider U.S. role in bilateral and multilateral methane commitments.

i. Domestic action

In November 2021, the White House published the *U.S. Methane Emissions Reduction Action Plan*, a whole-of-government initiative and model for taking a sectoral approach to reducing methane emissions.⁸⁰⁶ The U.S. has subsequently introduced a number of leading domestic methane regulations and initiatives as well as having led on, or helped to develop, a number of bilateral and multilateral methane commitments. Key actions to implement the Action Plan's whole-of-government approach are described below.

On 31 January 2022, the Biden administration announced the next steps of the *U.S. Methane Emissions Reduction Action Plan*, starting with allocating \$1.15 billion for states to clean up orphaned oil and gas wells.⁸⁰⁷ The next steps include enforcing the Protecting Our Infrastructure of Pipelines and Enhancing Safety (PIPES) Act to ensure that pipeline operators minimize methane leaks, emphasizing current research efforts and investments to reduce methane from cattle, and allocating \$11.3 billion in funding for abandoned mine-land reclamation and \$1 billion for natural gas pipeline modernization. As part of the Plan, the Biden administration announced the creation of an inter-agency group to coordinate methane measurement, monitoring, reporting and verification, and convened a workshop for energy communities on repurposing fossil fuel infrastructure.⁸⁰⁸ Alongside the reduction in emissions that will come with these measures, a study from the BlueGreen Alliance has found that the full implementation of the new proposed regulations for oil and gas facilities could create over 136,000 jobs over the next 13 years.⁸⁰⁹

In July 2023, the White House convened the first-of-its-kind Methane Summit.⁸¹⁰ At the Summit, the White House announced that it was establishing a Cabinet-level Methane Task Force to advance a whole-of-government approach to proactive methane leak detection and data transparency, and to support state and local efforts to mitigate and enforce methane emissions regulations.⁸¹¹ The Task Force is designed to accelerate the *U.S. Methane Emissions Reduction Action Plan*.⁸¹² The White House also committed to leveraging domestic action to raise global ambition and to coordinate international efforts to mitigate methane emission.⁸¹³

The passage in August 2022 of the Inflation Reduction Act (IRA) of 2022 is key to wider U.S. efforts on climate mitigation, including methane. The IRA contains nearly \$370 billion in climate funding, including \$1.55 billion to monitor and reduce emissions from oil and gas.⁸¹⁴ The legislation includes a Methane Emission Reduction Program with a methane waste fee (called the Waste Emissions Charge) of up to \$1,500 per ton of methane by 2026,⁸¹⁵ and raises royalty fees for oil and gas extracted from federal lands and waters, including fees on gas avoidably lost by non-emergency flaring or venting.⁸¹⁶ In addition, the IRA will provide about \$20 billion in agricultural conservation grants, which would prioritize climate issues including methane mitigation.⁸¹⁷ The IRA is estimated to reduce U.S. greenhouse gas emissions by 40% below 2005 levels by 2030.⁸¹⁸

The Infrastructure and Investment Jobs Act enacted in November 2021 authorized the U.S. government to invest in methane mitigation solutions and distribute significant grants to bolster methane mitigation. The Act also includes an Orphaned Well Site Plugging, Remediation, and Restoration program, which authorizes over \$4.5 billion in appropriations to plug, remediate, and reclaim orphaned wells.⁸¹⁹ Key rulemaking and other initiatives are described below.

a. Energy production sector

In November 2021, under § 111 of the Clean Air Act, the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) proposed regulations for more stringent controls on emissions of methane and other air pollutants from new and existing oil and gas operations.⁸²⁰ The proposal was subsequently updated to include more thorough life-cycle controls, tighter supervision of marginal wells, and a Super Emitter Response Program, among other measures.⁸²¹ The EPA estimates that for covered sources, the proposed rule would reduce emissions 87% below 2005 levels by 2030.⁸²² A finalized version of this rule was released at COP28.⁸²³ Another proposed EPA rule under the Clean Air Act, released in May 2023, would strengthen requirements on fossil fuel-fired electric generating units.⁸²⁴

The EPA has taken several regulatory actions to align with the Clean Air Act regulations and to implement the Methane Emissions Reduction Program under the IRA.⁸²⁵ The EPA issued a proposal in July 2023 to amend reporting requirements for petroleum and natural gas systems which will improve the accuracy of reported emissions of GHGs, including methane, consistent with the Methane Emissions Reduction Program under the IRA.⁸²⁶ In January 2024, the EPA issued a proposed rule to implement the requirements of the Waste Emissions Charge discussed above. This proposed rule interacts with other methane policies under the Clean Air Act and would affect oil and gas operators and facilities that report more than 25,000 Mt CO₂e. The rule would impose and collect an annual charge on methane emissions that exceed specified waste emissions thresholds.⁸²⁷ The current proposal would charge these operators \$900 for every ton of methane emissions that exceed levels set by the federal government, beginning in 2024. The fee would increase to \$1,200 in 2025 and \$1,500 per ton in 2026.⁸²⁸

The EPA Office of Enforcement and Compliance Assurance (OECA) has announced six priority areas as National Enforcement and Compliance Initiatives for Fiscal Years 2024–2027.⁸²⁹ One of these areas is mitigating climate change. As part of this, OECA has stated that they will use OECA's criminal and civil enforcement authorities to address three separate and significant contributors to climate change: (1) methane emissions from oil and gas facilities; (2) methane

emissions from landfills; and (3) the use, importation, and production of hydrofluorocarbons (HFCs).⁸³⁰ By focusing on enforcement of long-standing air pollution requirements, such as New Source Performance Standards at oil and gas facilities and landfills, OECA plans to achieve the ancillary benefit of reducing methane emissions.⁸³¹

Other federal departments and agencies are undertaking regulatory action to mitigate methane across the energy production sector.

Under the Infrastructure and Investment Jobs Act, the Department of Energy will distribute almost \$11 billion in Abandoned Land Mine grants to eligible states and tribes over 15 years.⁸³² States with unclaimed mines listed in the EPA's Methane Coal Mine Opportunities Database are encouraged to prioritize reclamation of said mines, eliminating methane emissions "to the greatest extent possible."⁸³³ In August 2022, the Department of Energy announced up to \$32 million in funding towards research and development of monitoring, measurement, and other mitigation technologies to detect and reduce methane emissions in the oil and gas sector.⁸³⁴ In July 2023, the EPA and Department of Energy released a notice of intent announcing the upcoming availability of up to \$350 million for mitigating methane emissions from marginal conventional wells.⁸³⁵ In January 2024, the Department of Energy's loan office conditionally approved a \$189 million loan to support the build-out of a methane monitoring network in key oil-producing basins that would provide real-time data for tens of thousands of oil and gas sites.⁸³⁶

As authorized by the Infrastructure and Investment Jobs Act, the Department of Agriculture is also investing \$10 million in a Bioproduct Pilot Program to "advance development of cost-competitive bioproducts with environmental benefits compared to incumbent products,"⁸³⁷ including products that have lower carbon footprints.⁸³⁸

The U.S. Bureau of Land Management, on 18 November 2023 published a proposed rule under the Mineral Leasing Act to extend royalty fees to avoidably vented, flared and leaked methane, and require operators to submit waste minimization plans.⁸³⁹ The Bureau of Land Management estimates that the proposed rule could save \$55 million a year in recovered gas, raise \$39 million a year in fees, and provide \$427 million a year in benefits to society from reduced emissions.⁸⁴⁰

The Department of Transportation is finalizing rules to reduce leaks throughout the gas pipeline system, and is working on a new proposed rule.⁸⁴¹ On 18 May 2023, the Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, a Department of Transportation agency, published a Notice of Proposed Rulemaking on pipeline safety which aims to reduce methane emissions from transmission pipelines, distribution pipelines, gas gathering pipelines, underground natural gas storage facilities, and liquefied natural gas facilities.⁸⁴² The proposed rule includes strengthened requirements on leakage survey, leak detection, leak grading and repair, blowdown emissions mitigation, and pipeline facility maintenance. The Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration estimates the proposed rule would result in \$341 to \$1,440 million per year in net benefits.⁸⁴³

In the coal sector, the EPA documented 53 current coal-mine methane recovery projects and profiles project opportunities at other gas-emitting mines.⁸⁴⁴ The EPA estimated in 2019 that recovery projects at some of the gassiest mines were capturing or oxidizing more than 700,000

tonnes of methane per year.⁸⁴⁵ However, overall coal-mine methane production has halved since 2008, falling from approximately 57 bcm in 2008 to 22 bcm in 2021.⁸⁴⁶

While reports indicated that the Biden administration was approving more drilling permits on public lands than previous administrations,⁸⁴⁷ in January 2024, the White House announced a temporary pause on pending approvals of Liquefied Natural Gas (LNG) exports until the Department of Energy can update the underlying analyses for authorizations.⁸⁴⁸ As part of this update the Department of Energy must consider the impact on climate change, as well as the economy and national security of the U.S.⁸⁴⁹

The U.S. has also increased its funding for methane mitigation efforts from fossil fuels. On 2 December 2021, the Department of Energy's Advanced Research Projects Agency–Energy (ARPA-E) announced 12 selectees to receive a total of \$35 million in grants to reduce methane emissions from the oil, gas, and coal sectors. These projects include research on reducing methane emissions from natural gas engines, gas flares, and coal mine shafts.⁸⁵⁰ According to ARPA-E, these three sources contribute to at least 10% of U.S. anthropogenic methane emissions.⁸⁵¹ In developing the REMEDY (Reducing Emissions of Methane Every Day of the Year) program, ARPA-E recognized the need for further research on methane capture from the air in parallel with efforts to capture CO₂.⁸⁵² In July 2022, the CHIPS and Science Act doubled ARPA-E's budget⁸⁵³ and expanded funding for climate and Earth systems research, including for a Center for Greenhouse Gas Measurements, Standards, and Information.⁸⁵⁴

b. Agriculture sector

There are a number of upcoming legislative bills and proposals with the potential to increase U.S. methane mitigation efforts in the agriculture sector. The upcoming 2023 Farm Bill may provide an additional opportunity for increased ambition in methane abatement projects through revised livestock management and crop production subsidies and incentives.⁸⁵⁵ In the 2023 progress report towards the *U.S. Methane Emissions Reduction Action Plan*, the U.S. was confirmed to have achieved \$500 million of methane agriculture finance through Partnerships for Climate-Smart Commodities,⁸⁵⁶ and an annual \$8 million in USDA's Agriculture Research Service methane research projects.⁸⁵⁷ However, there has been some opposition to the use of spending bills to increase the obligation on the agricultural sector to report their methane emissions.⁸⁵⁸

c. Waste sector

The *U.S. Methane Emissions Reduction Action Plan* also includes regulations and programs to reduce methane from landfills and the waste sector.⁸⁵⁹ The EPA is implementing updated emissions-reduction standards and requirements for municipal solid waste landfills (originally estimated to reduce methane emissions by over 300,000 metric tons of methane per year).⁸⁶⁰ In January 2024, the U.S. Senate Committee on Environment & Public Lands conducted a hearing on landfill methane emissions and the Committee Chair called on the waste industry, White House, and federal agencies, including the EPA, to deploy “innovative methods” to address methane.⁸⁶¹

The EPA is also tracking multiple other efforts to reduce methane, including livestock anaerobic-digester and landfill gas-capture projects.⁸⁶² In October 2023, the EPA released a report entitled *Quantifying Methane Emissions from Landfilled Food Waste*.⁸⁶³ This report constituted the first

peer-reviewed national reference point for the amount of methane emissions attributable to food waste in U.S. municipal solid waste landfills.⁸⁶⁴ It found that while total emissions from municipal solid waste landfills are decreasing, methane emissions from landfilled food waste are increasing.⁸⁶⁵ At COP28, the U.S. announced that the EPA is planning a rulemaking to review and, if appropriate, revise its Clean Air Act emission standards for new and existing municipal solid waste landfills, considering new monitoring technology, incentivization of organics waste diversion, and emissions controls at landfills not covered by current regulations. In 2024, EPA will release updates on emissions estimates for MSW landfills. In addition, the U.S. released for public comment a draft national strategy for Reducing Food Loss and Waste and Recycling Organics in line with its 2030 goal of 50% food loss and waste reduction.⁸⁶⁶

The EPA's 2024 review of the New Source Performance Standards and Emissions Guidelines for municipal solid waste landfills under the Clean Air Act provides an opportunity to include additional methane abatement measures.⁸⁶⁷ Several groups have called for stronger standards and guidelines that include expansion and regulation of gas capture systems for smaller landfills, increased frequency of methane monitoring, and increased source reduction and waste diversion from landfills.⁸⁶⁸ Some states have already begun including these recommendations into their regulations and guidelines,⁸⁶⁹ or are planning to do so,⁸⁷⁰ going beyond currently mandated U.S. EPA requirements.⁸⁷¹

ii. Other initiatives and proposals

The U.S. federal government operates a host of voluntary initiatives that incentivize methane reductions and provide technical support to abate methane emissions. These include the Food Waste Challenge to reduce food waste by 50% by 2030 (supported by businesses and organizations across the food chain through the Food Loss and Waste 2030 Champions initiative),⁸⁷² the Landfill Methane Outreach Program that promotes the capture and use of landfill gas,⁸⁷³ the Coalbed Methane Outreach Program that promotes the use of coal mine methane,⁸⁷⁴ and the AgStar Program that aims to reduce methane emissions from livestock waste.⁸⁷⁵ The U.S. Department of Agriculture also announced \$3.1 billion in Partnerships for Climate-Smart Commodities funding to encourage implementation of climate-smart practices, including practices that mitigate methane emissions, such as manure management, feed management to reduce enteric emissions, and alternative wetting and drying of rice fields.⁸⁷⁶ Several U.S.-funded programs were announced at COP27 to further livestock methane research and support projects that mitigate methane.⁸⁷⁷ In 2023, the U.S. Department of Commerce released an open-access plain language handbook for policymakers on reducing methane from oil and gas operations, entitled *Methane Abatement for Oil and Gas – Handbook for Policymakers*. The Handbook is a starting point for understanding the policies, rules, and best practices that countries can adopt and implement to effectively abate methane when producing oil and gas.⁸⁷⁸

A wider focus on methane emissions has also been seen in the context of corporate disclosure. Rules proposed by the U.S. Securities and Exchange Commission would require publicly listed companies to disclose climate emissions and related risks, including those related to methane.⁸⁷⁹ The U.S. oil and gas industry has also founded multiple voluntary initiatives related to methane emissions. The Environmental Partnership is an association of over 100 U.S. oil and natural gas companies designed to improve environmental performance through information-sharing, including best practices for LDAR, flaring, and other technologies.⁸⁸⁰ The ONE Future Coalition

is an association of more than 50 natural gas companies with the collective goal of reducing methane emissions across the natural gas value chain to 1% or less by 2025.⁸⁸¹ The Natural Gas Sustainability Initiative, launched by the Edison Electric Institute, American Gas Association, and other industry organizations, published a protocol for reporting methane emissions intensity.⁸⁸²

In August 2023, a bipartisan proposal called the Providing Reliable, Objective, Verifiable Emissions Intensity and Transparency (PROVE IT) Act was introduced to the U.S. Senate. The Act would direct the Department of Energy to conduct a comprehensive study comparing the emissions intensity of certain goods produced in the United States to the emissions of those same goods produced in the other countries.⁸⁸³ If legislated, the PROVE IT Act would be the first U.S. effort to comprehensively assess the relative carbon efficiency of goods produced in the world's major economies. On 18 January 2024, the U.S. Senate Committee on Environment and Public Works passed the PROVE IT Act. It is anticipated that a companion Act will be introduced in the U.S. House of Representatives.⁸⁸⁴

In December 2023, Senator Sheldon Whitehouse introduced his Clean Competition Act bill with the support of House champions.⁸⁸⁵ The Act would impose a carbon border adjustment charge based on carbon intensity.⁸⁸⁶ While the Act is focused on carbon intensity, it opens the door for further consideration of whether a similar border adjustment charge could be applied to methane.

Box 6. Subnational governments demonstrating leadership on methane mitigation

U.S. states also are working to decrease methane emissions in the oil and gas sector. California set a legislative target to reduce methane emissions by 40% by 2030.⁸⁸⁷ In 2014, Colorado approved the first methane regulations in the country, requiring energy companies to reduce methane emissions from both new and existing oil and natural gas facilities. Colorado continues to strengthen its oil and gas regulations, banning routine flaring and venting in 2020.⁸⁸⁸ At the Summit of the Americas in June 2022, California unveiled the California Climate Commitment, which includes a budget proposal for remediating idle oil wells (\$200 million) and launching methane-detecting satellites (\$100 million).⁸⁸⁹ In 2021, Colorado adopted standards to reduce methane emissions from pneumatic controllers.⁸⁹⁰ New Mexico followed suit, issuing stringent regulations for the oil and gas sector, and also banning all routine flaring and venting. A more recent New Mexico rule is expected to reduce emissions still further. Most recently, the Colorado Air Quality Control Commission adopted a new rule requiring direct measurement of methane emissions, building on Colorado's 2021 standards.

Members of the U.S. Climate Alliance, which includes the governments of 23 states and Puerto Rico aim to reduce methane emissions across all sectors by 40–50% by 2030. This target includes reducing emissions from the energy sector by 40–45% by 2025, and from the waste sector by 40–50% by 2030. Members also plan to reduce methane emissions from the agricultural sector, including reducing emissions by 30% from enteric fermentation, and up to 70% from manure management, by 2030. Moreover, states and municipalities have enacted policies that ban or divert organic waste from landfills and aim to reduce food waste. There has been some backlash to state initiatives, with the state of New York facing a lawsuit for its decision to ban natural gas stoves from 2026.⁸⁹¹

U.S. states are also leading outreach to other states serve as models for methane and other climate actions. For example, the California-China Climate Institute has completed Memoranda of Understanding (MOU) with, Guangdong Province,⁸⁹² Hainan Province,⁸⁹³ Jiangsu Province,⁸⁹⁴ and the municipalities of Beijing⁸⁹⁵ and Shanghai.⁸⁹⁶ California also launched a Subnational Methane Action Coalition to empower subnational governments to progress toward their climate goals through methane mitigation in the energy, agricultural and waste sectors.⁸⁹⁷

Research and other institutions are also developing tools for subnational jurisdictions, such as sectoral protocol frameworks for methane emission reductions, that engage governments in actions such as inventories, baselines, target setting, policy implementation, and information sharing.⁸⁹⁸

iii. International action

The U.S., alongside the EU, led the development of the Global Methane Pledge.⁸⁹⁹ The U.S. was also a leading convener alongside China and the UAE of the *COP28 Summit on Methane*.⁹⁰⁰ Further, the U.S. is a party to the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP), which is examining the impacts of methane on ozone formation and is discussed further in [Section 10](#).⁹⁰¹

The North American Climate, Clean Energy, and Environment Partnership that the U.S., Canada, and Mexico created in 2016 has agreed to reduce methane emissions from the oil and gas sector by 40–45% by 2025.⁹⁰² Partners committed to develop and implement federal regulations to reduce emissions from existing new sources in the oil and gas sector, as well as national methane reduction strategies for key sectors as soon as possible, including for oil and gas, agriculture, and waste and food management.⁹⁰³ See subsections above on Canada and Mexico actions to meet this target. In July 2022, the U.S. and Mexico committed together to “tackle methane emissions from oil and gas and other sectors.”⁹⁰⁴

In response to the global energy impact of the ongoing Russian invasion of Ukraine, the White House agreed to aid the EU transition from dependence on Russian gas by attempting to ensure additional shipments of 15 bcm of liquefied natural gas in 2022, in addition to “maintaining an enabling regulatory environment” toward new LNG export capacities. However, it also agreed to “undertake efforts to reduce the greenhouse gas intensity of all new LNG infrastructure and associated pipelines.”⁹⁰⁵ The Federal Energy Regulatory Commission also rolled back a new policy on assessing the climate impact of pipeline emissions.⁹⁰⁶ There is also concern about the methane emissions that will arise should the Biden administration continue to export LNG.⁹⁰⁷ This highlights the importance of immediate action to require progressive reductions in methane emission rates from “replacement methane gas” provided in response to changes in countries’ methane gas imports, keeping in mind GMP commitments.⁹⁰⁸

In May 2022, leaders from the U.S. and the Association of Southeast Asian Nations (ASEAN) agreed at the U.S.-ASEAN Special Summit in Washington, DC, to raise their collective ambition to, among other things, reduce methane emissions. The Fact Sheet for the Special Summit indicates:

“The United States is committed to working with the nations of Southeast Asia to reduce the region’s methane emissions. The United States welcomed Indonesia, Vietnam, Malaysia, the Philippines, and Singapore joining the GMP at COP-26, and we are accelerating technical assistance, financial resources, and project pipeline development for methane mitigation in GMP countries, including through the EPA, USTDA [U.S. Trade and Development Agency], DFC [Development Finance Corporation], and EXIM [Export-Import Bank], as well as the newly-created Global Methane Hub, a philanthropic fund that can support methane mitigation priorities in the region.”⁹⁰⁹

The U.S. also has collaborative arrangements with Brazil on energy. The U.S.-Brazil Energy Forum is a mechanism for the two governments to exchange technical, regulatory, and policy expertise, including carbon and methane management.⁹¹⁰ In August 2022, the U.S. and Brazil launched the Clean Energy Industry Dialogue, a bilateral forum led by the private sector and industry to promote clean energy, including offshore wind and clean hydrogen.⁹¹¹ A discussion of these developments can also be found in [Section 6K](#).

In April 2023, U.S. Secretary of State Anthony Blinken met with the Foreign Minister of Turkmenistan. They stated their intentions for the U.S. and Turkmenistan to cooperate on deploying leak detection and repair solutions as well as developing a methane reduction investment plan in 2023 to control methane emissions in the oil and gas sector.⁹¹² They also pledged to form a working group methane mitigation and will endeavor to feature methane mitigation outcomes by COP28.⁹¹³

Also in April 2023, President Biden highlighted the need for a Methane Finance Sprint at the Major Economies Forum on Energy and Climate⁹¹⁴ and announced a \$1 billion contribution to the UN’s Green Climate Fund at the Forum (*see Section 11B*).⁹¹⁵

In July 2023, U.S. Climate Envoy John Kerry visited China to advance climate cooperation. Kerry had previously indicated that methane was particularly important for cooperation.⁹¹⁶ At a subsequent bilateral meeting in November, the U.S. and China signed the *Sunnylands Statement*. The Statement stipulates, among other measures to cooperate to reduce methane emissions, that “the two countries will immediately initiate technical working group cooperation on policy dialogue, technical solutions exchanges, and capacity building, building on their respective national methane action plans to develop their respective methane reduction actions/targets for inclusion in their 2035 NDCs and support each country’s methane reduction/control progress.”⁹¹⁷

Additionally, in all methane-emitting sectors, the U.S. State Department, in partnership with U.S. Agency for International Development (USAID), has launched a new USAID Methane Accelerator program to mainstream and scale up methane abatement projects.⁹¹⁸

7. International collaboration is critical for combatting methane emissions

Public and private organizations and initiatives around the world, such as those described briefly below, are collaborating on methane mitigation. Their collaboration is critical to strengthening the consensus that supports methane action, including at the bilateral and multilateral levels. Initiatives that rate methane performance may be an increasingly important part of this collaboration as the world re-aligns around changes in global gas supply and focuses on assessing the methane intensity of available gas volumes and associated producer performance.⁹¹⁹

A. Governmental and Quasi-governmental organizations and initiatives

i. Agriculture Innovation Mission for Climate

The Agriculture Innovation Mission for Climate (AIM4C), co-created by the U.S. and UAE, is an initiative to increase funding and participation in climate-smart agriculture and food system innovation from 2021–2025. AIM4C “innovation sprints” will guide participants to address specific goals using coordinated funding. Methane-related innovation sprints include: “Enteric Fermentation R+D Accelerator,” “AgMission: Cultivating Climate-Smart Solutions,” “Cellular Agriculture: Addressing Climate Change and Promoting Resilience in the Protein Sector,” “Accelerating Sustainable Protein Innovation through Research,” “Livestock, Climate and System Resilience,” “Climate Smart Rice Technology Project,” “Greener Cattle Initiative: Addressing Enteric Methane Emissions,” and “Satellite monitoring of quantity and quality of available biomass in pastoral livestock systems.”⁹²⁰ Over 40 countries and nearly 300 organizations have partnered with this initiative.⁹²¹

ii. Alliance of Champions for Food Systems Transformation

At COP28, Brazil, Norway, Sierra Leone, Cambodia, and Rwanda launched the Alliance of Champions for Food Systems Transformation. The Alliance aims to transform national food

systems to deliver universal access to sustainable, affordable, and nutritious food and to achieve major progress across ten priority action areas this decade.⁹²² One of the priority action areas is reducing methane emissions from agriculture.⁹²³ Each country is pledging to: strengthen national plans and food systems transformation pathways, including in the priority action areas and consistent with science-based targets; update NDCs, National Adaptation Plans, Long-Term Low Emission Development Strategies, and National Biodiversity Strategies and Action Plans in line with these national plans and pathways by 2025 at the latest; and report annually on targets and priority action areas.⁹²⁴

iii. ASEAN Energy Sector Methane Leadership Program

The ASEAN Energy Sector Methane Leadership Program, established in July 2023, is an 18-month initiative, delivered through masterclasses and workshops, which will focus on capability building to strengthen ASEAN energy companies' plans, targets, and financing options for reducing methane emissions.⁹²⁵ The Program is launched as a collaboration between PETRONAS and ASEAN energy operators, governmental agencies, and international organizations.⁹²⁶

iv. The Breakthrough Agenda

Initially launched at COP26 by a coalition of 45 world leaders, the Breakthrough Agenda aims to halve global emissions by 2030 through a multi-country clean technology plan. Countries endorsed goals to make clean technologies and sustainable practices more affordable, accessible, and attractive than their alternatives by 2030 in the power, road transport, steel, hydrogen and agriculture sectors. At COP28, it was announced that the Breakthrough Agenda goals now also cover the buildings and cement sectors.⁹²⁷ The Breakthrough Agenda has an annual cycle to track developments towards these goals, identify where further coordinated international action is needed to galvanize public and private international action to make these transitions quicker, cheaper, and easier.⁹²⁸ At COP27, leaders set 28 priority actions within this framework and agreed to review and share progress and improvements on these actions. The 2023 Breakthrough Agenda report assessed annual progress on these priority actions and found only modest progress has been made in strengthening international collaboration in critical areas. The report's recommendations span financial assistance, research and development, demand-creation, infrastructure, and standards and trade, to accelerate the transition in each of the seven sectors.⁹²⁹

v. The Climate & Clean Air Coalition to Reduce Short-Lived Climate Pollutants

The CCAC facilitates methane mitigation and information sharing at all levels, including through publication of leading science. The CCAC is a voluntary partnership with over 80 State and regional partners, and a similar number of non-state partners as of the end of 2023.⁹³⁰

As of September 2023, the CCAC acts as the Secretariat for the Global Methane Pledge.⁹³¹ The CCAC assists countries with developing plans to reduce SLCPs.⁹³² The CCAC also helps countries increase the ambition of the SLCP-reduction targets that they include in their NDCs under the Paris Agreement. Increasing support and funding for the CCAC would strengthen information-sharing and technical support for countries leading to a concerted increase in ambition. This could include further ambition concerning methane reporting under the CCAC's Oil and Gas Methane Partnership, described in [Section 7B\(ix\)](#). This could also include coordinating support for

“National Methane Offices,” and other methane mitigation architecture, adopting the institutional strengthening approach that has been “a major factor in the success” of developing countries achieving Montreal Protocol objectives (see [Section 11](#)).⁹³³ The November 2022 Ministerial communiqué raised the possibility of establishing a Technology and Economic Assessment Panel on Methane (since established),⁹³⁴ to advise partners on “innovative methane mitigation technologies, including methane removal and sector-specific methane reduction technologies.”⁹³⁵

In November 2021, the CCAC Ministerial launched the CCAC Methane Flagship, “which, starting in 2022, will foster and strengthen high level commitments to reduce methane, amplify and raise awareness, support planning and delivery of strategies and plans, provide analysis and tools to support action, and scale up financing.”⁹³⁶ The CCAC’s efforts resulting in the *Global Methane Assessment* raised awareness of and brought political attention to the opportunities of methane abatement.⁹³⁷ In addition to their work with the *Global Methane Assessment*, the CCAC’s work with Shindell’s group at Duke University resulted in a publicly accessible, online methane mitigation tool.⁹³⁸ The CCAC plans to improve this tool to make it more user-friendly, including by continuously updating methane emissions and existing metrics for quantifying co-benefits. This will enable a national level overview of the relevant measures and related co-benefits, including job creation.

The CCAC is also planning to develop a *Global Methane Policy/Implementation Tracker* to record and quantify progress on the implementation of methane-related measures, policies, and regulations. In addition, the CCAC is hosting three hubs that will be working with governments and other stakeholders on agriculture, waste, and oil and gas. Notably, the UN Economic Commission for Europe (UNECE) joined the CCAC in 2015 with the aim of contributing to CCAC’s work by sharing experience, knowledge, and best practices, including with respect to UNECE’s amended Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone (Gothenburg Protocol) to LRTAP.⁹³⁹ This relationship can help inform efforts to develop a binding global methane agreement to address climate emergency and promote peace and security. The LRTAP Convention and the Gothenburg Protocol are discussed further below in [Section 10](#).

In September 2022, the CCAC and the Global Methane Initiative (GMI) convened a Global Methane, Climate and Clean Air Forum with the goal of bringing together policymakers, industry leaders, technical experts, and researchers from around the world.⁹⁴⁰ Discussion included opportunities to protect the climate and improve air quality, with a special focus on methane, in all emitting sectors. Several announcements of new financing projects were made following this forum, which have been described throughout [Section 7](#), [Section 10A](#), and [Section 11](#). Discussion highlighted the need for science-based fast climate action “given the narrow window to achieve the goals of the Paris Agreement on climate change,”⁹⁴¹ policy approaches that will catalyze adoption of mitigation technology, and financial support to make the necessary transitions.

In November 2022, the CCAC hosted a ministerial meeting at COP27 wherein ministers and leaders of CCAC partners reaffirmed and renewed their commitment to reduce methane and other SLCPs and to launch new collaborative actions to further drive emissions reductions.⁹⁴² The CCAC partners welcomed the possibility of exploring the formation of a Technology and Economic Assessment Panel on Methane to advise them on methane mitigation technologies⁹⁴³ and requested the CCAC Scientific Advisory Panel to develop a proposal to highlight and better calculate near-term climate benefits of methane action.⁹⁴⁴ The CCAC board has since approved

the formation of a pilot Technology and Economic Assessment Panel (TEAP) on Methane to develop and share knowledge with countries about promising, innovative, and underfinanced SLCP mitigation strategies.⁹⁴⁵ The TEAP launched its first report in November 2023.⁹⁴⁶ The CCAC is also continually strengthening its Scientific Advisory Panel (SAP) to provide needed support, including on methane mitigation science.⁹⁴⁷

In October 2023, the CCAC co-released a report with the IEA on *The Imperative of Cutting Methane from Fossil Fuels*. The report outlined in detail the necessity of rapid cuts to methane from fossil fuels, as well as the benefits for health and climate of such reductions.⁹⁴⁸

In December 2023, the CCAC co-hosted the Global Methane Pledge Ministerial at COP28.⁹⁴⁹ The Global Methane Pledge Ministerial, which showcased national actions and catalytic grant funding to deliver on the goal to cut methane at least 30% by 2030. Among the announcements made were over \$1 billion in new grant funding for methane action mobilized since COP27, the full launch of the Methane Alert and Response System, a new Data for Methane Action Campaign, and a new platform to better track waste methane emissions in cities around the world. Also announced was the joining of Canada, Federated States of Micronesia, Germany, Japan, and Nigeria as Global Methane Pledge Champions, while Turkmenistan, Kazakhstan, Kenya, Kosovo, Romania, and Angola joined the Global Methane Pledge (*see Section 10* for further details).⁹⁵⁰

The CCAC also hosted the CCAC Ministerial at COP28, which focused on financing SLCPs as well as immediate action to reduce methane and other SCLPs. Ministers announced the pilot work of the new TEAP which highlights context-specific, practical mitigation measures aimed at closing finance gaps.⁹⁵¹ The ministerial meeting also announced that a global assessment on the cost of inaction on SLCPs and an assessment on the integrated agriculture and food systems will be prepared in advance of COP30.⁹⁵² Additionally, Ministers called for increased efforts to support highly vulnerable Small-Island Developing States (SIDS), especially in the context of rapid mitigation of methane and black carbon to slow sea level rise and increasing frequency and intensity of climate-exacerbated weather events.⁹⁵³ Further contributions to the CCAC Trust Fund were announced from the European Commission, Finland, Germany, Ireland, Japan, Monaco, and Sweden amounting to an estimated \$15 million (*see Section 10* for further details).⁹⁵⁴

The Lowering Organic Waste Methane (LOW-Methane) initiative was also launched at COP28. The ambition of LOW-Methane is to deliver at least 1 million metric tons of annual waste-sector methane reductions well before 2030 with 40 subnational jurisdictions and their national government counterparts, including by working to unlock over \$10 billion in public and private investment. The consortium effort will be supported by a coordination group housed within the CCAC (*see Section 10* for further details).⁹⁵⁵

In addition, CCAC launched the CCAC Clean Air Flagship at COP28. The Flagship will bring more attention to the global air pollution crisis, highlight readily available solutions, elevate ongoing regional collaboration, amplify and strengthen multi-level government cooperation, and offer direct support to countries including through policy and integrated climate and clean air planning activities and sector specific action via CCAC Sector Hubs, and capacity support for integrated inventories, monitoring and air pollution modelling, and implementation of related priority measures and action plans.⁹⁵⁶ The Flagship will support science cooperation and information-sharing initiatives, especially with respect to methane,⁹⁵⁷ and strengthen and support

regional and sub-regional cooperation, and the implementation of political commitments to achieve the WHO Air Quality Guidelines and GMP.⁹⁵⁸

vi. The Global Waste Initiative 50 by 2050

Egypt, which held the COP27 Presidency in 2022, launched the *Global Waste Initiative 50 by 2050* in November 2022. This initiative estimates that the waste sector contributes 20% of global methane emissions.⁹⁵⁹ Methane emissions from landfilling of solid waste reached about 1.3 Mt CH₄ in 2010, which was projected to increase if waste management practices did not improve.⁹⁶⁰ The Global Waste Initiative will develop a platform for partnerships and projects on mitigation and adaptation and support knowledge and innovation transfer of infrastructure for waste management.⁹⁶¹ The COP27 also hosted a session on creating a “Green Africa,” including the goal of cutting waste by 50% in African countries.⁹⁶²

vii. International Fund for Agriculture Development’s Reducing Agricultural Methane Program (RAMP)

At COP28, the International Fund for Agriculture Development’s Reducing Agricultural Methane Program (RAMP) announced that it will, with funding from the U.S. State Department and Global Methane Hub, support 15 governments to incorporate agricultural methane into their nationally determined contributions and 10 governments to build investment pipelines in low-methane agricultural development.⁹⁶³

viii. International Working Group to Establish Universal Approach to Measuring, Monitoring, Reporting, and Verifying Greenhouse Gas Emissions Across the Natural Gas Supply Chain

At COP28, the U.S., the European Commission, and 12 other natural gas importing and exporting countries formed an international working group to advance comparable and reliable information about methane and CO₂ emissions across the natural gas supply chain to drive global emissions reductions.⁹⁶⁴

ix. United Arab Emirates Declaration on Sustainable Agriculture, Resilient Food Systems, and Climate Action

At COP28, 159 countries signed the UAE’s Declaration on Sustainable Agriculture, Resilient Food Systems, and Climate Action. The Declaration affirmed that “agriculture and food systems must urgently adapt and transform in order to respond to the imperatives of climate change.”⁹⁶⁵ While there is no explicit mention of the need to reduce methane emissions from the agriculture sector, the signatories to the Declaration pledged to work collaboratively and expeditiously on a number of objectives including maximizing “the climate and environmental benefits - while containing and reducing harmful impacts - associated with agriculture and food systems by conserving, protecting and restoring land and natural ecosystems, enhancing soil health, and biodiversity, and shifting from higher GHG-emitting practices to more sustainable production and consumption approaches.” Countries committed to report annually on their progress and increase finance to adapt and transform agriculture and food systems to address climate change.⁹⁶⁶

x. Net-Zero Producers Forum

In April 2021, Canada, Norway, Qatar, Saudi Arabia, and the United States announced their intention to establish the Net-Zero Producers Forum, which convened its first ministerial meeting in March 2022.⁹⁶⁷ The Forum is designed to “develop pragmatic net-zero emission strategies, including methane abatement, advancing the circular carbon economy approach, development and deployment of clean-energy and carbon capture and storage technologies, diversification from reliance on hydrocarbon revenues, and other measures in line with each country's national circumstances.”⁹⁶⁸ In May 2022, the UAE joined as a member of the Forum.⁹⁶⁹ At COP28, the Forum launched the Upstream Methane Abatement Toolkit.⁹⁷⁰ The Upstream Methane Abatement Toolkit is a resource developed to highlight current measures and lessons learned regarding the implementation of methane abatement technologies.⁹⁷¹

xi. World Bank Global Gas Flaring Reduction Partnership and Zero Flaring Initiative/Global Flaring and Methane Reduction (GFMR)

At COP28, the World Bank re-launched the Global Gas Flaring Reduction Partnership as the Global Flaring and Methane Reduction Partnership (GFMR), a new multi-donor trust fund focused on helping developing countries cut CO₂ and methane emissions from the oil and gas industry.⁹⁷²

Evolving from its predecessor, the Global Gas Flaring Reduction Partnership, GFMR develops country-specific flaring reduction programs, conducts research, shares best practices, raises awareness, and secures global commitments to end routine flaring, which results in methane emissions, and advances flare measurement and reporting.⁹⁷³ Access to project development and financing support through the re-launched GFMR will be subject to a commitment to measure and report emissions through the Oil and Gas Methane Partnership 2.0 Framework, to achieve near-zero absolute methane emissions by 2030 by reducing methane intensity to below 0.2%, and to achieve zero routine flaring by 2030.⁹⁷⁴ The GFMR has \$255 million in new grant funding supported by financial contributions from the UAE, U.S., Norway, BP, ENI, Equinor, Occidental, Shell, and TotalEnergies.⁹⁷⁵

The GFMR also seeks commitments to the Zero Routine Flaring by 2030 Initiative. Governments and companies that participate in the World Bank Zero Routine Flaring Initiative commit to end routine flaring by 2030.⁹⁷⁶ A wide range of stakeholders, including 34 governments, 54 oil and gas companies, and 15 development organizations, support the Zero Routine Flaring by 2030 Initiative.⁹⁷⁷ The GFMR is developing a Global Gas Flaring Explorer, an online platform that will deliver real-time monitoring of gas flaring globally, in collaboration with the Oil and Gas Climate Initiative and the Payne Institute (Colorado School of Mines).

The 2022 Global Gas Flaring Tracker Report found that ten countries account for 75% of all gas flaring and 50% of global oil production: “Seven of the top 10 flaring countries have held this position consistently for the last 10 years: Russia, Iraq, Iran, the U.S., Venezuela, Algeria, and Nigeria. The remaining three (Mexico, Libya, and China) have shown significant flaring increases in recent years.”⁹⁷⁸

xii. World Bank Global Methane Reduction Platform for Development (CH4D)

At COP28, the World Bank launched the Global Methane Reduction Platform for Development (CH4D) to support low- and mid-income countries to realize the “methane triple-wins” of abating emissions, enhancing resilience, and empowering livelihoods. Through partnerships, including with the CCAC Methane Roadmap Action Programme (M-RAP), CH4D will mobilize expertise, affordable technologies, and catalytic finance for methane abatement in the agriculture and waste sectors.⁹⁷⁹

B. Industry-led initiatives

i. American Petroleum Institute Methane Action Plan

In 2023, the American Petroleum Institute released its Methane Action Plan.⁹⁸⁰ The Plan highlights the work done by the oil and gas industry’s Environmental Partnership to reduce methane. The Environmental Partnership aims to reduce methane through the following actions:⁹⁸¹

- Reducing flaring through facility design, takeaway capacity planning and alternative beneficial use.
- Replacing, removing or retrofitting high-bleed pneumatic controllers with low- or zero-emitting devices.
- Monitoring manual liquids unloading to minimize emissions by ensuring all wellhead vents are closed to the atmosphere.
- Minimizing compressor emissions by implementing design and operation changes.
- Detecting and repairing leaks through regular component inspections.
- Minimizing pipeline blowdown emissions through operational changes prioritizing alternative beneficial use of gas that would otherwise be vented.

ii. Coalition for LNG Emission Abatement Towards Net Zero (CLEAN)

In July 2023, the European Commission, alongside the U.S., Japan, South Korea, and Australia agreed to form a new monitoring mechanism for methane emissions from the LNG sector.⁹⁸² The Coalition for LNG Emission Abatement Towards Net Zero (CLEAN) was announced at a conference in Tokyo.⁹⁸³ The Coalition of LNG buyers—including the Korean Gas Corporation (KOGAS) and JERA—will ask major LNG producers to provide basic data on emissions such as volume and intensity as well as reduction targets and measures being taken.⁹⁸⁴ Participation will be voluntary and the results will be disclosed by the government-backed Japan Organization for Metals and Energy Security, known as Jogmec.⁹⁸⁵

iii. Dairy Methane Action Alliance

At COP28, a group of global food companies, led by the Bel Group, Danone, General Mills, Kraft Heinz, Lactalis USA, and Nestlé, was convened by the EDF to launch the Dairy Methane Action Alliance (DMAA).⁹⁸⁶ Members of the DMAA commit to reporting their methane emissions by mid-2024 and producing methane action plans by the end of 2024.⁹⁸⁷

iv. Global Methane Initiative

The Global Methane Initiative (GMI) is a public-private partnership that covers the three major sectors (energy production, agriculture, and waste) and promotes methane capture and use.⁹⁸⁸ GMI facilitates the international exchange of information and technical assistance. GMI includes 46 countries that represent around 75% of the world's anthropogenic methane emissions, including the U.S., Canada, Argentina, Brazil, Russia, China, India, and Australia.⁹⁸⁹ GMI claims that its support has enabled partner countries to reduce methane emissions by more than 500 Mt CO₂e since 2004.⁹⁹⁰

v. Methane Abatement in Maritime Innovation Initiative (MAMII)

The Methane Abatement in Maritime Innovation Initiative (MAMII) was launched in September 2022 by a coalition of shipping leaders, aims to reduce the environmental impact of liquefied natural gas (LNG) in shipping, MAMII was formed to identify, accelerate, and advocate technology solutions for the maritime industry to measure and manage methane emissions activity.⁹⁹¹ Energy companies TotalEnergies and Chevron, and gas carrier Seapeak joined MAMII in February 2024. These three companies join the now more than 20 members of MAMII.⁹⁹²

vi. The Methane Guiding Principles

The 50 oil and gas industry signatories to the Methane Guiding Principles have committed to reporting publicly on how they are meeting the intent of five principles: including, continual reduction of methane emissions; improving the accuracy of emissions data; advocating sound policy and regulations on methane emissions, and increasing transparency.⁹⁹³ The commitment to reducing methane emissions includes the implementation of LDAR programs and reduction of venting and fugitive emissions. The group also released a toolkit for policymakers.⁹⁹⁴

At COP28, along with the International Association of Oil and Gas Producers, the Oil and Gas Climate Initiative, and the Environmental Defense Fund, the Methane Guiding Principles announced an intention to build a framework to share expertise to help companies reduce methane emission and flaring in line with the Oil and Gas Decarbonization Charter (i.e. achieving near-zero methane emissions and eliminating routine flaring by 2030).⁹⁹⁵ In addition, the Methane Guiding Principles launched the Advancing Global Methane Reductions initiative, which aims to accelerate 20 countries' methane emissions reductions.⁹⁹⁶

vii. Oil and Gas Climate Initiative

The Oil and Gas Climate Initiative (OGCI) is a CEO-led initiative in which member companies agree to several commitments and principles. In particular, OGCI members commit, by 2025, to a collective average methane intensity of aggregated upstream oil and gas operations of well below 0.20%, from a 2017 baseline of 0.30%. They also commit to reduce aggregate upstream carbon intensity from 23 kg of GHG per barrel of oil or gas in 2017 to 17 kg by 2025 and to support explicitly the aims of Zero Routine Flaring by 2030.⁹⁹⁷ OGCI reported a collective methane intensity of 0.17% in 2021,⁹⁹⁸ and in 2022 launched the Aiming for Zero Methane Emissions Initiative, with plans to eliminate the oil and gas industry's methane footprint by 2030.⁹⁹⁹ The Chair of the OGCI Executive Committee, Bjorn Otto Sverdrup, underscored the need for further

action at Global Energy Transition in June 2023: “It’s time to move beyond incremental improvement,” Sverdrup said, pointing to “zero-tolerance” policies already in place for oil spills and safety incidents. “Let’s try to deploy that mindset. All methane emissions can and should be avoided.”¹⁰⁰⁰ OGCI, together with industry associations Ipieca and IOGP have released a recommended practices guide to help operators select and deploy methane detection and quantification technologies.¹⁰⁰¹ At COP28, OGCI announced that it will be expanding its Satellite Monitoring Campaign to provide data to reduce emissions from large-scale methane plumes and flares, supported by in-kind contributions from OGCI companies.¹⁰⁰²

viii. Oil and Gas Decarbonization Charter (OGDC)

At COP28, companies representing more than 40% of global oil companies signed on to a voluntary decarbonization initiative called the Oil and Gas Decarbonization Charter (OGDC). National Oil Companies represent over 60% of the signatories to the Charter.¹⁰⁰³ Signatories have pledged to reduce their emissions to be net-zero operations by 2050 at the latest, and to end routine flaring by 2030, as well as to achieve near-zero upstream methane emissions by 2030.¹⁰⁰⁴ The Charter has come under criticism from a number of NGOs for its failure to impose mandatory targets and standards on the oil and gas industry.¹⁰⁰⁵

ix. Oil and Gas Methane Partnership

The Oil and Gas Methane Partnership (OGMP), a CCAC initiative (with UNEP, the European Commission, and EDF), advances methane emissions reporting, including through the OGMP 2.0 Reporting Framework. The Partnership now represents over 120 companies with assets in more than 60 countries on five continents and covers over 35% of the world’s oil and gas production and over 70% of LNG flows.¹⁰⁰⁶

The OGMP 2.0 Reporting Framework requires companies to report methane emissions from sources across the entire oil and gas value chain with a target to reduce emissions by 50–75% by 2030.¹⁰⁰⁷ OGMP 2.0 members are expected to provide continually updated implementation plans showing continuous improvement in measurement, coverage, and technical guidelines.¹⁰⁰⁸ The EU intends to build on this framework in developing its measurement, reporting, and verification requirements for the energy sector.¹⁰⁰⁹ To achieve the OGMP 2.0 Gold Standard (the highest possible standard under the framework) companies must demonstrate an explicit and credible path to required reporting levels within the required period.¹⁰¹⁰

x. The World Biogas Association

The World Biogas Association serves as a global trade association for biogas, landfill gas, and anaerobic digestion industry sectors.¹⁰¹¹ The Association provides members with publications such as a Global Biogas Industry Directory, data on the size and growth of global biogas markets, and analyses demonstrating the industry’s environmental and economic potential.¹⁰¹² The Association convenes the World Biogas Summit, which in 2021 focused on methane mitigation.¹⁰¹³

At COP28, the World Biogas Association co-hosted side events on the role of the waste sector in delivering the Global Methane Pledge, including an event in partnership with the CCAC, the International Solid Waste Association, and IGSD.¹⁰¹⁴

C. Performance rating and certification initiatives

Increased attention to fugitive methane emissions from the oil and gas sector is driving interest in lower methane-intensity sources. This has prompted a rise in certification programs using a range of approaches that require scrutiny and the development of criteria for assessing credibility and a framework for improving the validation of methane intensity claims.¹⁰¹⁵ It is useful to note that the Payne Institute for Public Policy (Colorado School of Mines) has published a glossary of terminology of oil and gas production operations to assist in promoting a common understanding and interpretation of terms.¹⁰¹⁶

i. MiQ, Veritas, Equitable Origin, Trustwell

RMI and SYSTEMIQ established MiQ, an independent not-for-profit organization. MiQ developed a certification system based on methane intensity that grades natural gas volumes produced and producer performance. MiQ indicates that it is the only major certification system based largely on bottom-line methane intensity, and estimates that it already certifies 4% of the global gas market.¹⁰¹⁷ MiQ maintains a digital registry of these certificates to avoid double-counting.¹⁰¹⁸ MiQ incorporates the Natural Gas Sustainability Initiative protocol or alternate “robust alternative methodologies” for calculating methane intensity.¹⁰¹⁹ It requires monitoring at source and facility level, and it specifies frequencies and minimum detection levels for such monitoring, with grade increases linked to “more robust emissions management.” Qualification for certification is based on methane intensity, company practices, and monitoring technology deployment, and methane intensity must be less than or equal to 2% to qualify.¹⁰²⁰ In June 2023, MIQ-Highwood released an index in the U.S. for integrating inventory and direct measurement data for national-level emissions intensity quantification.¹⁰²¹

Additional voluntary certification schemes have been developed by Veritas (led by GTI Energy), Equitable Origin,¹⁰²² and Trustwell (by Project Canary).¹⁰²³

ii. Natural Gas Sustainability Initiative (NGSI)

The Natural Gas Sustainability Initiative (NGSI) developed the NGSI Methane Emissions Intensity Protocol as a voluntary approach for companies to calculate methane emissions intensity.¹⁰²⁴

iii. Project Canary

Project Canary is a company of scientists, engineers, financial analysts, and industry experts focused on measuring, analyzing, and visualizing corporate emissions profiles and environmental risk assessments, to provide auditable emissions data and information for gas and gas-source certifications, including the Trustwell Responsible Gas certification.¹⁰²⁵ Project Canary’s emissions management program provides a platform for 24/7 real-time quantification and understanding of emissions data.¹⁰²⁶ For example, the Project Canary platform can “provide an inventory of emissions generated by all sources on a pad, from consistent flux of small emissions off tanks, to the larger discrete emissions events.”¹⁰²⁷ Project Canary’s environmental assessment program includes qualitative and quantitative Trustwell operational performance reviews of wellbores/facilities around the world.¹⁰²⁸ The environmental assessment program includes Colorado State University Center for Energy Water Sustainability-validated freshwater-use

metrics, to enable certification of freshwater resource use as part of a responsibly sourced gas environmental social governance strategy.¹⁰²⁹ Further, the Project Canary SENSE platform combines data from all sensors, equipment, inventory, and emissions factors, using ML-based regression and Gaussian plume models to quantify total site operational and fugitive methane emissions.¹⁰³⁰ The Project Canary continuous emissions monitoring platform and technologies are being deployed around the world, including at Kellas Midstream, the “company responsible for transporting 40 percent of the UK’s domestic gas production.”¹⁰³¹

8. Monitoring, data, and measurement systems add transparency and accountability

Methane emissions are currently estimated based on a range of existing reporting regimes and protocols, including the UNFCCC, the Global Reporting Initiative (GRI), and national reporting programs. Increasingly sophisticated systems to measure and monitor methane emissions will add transparency and accountability to global methane reduction efforts. In particular, these systems will be essential to ensuring the world is on track to securing the 30% (or greater) reductions in methane emissions necessary to slow the world’s near-term warming as called for in the GMP. Monitoring systems help provide critical information that the public can use to hold companies and countries accountable.¹⁰³²

Monitoring systems include satellites, aircraft-based flyover technologies that are being deployed to identify more exact infrastructure emissions source points, and on-the-ground handheld infrared and other monitoring devices to pinpoint emitting machinery.¹⁰³³

The rapid improvement in methane detection technologies and data analytics is fueling a boom in private monitoring and data analytics companies.¹⁰³⁴ Below is a non-comprehensive list of initiatives aimed at improving methane monitoring and accounting. These examples suggest how a combination of public and private monitoring services could provide a “system of systems” for companies, regulators, researchers,¹⁰³⁵ and citizens interested in tracking and mitigating methane emissions.¹⁰³⁶

Methane measurement and monitoring initiatives include the following:

A. Carbon Mapper

In April 2021, Carbon Mapper, a philanthropically funded not-for-profit organization, announced a plan to launch a satellite constellation to pinpoint methane emissions, in partnership with the State of California, NASA’s Jet Propulsion Laboratory, Planet, the University of Arizona, Arizona State University, High Tide Foundation, and RMI.¹⁰³⁷ The first two satellites are in development and will be launched in early 2024.¹⁰³⁸ Expansion to an operational multi-satellite constellation will start in 2025.¹⁰³⁹ Additionally, Carbon Mapper is developing a data portal in collaboration with California’s Air Resources Board to make the data publicly available.¹⁰⁴⁰ In 2023, Carbon Mapper is conducting remote-sensing surveys of more than 1,000 managed landfills and open dumpsites across the U.S., Canada, and locations in Latin America, Africa, and Asia, with the intent to expand coverage in 2024 using satellites.¹⁰⁴¹ At COP28, Carbon Mapper announced plans for new satellite launches in 2024.¹⁰⁴²

B. Copernicus

Copernicus is the EU's Earth observation program that provides information services with data drawn from satellite observation and in-situ (non-space) systems.¹⁰⁴³ The European Commission manages Copernicus and implements the program in partnership with Member States, European agencies, and centers.¹⁰⁴⁴ In addition to collecting information from in-situ systems, the European Union will place a constellation of about 20 satellites in orbit before 2030.¹⁰⁴⁵ Among the six information services, the Copernicus Atmosphere Monitoring Service,¹⁰⁴⁶ the Copernicus Land Monitoring Service,¹⁰⁴⁷ and the Copernicus Climate Change Service¹⁰⁴⁸ are closely relevant to methane monitoring. All of these information services are open for free access.

C. Climate Trace

Climate TRACE is a non-profit coalition of organizations working together to create an inventory of greenhouse gas emissions.¹⁰⁴⁹ The inventory uses satellites, other remote sensing techniques, and artificial intelligence to deliver a detailed look at global emissions including methane.¹⁰⁵⁰

D. Data to Methane Action Campaign

At COP28, the Global Methane Hub, in collaboration with IMEO and its partners, launched the Methane Action Campaign to comprehensively deliver increased funding to enable governments, businesses, and other actors to radically reduce methane emissions, including harmful leaks, and drive effective policy change through never-before-leveraged data. At COP28, the Global Methane Hub announced \$10 million in seed funding toward the Campaign and a funding target of \$300 million by COP29.¹⁰⁵¹

E. Earth Surface Mineral Dust Source

The National Aeronautics and Space Administration developed the Earth Surface Mineral Dust Source (EMIT) mission to map key minerals in deserts and advance understanding of the effect of airborne dust on climate but it also detects methane.¹⁰⁵² EMIT's monitoring, which covers the oil and gas production, waste, and energy sectors, has the capability to detect far larger emissions than those measured by previous airborne surveys.¹⁰⁵³ Since being installed on the International Space Station in July 2022, EMIT identified more than 50 methane super-emitters in Central Asia, the Middle East, and the Southwestern U.S.¹⁰⁵⁴ As EMIT monitors areas that are also methane hotspots, it is expected to detect more super-emitters in the future.¹⁰⁵⁵ The capabilities of EMIT will be used to inform the design of higher-resolution instrumentation launched on two satellites in late 2023.¹⁰⁵⁶

F. Environmental Defense Fund's MethaneSAT

The EDF's MethaneSAT program launched a new methane satellite on 4 March 2024 to provide regular monitoring of global oil and gas operations, including to identify emissions across large geographic areas and to measure emissions at predetermined locations.¹⁰⁵⁷

G. GHGSat

GHGSat, a global emissions monitoring company, signed a memorandum of intent in 2019 with the Canadian Space Agency and the European Space Agency.¹⁰⁵⁸ GHGSat will be collaborating with the International Methane Emissions Observatory by providing free data on methane emissions from their satellites.¹⁰⁵⁹ On 4 May 2022, GHGSat shared its first findings using satellite technology of livestock methane emissions from a farm in Joaquin Valley, California.¹⁰⁶⁰ In August 2022, GHGSat detected emissions from landfills in Buenos Aires, Delhi, Lahore, and Mumbai, finding that landfills contribute 6–50% of reported city-level emissions.¹⁰⁶¹ At COP28, GHGSat announced a strategic collaboration with Al Yah Satellite Communications Company (ADX: YAHSAT) and Abu Dhabi National Oil Company (ADNOC), aimed at reducing methane emissions from the global energy sector.¹⁰⁶²

H. Greenhouse Gas Observing Satellite

The Japanese Ministry of Environment, National Institute for Environmental Studies, and the Japanese Aerospace Exploration Agency jointly manage the Greenhouse Gas Observing Satellite (GOSAT) program, consisting of two satellites that have already been launched (GOSAT [“Ibuki”] and GOSAT-2) and a third (Global Observing SATellite for Greenhouse gases and Water cycle “GOSAT-GW”) that is scheduled to launch March 2024.¹⁰⁶³ The satellites are used for GHG emissions monitoring and meteorological studies.¹⁰⁶⁴

I. International Energy Forum’s Methane Initiative and Methane Measurement Methodology Project

The International Energy Forum (IEF)’s Methane Initiative will develop a methane emissions measurement methodology that can standardize data collection.¹⁰⁶⁵ IEF’s Methane Measurement Methodology Project aims to assist IEF Member States in their development of credible methane reduction plans for the energy sector based on best available data for methane emissions.¹⁰⁶⁶

J. International Methane Emissions Observatory

Launched on 31 October 2021 at the G20 Summit, the International Methane Emissions Observatory (IMEO) is a UNEP initiative with support from the European Commission and other governments that will integrate methane emission data from multiple sources into a coherent dataset that will describe the confidence in each data element.¹⁰⁶⁷ The IMEO will initially focus on the energy sector and later expand to waste and agriculture.¹⁰⁶⁸ Additionally, the IMEO will play an important role in implementing the GMP by helping countries prioritize actions and by monitoring commitments.¹⁰⁶⁹ UNEP hosts the IMEO, with public funding support of €100 million over five years (including funding from the European Commission as a founding member).¹⁰⁷⁰ IMEO will closely coordinate with the CCAC, among other organizations, including on incorporation and analysis of data from OGMP 2.0, mentioned in [Section 7](#).¹⁰⁷¹ The IMEO has published three annual reports, *An Eye on Methane*, which describe progress on OGMP 2.0 and remaining challenges in methane monitoring and measurement.¹⁰⁷² In November 2022, UNEP and IMEO launched the Methane Alert and Response System (MARS) to enhance detection of methane super-emitters, alert relevant stakeholders, and support and track methane mitigation progress.¹⁰⁷³ MARS is supported with a data from various stakeholders including as an example,

Karryos, a global technology company acting as a platform to access consolidated data from methane detecting satellites into one platform.¹⁰⁷⁴

At COP28, results of the MARS pilot period went live, publicly sharing satellite data for notified emissions events.¹⁰⁷⁵ As a result of the work of the IMEO, a large methane leak in Argentina has been halted.¹⁰⁷⁶ IMEO is also supporting 34 new science studies to fill existing knowledge gaps about the location and magnitude of emissions, including the first scientific measurement campaigns in sub-Saharan Africa (Angola and Gabon) and the Middle East (Oman).¹⁰⁷⁷

K. Oil and Climate Index Plus

Researchers from RMI, Stanford University, the University of Calgary, and Koomey Analytics developed the Oil and Climate Index Plus (OCI+) tool as a response to opaque, self-reporting of GHG emissions from the oil and gas sector.¹⁰⁷⁸ The OCI+ presents a full life-cycle assessment of GHG emissions for half of global oil and gas production. The OCI+ tool and the accompanying report conclude that significant fossil fuel emissions occur not only at the point of combustion but also at the wellhead, and during processing, refining, and transportation.¹⁰⁷⁹ The report also refers to cutting methane as “the highest priority for the oil and gas sector.”¹⁰⁸⁰ OCI+ could be useful for financial institutions to inform near-term investment decisions that reduce methane in their energy portfolios.¹⁰⁸¹

L. U.S. Greenhouse Gas Center

The U.S. launched the Greenhouse Gas Center at COP28. The Center will serve as a hub for collaboration between agencies across the U.S. government as well as non-profit and private sector partners.¹⁰⁸² Data, information, and computer models from observations from the International Space Station, various satellite and airborne missions, and ground stations are available online. The Center’s data catalogue includes a curated collection of data sets that provide insights into greenhouse gas sources, sinks, emissions, and fluxes.¹⁰⁸³ Initial information in the Center’s website is focused on estimates of greenhouse gas emissions from human activities, naturally occurring greenhouse gas sources and sinks on land and in the ocean, and large methane emission event identification and quantification, using aircraft and space-based data.¹⁰⁸⁴

M. Veritas

GTI has created a series of protocols to ensure adequate assessment of methane from natural gas.¹⁰⁸⁵ The Veritas protocols provide a guiding framework for operators across the natural gas supply chain to use measurements to estimate their methane emissions. As part of protocol development, 14 operators from across the natural gas supply chain participated in pilot demonstrations of the protocols in 2022. These operators executed draft versions of the protocols to examine their expected emissions and deploy a variety of detection and quantification technologies, from handheld instruments to aircraft surveys.¹⁰⁸⁶

N. Waste Methane Assessment Program

The Waste Methane Assessment Platform (WasteMAP), was created by the Rocky Mountain Institute and Clean Air Task Force, with funding from the Global Methane Hub, to improve waste

methane emissions transparency, highlight mitigation opportunities and best practices to reduce solid waste methane emissions.¹⁰⁸⁷ WasteMAP consolidates modeled and reported waste data and methane emissions data from Carbon Mapper, Climate TRACE, EDGAR, RMI, SRON, UNFCCC, UN-Habitat, and the World Bank.¹⁰⁸⁸ A key feature of WasteMAP is the decision support tool (DST), which allows users to estimate baseline methane emissions from current waste management practices in a given city and project alternative methane emission scenarios with improved waste management practices.¹⁰⁸⁹

9. Building an accountability and enforcement strategy using robust emissions monitoring systems

As discussed in [Section 8](#), emissions monitoring systems add transparency and accountability to emissions reduction efforts. The technologies underpinning these systems are poised to revolutionize the information available by making once invisible emissions visible to the public, to regulatory agencies, and to owners and operators of methane sources across all sectors. These monitoring systems, when coupled with an accountability and enforcement strategy, will be essential to ensuring the world is on track to secure maximum reductions in methane emissions.

Effective accountability and response mechanisms to tackle emissions sources would include several components. At the most basic level, these include: 1) inventory by emissions total, sector, and location; 2) baseline emissions level by jurisdiction; 3) reduction goal by emissions total and sector; and 4) monitoring and reporting, providing for full transparency. In addition, these components include the abilities: 1) to identify and alert organizations responsible for the emitting assets; 2) to make responsible regulatory agencies aware of the emissions; and 3) to ensure that the emissions data is available in an accessible and timely manner to civil society watchdogs, media, and affected communities.

An effective accountability and enforcement strategy should incorporate “carrot” (incentive) and “stick” (e.g., regulatory, “name and shame”) mechanisms. The strategy should encompass operators of methane sources, responsible government agencies, including prosecutors, and civil society, including affected communities. Further, the strategy should also identify solutions for addressing detected emissions and connect operators to technical capacity and financial resources, as appropriate. Additional capacity building that reflects training and other proper incentives are needed for stakeholders involved in the accountability aspects of the strategy. Such stakeholders include emissions-source operators, regulatory agencies, financial risk agencies, and watchdogs.

An accountability strategy could have several components, including:

- An asset map and inventory of methane sources with geospatial coordinates that allow detailed identification of sources and related contacts for operators;
- A “phone book” of the corresponding control agents for each source point of emissions (federal, state, local, private sector, etc.) based on location and type of asset;
- A mechanism for accessing emissions data from monitoring systems and rapidly converting the data into usable formats for accountability actors; *and*

- A coordination and communications network of civil-society actors by region, country, subnational jurisdiction where emissions are significant, to strengthen collective civil-society capacity to act as emissions data emerges.

The National Academies of Sciences recently published a framework for evaluating greenhouse gas emissions information, which advocates for the following pillars: (1) usability and timeliness; (2) information transparency; (3) evaluation and validation; (4) completeness; (5) inclusivity; and (6) communication.¹⁰⁹⁰

At the government level, National Methane Offices or equivalent responsible units could be established and assume responsibility for developing and maintaining emissions inventories and for identifying and monitoring key source points of emissions. These Offices would also liaise with corresponding subnational agencies to build effective accountability systems, establish procedures, and identify specialists and other stakeholders that can be relied upon for assistance with the deployment of accountability actions and systems. These Offices would be arranged regionally and at the subnational level, to encourage cooperation and share information and mitigation strategies.

A key component of incentivizing mitigation actions is for sources of identified methane emissions to have access to technologies and financing to implement mitigation solutions. The CCAC's new methane TEAP is a valuable tool to assess and recommend technology solutions on a regular basis to encourage continued innovation and support for implementation of best practices. A CCAC-housed Methane Tracker could also support this work.

10. International efforts, including the COP28 Methane Summit and the Global Methane Pledge, are catalyzing bilateral and multilateral actions to curb methane

Methane emissions from any source anywhere affect the global climate, as well as public health and environment, because methane is a well-mixed greenhouse gas and contributes to increasing background tropospheric ozone pollution. Methane mitigation by any and all countries is therefore the best means to achieve rapid and effective reductions of methane emissions wherever these emissions occur.¹⁰⁹¹

There have been numerous international agreements, commitments, pledges, initiatives, and measures seeking to bolster bilateral and multilateral efforts to cut methane emissions. A detailed description of these efforts is described in this section (*see also Section 7*). Key international efforts include the Global Methane Pledge (now endorsed by 156 countries and the European Union),¹⁰⁹² the 95% of countries that directly reference or plan to reference methane mitigation in its Paris Agreement NDCs,¹⁰⁹³ and bilateral agreements such as the *Sunnylands Statement*.¹⁰⁹⁴ The recent *COP28 Methane Summit* recognized methane's essential role in rapidly cutting methane emissions to ensure peak-warming reduction and limit the likelihood of overshooting 1.5 °C.¹⁰⁹⁵ COP28's Global Stocktake Agreement, including recognition of the urgent need to accelerate and substantially reduce "non-carbon-dioxide emissions globally ... in particular methane emissions by 2030," further illustrates the inevitability of a global methane agreement.¹⁰⁹⁶ International

efforts build upon impressive and increasingly strong domestic efforts to curb methane detailed in this *Primer* (see also [Section 6](#)).

Yet the majority of wider methane international commitments, including the Global Methane Pledge, are not mandatory. Voluntary commitments are not sufficient to quickly cut warming and avoid tipping points that would lock in devastating global warming and make it much more difficult to avoid an existential threat to a liveable planet Earth.¹⁰⁹⁷ There is therefore a growing chorus of support for binding national and international commitments.¹⁰⁹⁸ Because cutting methane emissions is the single most important action humanity can take to slow near-term warming, it is critical to move from a pledge to mandatory measures with bilateral, plurilateral, and regional efforts as the foundation for a binding global methane agreement. Governments must fully implement¹⁰⁹⁹ and build on the existing commitments and initiatives to open the door for a binding global methane agreement.

The Montreal Protocol provides inspiration for a global methane agreement.¹¹⁰⁰ Negotiated in nine months,¹¹⁰¹ the Montreal Protocol not only solved the first great threat to the global atmosphere by putting the stratospheric ozone on the path to recovery by 2065, but also has done more to avoid climate warming than any other agreement,¹¹⁰² avoiding an amount of warming that otherwise would have equaled or even exceeded the warming that CO₂ is causing today.¹¹⁰³

There are further discussions below of the Global Methane Pledge, COP28's Global Stocktake Agreement, the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution's Gothenburg Protocol, the United States-China *Sunnylands Statement* and *Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s*, and a global methane agreement to address the climate emergency and promote peace and security.

A. The Global Methane Pledge, the COP28 first Global Stocktake Agreement, and the Global Methane Pledge's Energy, Agriculture and Food, and Waste Pathways

The Global Methane Pledge was formally launched at the Head-of-State level at the high-level segment of COP26 on 2 November 2021 in Glasgow.¹¹⁰⁴ The United States and European Union first announced the GMP at the Major Economies Forum on 17 September 2021.¹¹⁰⁵ The Global Methane Pledge commits governments to a collective global goal of reducing global methane emissions by at least 30% from 2020 levels by 2030.¹¹⁰⁶ Signatories also commit to moving towards using the highest-tier IPCC good practice inventory methodologies to quantify methane emissions, with a particular focus on high emission sources.¹¹⁰⁷ The Global Methane Pledge marked the first time that Heads of State have committed to fast action to cut super climate pollutants to meet the 1.5 °C temperature target of the Paris Agreement. In September 2023, Canada, Federated States of Micronesia, Germany, Japan, and Nigeria joined the United States and the European Union as Champions of the Global Methane Pledge to advocate for accelerated methane action to achieve the Pledge.¹¹⁰⁸ During COP28, Turkmenistan, Kazakhstan, Kenya, Romania, and Angola were welcomed as new members of the GMP. In March 2024, Azerbaijan announced it had joined the Pledge, bringing total participation to 156 governments and the European Union.¹¹⁰⁹ At COP28, a GMP Ministerial was held to welcome efforts to deliver action and funding needed to achieve the 30% reduction target of the Global Methane Pledge.¹¹¹⁰

Successful implementation of the Global Methane Pledge would reduce warming by at least 0.2 °C by 2050.¹¹¹¹ Achieving the Global Methane Pledge’s emissions-reduction target would keep the planet on a pathway consistent with staying within 1.5 °C, according to the *Global Methane Assessment*.¹¹¹² This is roughly equivalent to an emissions reduction of 35% below projected 2030 levels. Deploying all available and additional measures could lead to a 45% reduction below 2030 levels to achieve nearly 0.3 °C in avoided warming by the 2040s.¹¹¹³

At COP28, Parties agreed to the first Global Stocktake Agreement, which “recognizes the need for deep, rapid, and sustained reductions in greenhouse gas emissions in line with 1.5 °C pathways and calls on Parties to contribute to the following global efforts.”¹¹¹⁴ One of the proposed methods in the Global Stocktake Agreement to achieve these deep, rapid, and sustained reductions in greenhouse gas emissions is “accelerating and substantially reducing non-carbon-dioxide emissions globally, including in particular methane emissions by 2030.”¹¹¹⁵ The reference to methane in the first Global Stocktake Agreement builds upon momentum starting at COP26, where former U.S. President Barack Obama reminded those in attendance that “curbing methane emissions is currently the single fastest and most effective way to limit warming.”¹¹¹⁶ The Glasgow Climate Pact, agreed to at COP26, “invites Parties to consider further actions to reduce by 2030 non-carbon dioxide greenhouse gas emissions, including methane.”¹¹¹⁷

At the U.S.-ASEAN Special Summit in Washington, DC, on 12 May 2022, the U.S. committed to “accelerating technical assistance, financial resources, and project pipeline development for methane mitigation in GMP countries, including through the EPA, USTDA [U.S. Trade and Development Agency], DFC [Development Finance Corporation], and EXIM [Export-Import Bank], as well as the newly-created Global Methane Hub.”¹¹¹⁸

On 27 May 2022, the G7 Climate, Energy, and Environment Ministers reaffirmed their commitment to the Global Methane Pledge and noted the importance of responding “to the current crisis, in a manner consistent with our climate objectives and without creating lock-in effects.”¹¹¹⁹ In June 2022, G7 Leaders reaffirmed their commitment to the Global Methane Pledge.¹¹²⁰

There are three Global Methane Pledge Pathways: the Global Methane Pledge Energy Pathway, the Global Methane Pledge Food and Agriculture Pathway, and the Global Methane Pledge Waste Pathway. The subsections below will address developments that have occurred in each Pathway, starting with developments from COP27, and then developments from COP28. This is followed by a brief overview of methane finance announcements from COP28.

i. Global Methane Pledge Energy Pathway

In June 2022, the U.S., EU, and 11 other countries launched the Global Methane Pledge Energy Pathway, which includes \$59 million in funding to support methane reductions in the oil and gas sector.¹¹²¹ The funding includes \$4 million to support the World Bank Global Gas Flaring Reduction Partnership (re-launched at COP28 as the GFMR), \$5.5 million to support the GMI, up to \$9.5 million from the IMEO to support scientific assessments of methane emissions and mitigation potential, and up to \$40 million annually from the philanthropic Global Methane Hub to support methane mitigation in the fossil energy sector.

Global Methane Pledge Energy Pathway developments that took place during COP27 in November 2022 include the following:¹¹²²

- The U.S., EU, Japan, Canada, Norway, Singapore, and UK issued a *Joint Declaration from Energy Importers and Exporters on Reducing Greenhouse Gas Emissions from Fossil Fuels*, in which the signatories commit to work towards creating an international market for fossil energy that minimizes flaring, methane, and carbon dioxide emissions across the value chain to the fullest extent possible.¹¹²³ The Joint Declaration covers over half of global gas import volumes and more than one-third of global gas production.
- UNEP and IMEO launched the Methane Alert and Response System (MARS) to augment detection of methane super emitters, notify relevant stakeholders, and support and track methane mitigation progress (*see Section 8*).¹¹²⁴
- The World Bank Global Gas Flaring Reduction Partnership announced the launch of the 2023 phase of its trust fund, with plans to become the GFMR Partnership to address methane emissions across the oil and gas value chain (*see Section 7*).¹¹²⁵

During COP28, a number of Global Methane Pledge Energy Pathway developments were welcomed and addressed at the Global Methane Pledge COP28 Ministerial,¹¹²⁶ including:

- New policies, regulations, and national commitments to cut methane from some of the world's largest oil and gas methane emitters, including:
 - U.S. announcing final standards to sharply reduce methane emissions from oil and gas operations, expected to reduce over 1.5 Gt CO₂e and reduce nearly 80% below future methane emissions expected without the rule (*see Section 6*);¹¹²⁷
 - EU adopting its first-ever methane regulations, setting ambitious monitoring and abatement criteria for domestically produced and imported fossil oil, gas, and coal, including establishing a methane import standard by 2030 (*see Section 6*);¹¹²⁸
 - Canada unveiling draft regulations to achieve an ambitious reduction of methane emissions in the upstream oil and gas sector by at least 75% below 2012 levels by 2030 (*see Section 6*);¹¹²⁹
 - Brazil announcing that its National Council of Energy Policy will establish guidelines on methane reduction in the oil and gas sector by the end of 2024, and the National Agency for Petroleum, Natural Gas and Biofuels aims to finalize regulations by the end of 2025 based on these guidelines (*see Section 6*);¹¹³⁰
 - Egypt announcing its intention to develop domestic methane regulations in its oil and gas sector by the end of 2024, as part of developing the sector's detailed methane emissions reduction roadmap;¹¹³¹
 - Nigeria showcasing major steps taken this year under the Nigeria Gas Flare Commercialization Program, including advancing projects estimated to capture over half of all gas flaring volumes in Nigeria. Nigeria committed to accelerate implementation of these projects and to ensure robust enforcement of its oil and gas methane guidelines launched at COP27 (*see Section 6*);¹¹³² and

- Kazakhstan joining the Global Methane Pledge and announced cooperation with the U.S. to develop national standards to eliminate non-emergency venting of methane and require LDAR in the oil and gas sector as soon as possible before 2030.¹¹³³
- New OGMP 2.0 members. The Partnership now represents over 120 companies with assets in more than 60 countries on five continents and covers over 35% of the world’s oil and gas production and over 70% of LNG flows (*see Section 7*).¹¹³⁴
- The launch of the World Bank GFMR with \$255 million in new grant funding to catalyze oil and gas methane and flaring reduction in developing countries (*see Section 7*).¹¹³⁵
- The U.S., European Commission, and 12 other natural gas importing and exporting countries establishment of an international working group to advance comparable and reliable information about methane and CO₂ emissions across the natural gas supply chain (*see Section 7*).¹¹³⁶
- The OGCI announcement that is expanding its Satellite Monitoring Campaign to provide actionable data to reduce emissions from large-magnitude methane plumes and flares, supported by in-kind contributions from OGCI companies. ExxonMobil also announced its intention to provide up to \$25 million in-kind assistance to address capability shortcomings to reduce methane emissions (*see Section 7*).¹¹³⁷

ii. Global Methane Pledge Food and Agriculture Pathway

At COP27, Global Methane Pledge countries launched the Global Methane Pledge Food and Agriculture Pathway and Waste Pathway.¹¹³⁸ The Food and Agriculture Pathway will leverage up to \$400 million to help smallholder farmers transition dairy systems to lower-emission, climate-resilient pathways¹¹³⁹ and raise \$70 million for a new Enteric Methane Research and Development Accelerator.¹¹⁴⁰ The Food and Agriculture Pathway focuses initially on providing funding support to targeted countries for transitioning their agricultural sector to low-emission and climate-resilient pathways, supporting methane mitigation research and innovation, and highlighting ambitious methane mitigation actions taken by the U.S. and EU.

During COP28,¹¹⁴¹ the Global Methane Pledge Ministerial welcomed several new developments in the Global Methane Pledge Food and Agriculture Pathway, including:

- The Global Methane Hub formal launch of the Enteric Fermentation R&D Accelerator with \$200 million in funding, making it the largest ever globally coordinated research effort into livestock methane reduction.¹¹⁴²
- The World Bank launch of the Global Methane Reduction Platform for Development (CH4D) to support low- and mid-income countries to realize the “methane triple-wins: of abating emissions, enhancing resilience, and empowering livelihood (*see Section 7; Section 11*).¹¹⁴³
- The International Fund for Agriculture Development’s Reducing Agricultural Methane Program (RAMP) announcement that it will, with funding from the U.S. State Department and Global Methane Hub, support 15 governments to incorporate agricultural methane into their nationally determined contributions and 10 governments to build investment pipelines in low-methane agricultural development (*see Section 7*).¹¹⁴⁴

- The launch of Dairy Methane Action Alliance (DMAA), a global initiative to accelerate food industry action to drive down dairy methane emissions, by six major food companies (Bel Group, Danone, General Mills, Kraft Heinz, Lactalis USA [a U.S. affiliate of Lactalis Group], and Nestlé), representing billions of dollars in global annual dairy sales (*see Section 7*).¹¹⁴⁵

iii. Global Methane Pledge Waste Pathway

Also launched at COP27, the Global Methane Pledge Waste Pathway aims to scale up subnational action on waste methane¹¹⁴⁶ and establish a Food Waste Management Accelerator to develop mitigation projects.¹¹⁴⁷ The Waste Pathway focuses initially on advancing methane mitigation measures across the solid waste value chain. Initial components of the Pathway include: enhancing measurement and tracking of methane emissions; supporting accelerated subnational action on waste methane; developing methane mitigation projects to reduce food loss and waste; funding projects with a high regional impact across different countries; and scaling up investment in waste methane mitigation.

During COP28, the Global Methane Pledge Ministerial New also welcomed a number of initiatives in the Global Methane Pledge Waste Pathway, including:

- Lowering Organic Waste Methane (LOW-Methane) initiative launch (*see Section 7*).¹¹⁴⁸
- Inter-American Development Bank launch of a new Too Good to Waste initiative, which aims to contribute at least a 30% reduction in methane emissions in solid waste operations in Latin America and the Caribbean financed by the Bank, including three recently approved projects totaling \$372.5 million.¹¹⁴⁹
- U.S. announcement of new steps on waste methane. The U.S. EPA is planning a rulemaking to review and, if appropriate, revise its Clean Air Act emission standards for new and existing municipal solid waste (MSW) landfills, considering new monitoring technology, incentivization of organics waste diversion, and emissions controls at landfills not covered by current regulations. In 2024, U.S. EPA will release updates on emissions estimates for MSW landfills. In addition, the United States released for public comment a draft national strategy for Reducing Food Loss and Waste and Recycling Organics in line with its 2030 goal of 50% food loss and waste reduction (*see Section 6*).¹¹⁵⁰
- The leaders of Canada, U.S., and Mexico's commitment to reducing methane emissions from the waste sector by at least 15% by 2030 at the 2023 North American Leaders Summit.¹¹⁵¹
- CCAC's TEAP, co-chaired by Ireland and Senegal, released its first report on *Driving Innovation and Technology in the Waste Sector* (*see Section 7*).¹¹⁵²

iv. Global Methane Pledge-Related Funding Announcements from COP27 and COP28

Funding announcements at COP27 included a \$3.5 million seed grant for further financing of global smallholder farmers led by the Green Climate Fund, a plan for the Global Methane Hub to raise \$70 million to develop a new Enteric Methane Research and Development Accelerator, \$500 million for methane reduction projects via Partnerships for Climate Smart Commodities launched by USDA, and more.¹¹⁵³ Prior to COP27, the U.S. announced a \$5 million grant to the African

Development Bank to fund methane abatement across Africa¹¹⁵⁴ and a \$2.8 billion investment in USDA-driven Partnerships for 70 Climate-Smart Commodities and Rural Projects, with methane reduction projects as a priority for the first round of funding distribution.¹¹⁵⁵

At COP28, Ministers welcomed the fact that, in addition to over \$1 billion in new grant funding, international financial institutions approved over \$3.5 billion in new investments for methane-reducing projects since COP27. Approvals include \$375 million from the Green Climate Fund and partners, over \$1.9 billion (€1.78 billion) from the European Investment Bank, over \$218 million (€200 million) from the European Bank for Reconstruction and Development, and \$372.5 million from the Inter-American Development Bank. The World Bank approved at least \$700 million in investments, including a \$255 million for rice project in China, \$300 million for landfill methane reduction in Cote d'Ivoire, and \$145 million for wastewater methane reduction in Malawi.¹¹⁵⁶

These initial commitments and activities, as well as those described below, raise awareness of the opportunity to slow warming by cutting methane, the sectors involved, and the level of ambition needed. Governments should build on the GMP and the GMP's multiple Pathways to open the door for a global methane agreement, including acting immediately to require a progressively lower methane emissions rate from providers of "replacement methane gas" in response to shifts in energy sourcing.

B. Methane action under the Gothenburg Protocol to the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution

The *COP28 Methane Summit* and the Global Methane Pledge lay the foundation for more concrete, emergency methane abatement, including in the form of a global methane agreement that also draws from successful models such as the UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (LRTAP), and its 1999 Protocol to Abate Acidification, Eutrophication, and Ground-level Ozone (Gothenburg Protocol),¹¹⁵⁷ described further below.

LRTAP is a regional treaty framework between Europe, North America, Russia, and former Eastern Bloc countries for reducing transboundary air pollution and understanding related science.¹¹⁵⁸ Methane is the last remaining major ozone precursor not explicitly controlled under the Gothenburg Protocol, as currently amended.¹¹⁵⁹

Including methane in LRTAP is an active area of discussion and this activity should acknowledge and reinforce efforts, including through UNECE's existing collaboration with the CCAC, to develop a global methane agreement to address the climate emergency and promote peace and security. UNECE joined the CCAC in 2015 with the aim of contributing to CCAC work through exchanges of experience, knowledge, and best practices, including with respect to the Gothenburg Protocol.¹¹⁶⁰

Several LRTAP subsidiary bodies are studying methane emissions, including modeling impacts of methane emissions from outside the region on ozone levels within the UNECE region.¹¹⁶¹ LRTAP and its eight protocols¹¹⁶² reflect several innovations that can benefit the development of a global methane agreement. These include: the adoption of a technology-based approach that incorporates national measures to reduce pollutants;¹¹⁶³ a robust scientific body that monitors whether Parties are on track to meet their targets,¹¹⁶⁴ and a dual reporting system that requires Parties to report

their annual pollutant emissions and progress in implementing their national strategies.¹¹⁶⁵ These policy mechanisms recognize, incorporate, and monitor existing national air pollutant emissions control efforts. When developing a global methane emissions control mechanism, it will be worth considering the benefits of LRTAP innovations when determining how to best recognize countries' existing measures to control methane.

While LRTAP could be a valuable regional mechanism for binding methane controls, additional LRTAP considerations from a global perspective include:

- *LRTAP Parties are from North America, Europe, and Central and Western Asia and do not include several countries with significant methane emissions or developing countries that support the Global Methane Pledge. LRTAP Parties are members of UNECE.*¹¹⁶⁶ Not all Parties to LRTAP are also Parties to the additional protocols under LRTAP. For example, Russia is a Party to LRTAP but is not a Party to the [Gothenburg Protocol](#). LRTAP Parties do not include major methane-emitting countries¹¹⁶⁷ such as China, India, Brazil, and Iran, or other [GMP countries in the developing world](#), such as Argentina, Ghana, Indonesia, Iraq, Mexico, Pakistan, and Nigeria.
- *Methane is under active discussion but is not controlled under LRTAP nor under any of its protocols at this time.* LRTAP controls in-scope pollutants contributing to transboundary air pollution. [Eight Protocols](#) further clarify Party obligations regarding specific pollutants and activities. The most recent Protocol, and the most consequential for methane, is the [Gothenburg Protocol](#), which entered into force in 2005.¹¹⁶⁸ The objectives of the [Gothenburg Protocol](#) include control and reduction of emissions of sulfur, nitrogen oxides, ammonia, volatile organic compounds (other than methane) and particulate matter caused by anthropogenic activities that are likely to cause adverse effects on human health and the environment, natural ecosystems, materials, crops and the climate in the short- and long-term, due to, among other things, ground-level ozone arising from long-range transport of covered pollutants.¹¹⁶⁹ Methane is a major source for tropospheric ozone and contributes to background ozone levels globally.¹¹⁷⁰ Although methane is recognized as an ozone precursor in the [Gothenburg Protocol](#),¹¹⁷¹ it is not currently a controlled pollutant.
- *UNECE remains focused on methane's role as an ozone precursor and on how methane emissions from outside the UNECE affect ozone formation within the UNECE.* UNECE recognizes that global growth in methane emissions is in large part from countries outside the UNECE (or ECE) region.¹¹⁷² UNECE is reviewing sources of global methane emissions, with a focus on how emissions from non-UNECE regions affect ozone transport to and formation within the UNECE.¹¹⁷³ This review also includes how methane emissions reductions may be better achieved through a future and instrument.¹¹⁷⁴
- *The LRTAP process for formalizing methane controls should support binding targets and move at a pace consistent with the climate emergency and the role of methane mitigation in slowing warming, while providing opportunities for input, collaboration, and support for global methane controls.* Since 2018, several LRTAP subsidiary bodies have been considering whether and how to address methane. In September 2021, a Joint Progress Report found that methane is the main driver behind increasing background ozone levels,

and that the waste sector in Europe and the oil and gas sector in Eastern Europe, Asia, and the U.S. have the greatest abatement potential in those regions.¹¹⁷⁵ The LRTAP Gothenburg Protocol Review Group, established under the Working Group on Strategies and Review pursuant to decision 2020/2,¹¹⁷⁶ concluded its work in the form of a report presented to the Executive Body in December 2022. In the report, the Review Group found that expected increases in global methane concentrations offset ozone decreases resulting from other pollution controls in Europe and North America.¹¹⁷⁷ The report also indicated that even with full implementation of the Protocol, background ozone levels within the UNECE region will continue to increase due to increases in external ozone precursor emissions, particularly methane.¹¹⁷⁸ The Review Group concluded that the methane contribution to transboundary ozone is “significant enough” that the LRTAP Executive Body should consider potential policy action under the Convention.¹¹⁷⁹ As a result of these recommendations, the LRTAP scientific bodies updated their strategy to include *further investigation* of methane emissions, their contribution to air pollution,¹¹⁸⁰ and the feasibility of adopting control technology among its priorities.¹¹⁸¹ The Task Forces have since drafted a guidance document on technical measures for reduction on methane emissions from landfills, the natural gas grid, and biogas facilities,¹¹⁸² and a policy brief on co-mitigation of methane and ammonia and methane emissions from agricultural sources.¹¹⁸³

- *LRTAP Parties decided to amend the Gothenburg Protocol in response to the findings of the review at the 43rd Meeting of the Executive Body in December 2023.* In the draft decision, Parties acknowledged that global methane reductions are necessary to reduce ground-level ozone within the ECE region and decided to include addressing methane emissions in the revision process.¹¹⁸⁴ The options for revisions include amending the Protocol text and annexes, adopting non-binding instruments to encourage voluntary actions to fulfill the goal of the Global Methane Pledge, and increasing collaboration with other entities like the WHO, the UNFCCC, and the CCAC to amplify action on air pollution globally.¹¹⁸⁵

Taking all the above considerations into account and recognizing that controlling methane calls for urgent action, Parties should consider both rapidly moving to include methane commitments within the Gothenburg Protocol and calling for a binding global methane agreement to account for the global nature of methane emissions and impacts and to promote global security and peace.

C. U.S.-China Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis and the Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s

i. The Sunnylands Statement

The *Sunnylands Statement* underscores the renewed U.S. and China commitment to climate leadership announced in advance of COP28.¹¹⁸⁶ This commitment was also reflected in China’s hosting, with the U.S. and the UAE, the *COP28 Methane Summit*.¹¹⁸⁷ The *Sunnylands Statement* is an important additional step to implement the new climate architecture that President Biden and his then climate envoy John Kerry articulated at the [Major Economies Forum on Energy and Climate](#) in April 2023.¹¹⁸⁸

Importantly, the *Sunnylands Statement* paves the way for U.S.-China engagement and cooperation on key climate priorities starting with the run up to COP28. The “[Sunnylands legacy](#)” includes the meeting in 2013 between President Obama and President Xi which helped build the consensus needed to adopt the Kigali Amendment to the Montreal Protocol on HFCs in 2016 and chart a path toward eventual HFC phaseout.¹¹⁸⁹ In the same way, the *Sunnylands Statement* reflects a “start and strengthen” approach to address the climate crisis.¹¹⁹⁰

At the 15 November 2023 meeting between President Biden and President Xi Jinping, “[t]he two leaders underscored the importance of working together to accelerate efforts to tackle the climate crisis in this critical decade. They welcomed recent positive discussions between their respective special envoys for climate, including on national actions to reduce emissions in the 2020s, on common approaches toward a successful COP28, and on operationalizing the Working Group on Enhancing Climate Action in the 2020s to accelerate concrete climate actions.”¹¹⁹¹

To realize the potential of the *Sunnylands Statement* to address the climate emergency, there is still a massive amount of work to be done. The *Statement* identifies opportunities for further understanding and ambition-strengthening actions in these top two GHG-emitting countries, including on the energy transition from fossil fuels,¹¹⁹² the mitigation of methane, HFCs, N₂O, and other non-CO₂ climate pollutants,¹¹⁹³ the development of resource efficiency and a circular economy,¹¹⁹⁴ the synergistic control of GHGs and other air pollutants,¹¹⁹⁵ on climate cooperation at the subnational level,¹¹⁹⁶ on combating deforestation,¹¹⁹⁷ and on 2035 NDCs.¹¹⁹⁸

In addition to action adopted at the national and subnational levels, the *Sunnylands Statement* underscores the role of multilateralism in solving the climate crisis.¹¹⁹⁹ It echoes the provisions on strengthening global methane governance and cooperation in the [China Methane Emissions Control Action Plan](#).¹²⁰⁰ It also points to the importance of international advocacy, including discussions at the COP28 Methane and Non-CO₂ GHGs Summit and other activities which can build the foundation for commitments that can contribute to a binding global methane agreement.¹²⁰¹

ii. The Joint Glasgow Declaration

Earlier, at COP26 on 10 November 2021, the U.S. and China issued the *Joint Glasgow Declaration*, which commits the two largest economies and emitters of climate pollutants to jointly tackle the climate crisis through “accelerated actions in the critical decade of the 2020s,”¹²⁰² including additional measures to reduce methane emissions. This *Declaration* provides key background for understanding the *Sunnylands Statement*. For example, in the *Declaration*, China agreed to develop a “comprehensive and ambitious National Action Plan” to achieve methane emissions control and reductions in the 2020s.¹²⁰³ The U.S. and China also committed to “cooperate to enhance the measurement of methane emissions,” to meet during the first half of 2022 to focus on methane measurement and mitigation issues,¹²⁰⁴ and to establish a Working Group on Enhancing Climate Action in the 2020s to address the climate crisis, which would meet regularly.¹²⁰⁵ Further, the United States and China indicated their intention to communicate 2035 NDCs in 2025,¹²⁰⁶ which helps reinforce the *Sunnylands Statement* reference that “both countries’ 2035 NDCs will be economy-wide, include all GHGs, and reflect the reductions aligned with the Paris temperature goal of holding the increase in global average temperature to well below 2 degrees C and pursuing efforts to limit the temperature increase to 1.5 degrees C.”¹²⁰⁷

China's announcement in the *Declaration of a National Action Plan on methane to reduce methane emissions in the 2020s*,¹²⁰⁸ later released on 7 November 2023,¹²⁰⁹ reflected at the time significant progress towards achieving the objectives of the Global Methane Pledge, although China has not joined the Global Methane Pledge.¹²¹⁰ Notwithstanding, as a result of the *Sunnylands Statement* and the *Joint Glasgow Declaration*, national and subnational methane-mitigation activities that Global Methane Pledge countries undertake will serve as models to help inform and potentially strengthen the implementation of China's Methane Emissions Control Action Plan. It is also significant that both China's updated NDCs and Mid-Century Strategy list policy actions for reductions of non-CO₂ GHGs, including methane.¹²¹¹

D. A Global Methane Agreement to Address the Climate Emergency and Promote Peace and Security

In the run-up to COP26 in Glasgow, the European Parliament called on the Commission and the Member States to “negotiate a binding global agreement on methane mitigation at the COP26 meeting in Glasgow in line with the modelled pathways that limit global warming to 1.5 °C.”¹²¹² There already is a strong and evolving foundation for negotiating such an agreement, as described below, including an appetite among key leaders for multilateralism to solve unprecedented global challenges and keep democracy alive.¹²¹³ This includes acting immediately to negotiate a progressively lower methane emissions rate from providers of “replacement methane gas” in response to shifts in sourcing as the availability of Russian gas is reduced.

The outcome of COP28 on the Global Stocktake Agreement further illustrates the inevitability of a global methane agreement. The decision states that parties to the UNFCCC recognize “the need for deep, rapid and sustained reductions in greenhouse gas emissions in line with 1.5 °C pathways and calls on Parties to contribute to the following global efforts, in a nationally determined manner, taking into account the Paris Agreement and their different national circumstances, pathways and approaches.”¹²¹⁴ One of the actions expressly needed to achieve this deep, rapid, and sustained reduction is “[a]ccelerating and substantially reducing non-carbon-dioxide emissions globally, including in particular methane emissions by 2030.”¹²¹⁵ This language in the final decision outcome establishes a critical building block towards a binding global methane agreement to expand on and fulfill this objective. As noted by CCAC High-level Advocate for Finance Rachel Kyte at the COP28 CCAC Ministerial: “It's 2023. With peak oil, peak coal, and peak emissions, we are also ‘peak-pledge.’”¹²¹⁶

i. The Montreal Protocol provides inspiration and a model for a global methane agreement

The Montreal Protocol provides inspiration and a model for a mandatory, sector-focused global methane agreement. The Montreal Protocol is widely regarded as the world's most successful environmental agreement because it has not only put the stratospheric ozone layer on the path to recovery by 2065, but also prevented global warming at least equal to the current warming from CO₂ emissions.¹²¹⁷

The Montreal Protocol has several features that could contribute to the success of a global methane agreement, even though a different approach may be needed for methane associated with fossil

fuel production and consumption,¹²¹⁸ or responses to crises involving food security or opportunities such as the growth of border adjustment and methane-fee regimes.

First, the treaty imposes mandatory obligations on all Parties, both those from the developed countries, and those from developing countries. At the same time, the Protocol implements the principle of “common but differentiated responsibilities and respective capabilities.”¹²¹⁹ This principle is implemented by giving developing-country Parties a grace period, often five or ten years, before requiring them to phaseout or phasedown a controlled substance.¹²²⁰ This principle also is given effect through a dedicated funding mechanism, the Multilateral Fund, where developed countries pay the “agreed incremental costs” that developing countries incur when implementing controlled-substance phaseouts and phasedowns.¹²²¹ In addition to financial support for replacement technologies, the Montreal Protocol provides financial support to strengthen the National Ozone Units that operate in every one of the 147 developing-country Parties.¹²²² The UNEP OzonAction office also provides regular training and capacity-building for developing-country Parties, expanding in-country action and awareness of the importance of achieving ozone-depletion and climate mitigation associated with the Montreal Protocol.

Additional important features of the Montreal Protocol are its assessment panels, particularly the Scientific Assessment Panel (SAP)¹²²³ and the Technology and Economic Assessment Panel (TEAP).¹²²⁴ The SAP assesses the status of ozone-layer depletion and relevant atmospheric science. The TEAP reviews the technologies and economics of alternatives to the chemicals being phased out by bringing together experts from industry, government, and academia to find solutions and report independently without government censorship.¹²²⁵

The Montreal Protocol was preceded by an underlying framework treaty, the Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer.¹²²⁶ A strategy involving the development of a global methane agreement should contemplate and anticipate the sudden prioritization and acceleration of action to cope with crises and opportunities to drive down global methane emissions, including crises involving food security and energy, as well as potential opportunities such as the growth of carbon border adjustment mechanisms and methane-fee initiatives. Nonetheless, a framework-protocol structure could be suitable for a global methane agreement: a framework agreement followed by a series of protocols on the energy, waste, and agricultural sectors,¹²²⁷ while also addressing research and development of strategies to remove methane from the atmosphere to counter natural emissions.¹²²⁸

ii. The scientific, policy, and technical foundation already exists for the negotiation of a global methane agreement inspired by the Montreal Protocol

The urgency of slowing warming in the near term means that speed must become the key factor in the selection of climate solutions¹²²⁹ to quickly limit warming, slow self-propagating feedbacks, avoid tipping points, and protect the most vulnerable people and ecosystems.¹²³⁰ The UNEP, the IPCC,¹²³¹ the CCAC,¹²³² and the Arctic Council¹²³³ have all contributed to this scientific understanding. The IPCC’s AR6 Working Group II contribution (AR6 WGII) underscores the dire consequences of further delays in global action and the urgency of slowing warming in the near term.¹²³⁴ The *Global Methane Assessment* confirms that cutting methane emissions is the fastest and only plausible mitigation strategy to limit warming over the next two decades.¹²³⁵

Responding to this call to action, governments, organizations, and collaborative initiatives at all levels have built a robust policy and technical foundation for global methane control. In addition to the developments at COP28 described in [Section 10A](#), this foundation includes:

- International commitments and initiatives involving critical methane action.* For instance, as of November 2023, 95% of NDCs of the Parties under the Paris Agreement include methane within the scope of their overall mitigation target and 40 Parties include methane as a supplementary target or assessment of the mitigation potential of the measure(s) identified.¹²³⁶ At the COP28 Global Methane Pledge Ministerial, U.S. Special Presidential Envoy for Climate John Kerry issued a challenge to all governments to include all greenhouse gases from all sectors in their revised 2035 NDC target.¹²³⁷ The U.S. and EU anchored support for the Global Methane Pledge at the leadership level during the Major Economies Forum on Energy and Climate in September 2021.¹²³⁸ In June 2022, the U.S., EU, and 11 other countries launched the Global Methane Pledge Energy Pathway, which includes funding to support methane reductions in the oil and gas sector. In November 2022, the U.S. and the EU launched the Global Methane Pledge Food and Agriculture Pathway and Global Methane Pledge Waste Pathway to advance methane mitigation in the agriculture and waste sectors. The Global Methane Pledge has since expanded to 157 participants (156 countries plus the EU) as of COP28, with developing countries such as Argentina, Ghana, Indonesia, Iraq, and Mexico, among the earliest supporters.¹²³⁹ The G20 has recognized that methane is “one of the quickest, most feasible and most cost-effective ways to limit climate change and its impacts” and agreed to promote cooperation and transparency.¹²⁴⁰ The EU has committed to reduce all GHG emissions by 55% by 2030,¹²⁴¹ and the European Commission has emphasized the need for unified, global action on methane.¹²⁴² Parties to the Economic Commission LRTAP—and specifically the Gothenburg Protocol—are undertaking a process that will hopefully formalize binding methane mitigation while providing opportunities for input, collaboration, and support for global methane controls.¹²⁴³ International Monetary Fund staff recognized that cutting methane emissions is critical to stabilizing the global climate and that financing would need to be part of an international agreement aimed at mitigating methane “given that mitigation costs would fall disproportionately on emerging market economies.”¹²⁴⁴ The CCAC is actively strengthening global understanding and ambition for methane control through initiatives such as its Methane Flagship, as well as its establishment of a TEAP and helping countries with the development of national methane action plans.¹²⁴⁵ The CCAC and the UNEP have partnered on the Global Methane Assessment.¹²⁴⁶ UNEP also launched the Oil & Gas Methane Partnership 2.0.¹²⁴⁷ In November 2022, the Joint Declaration from Energy Importers and Exporters on Reducing Greenhouse Gas Emissions from Fossil Fuels emphasized the “dramatically reducing methane” is a necessary complement to global decarbonization to limit warming to 1.5 °C.¹²⁴⁸ In October 2023, Ministers gathered at the International Climate and Energy Summit, with the aim of strengthening ambition and implementation ahead of COP28. There the Ministers agreed to highlight the critical role of, and opportunity for, the fossil fuel industry to reduce methane emissions from their operations, with the aim of cutting them 75% by 2030.¹²⁴⁹ Twelve countries, the European Commission, and the East Mediterranean Gas Forum established the International Working Group to Establish a Greenhouse Gas Supply Chain Emissions Measurement, Monitoring, Reporting, and

Verification (MMRV) Framework for Providing Comparable and Reliable Information to Natural Gas Market Participants.¹²⁵⁰ The China Council for International Cooperation on Environment and Development is developing research on methane metrics and measurement and initiatives for major methane-emitting sectors.¹²⁵¹ The Peterson Institute for International Economics has also called on the United States and the European Union to align their current efforts to introduce carbon border adjustment mechanisms to create an international methane border adjustment mechanism.¹²⁵² See also [Section 6](#), [Section 7](#), and [Section 11](#).

- *Bilateral commitments and actions on methane mitigation.* For instance, the U.S. and China, in their *Joint Glasgow Declaration*, demonstrated the capability of economic and political rivals to find common ground on methane mitigation.¹²⁵³ The landmark *Sunnylands Statement* has also seen the U.S. and China agree to further cooperate on methane reduction.¹²⁵⁴ These policy initiatives and the growing climate emergency underscore the importance, even during a time of increased political crises, for cooperation—and even some ambition-promoting competition—among methane mitigation champions in China and other countries.¹²⁵⁵ Canada¹²⁵⁶ and Mexico,¹²⁵⁷ as additional examples, have established regulations for energy-sector methane emissions, and joined the U.S. in pledging to enhance cooperation.¹²⁵⁸ Nigeria stands out as the first African country to regulate its energy-sector methane emissions (see [Section 6](#)).¹²⁵⁹
- *National methane mitigation measures.* Examples include, for instance, the China National Methane Emissions Control Plan;¹²⁶⁰ the U.S. Methane Emissions Reduction Action Plan and Methane Summit to Tackle Dangerous Climate Pollution, while Creating Good-Paying Jobs and Protecting Community Health;¹²⁶¹ and the European Union methane regulation and border adjustment mechanisms (see [Section 6](#)).¹²⁶²
- *Subnational efforts inspiring national measures.* These include regulations in U.S. states such as California,¹²⁶³ New Mexico,¹²⁶⁴ and Colorado,¹²⁶⁵ and in Canadian provinces such as British Columbia.¹²⁶⁶ Climate-focused initiatives such as the C40 Cities network¹²⁶⁷ and Under2 Coalition¹²⁶⁸ have united subnational entities around the world in addressing methane emissions. California launched a Subnational Methane Action Coalition in 2023 with 15 jurisdictions around the world to empower subnational governments to make concrete progress towards their climate goals through methane mitigation in the energy, agricultural and waste sectors (see [Box 5](#)).¹²⁶⁹
- *Methane monitoring, data, and measurement initiatives.* Multiple satellite-based efforts and the IMEO¹²⁷⁰ are already informing global understanding of the levels of methane emissions contributing to the climate emergency. These initiatives are essential to understanding whether the world is on track to meet existing commitments (see [Section 8](#)). They also provide critical information needed for successful and robust accountability and enforcement mechanisms in a global methane agreement.
- *Methane funding initiatives.* The World Bank's and International Monetary Fund's increased interest in methane funding and mitigation efforts demonstrate an increased interest from multilateral financial institutions in methane. Key efforts include the World

Bank's Global Flaring and Methane Reduction (GFMR) Partnership,¹²⁷¹ the International Monetary Fund's analysis of a global methane fee,¹²⁷² and the International Monetary Fund's Resilience and Sustainability Trust.¹²⁷³ The Global Methane Hub acts as a central focus point for wider philanthropic commitments on methane. These financial initiatives and other funding efforts are discussed further in **Section 11**. These financial initiatives lay the groundwork for a multilateral fund that can be used within a Global Methane Agreement to bolster financial support for the achievement of binding methane targets.

- *Public and private collaborations across all levels on methane mitigation.* These efforts, discussed further in **Section 7**, are strengthening awareness of effective methane mitigation measures that must underpin a successful global methane agreement. These encompass, in addition to the CCAC initiatives, the Global Methane Initiative,¹²⁷⁴ the OGCI,¹²⁷⁵ and methane emissions mitigation performance-rating and certification initiatives such as MiQ,¹²⁷⁶ the Canary Project, and the Natural Gas Sustainability Initiative.¹²⁷⁷

This scientific, technical, and policy foundation, added to the inspiration of the Montreal Protocol, provides the understanding, ambition, examples, and solutions necessary to develop a binding global methane agreement.

iii. Creating and strengthening the organizations necessary to support a global methane agreement can and should start immediately within the CCAC

With speed as a key factor for climate solutions, work on organizations that will later support a global methane agreement should not wait for negotiations to commence. The climate emergency and its impacts have no analog in the history of humankind. Therefore, the strategy for developing such an agreement should contemplate and anticipate the sudden prioritization and acceleration of action to cope with crises and methane mitigation opportunities, including crises involving food security and energy and opportunities such as the growth of border adjustment and methane-fee regimes. This work can and should start immediately. This includes strengthening or creating scientific, technical assessment, financial, and capacity-building organizations similar to those associated with the Montreal Protocol, such as the CCAC, which is now the Secretariat for the Global Methane Pledge.¹²⁷⁸ This could build upon existing commitments under the CCAC. For example, the CCAC launched the CCAC Clean Air Flagship at COP28. The Flagship will bring more attention to the global air pollution crisis, highlight readily available solutions, elevate ongoing regional collaboration, amplify and strengthen multi-level government cooperation, and offer direct support to countries including through policy and integrated climate and clean air planning activities and sector specific action via CCAC Sector Hubs, and capacity support for integrated inventories, monitoring and air pollution modeling and implementation of related priority measures and action plans.¹²⁷⁹ The Flagship will support science cooperation and information-sharing initiatives, especially with respect to methane,¹²⁸⁰ and strengthen and support regional and sub-regional cooperation, and the implementation of political commitments to achieve the WHO Air Quality Guidelines and Global Methane Pledge.¹²⁸¹ Building off of this Flagship model, but ensuring it focuses on methane, would allow the CCAC to play a critical role in a Global Methane Agreement.

The CCAC has also established a TEAP, which released its first report on *Driving Innovation and Technology in the Waste Sector* in November 2023.¹²⁸² The TEAP will form a useful advisory

component of a global methane agreement. The creation of a methane control regime based on the successful Montreal Protocol would help ensure that it lives up to its mandate.¹²⁸³

iv. Building upon the existing strong scientific, technical, and policy foundation and CCAC organizations, negotiations on a global methane agreement should start at the head-of-State level

Building upon the strong foundations already in place, using the Montreal Protocol as an inspiration and model, and employing organizations developed within an organization such as the CCAC, a global methane agreement should be launched at the Head of State level. Negotiations for the agreement should be concluded with the need for unprecedented speed in mind. The Montreal Protocol was negotiated in just nine months.¹²⁸⁴ In March 2022, UNEP launched negotiations with the ambition of completing a global agreement to address plastic pollution two years later, in 2024.¹²⁸⁵

11. Financial and philanthropic organizations can provide crucial financial support for methane ambition and action

Securing the appropriate funding and finance is essential to support governments and organizations committed to fast methane reductions. Private philanthropies, multilateral banks, governments, and other financial sector stakeholders all have roles to play in enabling fast methane mitigation to respond to the climate emergency. A stable climate system is a condition *sine qua non* for global financial system stability. Therefore, investment in methane mitigation at scale makes financial sense. In other words, the ability to capture the full temperature abatement of methane mitigation is the best insurance to secure investments.

Notably, however, methane mitigation solutions remain severely underfunded.¹²⁸⁶ In February 2024, the President of the World Bank said “[m]ethane is 80 times more dangerous than carbon dioxide. It gets 2% of climate financing. When something that is 80 times more dangerous gets 2% of financing, something is not right.”¹²⁸⁷ While the momentum coming out of the COP28 announcements described below and in **Section 10A(iv)** is promising, more needs to be done across all sources of climate finance to facilitate methane mitigation at the scale and speed required to address the climate emergency.

A first-of-its-kind assessment of the landscape of methane mitigation finance from the Climate Policy Initiative tracked about US\$11.6 billion in annual 2019/2020 investments, just 2% of total tracked climate finance (public development finance and private climate-related finance, excluding philanthropy), and 10 times less than the US\$119 billion needed each year through 2050 based on the cost of readily available mitigation measures consistent with a 2 °C warming scenario.¹²⁸⁸ Among sectors receiving funding, the waste sector accounts for about 66% of abatement financing while the agriculture and energy sectors collectively receive about 33% of available financing.¹²⁸⁹ Increased investments to reduce methane emissions in the energy and agricultural sectors are essential as these two sectors emit around 82% of anthropogenic methane.¹²⁹⁰

In the lead-up to COP28, the Climate Policy Initiative released its 2023 version of its landscape of methane abatement finance report. The report found that, at US\$13.7 billion, methane abatement finance is at its highest level yet, but annual flows need to be at least 3.5 times larger until 2030.¹²⁹¹ A 2023 report by the Clean Air Task Force identified that a lack of donor interest in methane mitigation financing, the absence of a dedicated international methane funding mechanism, and the failure to prioritize methane mitigation projects are all barriers to the ability to ensure adequate and available financing to mitigate methane at scale.¹²⁹² The IEA's *Global Methane Tracker 2024* estimates that around US\$170 billion in spending is needed to deliver methane mitigation in fossil fuel production to stay below 1.5 °C (around US\$100 billion in the oil and gas sector and US\$70 billion in the coal industry).¹²⁹³

At the highest level, multilateral development banks can support countries to achieve at least 30% of methane reduction consistent with the Global Methane Pledge and the *Global Methane Assessment*, including through the following:

- Ensure the availability of financing mechanisms for projects that reduce methane emissions from fossil fuel, waste, and agriculture;
- Promote an evaluation of climate risk that includes climate tipping points and feedbacks;¹²⁹⁴
- Avoid investments that will precipitate climate tipping points and are not aligned with keeping global temperature under 1.5 °C in the next decade;
- Introduce GWP₂₀ in climate impact evaluation to more accurately value near-term temperature impacts of action to reduce methane and other SLCPs;
- Assess the best way to leverage private finance for methane mitigation, including methane markets, policies, and regulation; *and*
- Assess how a global methane agreement can facilitate methane mitigation finance.

While integrating these climate emergency responses into bank processes, multilateral financial institutions can immediately build on their existing commitments to help countries invest in methane abatement. For example, the European Bank for Reconstruction and Development (EBRD) endorsed the GMP.¹²⁹⁵ The EBRD already finances green projects in large methane-emitting sectors, including energy and agribusiness.¹²⁹⁶ At the launch of the GMP, EBRD committed to assisting their countries of operation with efforts to reduce methane, including through technical assistance and funding for methane abatement projects.¹²⁹⁷ The European Investment Bank and Green Climate Fund also committed to providing technical assistance and project finance to support the GMP.¹²⁹⁸

In September 2022, during a high-level breakfast held on the margins of the 18th African Ministerial Conference on the Environment, the U.S. government announced a US\$5 million grant to the African Development Bank to support efforts to abate methane gas emissions across Africa. The CCAC and Global Methane Hub also promised US\$1.2 million and US\$5 million, respectively.¹²⁹⁹ At the conference, the Vice President of Power, Energy, Climate and Green Growth at the African Development Bank stated:

“With the support of the U.S. government, and other donors and non-state actors, we intend to create a dedicated pillar of activities within our Africa Climate Change Fund to support methane abatement including working with countries to include methane in their Nationally Defined Contributions and develop pipelines of methane abatement projects for further investment.”¹³⁰⁰

During COP27, the African Development Bank released a high-level assessment of anthropogenic methane emissions in Africa that outlines the methodology for quantifying methane in Africa to develop 2020 baselines for each country and sector, as well as case studies on possible abatement options and costs.¹³⁰¹

It will also be important for donor governments to provide financial support, including through a dedicated mechanism similar to the Montreal Protocol’s Multilateral Fund. Support from the Multilateral Fund for “institutional strengthening” that finances dedicated national ozone units in developing-country governments “is recognized as a major factor in the success of [developing countries] achieving compliance with the Montreal Protocol’s control measures.”¹³⁰² A similar model supporting a network of National Methane Offices could rapidly build the capacity of governments to assess and act on methane mitigation opportunities across sectors and countries, including developing methane emission baselines, tracking and inventorying emitters, providing methane education, implementing national methane action plans, and providing a linkage to global and other major methane mitigation funding.

Philanthropy also has an important role to play to facilitate countries’ achieving the Global Methane Pledge. Soon after the creation of the Global Methane Pledge was launched more than 20 leading philanthropies pledged over US\$328 million in support of efforts to drastically reduce methane emissions, including diplomatic efforts building on the Pledge.¹³⁰³ The philanthropies committed to quickly deploy grants and ensure that funding is flexible.¹³⁰⁴ As a result, the Global Methane Hub (discussed further in this section) was launched in March 2022 to “support and sustain action from civil society, government, and private industry” in the countries that have signed onto the GMP by “meaningfully investing in methane reduction solutions.”¹³⁰⁵

Numerous new methane funding announcements were made at the COP28 Methane Summit (*see Section 7 and Section 10(A)*), including that the Global Methane Pledge secured over \$1 billion in new grant funding. In addition, international financial institutions approved over \$3.5 billion in new investments for methane-reducing projects since COP27.¹³⁰⁶ These approvals included \$375 million from the Green Climate Fund and partners, over \$1.9 billion (€1.78 billion) from the European Investment Bank, over \$218 million (€200 million) from the European Bank for Reconstruction and Development, and \$372.5 million from the Inter-American Development Bank.¹³⁰⁷

This momentum must continue, and finance must ramp up to enable countries to achieve the GMP. COP29 should establish a global methane fund of \$10 billion a year for the next five years. This will help bridge the gap in methane finance. The fund could include financing and investment from sovereign wealth funds, the private sector, and the World Bank and other international financial institutions,¹³⁰⁸ as well as penalties collected from non-compliance, similar to the methane fee provision in the U.S.’ Inflation Reduction Act,¹³⁰⁹ and the methane fee proposed in a staff paper released by the International Monetary Fund.¹³¹⁰ (It is important to note this staff paper does not necessarily represent the views of the International Monetary Fund.)¹³¹¹ There is an opportunity to make a specific methane funding announcement at the next Spring meeting of the IMF and World

Bank. The G20 could also direct the IMF and World Bank to address some of the actions set out above and discussed in this Section.

The efforts of key financial institutions and philanthropic organizations to address methane mitigation are discussed below, along with proposals for methane taxes and fees and reform of the global climate finance architecture.

A. Global Methane Hub

The Global Methane Hub was launched in March 2022 with the mandate to support and sustain action from civil society, government, and private industry to achieve the Global Methane Pledge through targeted and effective investment in methane mitigation solutions.¹³¹² The Global Methane Hub focuses on the energy, agricultural, and waste sectors and supports ambitious catalytic investments and long-term transformation of challenging sectors.¹³¹³ The Hub's funding focuses on cross-cutting emissions in the highest methane emitting regions and sources around the world.¹³¹⁴

As of December 2023, the Global Methane Hub had raised over \$200 million in pooled funds from more than 20 of the largest climate philanthropies to accelerate methane mitigation.¹³¹⁵ The funding work of the Global Methane Hub is an important part of enabling countries to achieve the GMP. In addition, the Hub performs a critical role in facilitating effective and targeted collaboration on methane mitigation between private and public finance.

In June 2022, the U.S., the EU, and 11 other countries launched the Global Methane Pledge Energy Pathway (*see also Section 10A(i)*), which includes \$59 million in funding to support methane reductions in the oil and gas sector.¹³¹⁶ This funding included up to \$40 million annually from the Hub to support methane mitigation in the fossil energy sector.

At COP28, the Global Methane Hub formally launched the Enteric Fermentation R&D Accelerator with \$200 million in funding, making it the largest ever globally coordinated research effort into livestock methane reduction.¹³¹⁷ The Global Methane Hub also launched the Waste Methane Assessment Platform (WasteMAP), a global initiative in collaboration with Rocky Mountain Institute and Clean Air Task Force and with support from Google.

In addition, the Global Methane Hub announced funding initiatives to deliver resources to governments, businesses, and local climate organizations as they implement their methane mitigation strategies.¹³¹⁸ For example, the Data to Methane Action Campaign in collaboration with the UNEP International Methane Emissions Observatory and its partners. The Global Methane Hub also provided \$10 million in funding to help support governments and businesses identify and reduce methane leaks through better data monitoring; and supported the International Fund for Agriculture Development's Reducing Agricultural Methane Program (RAMP), along with the U.S. State Department, which will develop agricultural methane strategies in 25 countries.¹³¹⁹

B. The Methane Finance Sprint

In April 2023, Major Economies Forum participants, the U.S., EU, Canada, Norway, Ireland, France, Germany, and Japan, launched the Methane Finance Sprint.¹³²⁰ A handful of entities administering the Methane Finance Sprint, including the World Bank and the Global Methane

Hub, set out to mobilize, by COP28, at least \$200 million in new public and philanthropic support for methane abatement activities, with a view to developing a pipeline of projects.¹³²¹

As announced at COP28, governments, the European Commission, philanthropies, and the private sector significantly exceeded that target, announcing over \$1 billion in new grant funding committed since COP27 (see **Section 10A(iv)**).¹³²² This funding includes \$255 million for the re-launch of the World Bank GMFR, \$200 million for the launch of the Enteric Fermentation Accelerator, and additional support for the CCAC, the IMEO, and other programs (see **Section 7**).¹³²³

C. International Monetary Fund-World Bank Climate Advisory Group

In September 2023, the IMF and the World Bank announced the formalization of regular meetings of the IMF-World Bank Climate Advisory Group. This Group will meet every two months to discuss global and country level engagements, including the results of Country Climate and Development Report (CCDRs), country level climate analytical work, and the pipeline of key projects and lending (see *below*).¹³²⁴ In addition, the IMF and WBG committed to incorporate climate considerations into their revised joint *Low Income Country Debt Sustainability Framework*.¹³²⁵

These regular meetings between the IMF and World Bank present an opportunity to regularly coordinate and consider ways to better facilitate methane mitigation measures across the IMF's and WBG's efforts to address the climate emergency.

D. International Monetary Fund

The IMF recognizes that climate change is a long-term structural challenge that will make countries more prone to severe balance of payment problems by raising the likelihood and impact of future shocks and undermining growth prospects.¹³²⁶ IMF staff recognized that cutting methane emissions is critical to stabilizing the global climate and financing would need to be part of an international agreement aimed at mitigating methane “given that mitigation costs would fall disproportionately on emerging market economies.”¹³²⁷

i. Resilience and Sustainability Trust

In August 2021, the IMF Board of Governors approved the anticipated general allocation of \$456 billion worth of Special Drawing Rights (SDR) (equivalent to US\$605 billion).¹³²⁸ While this was a historic accomplishment by the International Monetary Fund under the direction of the International Monetary Fund's Managing Director, Kristalina Georgieva, because of the IMF's quota system, the vast majority of SDRs flow to high-income countries. Recognizing this shortcoming, the G7 leaders previously pledged to redirect \$100 billion worth of SDRs for countries most in need of resources to address the COVID-19 pandemic, stabilize their economies, and mount a green and global recovery that is aligned with shared development and climate goals.¹³²⁹

In October 2021, at the G20 meeting in Rome, world leaders issued the Leaders' Declaration requiring the International Monetary Fund to establish a Resilience and Sustainability Trust (RST). In this Declaration, the G20 Leaders elaborated that the RST would “provide affordable long-term

financing to help low-income countries.... and vulnerable middle-income countries to reduce risks to prospective balance of payments stability, including those stemming from pandemics and climate change.”¹³³⁰ This was the first time the G20 Heads of State called on the IMF to play a role in reducing economic risks due to climate change.

The Executive Board of the IMF approved the establishment of the RST on 13 April 2022.¹³³¹ Upon its establishment the IMF estimated total resource needs for the RST as SDR 33 billion (equivalent to US\$45 billion). The RST was designed to complement IMF’s existing lending toolkit that focuses on longer-term structural challenges, including climate change and pandemic preparedness. It aims to enhance economic resilience and sustainability by: 1) supporting policy reforms to reduce macro-critical risks associated with longer-term structural challenges; and 2) augmenting policy space and financial buffers to mitigate the risks arising from such longer-term structural challenges—thereby contributing to *prospective balance of payments stability*.¹³³²

The IMF Executive Board conducted an annual review of the resource adequacy of the RST in April 2023. As at that date, the IMF announced that five countries had received loans from the RST and 44 countries had expressed an interest in borrowing from the RST.¹³³³ As of end of December 2023, 18 countries, including China, France, Germany, Japan, the UK, Canada, Italy, and the Netherlands, had pledged the equivalent of US\$42.8 billion on SDRs to the RST.¹³³⁴ At COP28, the UAE announced a commitment to provide \$200 million to the RST.¹³³⁵ It is also noteworthy that in December 2022, the U.S. Congress’ approved an appropriation \$20 million to either the IMF’s Poverty Reduction and Growth Trust or the RST.¹³³⁶

The RST may finance, *inter alia*, costs of climate-related public and/or private investments, like energy efficient retrofitting of existing buildings, costs associated with transitioning to green technologies, and offsetting costs of policies to ensure a just transition, like providing social assistance as governments unwind carbon subsidies.¹³³⁷ RST disbursement is linked to the country’s financial reform progress. RST measures are informed and consistent with country diagnostics tools developed by both the IMF (the and the World Bank (discussed below) relevant to the RST’s purposes.¹³³⁸ About three quarters of IMF’s membership are eligible for RST financing, including low-income countries, developing and vulnerable small states, and lower middle-income countries.¹³³⁹ Access is capped at SDR 1 billion. The loans have a 20-year maturity and a 10.5-year grace period.¹³⁴⁰

After becoming operational in December 2022, it remains to be seen how effectively the RST can contribute to supporting countries efforts on methane reductions. The IMF expects that the “RST support for the development and implementation of overarching policy frameworks such as green public financial management would improve the integration of climate in policy formulation and enhance governance, thereby giving more comfort to other public and private lenders and donors to provide project financing and technical assistance.”¹³⁴¹ This could present an opportunity for countries that are contributing SDRs to the RST to ensure private sector engagement on methane mitigation. According to the RST framework document, “the RST would focus on downside scenarios associated with select longer-term challenges. It would aim to lower the probability of such scenarios and/or reduce the severity of the [balance of payment] problems that would materialize should such a scenario come to pass.”¹³⁴²

The RST framework does not specifically mention methane emissions mitigation among the projects that could benefit from RST financing. However, the language of the framework is sufficiently broad to cover methane action. The IMF and its members, with guidance from the World Bank, should be encouraged to divert funding to methane emissions mitigation policy reforms.¹³⁴³ Focusing on methane, the RST could provide financial support to countries in their efforts to reduce methane and create the market conditions for private-sector investment in methane reductions. For example, the RST could include the possibility of allocating SDRs to middle-income countries that have the capacity to catalyze low-cost financing to implement the GMP. The RST should also enhance the ability of middle-income countries to mobilize longer-term financing for just transitions in high methane-emitting sectors. These design aspects must be done without increasing the debt burden of the SDR recipient.

As the IMF continues the RST to reduce climate risk, the IMF must keep climate science as the core of its efforts. The IMF should consider including tipping points and feedbacks in IMF climate modeling. The RST scenarios should use GWP₂₀ and include the climate, economic, and social benefits of undertaking methane mitigation. The RST’s design, implementation, and measure of its success should be guided by the latest science on climate emergency, climate risk, and pathway to a climate safe zone, including through fast, near-term methane mitigation. It is noteworthy that IMF staff published a paper on *How to Cut Methane Emissions*, specifically calling for a global agreement on methane pricing.¹³⁴⁴

National climate-risk scenarios cannot be done in isolation because climate is a global challenge. Therefore, such national scenarios should be linked with the global scenario and the 1.5 °C temperature and GMP goals.

E. World Bank Group

The World Bank Group (WBG) is the largest provider of climate finance for developing countries. In 2018, the WBG announced a new set of climate targets for 2021–2025, “doubling its current 5-year investments to around US\$200 billion in support for countries to take ambitious climate action.”¹³⁴⁵ The US\$200 billion consists of “approximately US\$100 billion in direct finance from the World Bank, and approximately US\$100 billion in combined direct finance” from the International Finance Corporation, the Multilateral Investment Guarantee Agency, and WBG-mobilized private capital.¹³⁴⁶ As part of this action plan, the WBG committed to align all of its financing operations with the Paris Agreement. The World Bank announced it was on track to align 100% of new operations with the Paris Agreement goals from 1 July 2023. For the International Finance Corporation and Multilateral Investment Guarantee Agency, 85% of new operations will be aligned from 1 July 2023 and 100% from 1 July 2025.¹³⁴⁷

The latest IPCC reports offer an opportunity for the WBG to review its *Climate Action Plan (2021–2025)* and to ensure its portfolio aligns with the 1.5 °C temperature goal of the Paris Agreement, focusing on the climate emergency, tipping points, and feedback loops, and prioritizing investments in fast mitigation strategies as essential to build resilience and reduce climate risk.¹³⁴⁸ The WBG could also begin incorporating the use of metrics that capture the near-term temperature impacts of methane and other SLCPs, such as GWP₂₀, in all its work to promote carbon markets.¹³⁴⁹

In 2012, the G8 agreed to commission the WBG to evaluate innovative pay-for-performance mechanisms to address methane.¹³⁵⁰ A report by the Methane Finance Study Group supported the establishment of a methane facility.¹³⁵¹ In its design and development phase, the [Pilot Auction Facility for Methane and Climate Change Mitigation](#) (PAF) benefited from the support of the [Climate & Clean Air Coalition](#).¹³⁵² The PAF completed three auctions to allocate a guaranteed price for future carbon credits in the form of a tradable put option, two for the abatement of methane emissions from the waste sector and one for the abatement of nitrous oxide emissions from nitric acid production.¹³⁵³ The three auctions allocated up to US\$54 million, resulting in abatement of up to 20.6 million metric tons of CO₂e (using GWP₁₀₀, thus undervaluing methane climate impact). The main PAF contributors were Germany, Sweden, Switzerland (through a joint contribution of the State Secretariat of Economic Affairs and the Climate Cent Foundation), and the United States.¹³⁵⁴ The GMP might provide an opportunity to further explore this kind of finance mechanism.

Over the last few years, WBG has significantly increased funding of methane mitigation projects across the energy, agriculture, and waste sectors.¹³⁵⁵

The International Finance Corporation, the WBG's private sector arm, finances methane mitigation projects. For example, in 2021, the International Finance Corporation also announced it had supported one of the largest gas flaring reduction projects in the world in Iraq by arranging a \$360 million loan.¹³⁵⁶ In 2022, International Finance Corporation disclosed its funding for 24 landfill gas-to-energy project that will be implemented in 10 provinces in China.¹³⁵⁷ The project is estimated to reduce about 3.4 Mt CO₂e of GHG through methane capture.¹³⁵⁸ Their Green Bond Program offers financing for methane reduction projects focusing on livestock, aquaculture, gas flaring, and waste-to-energy among the list of projects eligible financing.¹³⁵⁹ However, the International Finance Corporation could do more and update its [Performance Standards on Environment and Social Sustainability](#) (last updated in 2012) and its [Definitions and Metrics on Climate Related Activities](#) (last updated in 2017) with the latest climate emergency science, including climate tipping points and feedback loops in its definition of climate risk so that its financing offerings remain current.

The WBG's International Development Association also funds methane mitigation projects. The International Development Association works in 74 countries and aims to reduce poverty by providing financing and policy advice that boost economic growth, build resilience, and improve the lives of people in the world's lowest income countries.¹³⁶⁰ For example, the International Development Association provided \$115 million for an urban sanitation project in Mozambique to improve access to safely managed sanitation to reduce methane emissions,¹³⁶¹ and provided \$200 million for a project in the Logone Valley in Cameroon to improve irrigation and drainage systems to limit methane emissions from rice fields and train farmers on climate-smart agricultural approaches.¹³⁶²

In addition, the Multilateral Investment Guarantee Agency, a WBG member that provides long-maturity guarantees,¹³⁶³ can support quick and permanent adoption of methane emission solutions. Many of the actions to reduce methane emission involve long-term investment. The Multilateral Investment Guarantee Agency could produce a plan to scale up its capital optimization product to support a range of methane mitigation loans and deploy a strategy to attract commercial banks partnership in key projects.

At COP27, the World Bank hosted an event titled “It’s Time to Sprint: Targeting Methane Emissions.”¹³⁶⁴ Since COP27, the WBG has increased its support of methane mitigation. In addition to direct lending or investment, WBG’s support includes analytical work, capacity building, support on regulatory reform, leak detection and monitoring, investment feasibility studies.¹³⁶⁵ At COP28, the WBG announced that since COP27 it had approved at least \$700 million in investments, including \$455 million for a rice project in China, \$300 million for landfill methane reduction in Cote d’Ivoire, and \$145 million for wastewater methane reduction in Malawi.¹³⁶⁶ The WBG also launched at COP28 the Global Methane Reduction Platform for Development (CH4D) to support low- and mid-income countries to realize the “methane triple-wins” of abating emissions, enhancing resilience, and empowering livelihoods.¹³⁶⁷ The World Bank also re-launched, the Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR) as the Global Flaring and Methane Reduction (GFMR) Partnership, a new multi-donor trust fund focused on helping developing countries cut carbon dioxide and methane emissions generated by the oil and gas industry (*see Section 7*).¹³⁶⁸

i. Country Climate and Development Report

As part of the RST architecture, the IMF, and World Bank agreed on “Broad Principles for Bank-Fund Coordination in RST Operations.”¹³⁶⁹ One of the key tools of this collaboration is the World Bank’s CCDR. The CCDRs are a relatively new WBG diagnostic tool (announced at COP26)¹³⁷⁰ that integrate climate change and development considerations and help countries prioritize the most impactful actions that can reduce greenhouse gas emissions, including methane, and boost adaptation.¹³⁷¹ As public documents, CCDRs aim to inform governments, citizens, the private sector, and development organizations to engage and implement a climate and development agenda.¹³⁷² The CCDRs may complement the IMF’s Climate Macroeconomic Assessments Programs, which is the successor to the Climate Change Policy Assessments (CCPAs).¹³⁷³

Each year key insights from the CCDRs are summarized by the WBG in an annual report.¹³⁷⁴ The 2023 annual report released at COP28 combined results from the CCDRs in 42 countries and highlighted cost-effective opportunities to reduce methane emissions included in numerous CCDRs.¹³⁷⁵ The CCDRs present an opportunity to identify countries’ methane mitigation measures that align with meeting the Global Methane Pledge commitments.

F. Private Investment

At COP28, the United Arab Emirates announced the launch of Alterra, a private investment fund for global climate solutions focusing on emerging markets and developing countries.¹³⁷⁶ Alterra seeks to bridge the climate financing gap by raising and investing up to \$250 billion of institutional and private capital by 2030. The fund operates in collaboration with BlackRock, Brookfield, and TPG as inaugural partners and had \$6.5 billion in committed climate investments, including investments in the Global South, as of December 2023.¹³⁷⁷ The size and focus of this investment fund should facilitate countries’ compliance with the Oil and Gas Decarbonization Charter (also announced at COP28 and discussed in *Section 7*).

The IEA notes that investors and insurers are beginning to establish methane performance requirements as a condition on future lending. This includes underwriting standards that include methane reductions. For example, Barclays announced that starting from 2026, energy clients will

be required to have 2030 methane emissions reduction targets and a commitment to end all routine venting and flaring by 2030.¹³⁷⁸

G. Global Methane Tax/Fee

The IMF has modelled the implementation of a methane tax or fee in the top 35 methane-emitting countries.¹³⁷⁹ This tax or fee would work by integrating an initial fee of \$10 per tonne of CO₂ equivalent rising to \$70 per tonne of CO₂-equivalent in 2030 into existing fiscal regimes.¹³⁸⁰ The European Union's newly adopted CBAM, designed to prevent outsourcing of carbon-intensive industries and incentivize sustainable practices abroad,¹³⁸¹ does not address imported methane. Some have called for methane to be addressed in future measures,¹³⁸² although concerns have been voiced about the imposition of border adjustment mechanisms from a global trade law and policy perspective.¹³⁸³ CBAM entered into effect on a transitional basis in October 2023, only applying during this transitional phase to imports of cement, iron and steel, aluminum, fertilizers, electricity and hydrogen.¹³⁸⁴ CBAM may evolve in time to allow for broader EU-U.S. alignment on a global methane border adjustment mechanism.¹³⁸⁵ The European Union's first-ever methane regulations, however, do include ambitious monitoring and abatement criteria for both domestically produced and imported fossil oil, gas, and coal, and establish a methane import standard by 2030.¹³⁸⁶ **Section 6E** further discusses the European Union's methane regulations and directives. Separately, the Peterson Institute for International Economics has proposed a new global methane border adjustment mechanism where countries would be expected to align with new EU-U.S. methane regulation or pay a methane border adjustment tax.¹³⁸⁷

H. A Global Financial Strategy to Tackle the Climate Emergency including Methane

At COP26, Prime Minister Mia Mottley from Barbados presented a financial plan to tackle the climate emergency. Prime Minister Mottley, who is also Co-Chair of the Development Committee of the World Bank and the IMF, noted that:

“The central banks of the wealthiest countries engaged in 25 trillion dollars of quantitative easing in the last 13 years. 25 trillion. Of that, \$9 trillion was in the past 18 months – to fight the pandemic. Had we used that \$25 trillion to purchase bonds to finance the energy transition, or the transition of how we eat, or how we move ourselves in transport, we would now, today, be reaching that 1.5 degree limit that is so vital to us.”¹³⁸⁸

Prime Minister Mottley proposed an annual increase in the SDRs of \$500 billion a year for twenty years to be put in a trust to finance the transition. She pointed out that \$500 billion is just 2% of the \$25 trillion that central banks from the wealthiest countries engaged in the last 13 years.¹³⁸⁹ The proposal includes a \$500 billion trust that would operate on an auction basis for the greatest climate mitigation and include the private sector in its eligibility criteria. Prime Minister Mottley continues to advocate for the creation of this trust which, to truly attenuate the climate emergency, must prioritize methane emissions reductions.¹³⁹⁰ In her address at COP28, Prime Minister Mottley continued to emphasize the need for a different approach to the global capitalization of international financial institutions, including for non-state actors to contribute to this capitalization. She also noted that we have yet to see the global methane agreement that the world needs as part of a change of course on climate action.¹³⁹¹

At COP28, major international financial institutions and countries made new commitments to offer climate-resilient debt clauses (CRDCs) in their lending. These clauses allow debt service to be paused to give countries breathing space after climate disasters.¹³⁹² The use of CRDCs was supported by over 70 countries and new commitments to expand the use of CRDCs were made by the UK, France, World Bank, Inter-American Development Bank, European Investment Bank, European Bank for Reconstruction and Development, and African Development Bank.¹³⁹³ The IDB announced it had already offered \$1.2 billion of loans covered by CRDCs.¹³⁹⁴ Also at COP28, Japan and France announced they would co-lead in supporting the African Development Bank's facility to leverage IMF SDRs for climate and development.¹³⁹⁵

Earlier, in 2022, Barbados hosted the Bridgetown Initiative with key stakeholders and developed the Bridgetown Agenda.¹³⁹⁶ While the Bridgetown Agenda does not specifically include methane, if implemented, it might present an important opportunity for methane mitigation within the global finance system.

Building upon the Bridgetown Agenda as well as other climate finance flagship initiatives, the UAE Leaders' Declaration on a Global Climate Finance Framework was launched at the start of COP28.¹³⁹⁷ The Declaration seeks to reform the global climate finance architecture by making climate finance available, accessible, and affordable.¹³⁹⁸ The principles in the Declaration emphasize the need for reform of MDBs to better address climate change, widening concessional finance, and for global private and public financial architecture to be made "fit for more frequent, profound shocks" including through wider use of CRDCs and rechallenging IMF SDRs through the RST.¹³⁹⁹ Barbados, Germany, France, Ireland, the Philippines, Colombia, Ghana, Kenya, India, Senegal, UAE, the UK and the United States signed the Declaration.¹⁴⁰⁰ While the Declaration does not specifically address methane, the high-level principles it contains are a useful framework to unlock public and private finance to fund methane mitigation globally at the scale and speed required.

12. Conclusion

Cutting methane emissions is the best way we know to slow warming in the next 20 years. Achieving the goal of up to 0.3 °C in avoided warming to keep 1.5 °C within reach requires building technical, financial, and governance mechanisms. The COP28 Methane Summit, GMP, and the increasing demand for multilateralism represent important steps along the way to implementing existing commitments and moving to a binding global methane agreement. This includes immediate action to require a progressively lower methane emissions rate from providers that continue to supply "replacement methane gas" in response to changes in countries' methane gas imports, through the full implementation of initiatives such as the CBAM mechanism and methane taxes or fees. Improvements in monitoring systems add transparency but need to be paired with an accountability and enforcement strategy that incentivizes effective emissions reductions by connecting emitters with technical and financial capacity. At the same time, a global methane agreement must be flexible enough to account for growing crises in peace, food security, and global democracy such that it can adapt to the evolving nature of the climate emergency. The Montreal Protocol provides a solid foundation for the architecture of a global methane agreement, with existing methane ambition offering an initial scope for targets, policies, and initiatives that

could be pursued under a global methane agreement. This *Methane Primer* lays out the urgency, opportunity, and key pieces to build a solid foundation for a global methane agreement, which should be the ultimate goal if we are going to succeed in slowing global warming in this decade.

Acronyms

AIM4C	Agriculture Innovation Mission for Climate
AR6	Sixth Assessment Report of the United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change
AR6 WGI	Working Group I contribution to the IPCC Sixth Assessment Report on the <i>Physical Science Basis</i> (2021)
AR6 WGII	Working Group II contribution to the IPCC Sixth Assessment Report on <i>Impacts, Adaptation, and Vulnerability</i> (2022)
AR6 WGIII	Working Group III contribution to the IPCC Sixth Assessment Report on <i>Mitigation of Climate Change</i> (2022)
ARPA-E	Advanced Research Projects Agency–Energy (U.S.)
ASEAN	Association of Southeast Asian Nations
BRICS	Brazil, Russia, India, China, South Africa
BUR	Biennial Update Report (India)
CATF	Clean Air Task Force
CAP	Common Agriculture Policy (EU)
CBM	coal bed methane
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism (EU)
CCAC	Climate & Clean Air Coalition
CCDR	Country Climate and Development Reports
CCPA	Climate Change Policy Assessment
CH₄	methane
CH4D	Global Methane Reduction Platform for Development (World Bank)
CO₂	carbon dioxide
CO_{2e}	carbon dioxide equivalent
COP26	26 th Conference of the Parties (Glasgow, Scotland) (2021)
COP27	27 th Conference of the Parties (Sharm El-Sheikh, Egypt) (2022)
COP28	28 th Conference of the Parties (Dubai, United Arab Emirates) (2023)
COP29	29 th Conference of the Parties (Baku, Azerbaijan) (2024)
DMAA	Dairy Methane Action Alliance
EDF	Environmental Defense Fund

EMIT	Earth Surface Mineral Dust Source (NASA)
EPA	Environmental Protection Agency (U.S.)
ESG	Environmental, Social, and Governance framework
EXIM	Export–Import Bank of the United States
GBA	Global Biofuels Alliance
GCF	Green Climate Fund
GFMR	Global Flaring and Methane Reduction (World Bank)
GGFR	Global Gas Flaring Reduction Partnership (World Bank)
GFMR	Global Flaring Methane Reduction Partnership (World Bank)
GHG	greenhouse gas
GMI	Global Methane Initiative
GMP	Global Methane Pledge
GOSAT	Greenhouse Gas Observing Satellite (Japan)
Gothenburg Protocol	Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone (Gothenburg, Sweden) (1999)
GRI	Global Reporting Initiative
GWP	global warming potential
HFC	hydrofluorocarbons
HoD	Heads of Delegation
IEA	International Energy Agency
IEF	International Energy Forum
IFAD	International Fund for Agriculture Development
IMEO	International Methane Emissions Observatory
IMF	International Monetary Fund
IMRRP	Iron Mains Risk Reduction Programme (UK)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JPL	Jet Propulsion Laboratory (NASA)
Kigali Amendment	Kigali Amendment to the Montreal Protocol (Kigali, Rwanda) (2016)
LDAR	leak detection and repair
LNG	liquefied natural gas

LRTAP	Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution
MAMII	Methane Abatement in Maritime Innovation Initiative
MARS	Methane Alert and Response System (UNEP & IMEO)
MEE	Ministry of Ecology and Environment (China)
MERiL	Methane Emissions Reduction in Livestock (Australia)
MLF	Multilateral Fund of the Montreal Protocol
Montreal Protocol	Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer (Montreal, Canada) (1987)
M-RAP	Methane Roadmap Action Programme (CCAC)
MMRV	measurement, monitoring, reporting, and verification
MRV	measurement, reporting, and verification
MSW	municipal solid waste
Mt	metric ton
N₂O	nitrous oxide
NASA	National Aeronautics and Space Administration (U.S.)
NDC	Nationally Determined Contribution
NGSI	Natural Gas Sustainability Initiative
NZE	Net Zero Emissions by 2050
O₃	tropospheric ozone
OCI+	Oil Climate Index Plus
OGCI	Oil & Gas Climate Initiative
OGDC	Oil & Gas Decarbonization Charter
OGMP	Oil & Gas Methane Partnership
PAF	Pilot Auction Facility for Methane and Climate Change Mitigation
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PFCs	perfluorocarbon
PIPES Act	Protecting Our Infrastructure of Pipelines and Enhancing Safety Act (U.S.) (2020)
ppb	parts per billion
PROVE IT Act	Providing Reliable, Objective, Verifiable Emissions Intensity and Transparency Act (U.S.) (2024)

R&D	research & development
RAMP	Reducing Agricultural Methane Program (IFAD)
REME	Reducing Enteric Methane Emissions from Beef Cattle (Canada)
REMEDY	Reducing Emissions of Methane Every Day of the Year (U.S.)
RMI	Rocky Mountain Institute
RST	Resilience and Sustainability Trust (IMF)
SAP	Scientific Assessment Panel (CCAC)
SDR	Special Drawing Rights (IMF)
SLCP	short-lived climate pollutant
SO₂	sulfur dioxide
TEAP	Technology and Economic Assessment Panel (CCAC)
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
UNEP	United Nations Environment Programme
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
USAID	United States Agency for International Development
USDA	United States Department of Agriculture
USTDA	United States Trade and Development Agency
WasteMAP	Waste Methane Assessment Platform (RMI & CATF)
WBG	World Bank Group
WHO	World Health Organization

References

- ¹ Abnett K. & Dickie G. (8 November 2023) *This year “virtually certain” to be warmest in 125,000 years, EU scientists say*, REUTERS (“This year is “virtually certain” to be the warmest in 125,000 years, European Union scientists said on Wednesday, after data showed last month was the world’s hottest October in that period. Last month smashed through the previous October temperature record, from 2019, by a massive margin, the EU’s Copernicus Climate Change Service (C3S) said. “The record was broken by 0.4 degrees Celsius, which is a huge margin,” said C3S Deputy Director Samantha Burgess, who described the October temperature anomaly as “very extreme”. ... “When we combine our data with the IPCC, then we can say that this is the warmest year for the last 125,000 years,” Burgess said.”).
- ² Arias P. A., *et al.* (2021) *Technical Summary*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 42 (“Timing of crossing 1.5°C global warming: Slightly different approaches are used in SR1.5 and in this Report. SR1.5 assessed a likely range of 2030 to 2052 for reaching a global warming level of 1.5°C (for a 30-year period), assuming a continued, constant rate of warming. In AR6, combining the larger estimate of global warming to date and the assessed climate response to all considered scenarios, the central estimate of crossing 1.5°C of global warming (for a 20-year period) occurs in the early 2030s, ten years earlier than the midpoint of the likely range assessed in the SR1.5, assuming no major volcanic eruption. (TS.1.3, Cross-Section Box TS.1)”).
- ³ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), SPM-36 (“Strong, rapid and sustained reductions in CH₄ emissions would also limit the warming effect resulting from declining aerosol pollution and would improve air quality.”). *See also* Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 6-7 (“Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*). {6.6.3, 6.7.3, 4.4.4}”).
- ⁴ Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 6-7 (“Across the SSPs, the collective reduction of CH₄, ozone precursors and HFCs can make a difference of global mean surface air temperature of 0.2 with a very likely range of [0.1–0.4] °C in 2040 and 0.8 with a very likely range of [0.5–1.3] °C at the end of the 21st century (comparing SSP3-7.0 and SSP1-1.9), which is substantial in the context of the Paris Agreement. Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*). {6.6.3, 6.7.3, 4.4.4}”); 6-8 (“Additional CH₄ and BC mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with SO₂ reductions that would accompany decarbonization (*high confidence*).”).
- ⁵ Solomon S., Daniel J. S., Sanford T. J., Murphy D. M., Plattner G.-K., Knutti R., & Friedlingstein P. (2010) *Persistence of climate changes due to a range of greenhouse gases*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 107(43): 18354–18359, 18357 (“In the case of a gas with a 10-y lifetime, for example, energy is slowly stored in the ocean during the period when concentrations are elevated, and this energy is returned to the atmosphere from the ocean after emissions cease and radiative forcing decays, keeping atmospheric temperatures somewhat elevated for several decades. Elevated temperatures last longer for a gas with a 100-y lifetime because, in this case, radiative forcing and accompanying further ocean heat uptake continue long after emissions cease. As radiative forcing decays further, the energy is

ultimately restored from the ocean to the atmosphere. Fig. 3 shows that the slow timescale of ocean heat uptake has two important effects. It limits the transfer of energy to the ocean if emissions and radiative forcing occur only for a few decades or a century. However, it also implies that any energy that is added to the ocean remains available to be transferred back to the atmosphere for centuries after cessation of emissions.”).

⁶ Comparison of strategy targeting CO₂ alone to a reference scenario with limited climate mitigation and when accounting for the reduction in reflective particles that mask warming as a result of decarbonization strategies that phase out fossil fuel use. See Dreyfus G. B., Xu Y., Shindell D. T., Zaelke D., & Ramanathan V. (2022) *Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 119(22): 1–8, 5 (“Aggressive decarbonization to achieve net-zero CO₂ emissions in the 2050s (as in the decarb-only scenario) results in weakly accelerated net warming compared to the reference case, with a positive warming up to 0.03 °C in the mid-2030s, and no net avoided warming until the mid-2040s due to the reduction in co-emitted cooling aerosols (Figure 3a). By 2050, decarbonization measures result in very limited net avoided warming (0.07°C), consistent with Shindell and Smith, but rise to a likely detectable 0.25°C by 2060 and a major benefit of 1.4°C by 2100 (Table S5). In contrast, pairing decarbonization with mitigation measures targeting CH₄, BC, HFC, and N₂O (not an SLCP due to its longer lifetime) independent from decarbonization are essential to slowing the rate of warming by the 2030s to under 0.3°C per decade (Table 1, Figure 3b), similar to the 0.2°C to 0.25°C per decade warming prior to 2020. Recent studies suggest that rate of warming rather than level of warming controls likelihood of record-shattering extreme weather events. By 2050, the net avoided warming from the targeted non-CO₂ measures is 0.26°C, almost 4 times larger than the net benefit of decarbonization alone (0.07°C) (Table S5).”). When excluding consideration of unmasking of reflective particles, strategies that target super climate pollutants could avoid as much as 0.6°C by 2050 compared to 0.1-0.2°C for CO₂-focused strategies alone. Xu Y. & Ramanathan V. (2017) *Well below 2 °C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 114(39): 10315–10323, 10321 (“The SP [super pollutant] lever targets SLCPs. Reducing SLCP emissions thins the SP blanket within few decades, given the shorter lifetimes of SLCPs (weeks for BC to about 15 years for HFCs). The mitigation potential of the SP lever with a maximum deployment of current technologies ... is about 0.6 °C by 2050 and 1.2 °C by 2100 (SI Appendix, Fig. S5B and Table S1).”). See also Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7 (“Across the SSPs, the collective reduction of CH₄, ozone precursors and HFCs can make a difference of global mean surface air temperature of 0.2 with a very likely range of [0.1–0.4] °C in 2040 and 0.8 with a very likely range of [0.5–1.3] °C at the end of the 21st century (comparing SSP3-7.0 and SSP1-1.9), which is substantial in the context of the Paris Agreement. Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*). {6.6.3, 6.7.3, 4.4.4}”).

⁷ United Nations Environment Programme & World Meteorological Organization (2011) *INTEGRATED ASSESSMENT OF BLACK CARBON AND TROPOSPHERIC OZONE*, 254 (“Evaluating global mean temperature change, it was found that the targeted measures to reduce emissions of methane and BC could greatly reduce warming rates over the next few decades (Figure 6.1; Box 6.1). When all measures are fully implemented, warming during the 2030s relative to the present would be only half as much as in the reference scenario. In contrast, even a fairly aggressive strategy to reduce CO₂ emissions, as for the CO₂-measures scenario, does little to mitigate warming until after the next 20-30 years (Box 6.2).”), 262 (“Large impacts of the measures examined here were also seen for the Arctic despite the minimal amount of emissions currently taking place there. This occurs due to the high sensitivity of the Arctic both to pollutants that are transported there from remote sources and to radiative forcing that takes place in areas of the northern hemisphere outside the Arctic. The 16 measures examined here, including the measures on pellet stoves and coal briquettes, reduce warming in the Arctic by 0.7 °C (range 0.2 to 1.3 °C) at 2040. This is a large portion of the 1.1 °C (range 0.7 to 1.7 °C) warming projected under the reference scenario for the Arctic, and hence implementation of the measures would be virtually certain to substantially slow, but not halt, the pace of Arctic climate change.”). See also Shindell D., et al.

(2012) *Simultaneously Mitigating Near-Term Climate Change and Improving Human Health and Food Security*, SCIENCE 335(6065): 183–189, 183–185 (“The global mean response to the CH₄ plus BC measures was $-0.54 \pm 0.05^\circ\text{C}$ in the climate model. ... Roughly half the forcing is relatively evenly distributed (from the CH₄ measures). The other half is highly inhomogeneous, especially the strong BC forcing, which is greatest over bright desert and snow or ice surfaces. Those areas often exhibit the largest warming mitigation, making the regional temperature response to aerosols and ozone quite distinct from the more homogeneous response to well-mixed greenhouse gases. ... BC albedo and direct forcings are large in the Himalayas, where there is an especially pronounced response in the Karakoram, and in the Arctic, where the measures reduce projected warming over the next three decades by approximately two thirds and where regional temperature response patterns correspond fairly closely to albedo forcing (for example, they are larger over the Canadian archipelago than the interior and larger over Russia than Scandinavia or the North Atlantic).”); and United Nations Environment Programme & World Meteorological Organization (2011) *INTEGRATED ASSESSMENT OF BLACK CARBON AND TROPOSPHERIC OZONE*, 254 (“Evaluating global mean temperature change, it was found that the targeted measures to reduce emissions of methane and BC could greatly reduce warming rates over the next few decades (Figure 6.1; Box 6.1). When all measures are fully implemented, warming during the 2030s relative to the present would be only half as much as in the reference scenario. In contrast, even a fairly aggressive strategy to reduce CO₂ emissions, as for the CO₂-measures scenario, does little to mitigate warming until after the next 20-30 years (Box 6.2).”), 262 (“Large impacts of the measures examined here were also seen for the Arctic despite the minimal amount of emissions currently taking place there. This occurs due to the high sensitivity of the Arctic both to pollutants that are transported there from remote sources and to radiative forcing that takes place in areas of the northern hemisphere outside the Arctic. The 16 measures examined here, including the measures on pellet stoves and coal briquettes, reduce warming in the Arctic by 0.7 °C (range 0.2 to 1.3 °C) at 2040. This is a large portion of the 1.1 °C (range 0.7 to 1.7 °C) warming projected under the reference scenario for the Arctic, and hence implementation of the measures would be virtually certain to substantially slow, but not halt, the pace of Arctic climate change.”).

⁸ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-19 (“With every additional increment of global warming, changes in extremes continue to become larger. For example, every additional 0.5°C of global warming causes clearly discernible increases in the intensity and frequency of hot extremes, including heatwaves (*very likely*), and heavy precipitation (*high confidence*), as well as agricultural and ecological droughts in some regions (*high confidence*). Discernible changes in intensity and frequency of meteorological droughts, with more regions showing increases than decreases, are seen in some regions for every additional 0.5°C of global warming (*medium confidence*). Increases in frequency and intensity of hydrological droughts become larger with increasing global warming in some regions (*medium confidence*). There will be an increasing occurrence of some extreme events unprecedented in the observational record with additional global warming, even at 1.5°C of global warming. Projected percentage changes in frequency are higher for rarer events (*high confidence*).”).

⁹ Fischer E. M., Sippel S., & Knutti R. (2021) *Increasing probability of record-shattering climate extremes*, NAT. CLIM. CHANGE 11(8): 689–685, Supplementary Information (“In the main manuscript, we illustrate a fundamental difference in the behavior of (i) the statistically expected return levels or return periods of extremes traditionally defined as anomalies relative to a reference period, i.e. the probability of exceeding a fixed threshold and (ii) the expected probability of record-shattering extremes. For (i) the statistically expected return periods and levels are largely proportional to the warming level independent of the emission pathway (RCP/SSP), whereas for (ii) the statistically expected probability differs for the same warming level depending on the warming rate of the underlying forced response (i.e. the multi-member mean warming) and thereby on the emission pathway (RCP or SSP).”).

¹⁰ Fischer E. M., Sippel S., & Knutti R. (2021) *Increasing probability of record-shattering climate extremes*, NAT. CLIM. CHANGE 11(8): 689–695, 689 (“Here, we show models project not only more intense extremes but also events that break previous records by much larger margins. These record-shattering extremes, nearly impossible in the absence of warming, are likely to occur in the coming decades. We demonstrate that their probability of occurrence depends on warming rate, rather than global warming level, and is thus pathway-dependent. In high-emission

scenarios, week-long heat extremes that break records by three or more standard deviations are two to seven times more probable in 2021–2050 and three to 21 times more probable in 2051–2080, compared to the last three decades.”); Supplementary Information (“In the main manuscript, we illustrate a fundamental difference in the behavior of (i) the statistically expected return levels or return periods of extremes traditionally defined as anomalies relative to a reference period, i.e. the probability of exceeding a fixed threshold and (ii) the expected probability of record-shattering extremes. For (i) the statistically expected return periods and levels are largely proportional to the warming level independent of the emission pathway (RCP/SSP), whereas for (ii) the statistically expected probability differs for the same warming level depending on the warming rate of the underlying forced response (i.e. the multi-member mean warming) and thereby on the emission pathway (RCP or SSP).”).

¹¹ Lee J.-Y., Marotzke J., Bala G., Cao L., Corti S., Dunne J. P., Engelbrecht F., Fischer E., Fyfe J. C., Jones C., Maycock A., Mutemi J., Ndiaye O., Panickal S., & T. Zhou (2021) *Chapter 4: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 555 (“The threshold-crossing time is defined as the midpoint of the first 20-year period during which the average GSAT exceeds the threshold. In all scenarios assessed here except SSP5-8.5, the central estimate of crossing the 1.5°C threshold lies in the early 2030s. This is in the early part of the *likely* range (2030–2052) assessed in the IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C (SR1.5), which assumed continuation of the then-current warming rate; this rate has been confirmed in the AR6. Roughly half of this difference between assessed crossing times arises from a larger historical warming diagnosed in AR6. The other half arises because for central estimates of climate sensitivity, most scenarios show stronger warming over the near term than was assessed as ‘current’ in SR1.5 (*medium confidence*).”). See also Tollefson J. (21 November 2023) *Is it too late to keep global warming below 1.5°C? The challenge in 7 charts*, NATURE (“At this rate, it could be less than a decade — possibly much sooner — before global warming reaches 1.5 °C above pre-industrial levels. Natural variations, such as the current El Niño warming in the tropical Pacific, can significantly influence temperatures in the short term. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) uses 10- and 20-year rolling averages when it calculates Earth’s surface temperature. This means there can be a long lag between the official IPCC estimate of global warming and the average temperatures in any given year.”).

¹² Diffenbaugh N. S. & Barnes E. A. (2023) *Data-driven predictions of the time remaining until critical global warming thresholds are reached*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 120(6): 1–9, 2 (“For 1.5 °C, the observed pattern of annual temperature anomalies in 2021 leads to a predicted time-to-threshold of 2035 (2030 to 2040) in the High scenario, 2033 (2028 to 2039) in the Intermediate scenario, and 2033 (2026 to 2041) in the Low scenario (Fig. 3). For 2 °C, the observed pattern of annual temperature anomalies in 2021 leads to a predicted time-to-threshold of 2050 (2043 to 2058) in the High scenario, 2049 (2043 to 2055) in the Intermediate scenario, and 2054 (2044 to 2065) in the Low scenario.”), discussed in Harvey C. (31 January 2023) *AI Predicts Warming Will Surpass 1.5 C in a Decade*, SCIENTIFIC AMERICAN. See also Xu Y., Ramanathan V., & Victor D. G. (2018) *Global warming will happen faster than we think*, Comment, NATURE 564(7734): 30–32, 30–31 (“But the latest IPCC special report underplays another alarming fact: global warming is accelerating. Three trends—rising emissions, declining air pollution and natural climate cycles—will combine over the next 20 years to make climate change faster and more furious than anticipated. In our view, there’s a good chance that we could breach the 1.5 °C level by 2030, not by 2040 as projected in the special report (see ‘Accelerated warming’). The climate-modelling community has not grappled enough with the rapid changes that policymakers care most about, preferring to focus on longer-term trends and equilibria.”). Since Xu, Ramanathan, and Victor comment was published, the IPCC has updated its estimate for when 1.5 °C will be exceeded: see Arias P. A., et al. (2021) *Technical Summary*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 42 (“Timing of crossing 1.5°C global warming: Slightly different approaches are used in SR1.5 and in this Report. SR1.5 assessed a likely range of 2030 to 2052 for reaching a global warming level of 1.5°C (for a 30-year period), assuming a continued, constant rate of warming. In AR6, combining the larger estimate of global warming to date and the assessed climate response to all considered scenarios, the central estimate of crossing 1.5°C of global warming (for a 20-year period) occurs in the early 2030s, ten years earlier than the midpoint of the

likely range assessed in the SR1.5, assuming no major volcanic eruption. (TS.1.3, Cross-Section Box TS.1)”). See also Dvorak M. T., Armour K. C., Frierson D. M. W., Proistosescu C., Baker M. B., & Smith C. J. (2022) *Estimating the timing of geophysical commitment to 1.5 and 2.0 °C of global warming*, NAT. CLIM. CHANGE 12: 547–552, 547 (“Following abrupt cessation of anthropogenic emissions, decreases in short-lived aerosols would lead to a warming peak within a decade, followed by slow cooling as GHG concentrations decline. This implies a geophysical commitment to temporarily crossing warming levels before reaching them. Here we use an emissions-based climate model (FaIR) to estimate temperature change following cessation of emissions in 2021 and in every year thereafter until 2080 following eight Shared Socioeconomic Pathways (SSPs). Assuming a medium-emissions trajectory (SSP2–4.5), we find that we are already committed to peak warming greater than 1.5 °C with 42% probability, increasing to 66% by 2029 (340 GtCO₂ relative to 2021). Probability of peak warming greater than 2.0 °C is currently 2%, increasing to 66% by 2057 (1,550 GtCO₂ relative to 2021). Because climate will cool from peak warming as GHG concentrations decline, committed warming of 1.5 °C in 2100 will not occur with at least 66% probability until 2055.”).

¹³ Xu Y., Ramanathan V., & Victor D. G. (2018) *Global warming will happen faster than we think*, NATURE 564(7734): 30–32, 31 (“In 2017, industrial carbon dioxide emissions are estimated to have reached about 37 gigatonnes². This puts them on track with the highest emissions trajectory the IPCC has modelled so far. This dark news means that the next 25 years are poised to warm at a rate of 0.25–0.32 °C per decade³. That is faster than the 0.2 °C per decade that we have experienced since the 2000s, and which the IPCC used in its special report.”). For historical rates of warming, see Lindsey R. & Dahlman L. (18 January 2024) *Climate Change: Global Temperature*, National Oceanic and Atmospheric Administration (“Though warming has not been uniform across the planet, the upward trend in the globally averaged temperature shows that more areas are warming than cooling. According to NOAA’s 2023 Annual Climate Report the combined land and ocean temperature has increased at an average rate of 0.11° Fahrenheit (0.06° Celsius) per decade since 1850, or about 2° F in total. The rate of warming since 1982 is more than three times as fast: 0.36° F (0.20° C) per decade.”).

¹⁴ World Meteorological Organization (2023) *WMO GLOBAL ANNUAL TO DECADEAL CLIMATE UPDATE*, 2 (“The chance of global near-surface temperature exceeding 1.5°C above preindustrial levels for at least one year between 2023 and 2027 is more likely than not (66%). It is unlikely (32%) that the five-year mean will exceed this threshold.”). For previous years, see Madge G. (8 May 2022) *Temporary breaching of 1.5C in next five years?*, UK MET OFFICE (“The chance of at least one year exceeding 1.5°C above pre-industrial levels between 2022–2026 is about as likely as not (48%). However, there is only a very small chance (10%) of the five-year mean exceeding this threshold.”); discussing World Meteorological Organization (2022) *GLOBAL ANNUAL TO DECADEAL CLIMATE UPDATE*. See also Hook L. (9 May 2022) *World on course to breach global 1.5C warming threshold within five years*, FINANCIAL TIMES. World Meteorological Organization (2021) *WMO GLOBAL ANNUAL TO DECADEAL CLIMATE UPDATE*, 5 (“Relative to pre-industrial conditions, the annual mean global near surface temperature is predicted to be between 0.9°C and 1.8°C higher (90% confidence interval). The chance of at least one year exceeding 1.5°C above pre-industrial levels is 44% and is increasing with time. There is a very small chance (10%) of the five-year mean exceeding this threshold. The Paris Agreement refers to a global temperature increase of 1.5°C, which is normally interpreted as the long-term warming, but temporary exceedances would be expected as global temperatures approach the threshold.”); discussed in Hodgson C. (26 May 2021) *Chance of temporarily reaching 1.5C in warming is rising, WMO says*, FINANCIAL TIMES; World Meteorological Organization (2020) *UNITED IN SCIENCE 2020*, 16 (“Figure 2 shows that in the five-year period 2020–2024, the annual mean global near surface temperature is predicted to be between 0.91 °C and 1.59 °C above pre-industrial conditions (taken as the average over the period 1850 to 1900). The chance of at least one year exceeding 1.5 °C above pre-industrial levels is 24%, with a very small chance (3%) of the five-year mean exceeding this level. Confidence in forecasts of global mean temperature is high. However, the coronavirus lockdown caused changes in emissions of greenhouse gases and aerosols that were not included in the forecast models. The impact of changes in greenhouse gases is likely small based on early estimates (Le Quéré et al. 2020 and Carbonbrief.org.)”); and McGuire B. (12 September 2022) *Why we should forget about the 1.5C global heating target*, THE GUARDIAN.

¹⁵ This value is averaged from five agencies' reported 2023 temperature anomalies. Datasets used by different scientific agencies tend to have fewer data (and thus different baselines) for the pre-industrial period of 1850–1900, and so report slightly different values for the temperature anomaly. For data reported by the five agencies, see Hausfather Z. (12 January 2024) *State of the Climate: 2023 smashes records for surface temperature and ocean heat*, CARBON BRIEF.

¹⁶ Abnett K. & Dickie G. (8 November 2023) *This year "virtually certain" to be warmest in 125,000 years, EU scientists say*, REUTERS ("This year is "virtually certain" to be the warmest in 125,000 years, European Union scientists said on Wednesday, after data showed last month was the world's hottest October in that period. Last month smashed through the previous October temperature record, from 2019, by a massive margin, the EU's Copernicus Climate Change Service (C3S) said. "The record was broken by 0.4 degrees Celsius, which is a huge margin," said C3S Deputy Director Samantha Burgess, who described the October temperature anomaly as "very extreme". ... "When we combine our data with the IPCC, then we can say that this is the warmest year for the last 125,000 years," Burgess said.").

¹⁷ Hausfather Z. (2024) *State of the Climate: 2023 smashes records for surface temperature and ocean heat*, CARBON BRIEF ("However, 2023 was so exceptionally warm that it suggests that this El Niño might be behaving differently, with global surface temperatures responding more rapidly than in the past. If this is the case, 2024 would not necessarily follow the pattern of past El Niño events and is less likely to be substantially warmer than 2023. ... The Met Office, Dr Schmidt, Berkeley Earth and Carbon Brief estimates all have 2024 as more likely than not to be warmer than 2023 – but only by a small margin. In all estimates it is close to a coin flip which will end up as the warmer year. Against a 1880-99 pre-industrial baseline, the central estimate of all four forecasts is just below 1.5C of warming, with ranges suggesting that temperatures could top 1.5C next year."). See also Madge G. (8 December 2023) *2024: First chance of a 1.5 °C year*, UK MET OFFICE ("The anticipated two-stage spike in global temperature has received a temporary and partial boost by the current El Niño event warming the tropical Pacific. But, says the Met Office's Prof Adam Scaife: "The main driver for record-breaking temperatures is the ongoing human-induced warming since the start of the Industrial Revolution." ... Global average temperatures are measured as the difference between 1850-1900: a proxy for the Industrial Revolution. The global average temperature for 2023 is expected to be below 1.5 °C, but next year's forecast suggests for the first time that values of 1.5 °C or above cannot be ruled out.").

¹⁸ Hansen J., Sato M., & Ruedy R. (12 January 2024) *Global Warming Acceleration: Causes and Consequences*, Columbia University, 1 ("We expect record monthly temperatures to continue into mid-2024 due to the present large planetary energy imbalance, with the 12-month running-mean global temperature reaching +1.6-1.7°C relative to 1880-1920 and falling to only +1.4 ± 0.1°C during the following La Nina. ... How do we know global temperature will continue to grow in the next 5-8 months, carrying the 12-month running-mean to at least 1.6-1.7°C? The main reason is the large increase of global absorbed solar radiation (ASR) since 2015 (Fig. 4), which is a decrease of Earth's albedo (reflectivity) by 0.4% (1.4/340).[9] This reduced albedo is equivalent to a sudden increase of atmospheric CO₂ from 420 to 530 ppm. Increase of EEI (Fig. 5) is smaller than the increase of ASR because the warming increases thermal emission to space. The increase of ASR since 2015 is particularly important because it acts as a "fresh forcing," regardless of whether it is a forcing, a persistent feedback, or a combination thereof. Given the absence of monitoring of global aerosol forcing, ASR provides our best clue as to the changing drives for global warming. These assertions warrant discussion.").

¹⁹ Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, NATURE 575(7784): 592–595, 594 ("In our view, the clearest emergency would be if we were approaching a global cascade of tipping points that led to a new, less habitable, 'hothouse' climate state¹¹. Interactions could happen through ocean and atmospheric circulation or through feedbacks that increase greenhouse-gas levels and global temperature."). See also Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) *Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points*, SCIENCE 377(6611): 1–10, 7 ("Current warming is ~1.1°C above preindustrial and even with rapid emission cuts warming will reach ~1.5°C by the 2030s

(23). We cannot rule out that WAIS and GrIS tipping points have already been passed (see above) and several other tipping elements have minimum threshold values within the 1.1 to 1.5°C range. Our best estimate thresholds for GrIS, WAIS, REEF, and abrupt permafrost thaw (PFAT) are ~1.5°C although WAIS and GrIS collapse may still be avoidable if GMST returns below 1.5°C within an uncertain overshoot time (likely decades) (94).”); Wunderling N., Donges J. F., Kurths J., & Winkelmann R. (2021) *Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming*, *EARTH SYST. DYN.* 12(2): 601–619, 614 (“In this study, we show that this risk increases significantly when considering interactions between these climate tipping elements and that these interactions tend to have an overall destabilising effect. Altogether, with the exception of the Greenland Ice Sheet, interactions effectively push the critical threshold temperatures to lower warming levels, thereby reducing the overall stability of the climate system. The domino-like interactions also foster cascading, non-linear responses. Under these circumstances, our model indicates that cascades are predominantly initiated by the polar ice sheets and mediated by the AMOC. Therefore, our results also imply that the negative feedback loop connecting the Greenland Ice Sheet and the AMOC might not be able to stabilise the climate system as a whole.”); and Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) *AR6 SYNTHESIS REPORT: CLIMATE CHANGE 2023, Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Arias P., Bustamante M., Elgizouli I., Flato G., Howden M., Méndez C., Pereira J., Pichs-Madruga R., Rose S. K., Saheb Y., Sánchez R., Ürge-Vorsatz D., Xiao C., & Yassaa N. (eds.), 42 (“Risks associated with large-scale singular events or tipping points, such as ice sheet instability or ecosystem loss from tropical forests, transition to high risk between 1.5°C–2.5°C (*medium confidence*) and to very high risk between 2.5°C–4°C (*low confidence*). The response of biogeochemical cycles to anthropogenic perturbations can be abrupt at regional scales and irreversible on decadal to century time scales (*high confidence*). The probability of crossing uncertain regional thresholds increases with further warming (*high confidence*).”).

²⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers, in CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), SPM-11 (“Approximately 3.3 to 3.6 billion people live in contexts that are highly vulnerable to climate change (*high confidence*).”), SPM-13 (“Levels of risk for all Reasons for Concern (RFC) are assessed to become high to very high at lower global warming levels than in AR5 (*high confidence*). Between 1.2°C and 4.5°C global warming level very high risks emerge in all five RFCs compared to just two RFCs in AR5 (*high confidence*). Two of these transitions from high to very high risk are associated with near-term warming: risks to unique and threatened systems at a median value of 1.5°C [1.2 to 2.0] °C (*high confidence*) and risks associated with extreme weather events at a median value of 2°C [1.8 to 2.5] °C (*medium confidence*). Some key risks contributing to the RFCs are projected to lead to widespread, pervasive, and potentially irreversible impacts at global warming levels of 1.5–2°C if exposure and vulnerability are high and adaptation is low (*medium confidence*). ... SPM.B.3 Global warming, reaching 1.5°C in the near-term, would cause unavoidable increases in multiple climate hazards and present multiple risks to ecosystems and humans (*very high confidence*). The level of risk will depend on concurrent near-term trends in vulnerability, exposure, level of socioeconomic development and adaptation (*high confidence*).”).

²¹ Zhang Y., Held I., & Fueglistaler S. (2021) *Projections of tropical heat stress constrained by atmospheric dynamics*, *NAT. GEO.* 14(3): 133–137, 133 (“For each 1 °C of tropical mean warming, global climate models project extreme TW (the annual maximum of daily mean or 3-hourly values) to increase roughly uniformly between 20° S and 20° N latitude by about 1 °C. This projection is consistent with theoretical expectation based on tropical atmospheric dynamics, and observations over the past 40 years, which gives confidence to the model projection. For a 1.5 °C warmer world, the probable (66% confidence interval) increase of regional extreme TW is projected to be 1.33–1.49 °C, whereas the uncertainty of projected extreme temperatures is 3.7 times as large. These results suggest that limiting global warming to 1.5 °C will prevent most of the tropics from reaching a TW of 35 °C, the limit of human adaptation.”). See also Vecellio D. J., Kong Q., Kenney W. L., & Huber M. (2023) *Greatly enhanced risk to humans as a consequence of empirically determined lower moist heat stress tolerance*, *PROC. NAT’L. ACAD. SCI.* 120(42): 1–9, 3 (“In climate change scenarios of 2 °C warming and below, conditions associated with threshold exceedance are limited to the Indus River Valley, east China, the Persian Gulf coastline, and sub-Saharan Africa. Increases in the

number of hours over the threshold in these regions are mild in transitioning from 1.5 °C to 2 °C (Fig. 1 A and B)... . In this study’s worst-case scenario of a 4 °C warmer world, around 2.7 billion persons will experience at least 1 wk of daytime (8 h) ambient conditions associated with uncompensable heat stress, 1.5 billion will experience a month under such conditions, and 363.7 million will be faced with an entire season (3 mo) of life-altering extreme heat (Fig. 1F).”).

²² Lenton T. M., Xu C., Abrams J. F., Ghadiali A., Loriani S., Sakschewski B., Zimm C., Ebi K. L., Dunn R. R., Svenning J.-C., & Scheffer M. (2023) *Quantifying the human cost of global warming*, NAT. SUSTAIN. 6(10): 1–11, 7 (calculated based on Supplementary Data 1 “Country-level results for population, land area and land fraction exposed to MAT > 29°C”) (“The ~2.7 °C global warming expected under current policies puts around a third of the world population outside the niche. It exposes almost the entire area of some countries (for example, Burkina Faso, Mali) to unprecedented heat, including some Small Island Developing States (for example, Aruba, Netherlands Antilles; Fig. 5b)—a group with members already facing an existential risk from sea-level rise. The gains from fully implementing all announced policy targets and limiting global warming to ~1.8 °C are considerable, but would still leave nearly 10% of people exposed to unprecedented heat. Meeting the goal of the Paris Agreement to limit global warming to 1.5 °C halves exposure outside the temperature niche relative to current policies and limits those exposed to unprecedented heat to 5% of people.”), 1 (“By end-of-century (2080–2100), current policies leading to around 2.7 °C global warming could leave one-third (22–39%) of people outside the niche. Reducing global warming from 2.7 to 1.5 °C results in a ~5-fold decrease in the population exposed to unprecedented heat (mean annual temperature ≥29 °C). The lifetime emissions of ~3.5 global average citizens today (or ~1.2 average US citizens) expose one future person to unprecedented heat by end-of-century. That person comes from a place where emissions today are around half of the global average. These results highlight the need for more decisive policy action to limit the human costs and inequities of climate change.”), 5 (“Assuming a future world of 9.5 billion, India has the greatest population exposed under 2.7 °C global warming, >600 million, but this reduces >6-fold to ~90 million at 1.5 °C global warming. Nigeria has the second largest population exposed, >300 million under 2.7 °C global warming, but this reduces >7-fold to 20-fold, from ~100 million under 2.7 °C global warming to 80 million exposed under 2.7 °C global warming, there are even larger proportional reductions at 1.5 °C global warming. Sahelian–Saharan countries including Sudan (sixth ranked) and Niger (seventh) have a ~2-fold reduction in exposure, because they still have a large fraction of land area hot exposed at 1.5 °C global warming (Fig. 5b). The fraction of land area exposed approaches 100% for several countries under 2.7 °C global warming (Fig. 5b). Brazil has the greatest absolute land area exposed under 2.7 °C global warming, despite almost no area being exposed at 1.5 °C, and Australia and India also experience massive increases in absolute area exposed (Fig. 4). (If the future population reaches 11.1 billion, the ranking of countries by population exposed remains similar, although the numbers exposed increase.) Those most exposed under 2.7 °C global warming come from nations that today are above the median poverty rate and below the median per capita emissions (Fig. 6).”). See also Xu C., Kohler T. A., Lenton T. M., Svenning J.-C., & Scheffer M. (2020) *Future of the human climate niche*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 117(21): 11350–11355, 11352 (“Such a calculation suggests that for the RCP8.5 business-as-usual climate scenario, and accounting for expected demographic developments (the SSP3 scenario[15]), ~3.5 billion people (roughly 30% of the projected global population; SI Appendix, Fig. S12) would have to move to other areas if the global population were to stay distributed relative to temperature the same way it has been for the past millennia (SI Appendix, Fig. S13). Strong climate mitigation following the RCP2.6 scenario would substantially reduce the geographical shift in the niche of humans and would reduce the theoretically needed movement to ~1.5 billion people (~13% of the projected global population; SI Appendix, Figs. S12 and S13).”).

²³ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2022) *Summary for Policymakers, in GLOBAL METHANE ASSESSMENT: 2030 BASELINE REPORT*, 5 (“The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)’s Sixth Assessment shows that human-driven methane emissions are responsible for nearly 45 per cent of current net warming. The IPCC has continuously emphasized the critical urgency of reducing anthropogenic emissions – from methane and from other climate pollutants – if the world is to stay below 1.5° and 2°C targets.”).

²⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), Figure SPM.2.

²⁵ Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, ENVIRON. SCI. POLICY 134: 127–136, 128 (“The increase in atmospheric CH₄ observed over the past decade has been tracking RCP8.5, the warmest scenario assessed by the IPCC, which yields an estimated 4.3°C of warming globally by 2100 (Jackson et al., 2020; Saunio et al., 2020; Nisbet et al., 2020). Furthermore, there is no reversal of this trend on the horizon: under current policy scenarios, by 2050 CH₄ emissions are expected to increase by 30% compared to 2015 levels (Höglund-Isaksson et al., 2020). Together with recent trends, these prognoses serve to underscore the urgency of mitigating CH₄ emissions.”). See also United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2022) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: 2030 BASELINE REPORT*, 34 (Figure 7 shows baseline emissions increasing from about 380 MtCH₄ in 2020 to 470 MtCH₄ in 2050).

²⁶ World Meteorological Organization (26 October 2022) *The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2021*, WMO GREENHOUSE GAS BULLETIN (“In 2020 and 2021, the global network of the WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Programme detected the largest within-year increases (15 and 18 ppb, respectively) of atmospheric methane (CH₄) since systematic measurements began in the early 1980s (Figure 1). The causes of these exceptional increases are still being investigated by the global greenhouse gas science community. Analyses of measurements of the abundances of atmospheric CH₄ and its stable carbon isotope ratio ¹³C/¹²C (reported as δ¹³C(CH₄)) (Figure 2) indicate that the increase in CH₄ since 2007 is associated with biogenic processes, but the relative contributions of anthropogenic and natural sources to this increase are unclear. While all conceivable efforts to reduce CH₄ emissions should be employed, this is not a substitute for reducing CO₂ emissions, whose impact on climate will continue for millennia.”). See also United States Department of Commerce, *Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases* (last visited 25 January 2023); and Allen G. H. (2022) *Cause of the 2020 surge in atmospheric methane clarified*, NATURE 612(7940): 413–14 (“Its atmospheric concentration has nearly tripled since pre-industrial times, from 700 parts per billion (p.p.b.) to more than 1,900 p.p.b. today³ (see also go.nature.com/3xm1dx4). During 2007–19, the concentration rose at a rate of 7.3 ± 2.4 p.p.b. per year. Then, in 2020, the methane growth rate increased dramatically to 15.1 ± 0.4 p.p.b. per year. ... The concentration of atmospheric methane surged again (see go.nature.com/3xm1dx4) to 18.2 ± 0.5 p.p.b. per year in 2021 — another mysterious acceleration without a clear cause, and the fastest rate of increase ever recorded.”).

²⁷ Peng S., Lin X., Thompson R. L., Xi Y., Liu G., Hauglustaine D., Lan X., Poulter B., Ramonet M., Saunio M., Yin Y., Zhang Z., Zheng B., & Ciais P. (2022) *Wetland emission and atmospheric sink changes explain methane growth in 2020*, NATURE 612(7940): 477–482, 481 (“In summary, our results show that an increase in wetland emissions, owing to warmer and wetter conditions over wetlands, along with decreased OH, contributed to the soaring methane concentration in 2020. The large positive MGR anomaly in 2020, partly due to wetland and other natural emissions, reminds us that the sensitivity of these emissions to interannual variation in climate has had a key role in the renewed growth of methane in the atmosphere since 2006. The wetland methane–climate feedback is poorly understood, and this study shows a high interannual sensitivity that should provide a benchmark for future coupled CH₄ emissions–climate models. We also show that the decrease in atmospheric CH₄ sinks, which resulted from a reduction of tropospheric OH owing to less NO_x emissions during the lockdowns, contributed 53 ± 10% of the MGR anomaly in 2020 relative to 2019. Therefore, the unprecedentedly high methane growth rate in 2020 was a compound event with both a reduction in the atmospheric CH₄ sink and an increase in Northern Hemisphere natural sources. With emission recovery to pre-pandemic levels in 2021, there could be less reduction in OH. The persistent high MGR anomaly in 2021 hints at mechanisms that differ from those responsible for 2020, and thus awaits an explanation.”). See also Qu Z., Jacob D. J., Zhang Y., Shen L., Varon D. J., Lu X., Scarpelli T., Bloom A., Worden J., & Parker R. J. (2022) *Attribution of the 2020 surge in atmospheric methane by inverse analysis of GOSAT observations*, ENVIRON. RES. LETT. 17(9): 1–8, 6 (“The inversion shows an increase in the methane growth rate from 28 Tg a⁻¹ in 2019 to 59 Tg a⁻¹ in 2020, consistent with observations. This implies a forcing on the methane budget away from a steady state by 36 Tg a⁻¹ from 2019 to 2020, 86% (82 ± 18% in the nine-member inversion ensemble) of which is from the increase in

emissions between the two years and the rest is from the decrease in tropospheric OH. Changes in methane mass offset the forcing by 5 Tg a^{-1} . The global mean OH concentration decreases by 1.2% ($1.6 \pm 1.5\%$) from 2019 to 2020, which could be due to reduced NOx emissions from COVID-19 decreases in economic activity but accounts for only a small fraction of the methane surge. We find that half of the increase in methane emissions from 2019 to 2020 is due to Africa. High precipitation and flooding in East Africa leading to increased wetland methane emissions could explain the increase. We also find a large relative increase in Canadian emissions, also apparently driven by wetlands.”).

²⁸ National Oceanic and Atmospheric Administration (5 April 2023) *Greenhouse gases continued to increase rapidly in 2022* (“Atmospheric methane, which is far less abundant but much more potent than CO₂ at trapping heat in the atmosphere, increased to an average of 1,911.9 parts per billion (ppb). The 2022 methane increase was 14.0 ppb, the fourth-largest annual increase recorded since NOAA’s systematic measurements began in 1983, and follows record growth in 2020 and 2021. Methane levels in the atmosphere are now more than two and a half times their pre-industrial level.”). See also National Oceanic and Atmospheric Administration Global Monitoring Laboratory (2023) *Global CH₄ Monthly Means* (Preliminary data posted on 5 April 2023 showed atmospheric CH₄ concentrations in December 2022 reached 1924.99 ppb compared with 1908.84 ppb in December 2021.).

²⁹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 17 (“Mitigation of methane is very likely the strategy with the greatest potential to decrease warming over the next 20 years.”). See also Ross K., Waskow D., & Ge M. (17 September 2021) *How Methane Emissions Contribute to Climate Change*, WORLD RESOURCES INSTITUTE (“Methane is the **second most abundant** human-caused greenhouse gas (GHG), and is **86 times more powerful** than carbon dioxide over 20 years in the atmosphere (**34 times more powerful** over 100 years). Because it exists for a relatively short time in the atmosphere, cutting methane provides a quick benefit in terms of limiting near-term temperature rise. Studies **estimate** that ambitious actions to reduce methane can avoid 0.3 degrees C of warming by 2050.”); and Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) *AR6 SYNTHESIS REPORT: CLIMATE CHANGE 2023, Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Arias P., Bustamante M., Elgizouli I., Flato G., Howden M., Méndez C., Pereira J., Pichs-Madruga R., Rose S. K., Saheb Y., Sánchez R., Ürge-Vorsatz D., Xiao C., & Yassaa N. (eds.), 33, 57 (“Global warming will continue to increase in the near term in nearly all considered scenarios and modelled pathways. Deep, rapid and sustained GHG emissions reductions, reaching net zero CO₂ emissions and including strong emissions reductions of other GHGs, in particular CH₄, are necessary to limit warming to 1.5°C (>50%) or less than 2°C (>67%) by the end of century (*high confidence*). ... All global modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) or lower by 2100 involve reductions in both net CO₂ emissions and non-CO₂ emissions (see Figure 3.6) (*high confidence*). For example, in pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot, global CH₄ (methane) emissions are reduced by 34% [21–57%] below 2019 levels by 2030 and by 44% [31–63%] in 2040 (*high confidence*). Global CH₄ emissions are reduced by 24% [9–53%] below 2019 levels by 2030 and by 37% [20–60%] in 2040 in modelled pathways that limit warming to 2°C with action starting in 2020 (>67%) (*high confidence*). (CrossSection Box.2).”).

³⁰ Ocko I. B., Sun T., Shindell D., Oppenheimer M., Hristov A. N., Pacala S.W., Mauzerall D. L., Xu Y., & Hamburg S. P. (2021) *Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming*, ENVIRON. RES. LETT. 16(5): 1–11, 1 (“Pursuing all mitigation measures now could slow the global-mean rate of near-term decadal warming by around 30%, avoid a quarter of a degree centigrade of additional global-mean warming by midcentury, and set ourselves on a path to avoid more than half a degree centigrade by end of century. On the other hand, slow implementation of these measures may result in an additional tenth of a degree of global-mean warming by midcentury and 5% faster warming rate (relative to fast action), and waiting to pursue these measures until midcentury may result in an additional two tenths of a degree centigrade by midcentury and 15% faster warming rate (relative to fast action).”). See also Sun X., Wang P., Ferris T., Lin H., Dreyfus G., Gu B.H., Zaelke D., & Wang Y. (2022) *Fast action on short-lived climate pollutants and nature-based solutions to help countries meet carbon neutrality goals*, ADV. CLIM. CHANGE RES. 13(4): 564–577.

³¹ International Energy Agency (2024) [GLOBAL METHANE TRACKER 2024](#) (“Cutting methane emissions from fossil fuels by 75% by 2030 is vital to limit warming to 1.5 °C”).

³² International Energy Agency (2024) [GLOBAL METHANE TRACKER 2024](#) (“Taken together, we estimate that if all methane policies and pledges made by countries and companies to date are implemented and achieved in full and on time, methane emissions from fossil fuels would decline by around 50% by 2030. However, in most cases, these pledges are not yet backed up by detailed plans, policies and regulations. The detailed methane policies and regulations that currently exist would cut emissions from fossil fuel operations by around 20% from 2023 levels by 2030.”).

³³ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 17 (“Mitigation of methane is very likely the strategy with the greatest potential to decrease warming over the next 20 years.”).

³⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) [Summary for Policymakers](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-36 (“Strong, rapid and sustained reductions in CH₄ emissions would also limit the warming effect resulting from declining aerosol pollution and would improve air quality.”). See also Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Bernsten T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) [Chapter 6: Short-lived climate forcers](#), in [CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS](#), *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7 (“Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*). {6.6.3, 6.7.3, 4.4.4}”).

³⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) [Summary for Policymakers](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE](#), *Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., & Malley J. (eds.), SPM-30–SPM-31 (“Deep GHG emissions reductions by 2030 and 2040, particularly reductions of methane emissions, lower peak warming, reduce the likelihood of overshooting warming limits and lead to less reliance on net negative CO₂ emissions that reverse warming in the latter half of the century. ... Future non-CO₂ warming depends on reductions in non-CO₂ GHG, aerosol and their precursor, and ozone precursor emissions. In modelled global low emission pathways, the projected reduction of cooling and warming aerosol emissions over time leads to net warming in the near- to mid-term. In these mitigation pathways, the projected reductions of cooling aerosols are mostly due to reduced fossil fuel combustion that was not equipped with effective air pollution controls. Non-CO₂ GHG emissions at the time of net zero CO₂ are projected to be of similar magnitude in modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) or lower. These non-CO₂ GHG emissions are about 8 [5–11] GtCO₂-eq per year, with the largest fraction from CH₄ (60% [55–80%]), followed by N₂O (30% [20–35%]) and F-gases (3% [2–20%]). [FOOTNOTE 52] Due to the short lifetime of CH₄ in the atmosphere, projected deep reduction of CH₄ emissions up until the time of net zero CO₂ in modelled mitigation pathways effectively reduces peak global warming. (*high confidence*) {3.3, AR6 WG I SPM D1.7}”).

³⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) [Summary for Policymakers](#), in [CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE](#), *Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., & Malley J. (eds.), SPM-22 (“C.1.2 In modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) assuming immediate action, global net CO₂ emissions are reduced compared to modelled 2019 emissions by 27% [11–46%] in 2030 and by 52% [36–70%] in 2040; and global CH₄ emissions are reduced by 24% [9–53%] in 2030 and by 37% [20–60%] in 2040. In pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot global net CO₂ emissions are reduced

compared to modelled 2019 emissions by 48% [36–69%] in 2030 and by 80% [61–109%] in 2040; and global CH₄ emissions are reduced by 34% [21–57%] in 2030 and 44% [31–63%] in 2040. There are similar reductions of non-CO₂ emissions by 2050 in both types of pathways: CH₄ is reduced by 45% [25–70%]; N₂O is reduced by 20% [–5 – 55%]; and F-Gases are reduced by 85% [20–90%]. [FOOTNOTE 44] Across most modelled pathways, this is the maximum technical potential for anthropogenic CH₄ reductions in the underlying models (*high confidence*). Further emissions reductions, as illustrated by the IMP-SP pathway, may be achieved through changes in activity levels and/or technological innovations beyond those represented in the majority of the pathways (*medium confidence*). Higher emissions reductions of CH₄ could further reduce peak warming. (*high confidence*) (Figure SPM.5 {3.3}).”)

³⁷ Rogelj J. & Lamboll R. (2024) *Substantial reductions in non-CO₂ greenhouse gas emissions reductions implied by IPCC estimates of the remaining carbon budget*, COMMUN. EARTH ENVIRON. 5: 1–5, 2 (“Here, we uncover the broader non-CO₂ emissions assumptions that underlie some of the most prominent RCB estimates that are currently available in the literature, and show how shortfall in mitigation ambition for methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) put achievement of the Paris Agreement targets out of reach. ... RCB estimates in line with limiting warming to 1.5 °C assume 1.5 °C-compatible CH₄ reductions from 2020 to 2050 of 51% (47–60%, range between 25th and 75th quantile regressions at 1.5 °C of global warming across scenarios, see Fig. 1, panel a).”).

³⁸ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 21 (“This is because a realistically paced phase-out of fossil fuels, or even a rapid one under aggressive decarbonization, is likely to have minimal net impacts on near-term temperatures due to the removal of co-emitted aerosols (Shindell and Smith 2019). As methane is the most powerful driver of climate change among the short-lived substances (Myhre et al. 2013), mitigation of methane emissions is very likely to be the most powerful lever in reducing near-term warming. This is consistent with other assessments; for example, the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (IPCC AR5) showed that methane controls implemented between 2010 and 2030 would lead to a larger reduction in 2040 warming than the difference between RCPs 2.6, 4.5 and 6.0 scenarios. (The noted IPCC AR5-era scenarios are called representative concentration pathways (RCPs, with the numerical value indicating the target radiative forcing in 2100 (Kirtman et al. 2013)).”). See also Shindell D. & Smith C. J. (2019) *Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels*, NATURE 573: 408–411, Addendum “Methods” (“We note that, although this study focuses on the effects of fossil-fuel related emissions, accounting for the effects of reductions in greenhouse gases from non-fossil sources—including fluorinated gases and both methane and nitrous oxide from agriculture—along with biofuels that are a large source of warming black carbon, could eliminate any near-term penalty entirely. In fact, given that the net effect of the fossil-fuel phase-out on temperature is minimal during the first 20 years (Fig. 3), reducing those other emissions is the only plausible way in which to decrease warming during that period.”).

³⁹ Lelieveld J., Klingmüller K., Pozzer A., Burnett R. T., Haines A., & Ramanathan V. (2019) *Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 116(15): 7192–7197, 7194 (“Finally, our model simulations show that fossil-fuel-related aerosols have masked about 0.51(±0.03) °C of the global warming from increasing greenhouse gases (Fig. 3). The largest temperature impacts are found over North America and Northeast Asia, being up to 2 °C. By removing all anthropogenic emissions, a mean global temperature increase of 0.73(±0.03) °C could even warm some regions up to 3 °C. Since the temperature increase from past CO₂ emissions is irreversible on human timescales, the aerosol warming will be unleashed during the phaseout (11, 19–22).”). See also Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 7 (Figure SPM.2c shows that Sulphur dioxide (SO₂) contributes –0.49 °C (–0.10 to –0.93 °C) to observed warming in 2010–2019 relative to 1850–1900); Samset B. H., Sand M., Smith C. J., Bauer S. E., Forster P. M., Fuglestedt J. S., Osprey S., & Schleussner C.-F. (2018) *Climate impacts from a removal of anthropogenic aerosol emissions*, GEOPHYS. RES. LETT. 45(2): 1020–1029, 1020 (“Limiting global warming to 1.5 or 2.0°C requires strong mitigation of anthropogenic greenhouse gas (GHG) emissions. Concurrently, emissions of anthropogenic aerosols will decline, due to coemission

with GHG, and measures to improve air quality. ... Removing aerosols induces a global mean surface heating of 0.5–1.1°C, and precipitation increase of 2.0–4.6%. Extreme weather indices also increase. We find a higher sensitivity of extreme events to aerosol reductions, per degree of surface warming, in particular over the major aerosol emission regions. ... “Plain Language Summary. To keep within 1.5 or 2° of global warming, we need massive reductions of greenhouse gas emissions. At the same time, aerosol emissions will be strongly reduced. We show how cleaning up aerosols, predominantly sulfate, may add an additional half a degree of global warming, with impacts that strengthen those from greenhouse gas warming. The northern hemisphere is found to be more sensitive to aerosol removal than greenhouse gas warming, because of where the aerosols are emitted today. This means that it does not only matter whether or not we reach international climate targets. It also matters how we get there.”); and Feijoo F., Mignone B. K., Kheshgi H. S., Hartin C., McJeon H., & Edmonds J. (2019) *Climate and carbon budget implications of linked future changes in CO₂ and non-CO₂ forcing*, ENVIRON. RES. LETT. 14(4): 1–11.

⁴⁰ Dreyfus G. B., Xu Y., Shindell D. T., Zaelke D., & Ramanathan V. (2022) *Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 119(22): 1–8, 1 (“We find that mitigation measures that target only decarbonization are essential for strong long-term cooling but can result in weak near-term warming (due to unmasking the cooling effect of co-emitted aerosols) and lead to temperatures exceeding 2°C before 2050. In contrast, pairing decarbonization with additional mitigation measures targeting short-lived climate pollutants (SLCPs) and N₂O, slows the rate of warming a decade or two earlier than decarbonization alone and avoids the 2°C threshold altogether. These non-CO₂ targeted measures when combined with decarbonization can provide net cooling by 2030, reduce the rate of warming from 2030 to 2050 by about 50%, roughly half of which comes from methane, significantly larger than decarbonization alone over this timeframe.”).

⁴¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-36 (“Strong, rapid and sustained reductions in CH₄ emissions would also limit the warming effect resulting from declining aerosol pollution and would improve air quality.”). See also Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-8 (“Additional CH₄ and BC mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with SO₂ reductions that would accompany decarbonization (*high confidence*).”); and Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Shukla P. R., Skea J., Slade R., Al Khouradje A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., & Malley J. (eds.), SPM-31 (“In modelled global low emission pathways, the projected reduction of cooling and warming aerosol emissions over time leads to net warming in the near- to mid-term. In these mitigation pathways, the projected reductions of cooling aerosols are mostly due to reduced fossil fuel combustion that was not equipped with effective air pollution controls.”).

⁴² Xu Y. & Ramanathan V. (2017) *Well below 2 °C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 114(39): 10315–10323, 10321 (“The SP [super pollutant] lever targets SLCPs. Reducing SLCP emissions thins the SP blanket within few decades, given the shorter lifetimes of SLCPs (weeks for BC to about 15 years for HFCs). The mitigation potential of the SP lever with a maximum deployment of current technologies ... is about 0.6 °C by 2050 and 1.2 °C by 2100 (SI Appendix, Fig. S5B and Table S1).”). See also Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7 (“Across the SSPs, the collective reduction of CH₄, ozone precursors and HFCs can make a difference of global mean surface air temperature of 0.2 with a very likely range of [0.1–0.4] °C in 2040 and 0.8 with a very likely range of [0.5–1.3] °C at the end of the 21st

century (comparing SSP3-7.0 and SSP1-1.9), which is substantial in the context of the Paris Agreement. Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*). {6.6.3, 6.7.3, 4.4.4}”).

⁴³ Olczak M., Piebalgs A., & Balcombe P. (2023) *A global review of methane policies reveals that only 13% of emissions are covered with unclear effectiveness*, ONE EARTH 6(5): 519–535, 520 (“Only ~13% (minimum [min.] 10%, maximum [max.] 17%) of global methane emissions are covered by direct methane mitigation policies, while limited policy stringency and reliance on inaccurate emission estimates remain barriers to effective policy. These findings suggest that a consistent approach for accurate identification, quantification, and verification of methane emission sources alongside greater policy coverage and stringency (e.g. measurable objectives and enforcement) must be put into place to realize significant methane emission reduction opportunities”).

⁴⁴ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 10 (“The levels of methane mitigation needed to keep warming to 1.5°C will not be achieved by broader decarbonization strategies alone. The structural changes that support a transformation to a zero-carbon society found in broader strategies will only achieve about 30 per cent of the methane reductions needed over the next 30 years. Focused strategies specifically targeting methane need to be implemented to achieve sufficient methane mitigation. At the same time, without relying on future massive-scale deployment of unproven carbon removal technologies, expansion of natural gas infrastructure and usage is incompatible with keeping warming to 1.5°C. (Sections 4.1, 4.2 and 4.3)”).

⁴⁵ United States Department of State (11 October 2021) *Joint U.S.-EU Statement on the Global Methane Pledge*, Press Release (“Countries joining the Global Methane Pledge commit to a collective goal of reducing global methane emissions by at least 30 percent from 2020 levels by 2030 and moving towards using highest tier IPCC good practice inventory methodologies to quantify methane emissions, with a particular focus on high emission sources. Successful implementation of the Pledge would reduce warming by at least 0.2 degrees Celsius by 2050.”).

⁴⁶ The *Global Methane Pledge* calls for reducing global methane emissions by at least 30 percent from 2020 levels by 2030, which is comparable to 35 percent reduction below 2030 business-as-usual projections and within the range found to be consistent with 1.5 °C pathways in Figure ES.1 of the *Global Methane Assessment*. See United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*; and United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *Briefing on the Global Methane Pledge* (“The Global Methane Pledge is a strong first step as the first-ever Heads-of-State global commitment to cut methane emissions at a level consistent with a 1.5 C pathway.”).

⁴⁷ Saunio M., *et al.* (2020) *The Global Methane Budget 2000-2017*, EARTH SYST. SCI. DATA 12(3): 1561–1623, 1561 (“For the 2008–2017 decade, global methane emissions are estimated by atmospheric inversions (a top-down approach) to be 576 Tg CH₄ yr⁻¹ (range 550–594, corresponding to the minimum and maximum estimates of the model ensemble). Of this total, 359 Tg CH₄ yr⁻¹ or ~ 60 % is attributed to anthropogenic sources, that is emissions caused by direct human activity (i.e. anthropogenic emissions; range 336–376 Tg CH₄ yr⁻¹ or 50 %–65 %).”).

⁴⁸ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 28 (“Fossil fuels: release during oil and gas extraction, pumping and transport of fossil fuels accounts for roughly 23 per cent of all anthropogenic emissions, with emissions from coal mining contributing 12 per cent.”).

⁴⁹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 28 (“Agriculture: emissions from enteric fermentation and manure management represent roughly 32 per cent of global anthropogenic emissions. Rice cultivation adds another 8 per cent to anthropogenic emissions. Agricultural waste burning contributes about 1 per cent or less.”).

⁵⁰ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 28 (“Waste: landfills and waste management represents the next largest component making up about 20 per cent of global anthropogenic emissions.”).

⁵¹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 8 (“Available targeted methane measures, together with additional measures that contribute to priority development goals, can simultaneously reduce human-caused methane emissions by as much as 45 per cent, or 180 million tonnes a year (Mt/yr) by 2030. This will avoid nearly 0.3°C of global warming by the 2040s and complement all long-term climate change mitigation efforts.”).

⁵² United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 10 (“Roughly 60 per cent, around 75 Mt/yr, of available targeted measures have low mitigation costs², and just over 50 per cent of those have negative costs – the measures pay for themselves quickly by saving money (Figure SDM2). Low-cost abatement potentials range from 60–80 per cent of the total for oil and gas, from 55–98 per cent for coal, and approximately 30–60 per cent in the waste sector. The greatest potential for negative cost abatement is in the oil and gas subsector where captured methane adds to revenue instead of being released to the atmosphere. (Section 4.2) ... Less than US\$ 600 per tonne of methane reduced, which would correspond to ~US\$ 21 per tonne of carbon dioxide equivalent if converted using the IPCC Fifth Assessment Report’s GWP₁₀₀ value of 28 that excludes carbon-cycle feedbacks.”).

⁵³ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 10 (“Roughly 60 per cent, around 75 Mt/yr, of available targeted measures have low mitigation costs², and just over 50 per cent of those have negative costs – the measures pay for themselves quickly by saving money (Figure SDM2). Low-cost abatement potentials range from 60–80 per cent of the total for oil and gas, from 55–98 per cent for coal, and approximately 30–60 per cent in the waste sector. The greatest potential for negative cost abatement is in the oil and gas subsector where captured methane adds to revenue instead of being released to the atmosphere. (Section 4.2) ... Less than US\$ 600 per tonne of methane reduced, which would correspond to ~US\$ 21 per tonne of carbon dioxide equivalent if converted using the IPCC Fifth Assessment Report’s GWP₁₀₀ value of 28 that excludes carbon-cycle feedbacks.”).

⁵⁴ International Energy Agency (2024) *GLOBAL METHANE TRACKER 2024* (“Methane abatement in the fossil fuel industry is one of the most pragmatic and lowest cost options to reduce greenhouse gas emissions.”).

⁵⁵ See generally International Energy Agency (2023), *THE IMPERATIVE OF CUTTING METHANE FROM FOSSIL FUELS: AN ASSESSMENT OF THE BENEFITS FOR THE CLIMATE AND HEALTH*, 3 (“More than 75% of methane emissions from oil and gas operations and half of emissions from coal today can be abated with existing technology, often at low cost. The oil and gas sector has the greatest share of ready-to-implement and cost-effective technical opportunities to reduce methane emissions.”); and International Energy Agency (2024) *GLOBAL METHANE TRACKER 2024* (“We estimate that around 80 Mt of annual methane emissions from fossil fuels can be avoided through the deployment of known and existing technologies, often at low – or even negative – cost. In our Net Zero Emissions by 2050 (NZE) Scenario – which sees the global energy sector achieving net zero emissions by mid-century, limiting the temperature rise to 1.5 °C – methane emissions from fossil fuel operations fall by around 75% by 2030.”).

⁵⁶ International Energy Agency (2022) *GLOBAL METHANE TRACKER 2022*, 5 (“The best companies and countries are showing what can be done to reduce emissions from oil and gas operations, but the intensity of methane emissions (emissions per unit of production) ranges widely. The best performing countries are more than 100 times better than the worst. Norway and the Netherlands have the lowest emissions intensities in our updated Tracker, and countries in the Middle East such as Saudi Arabia and the United Arab Emirates also have relatively low emissions intensities; Turkmenistan and Venezuela have the highest. If all producing countries were to match Norway’s emissions intensity, global methane emissions from oil and gas operations would fall by more than 90%.”), 24 (“The methane emissions

intensity of oil and gas operations varies greatly across countries, with the best performing countries having an emission intensity over 100 times lower than the worst performers. High emission intensities from oil and gas operations are not inevitable; they are an “above-ground issue” that can be addressed cost-effectively through a well-established combination of high operational standards, firm policy action and technology deployment.”). *See also* Ocko I. B., Sun T., Shindell D., Oppenheimer M., Hristov A. N., Pacala S. W., Mauzerall D. L., Xu Y., & Hamburg S. P. (2021) *Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming*, ENVIRON. RES. LETT. 16(5): 1–11, 5 (“For oil and gas, we supplement the IEA (2017) abatement potential of 75% below current levels with voluntary company commitments of capping upstream leakage. This results in an 83% below 2030 level abatement potential rather than 77% without industry targets.”).

⁵⁷ *See generally* International Energy Agency (2022) *NORWAY 2022: ENERGY POLICY REVIEW*, 52 (“The government has regulations in place to address emissions in the sector. Direct emissions of methane (venting and fugitive emissions) have long been regulated and flaring is only permitted when necessary for safety reasons. Norway is also part of the Global Methane Pledge of over 100 countries announced at COP26 to reduce global methane emissions by at least 30% from 2020 levels by 2030.”).

⁵⁸ International Energy Agency (2022) *NORWAY 2022: ENERGY POLICY REVIEW*, 41 (“The polluter-pays principle is a cornerstone of the Norwegian policy framework on climate change. Norway was one of the first countries in the world to put in place a carbon tax, already in 1991, covering the combustion of fossil fuels and the petroleum sector. Today, approximately 85% of domestic GHG emissions are either covered by the EU ETS or subject to a CO₂ tax (or other GHG taxes), or both. And nearly 70% of non-ETS emissions are covered by taxes on GHG emissions. Emissions of nitrous oxide and methane from agriculture constitute two-thirds of non-priced emissions. Methane from landfills is another important source of non-priced emissions. The practice of dumping biological waste on landfills has been banned, and these emissions will phase out.”).

⁵⁹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 87 (“Analysis of the technical potential to mitigate methane from four separate studies shows that for 2030, reductions of 29–57 Mt/yr could be made in the oil and gas subsector, 12–25 Mt/yr from coal mining, 29–36 Mt/yr in the waste sector and 6–9 Mt/yr from rice cultivation. Values for the livestock subsector are less consistent, ranging from 4–42 Mt/yr.”).

⁶⁰ United States Climate Alliance (2018) *FROM SLCPC CHALLENGE TO ACTION: A ROADMAP FOR REDUCING SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS TO MEET THE GOALS OF THE PARIS AGREEMENT*, 102 (“Within the waste sector, all cost abatement potential is concentrated within the solid waste subsector which has three to six times the potential found in the wastewater (sewage) subsector (Figure 4.9). Totals in the three available analyses are very similar for the full waste sector, so that the full range is captured by 32 ± 4 Mt/yr. Hence this sector has about half the potential of the fossil sector for all cost measures and a much narrower uncertainty range. Evaluating this mitigation potential as a share of projected 2030 waste sector emissions is complicated by a large divergence between them, which were ~70 Mt/yr in the Harmsen and US EPA analyses, whereas there was a much larger value of 114 Mt/yr in the IIASA analysis. Hence although all the studies find similar abatement potential, the share of 2030 emissions from waste estimated to be abatable ranges from just 25 per cent in the IIASA analysis to ~40-50 per cent in the US EPA and Harmsen analyses. For low-cost measures in the waste sector, the analyses are again fairly consistent with all falling within the range 16 ± 5 Mt/yr.”).

⁶¹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 87 (“Analysis of the technical potential to mitigate methane from four separate studies shows that for 2030, reductions of 29–57 Mt/yr could be made in the oil and gas subsector, 12–25 Mt/yr from coal mining, 29–36 Mt/yr in the waste sector and 6–9 Mt/yr from rice cultivation. Values for the livestock subsector are less consistent, ranging from 4–42 Mt/yr.”).

⁶² Lowe M. & Lowe-Skillern R. (2021) *Find, Measure, Fix: Jobs in the U.S. Methane Emissions Mitigation Industry*, DATU RESEARCH, 6 (“Methane emissions mitigation means jobs. A wide and steadily expanding range of skills are required, from field technicians to chemical engineers to data scientists. Interviews with firms indicate that these jobs offer upward mobility. Many firms expect to expand their workforce if new federal and/or state methane rules are put into place. Of the eight states that either have methane rules or are considering them, seven are among the top states for employee locations in the methane emissions mitigation industry, including California, Colorado, Pennsylvania, New York, Wyoming, New Mexico, and Ohio. This would suggest that employee locations are poised to grow if the federal government and/or states roll out new rules on methane emissions.”).

⁶³ von Braun J., Ramanathan V., & Turkson P. K. A. (2022) *Resilience of people and ecosystems under climate stress*, Pontifical Academy of Sciences (“Recommendations: *Resilience building must rest on three pillars: Mitigation, Adaptation & Transformation. Mitigation: Reduce climate risks. ... Adaptation: Reduce exposure and vulnerability to unavoidable climate risks. Exposure & vulnerability reduction has three faces: Reductions in sensitivity to climate change; Reductions in risk exposure; & enhancement of adaptive capacity. There are limits to adaptation and hence adaptation has to be integrated with mitigation actions to avoid crossing the limits.*”); where the definition of resilience is taken from Möller V., van Diemen R., Matthews J. B. R., Méndez C., Semenov S., Fuglestedt J. S., & Resinger A. (2022) *Annex II: Glossary*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), AII-37–AII-38 (“The capacity of interconnected social, economic and ecological systems to cope with a hazardous event, trend or disturbance, responding or reorganising in ways that maintain their essential function, identity and structure. Resilience is a positive attribute when it maintains capacity for adaptation, learning and/or transformation (Arctic Council, 2016).”).

⁶⁴ Zaelke D., Piccolotti R., & Dreyfus G. (14 November 2021) *Glasgow climate summit: A glass half full*, THE HILL (“The new architecture also includes cutting not just carbon dioxide but also non-carbon dioxide climate emissions, with a specific focus on methane, a super climate pollutant responsible for 0.5 degrees Celsius of today’s observed warming of 1.1 degrees Celsius. Cutting methane presents the **single biggest and fastest mitigation action** the world can take to keep warming from breaching the 1.5 degrees Celsius guardrail. This makes fast reductions of methane essential for adaptation as well.”). *See also* Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), SPM-13 (“Near-term actions that limit global warming to close to 1.5°C would substantially reduce projected losses and damages related to climate change in human systems and ecosystems, compared to higher warming levels, but cannot eliminate them all (*very high confidence*).”); and Intergovernmental Panel on Climate Change (2018) *GLOBAL WARMING OF 1.5 °C, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 22 (“Social justice and equity are core aspects of climate-resilient development pathways that aim to limit global warming to 1.5°C as they address challenges and inevitable trade-offs, widen opportunities, and ensure that options, visions, and values are deliberated, between and within countries and communities, without making the poor and disadvantaged worse off (*high confidence*).”).

⁶⁵ International Energy Agency, United Nations Environment Programme, & Climate & Clean Air Coalition (2023) *THE IMPERATIVE OF CUTTING METHANE FROM FOSSIL FUELS*, 3 (“Immediate, targeted methane abatement in the fossil fuel sector can prevent nearly 1 million premature deaths due to ozone exposure, 90 million tonnes of crop losses due to ozone and climate changes, and about 85 billion hours of lost labour due to heat exposure by 2050, providing roughly U.S.D 260 billion in direct economic benefits.”).

⁶⁶ Mbow C., et al. (2019) *Chapter 5: Food Security*, in *CLIMATE CHANGE AND LAND, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*, Shukla P. R., et al. (eds.),

451 (“Methane increases surface ozone which augments warming-induced losses and some quantitative analyses now include climate, long-lived (CO₂) and multiple short-lived pollutants (CH₄, O₃) simultaneously (Shindell et al. 2017; Shindell 2016). Reduction of tropospheric ozone and black carbon can avoid premature deaths from outdoor air pollution and increases annual crop yields (Shindell et al. 2012). These actions plus methane reduction can influence climate on shorter time scales than those of carbon dioxide reduction measures. Implementing them substantially reduces the risks of crossing the 2°C threshold and contributes to achievement of the SDGs (Haines et al. 2017; Shindell et al. 2017).”); (“Ozone causes damage to plants through damages to cellular metabolism that influence leaf-level physiology to whole-canopy and root-system processes and feedbacks. ... Using atmospheric chemistry and a global integrated assessment model, Chuwah et al. (2015) found that without a large decrease in air pollutant emissions, high ozone concentration could lead to an increase in crop damage of up to 20% in agricultural regions in 2050 compared to projections in which changes in ozone are not accounted for. Higher temperatures are associated with higher ozone concentrations; C3 crops are sensitive to ozone (e.g., soybeans, wheat, rice, oats, green beans, peppers, and some types of cottons) and C4 crops are moderately sensitive (Backlund et al. 2008).”). See also Climate & Clean Air Coalition, *Tropospheric ozone* (last visited 5 February 2023) (“79–121 million: Estimated global crop production losses owing to ozone total 79–121 million tonnes, worth USD 11–18 billion annually. ... 1 million: Long-term exposure to ozone air pollution is linked to 1 million premature deaths per year due to respiratory diseases.”).

⁶⁷ Luna M. & Nicholas D. (2022) *An environmental justice analysis of distribution-level natural gas leaks in Massachusetts, USA*, ENERGY POLICY 162(112778): 1–23, 1 (“Using recently available high resolution leak data, this analysis of natural gas leaks across the state of Massachusetts shows that People of Color, limited English speaking households, renters, lower income residents, and adults with lower levels of education are disproportionately exposed to natural gas leaks and that their leaks take longer to repair, as compared to the general population, and particularly as compared to White residents and to homeowners. This pattern is evident for all leaks in the state, for leaks disaggregated by leak class or grade, and for leaks disaggregated by utility. This analysis shows that natural gas leaks are an environmental justice issue warranting further study and policy attention.”); discussed in Segal E. (17 February 2022) *New Research Shines Light On Natural Gas Leak Crisis*, FORBES. See also United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 11 (“This assessment found that every million tonnes (Mt) of methane reduced: - prevents approximately 1 430 annual premature deaths due to ozone globally. Of those, 740 would have died from respiratory disease and 690 from cardiovascular disease. Every million tonnes of reduced methane emissions could also avoid approximately 4 000 asthma-related accident and emergency department visits and 90 hospitalizations per year. (Section 3.4) - avoids losses of 145 000 tonnes of wheat, soybeans, maize and rice ozone exposure every year. This is roughly equivalent to increased global yields of 55 000 tonnes of wheat, 17 000 tonnes of soybeans, 42 000 tonnes of maize, and 31 000 tonnes of rice annually for every million tonnes of methane reduced. (Section 3.5)”).

⁶⁸ Saunio M., et al. (2020) *The Global Methane Budget 2000-2017*, EARTH SYST. SCI. DATA 12(3): 1561–1623, 1561 (“For the 2008–2017 decade, global methane emissions are estimated by atmospheric inversions (a top-down approach) to be 576 Tg CH₄ yr⁻¹ (range 550–594, corresponding to the minimum and maximum estimates of the model ensemble). Of this total, 359 Tg CH₄ yr⁻¹ or ~ 60 % is attributed to anthropogenic sources, that is emissions caused by direct human activity (i.e. anthropogenic emissions; range 336–376 Tg CH₄ yr⁻¹ or 50 %–65 %).”). See also Saunio M., et al. (2020) *The Global Methane Budget 2000-2017*, EARTH SYST. SCI. DATA 12(3): 1561–1623, 1577 (“Natural methane sources include vegetated wetland emissions and inland water systems (lakes, small ponds, rivers), land geological sources (gas–oil seeps, mud volcanoes, microseepage, geothermal manifestations, and volcanoes), wild animals, termites, thawing terrestrial and marine permafrost, and oceanic sources (biogenic, geological, and hydrate).”).

⁶⁹ Canadell J. G., et al. (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 5-66 (“This new assessment, based on studies included in or published since SROCC (Schaefer et al., 2014; Koven et al., 2015c; Schneider von Deimling et al., 2015; Schuur et al., 2015; MacDougall and Knutti, 2016a; Gasser et al., 2018; Yokohata

et al., 2020), estimates that the permafrost CO₂ feedback per degree of global warming (Figure 5.29) is 18 (3.1–41, 5th–95th percentile range) PgC °C⁻¹. The assessment is based on a wide range of scenarios evaluated at 2100, and an assessed estimate of the permafrost CH₄-climate feedback at 2.8 (0.7–7.3 5th–95th percentile range) Pg C_{eq} °C⁻¹ (Figure 5.29). This feedback affects the remaining carbon budgets for climate stabilisation and is included in their assessment (Section 5.5.2).”). See also Lan X., Nisbet E. G., Dlugokencky E. J., & Michel S. E. (2021) *What do we know about the global methane budget? Results from four decades of atmospheric CH₄ observations and the way forward*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 1–14, 11 (“Explaining the renewed and accelerating increase in atmospheric CH₄ burden since 2007 remains challenging, and the exact causes are not yet clear. But, the observations we describe suggest that increased emissions from microbial sources are the strongest driver, with a relatively smaller contribution from other processes, e.g., fossil fuel exploitation. A more difficult question to answer is the one posed by this special issue: is warming feeding the warming? We cannot say for certain, but we cannot rule out the possibility that climate change is increasing CH₄ emissions. The strong signals from the tropics combined with the isotopic data are consistent with increased emissions from natural wetlands, but large [interannual variability (IAV)] and inter-decadal variability in wetland drivers like precipitation make it difficult to identify small trends. Observations are needed that will help process models capture this variability. The size of the IAV illustrates the potential scope of uncontrollable near-future change and emphasizes the urgency of reducing the global methane burden by mitigating the methane emissions that we can control, from the fossil fuel and agricultural sectors.”); and Peng S., Lin X., Thompson R. L., Xi Y., Liu G., Hauglustaine D., Lan X., Poulter B., Ramonet M., Saunio M., Yin Y., Zhang Z., Zheng B., & Ciais P. (2022) *Wetland emission and atmospheric sink changes explain methane growth in 2020*, NATURE 612(7940): 477–482, 481 (“In summary, our results show that an increase in wetland emissions, owing to warmer and wetter conditions over wetlands, along with decreased OH, contributed to the soaring methane concentration in 2020. The large positive MGR anomaly in 2020, partly due to wetland and other natural emissions, reminds us that the sensitivity of these emissions to interannual variation in climate has had a key role in the renewed growth of methane in the atmosphere since 2006. The wetland methane–climate feedback is poorly understood, and this study shows a high interannual sensitivity that should provide a benchmark for future coupled CH₄ emissions–climate models. We also show that the decrease in atmospheric CH₄ sinks, which resulted from a reduction of tropospheric OH owing to less NO_x emissions during the lockdowns, contributed 53 ± 10% of the MGR anomaly in 2020 relative to 2019.”). However, other studies suggest a more limited increase in recent emissions from natural wetlands compared to agriculture and waste and energy production sectors, see Zhang Z., et al. (2021) *Anthropogenic emissions are the main contribution to the rise of atmospheric methane (1993-2017)*, NAT’L SCI. REV. 9(5): 1–13, 1 (“Our emission scenarios that have the fewest biases with respect to isotopic composition suggest that the agriculture, landfill, and waste sectors were responsible for 53±13% of the renewed growth over the period 2007-2017 compared to 2000-2006; industrial fossil fuel sources explained an additional 34±24%, and wetland sources contributed the least at 13±9%. The hypothesis that a large increase in emissions from natural wetlands drove the decrease in atmospheric δ¹³C-CH₄ values cannot be reconciled with current process-based wetland CH₄ models. This finding suggests the need for increased wetland measurements to better constrain the contemporary and future role of wetlands in the rise of atmospheric methane and climate feedbacks. Our findings highlight the predominant role of anthropogenic activities in driving the growth of atmospheric CH₄ concentrations.”).

⁷⁰ Jackson R. B., et al. (2021) *Atmospheric methane removal: a research agenda*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 1–17, 1 (“Atmospheric methane removal may be needed to offset continued methane release and limit the global warming contribution of this potent greenhouse gas. Eliminating most anthropogenic methane emissions is unlikely this century, and sudden methane release from the Arctic or elsewhere cannot be excluded, so technologies for negative emissions of methane may be needed. Carbon dioxide removal (CDR) has a well-established research agenda, technological foundation and comparative modelling framework [23–28]. No such framework exists for methane removal. We outline considerations for such an agenda here. We start by presenting the technological Mt CH₄ yr⁻¹ considerations for methane removal: energy requirements (§2a), specific proposed technologies (§2b), and air processing and scaling requirements (§2c). We then outline the climate and air quality impacts and feedbacks of methane removal (§3a) and argue for the creation of a Methane Removal Model Intercomparison Project (§3b), a multi-model framework that would better quantify the expected impacts of methane removal. In §4, we discuss some broader implications of methane removal.”). See also Abernethy S., O’Connor F. M., Jones C. D., & Jackson R. B.

(2021) *Methane removal and the proportional reductions in surface temperature and ozone*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 1–13, 6 (“Due to the temporal nature of effective cumulative removal, comparisons between methane and carbon dioxide depend on the timescale of interest. The equivalent of MCR for carbon dioxide, the TCRE, is $0.00048 \pm 0.0001^\circ\text{C}$ per Pg CO_2 [38], two orders of magnitude smaller than our MCR estimate of $0.21 \pm 0.04^\circ\text{C}$ per effective Pg CH_4 removed (figure 2). Accounting for the time delay for carbon dioxide removal due to the lagged response of the deep ocean, the TCRE for CO_2 removal may be even lower [39]. If 1 year of anthropogenic emissions was removed (0.36 Pg CH_4 [3] and 41.4 Pg CO_2 [40]), the transient temperature impact would be almost four times larger for methane than for CO_2 (0.075°C compared to 0.02°C). Using this example, however, maintaining a steady-state response of 0.36 Pg CH_4 effectively removed would require the ongoing removal of roughly $0.03 \text{ Pg } \text{CH}_4 \text{ yr}^{-1}$, since a removal rate of E/τ is required to maintain an effective cumulative removal of E .”).

⁷¹ For example, see United States Climate Alliance (2018) *FROM SLCP CHALLENGE TO ACTION*, 9 (“Given the uncertainty and inaction at the federal level, state leadership on SLCPs is even more necessary and urgent. The U.S. Climate Alliance is stepping up and accepting the mantle of leadership.”).

⁷² Lauvaux T., Giron C., Mazzolini M., d’Aspremont A., Duren R., Cusworth D., Shindell D., & Ciais P. (2022) *Global assessment of oil and gas methane ultra-emitters*, SCIENCE 375(6580): 557–561, 578 (“On the basis of adjusted emissions, O&G ultra-emitter estimates represent 8 to 12% of global O&G CH_4 emissions (according to national inventories; Fig. 2C), a contribution not included in most current inventories (13)... In terms of net climate benefits, eliminating methane emissions from ultra-emitters would lead to $0.005^\circ \pm 0.002^\circ\text{C}$ of avoided warming over the next one to three decades on the basis of linearized estimates from prior modeling (38). Though small, this value is approximately equal to the total influence from all emissions since 2005 from Australia or the Netherlands (39), or removal of 20 million vehicles from the road for 1 year. The avoided warming would prevent $\sim 1600 \pm 800$ premature deaths annually due to heat exposure and $\sim 1.3 \pm 0.9$ billion hours of labor productivity lost annually due to exposure to heat and humidity, with the latter valued at $\sim \$200$ million per year.”). Note that IEA estimates about 3.5 Mt of methane emissions from the oil and gas sector based on satellite data, representing 6% of IEA’s estimate of oil and gas emissions from the 15 countries where such emission events were detected. Recall that IEA uses a scaling approach to estimate emissions and found 70% higher emissions than officially reported. See also International Energy Agency (2022) *GLOBAL METHANE TRACKER 2022*, 6, 16 (“Globally, our analysis finds that methane emissions from the energy sector are about 70% greater than the sum of estimates submitted by national governments.”), 561 (“Accounting for the level of satellite coverage, very large emitting events detected by satellite are estimated to have been responsible for around 3.5 Mt of emissions from oil and gas operations in 2021 (6% of our estimate of oil and gas emissions in the 15 countries where events were detected).”). Gas has a particularly important role to play in mitigating methane emissions because gas is mostly comprised (70-90%) of methane. So when gas leaks, it is mostly methane that is emitted. This counters the widely promoted and often still accepted argument that gas is an inherently ‘cleaner’ fuel than coal. See Dreyfus G. & Ferris T. (2023) *Metrics and Measurement of Methane Emissions*, in *INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND CARBON SEQUESTRATION MONITORING*, China Council for International Cooperation on Environment and Development, 23. See also Gordon D., Reuland F., Jacob D. J., Worden J. R., Shindell D., & Dyson M. (2023) *Evaluating net life-cycle greenhouse gas emissions intensities from gas and coal at varying methane leakage rates*, ENVIRON. RES. LETT. 18(8): 1–10; and calculator developed by RMI to compare the net GHG emissions parity between gas and coal using varying inputs.

⁷³ Abernethy S. & Jackson R. B. (2022) *Global temperature goals should determine the time horizons for greenhouse gas emission metrics*, ENVIRON. RES. LETT. 17(2): 1–10, 7 (“Although NDCs and long-term national pledges are currently insufficient to keep warming below 2°C , let alone 1.5°C [50–52], the time horizons used for emission metrics should nevertheless be consistent with that central goal of the Paris Agreement. We therefore support the use of the 20 year time horizon over the 100 year version, when binary choices between these two must be made, due to the better alignment of the former with the temperature goals of the Paris Agreement. The 50 year time horizon, not yet in widespread use but now included in IPCC AR6, is in fact the only time horizon that the IPCC presents that falls within the range of time horizons that align with the Paris Agreement temperature goals (24–58 years). However, to best align emission metrics with the Paris Agreement 1.5°C goal, we recommend the use of the 24 year time horizon,

using 2045 as the end point time, with its associated $GWP_{1.5^{\circ}C} = 75$ and $GTP_{1.5^{\circ}C} = 41$.”). See also Abernethy S. (14 March 2022) *Why don't people realize how bad methane is for climate change? Bad math*, SAN FRANCISCO CHRONICLE; discussed in McKenna P. (9 February 2022) *To Counter Global Warming, Focus Far More on Methane, a New Study Recommends*, INSIDE CLIMATE NEWS (“The Environmental Protection Agency is drastically undervaluing the potency of methane as a greenhouse gas when the agency compares methane’s climate impact to that of carbon dioxide, a new study concludes. The EPA’s climate accounting for methane is ‘arbitrary and unjustified’ and three times too low to meet the goals set in the Paris climate agreement, the research report, published Wednesday in the journal *Environmental Research Letters*, found.”); and Rathi A. (15 February 2022) *The Case Against Methane Emissions Keeps Getting Stronger*, BLOOMBERG. See also Dreyfus G. & Ferris T. (2023) *Metrics and Measurement of Methane Emissions*, in *INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND CARBON SEQUESTRATION MONITORING*, China Council for International Cooperation on Environment and Development, 23 (“Reducing intended and unintended emissions to achieve lower-emission goals with a transition to gas, and as we work toward a transition away from gas, requires measurement and MRV along the full well-to-gate scope (producers, processors, and transporters of gas) both for domestic producers and for importers seeking to impose methane emission intensity requirements. Such quantification-based intensity requirements complement established approaches for controlling methane leaks through prescriptive regulations. Measuring methane accurately is key to enabling these types of policies. Further, successful quantification-based emissions policy, such as limits to methane intensity or certification, requires accurate measurement technologies and robust MRV systems coupled with sufficient compliance and enforcement. New investments in the oil and gas sector should build in enhanced MRV systems and methane intensity requirements to limit risks of stranded assets and align with carbon-neutrality goals.”).

⁷⁴ Rosane P., Naran B., Pastor A. O., Connolly J., & Wignarajah D. (2022) *The Landscape of Methane Abatement Finance*, Climate Policy Initiative & Global Methane Hub, 9 (“Methane abatement solutions are severely underfunded considering their climate change mitigation potential. While also underfunded, other climate change solutions with similar mitigation potential, such as low-carbon transport, received 15 times the investment of methane abatement measures, while solutions such as solar and wind received 26 times the investment. Wind and solar energy have an average of 8.35 GtCO_{2e} mitigation potential (CO₂) by 2030, and received USD 296 billion in 2019/2020, while targeted methane abatement solutions received only USD 6.3 billion with an average mitigation potential of 3.3 GtCO_{2e} – the ratio of investment flows to mitigation potential was almost 20 times lower than that of the renewable energy sector (Figure 4). Estimated mitigation potential of methane abatement solutions is 3 GtCO_{2e} by 2030 over a 100-year timeframe (GWP₁₀₀). However, if a 20-year timeframe (GWP₂₀) is considered, the mitigation potential would be substantially higher.”).

⁷⁵ Clean Air Task Force (8 December 2023) *Turning pledges into action: COP28 Global Methane Pledge Ministerial*, (“This year, Global Methane Partners announced: Over \$1 billion in new grant funding for methane action mobilized since COP27, more than triple current levels, which will mobilize billions in investment to reduce methane.”).

⁷⁶ International Energy Agency (2024) *GLOBAL METHANE TRACKER 2024* (“Fossil fuel companies and governments around the world now need to deliver clear strategies for how they will implement these pledges effectively and rapidly. This needs to be accompanied by verification and accountability mechanisms to ensure that actors are taking the necessary steps towards their goals. Further commitments – particularly in financing – are needed to deliver the reductions required this decade.” ... “We estimate that around USD 170 billion in spending is needed to deliver the methane abatement measures deployed by the fossil fuel industry in the NZE Scenario. This includes around USD 100 billion of spending in the oil and gas sector and USD 70 billion in the coal industry. Through 2030, roughly USD 135 billion goes towards capital expenditures, while USD 35 billion is for operational expenditures.”).

⁷⁷ Zaelke D & Beaugrand M. (26 November 2023) *COP28 Must Set the Stage for a Mandatory Methane Agreement*, THE MESSENGER (“For COP28, and its methane summit, to succeed in preventing climate chaos, it must put the previous pledge on a path to a global methane agreement that moves from voluntary to mandatory measures, with specific numerical targets, tight timelines and a dedicated funding stream — perhaps an “Agreement to Reduce Methane, Avoid Climate Tipping Points, and Eliminate Waste of Fossil Gas.”).

⁷⁸ AzerNews (7 March 2024) *Azerbaijan's joining Global Methane Pledge aligns with international efforts to limit global warming* (“Methane reduction is of global significance. The fact that 155 countries, contributing to around 50% of global methane pollution, have pledged to reduce emissions underscores the widespread recognition of the urgency to address this potent greenhouse gas. Azerbaijan's decision to join the "Global Methane Pledge" is a notable step. The voluntary commitment to reduce methane emissions by at least 30% by 2030 aligns with the overall goal set by the initiative at COP26. This demonstrates Azerbaijan's recognition of the role it can play in combating climate change and its willingness to contribute to international efforts. On March 4th, Azerbaijan announced its participation in the "Global Methane Pledge," which involves voluntary commitments by states to reduce methane emissions.”). See also United States Department of State (2 November 2021) *United States, European Union, and Partners Formally Launch Global Methane Pledge to Keep 1.5°C Within Reach*, Press Release (“Today, the United States, the European Union, and partners formally launched the Global Methane Pledge, an initiative to reduce global methane emissions to keep the goal of limiting warming to 1.5 degrees Celsius within reach. A total of over 100 countries representing 70% of the global economy and nearly half of anthropogenic methane emissions have now signed onto the pledge.”). The Global Methane Pledge sets a collective target to reduce global methane emissions by at least 30% from 2020 levels by 2030, would reduce warming by at least 0.2 °C by 2050 and keep the planet on a pathway consistent with staying below 1.5 °C. See United States Department of State (11 October 2021) *Joint U.S.-EU Statement on the Global Methane Pledge*, Press Release (“Countries joining the Global Methane Pledge commit to a collective goal of reducing global methane emissions by at least 30 percent from 2020 levels by 2030 and moving towards using highest tier IPCC good practice inventory methodologies to quantify methane emissions, with a particular focus on high emission sources. Successful implementation of the Pledge would reduce warming by at least 0.2 degrees Celsius by 2050.”).

⁷⁹ Climate & Clean Air Coalition (7 December 2023) *Opportunities for Increasing Ambition of NDCs Through Integrated Air Pollution and Climate Change Planning: Progress & Looking Ahead to 2025*, 3 (“As of November 2023, 95% of NDCs include methane within the scope of their overall mitigation target. The absolute number of NDCs including methane in their overall target has more than doubled, from 90 to 184. Forty countries (~20%) include methane as a supplementary target or assessment of the mitigation potential of the measure(s) identified, growing from a base of two in 2016. Most of the countries who include methane in this way (88%) are GMP partners.”). See also Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, ENVIRON. SCI. POLICY 134: 127–136, 131 (“A closer look into the NDCs shows that some go beyond simply listing CH₄ under the scope of covered gases and provide more detailed information on CH₄ mitigation. For instance, a number of NDCs include sector-specific policies in the areas of agriculture, waste, oil and gas, and coal that will reduce CH₄ emissions (Ross et al., 2018; Walderdorff, 2020). An even smaller number of NDCs include a quantitative, CH₄-specific reduction target, such as Canada, Japan, and New Zealand. Table 2 provides a summary of NDCs that include a quantitative descriptor of CH₄ mitigation as of January 1, 2021. While some of the NDCs shown in Table 2 include true quantitative CH₄ reduction targets, others quantify the potential for CH₄ reductions, or specify goals expressed in terms of efficiency or intensity. In aggregate, very few NDCs provide concrete or quantitative details on CH₄ mitigation activities – indeed, the NDCs summarized in Table 2 are among those that provide the greatest amount of specificity on CH₄ mitigation, which still tends to be very little.”). IGSD makes the following note re: the following three countries included in Mar *et al.* (2022): • Afghanistan: Afghanistan included methane reduction targets within its quantitative emissions reductions goals, but this is not reflected in Mar *et al.* (2022); • China: China’s 2016 Intended NDC included a numeric target for coal-bed methane capture, but this target is absent from its updated 2021 submission; China was therefore not included as a country with a numeric methane target; and • Dominica: Dominica’s Intended NDC included plans to install methane capture at a landfill. This project was slated for 2016–2021, but project completion remains unconfirmed. See United Nations Framework Convention on Climate Change (2022) *Nationally determined contributions under the Paris Agreement: Synthesis report by the secretariat*, Conference of the Parties, Fourth Session, 15 (“All NDCs cover CO₂ emissions, almost all (91 per cent) cover CH₄ and most (89 per cent) cover N₂O emissions, many (53 per cent) cover HFC emissions and some cover PFC and SF₆ (36 per cent) and NF₃ (26 per cent) emissions.”); and United States Department of State (17 November 2022) *Global Methane Pledge: From Moment to Momentum*, Press Release. See also Paris Agreement Article 4(2) and Article 4(3) (“2. Each Party shall prepare, communicate and maintain successive nationally

determined contributions that it intends to achieve. Parties shall pursue domestic mitigation measures, with the aim of achieving the objectives of such contributions. 3. Each Party's successive nationally determined contribution will represent a progression beyond the Party's then current nationally determined contribution and reflect its highest possible ambition, reflecting its common but differentiated responsibilities and respective capabilities, in the light of different national circumstances.”).

⁸⁰ United States Department of State (14 November 2023) *Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis* (“11. The two countries will immediately initiate technical working group cooperation on policy dialogue, technical solutions exchanges, and capacity building, building on their respective national methane action plans to develop their respective methane reduction actions/targets for inclusion in their 2035 NDCs and support each country’s methane reduction/control progress.”).

⁸¹ United Nations Environment Program (2 December 2023) *Bending the warming curve through action on non-CO2 gases at COP28 Summit*. See also United States Department of State (2 December 2023) *Accelerating Fast Mitigation: Summit on Methane and Non-CO2 Greenhouse Gases*, Fact Sheet (“The United States, People’s Republic of China, and United Arab Emirates today convened a Summit to accelerate actions to cut methane and other non-CO2 greenhouse gases as the fastest way to reduce near-term warming and keep a goal of limiting global average temperature increase to 1.5 degrees Celsius within reach.”); and Escudero J. (18 December 2023) *COP28: “The Methane COP”*, LEGAL PLANET (“In a high-profile event at the main stage of COP28, the U.S., China, and United Arab Emirates hosted the Summit on Methane and non-CO2 Greenhouse Gases that called on the parties of the Paris Agreement to include methane and other GHGs in their nationally determined contributions (NDC). This statement is relevant since the parties did not always inform methane emissions; therefore, they were usually ignored in the actions that followed Nationally Determined Contributions, or NDCs. Another significant announcement from the Summit was the incorporation of Turkmenistan – one of the world’s top emitters-Kazakhstan, Angola, Kenya, and Romania to the Global Methane Pledge, a commitment to reduce methane emissions by 30% from 202 levels by 2030. With these incorporations, 156 countries have joined the pledge, notably not China. In addition, Kazakhstan and the U.S. announced a cooperation partnership to help the Central Asian country meet the Global Methane Pledge’s goals by developing national standards to eliminate non-emergency venting of methane, among other actions.”).

⁸² United Nations Framework Convention on Climate Change (2023) *First global stocktake, Proposal by the President Draft decision -/CMA.5 Outcome of the first global stocktake*, S28 (“Further recognizes the need for deep, rapid and sustained reductions in greenhouse gas emissions in line with 1.5 °C pathways and calls on Parties to contribute to the following global efforts, in a nationally determined manner, taking into account the Paris Agreement and their different national circumstances, pathways and approaches.” (f) “Accelerating and substantially reducing non-carbon-dioxide emissions globally, including in particular methane emissions by 2030.”).

⁸³ United Nations Environment Program (1987) *The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. See also Young P. J., Harper A. B., Huntingford C., Paul N. D., Morgenstern O., Newman P. A., Oman L. D., Madronich S., & Garcia R. R. (2021) *The Montreal Protocol protects the terrestrial carbon sink*, NATURE 59 (7872): 384–388, 384 (“About 1.7 °C of the avoided warming comes from the Protocol’s mandatory reduction of super polluting chemicals—CFCs, HCFCs, and now HFCs—used primarily as refrigerants in cooling equipment. An additional 0.85 °C of warming will be avoided by protecting forests and other carbon “sinks” from damaging ultraviolet radiation that reduce the ability to pull CO₂ out of the atmosphere and store it safely in terrestrial sinks.”). See also United Nations Environment Programme, Ozone Secretariat (16 September 2022) *World Ozone Day 2022: Global cooperation protecting life on Earth* (“This action has protected millions of people from skin cancer and cataracts over the years since. It allowed vital ecosystems to survive and thrive. It safeguarded life on Earth. And it slowed climate change: if ozone-depleting chemicals had not been banned, we would be looking at a global temperature rise of an additional 2.5°C by the end of this century. This would have been a catastrophe.”); World Meteorological Organization, United Nations Environment Programme, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration, & European Commission (2022) *SCIENTIFIC ASSESSMENT OF OZONE DEPLETION: 2022*, Global Ozone Research and Monitoring Project–Report No. 278, 26 (“New

studies support previous Assessments in that the decline in ODS emissions due to compliance with the Montreal Protocol avoids global warming of approximately 0.5–1 °C by mid-century compared to an extreme scenario with an uncontrolled increase in ODSs of 3–3.5% per year.”); and Andersen S. O., Gonzalez M., & Sherman N. J. (2022) *Setting the stage for climate action under the Montreal Protocol*, EOS 103.

⁸⁴ Bledsoe P & Zaelke D. (6 April 2023) *Can the UAE help get a planet-saving methane deal at COP28?*, THE HILL (“The UAE and all nations should make a binding international agreement on methane reductions from the oil and gas sector a key outcome of COP 28.”).

⁸⁵ United States Department of State (2 December 2023) *Accelerating Fast Mitigation: Summit on Methane and Non-CO2 Greenhouse Gases* (“To keep the goal of 1.5 degrees within reach and reduce the risk of breaching near-term tipping points, the world must take fast action on non-CO2 greenhouse gases, as an essential complement to the energy transition and ending deforestation. While CO2 will determine our long-term climate future, non-CO2 greenhouse gases have an outsized impact on near-term temperatures. Accelerated cuts to methane and non-CO2 gases could avoid up to 0.5 degrees of warming by 2050. Non-CO2 greenhouse gases also cause almost 500,000 deaths every year from respiratory illnesses and 5-7 percent of global crop losses at a time when global production is already strained. Rapidly reducing non-CO2 emissions is a three-in-one solution, advancing global climate, health, and food security objectives simultaneously.”).

⁸⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) *Summary for Policymakers, in AR6 SYNTHESIS REPORT: CLIMATE CHANGE 2023, Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Arias P., Bustamante M., Elgizouli I., Flato G., Howden M., Méndez C., Pereira J., Pichs-Madruga R., Rose S. K., Saheb Y., Sánchez R., Ürgel-Vorsatz D., Xiao C., & Yassaa N. (eds.), 27 (“Strong, rapid and sustained reductions in methane emissions can limit near-term warming and improve air quality by reducing global surface ozone. (*high confidence*)”). See also Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) *AR6 SYNTHESIS REPORT: CLIMATE CHANGE 2023, Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Arias P., Bustamante M., Elgizouli I., Flato G., Howden M., Méndez C., Pereira J., Pichs-Madruga R., Rose S. K., Saheb Y., Sánchez R., Ürgel-Vorsatz D., Xiao C., & Yassaa N. (eds.), 59 (“Mitigation actions will have other sustainable development co-benefits (*high confidence*). Mitigation will improve air quality and human health in the near-term notably because many air pollutants are co-emitted by GHG emitting sectors and because methane emissions leads to surface ozone formation (*high confidence*). The benefits from air quality improvement include prevention of air pollution-related premature deaths, chronic diseases and damages to ecosystems and crops. The economic benefits for human health from air quality improvement arising from mitigation action can be of the same order of magnitude as mitigation costs, and potentially even larger (*medium confidence*). As methane has a short lifetime but is a potent GHG, strong, rapid and sustained reductions in methane emissions can limit near-term warming and improve air quality by reducing global surface ozone (*high confidence*).”).

⁸⁷ The global warming potential (GWP) of a non-CO2 greenhouse gas compares the amount of warming caused by a GHG with that of CO2. IPCC reports the 20-year global warming potential (GWP₂₀) of methane as 81.2 times that of CO2. See Forster P., Storelvmo T., Armour K., Collins W., Dufresne J.-L., Frame D., Lunt D. J., Mauritsen T., Palmer M. D., Watanabe M., Wild M., & Zhang H. (2021) *Chapter 7: The Earth’s Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity Supplementary Material, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), Table 7.SM.7.

⁸⁸ Hook L. & Campbell C. (23 August 2022) *Methane hunters: what explains the surge in the potent greenhouse gas?*, FINANCIAL TIMES (“If you think of fossil fuel emissions as putting the world on a slow boil, methane is a blow torch that is cooking us today,” says Durwood Zaelke, president of the Institute for Governance & Sustainable Development, and an advocate of stricter policies to reduce methane emissions. “The fear is that this is a self-reinforcing feedback loop.... If we let the earth warm enough to start warming itself, we are going to lose this battle.”).

⁸⁹ Feng Z., Xu Y., Kobayashi K., Dai L., Zhang T., Agathokleous E., Calatayud V., Paoletti E., Mukherjee A., Agrawal M., Park R. J., Oak Y. J., & Yue X. (2022) *Ozone pollution threatens the production of major staple crops in East Asia*, NAT. FOOD 3: 47–56, 47 (“East Asia is a hotspot of surface ozone (O₃) pollution, which hinders crop growth and reduces yields. Here, we assess the relative yield loss in rice, wheat and maize due to O₃ by combining O₃ elevation experiments across Asia and air monitoring at about 3,000 locations in China, Japan and Korea. China shows the highest relative yield loss at 33%, 23% and 9% for wheat, rice and maize, respectively. The relative yield loss is much greater in hybrid than inbred rice, being close to that for wheat. Total O₃-induced annual loss of crop production is estimated at US\$63 billion.”). See also United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 68 (“Methane also plays a significant role in reducing crop yields and the quality of vegetation. Ozone exposure is estimated to result in yield losses in wheat, 7.1 per cent; soybean, 12.4 per cent; maize, 6.1 per cent; and rice, 4.4 per cent for near present-day global totals (Mills et al. 2018; Shindell et al. 2016; Avnery et al. 2011a)”; and Shindell D., Faluvegi G., Kasibhatla P., & Van Dingenen R. (2019) *Spatial Patterns of Crop Yield Change by Emitted Pollutant*, EARTH’S FUTURE 7(2): 101–112, 101 (“Our statistical modeling indicates that for the global mean, climate and composition changes have decreased wheat and maize yields substantially whereas rice yields have increased. Well-mixed greenhouse gases drive most of the impacts, though aerosol-induced cooling can be important, particularly for more polluted area including India and China. Maize yield losses are most strongly attributable to methane emissions (via both temperature and ozone).”).

⁹⁰ Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, ENVIRON. SCI. POLICY 134: 127–136, 129 (“Methane is an important contributor to the formation of tropospheric O₃. In addition to acting as a greenhouse gas and being directly harmful to human health (see Section 3.3), it also harms plants by causing cellular damage within the leaves, adversely affecting plant production, reducing the rate of photosynthesis, and requiring increased resource allocation to detoxify and repair leaves (Ashmore, 2005, Sitch et al., 2007). This results in an estimated \$11-\$18 billion worth of global crop losses annually (Avnery et al., 2011). Beyond this, however, O₃ damage to plants may significantly reduce the ability of terrestrial ecosystems to absorb carbon, negating some of the enhanced carbon uptake due to CO₂ fertilization that is expected to partially offset rising atmospheric CO₂ concentrations (Sitch et al., 2007, Ciais et al., 2013, Arneeth et al., 2010, Ainsworth et al., 2012).”).

⁹¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) *AR6 SYNTHESIS REPORT: CLIMATE CHANGE 2023, Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Arias P., Bustamante M., Elgizouli I., Flato G., Howden M., Méndez C., Pereira J., Pichs-Madruga R., Rose S. K., Saheb Y., Sánchez R., Ürge-Vorsatz D., Xiao C., & Yassaa N. (eds.), 6 (“[FOOTNOTE 10] Contributions from emissions to the 2010–2019 warming relative to 1850–1900 assessed from radiative forcing studies are: CO₂ 0.8 [0.5 to 1.2]°C; methane 0.5 [0.3 to 0.8]°C; nitrous oxide 0.1 [0.0 to 0.2]°C and fluorinated gases 0.1 [0.0 to 0.2]°C.”). See also Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), Figure SPM.2.

⁹² United States Department of Commerce, *Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases* (last visited 25 January 2023). See also Vaughan A. (7 January 2022) *Record levels of greenhouse gas methane are a ‘fire alarm moment’*, NEW SCIENTIST (“According to data compiled by the US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), average atmospheric concentrations of methane reached a record 1900 parts per billion (ppb) in September 2021, the highest in nearly four decades of records. The figure stood at 1638 ppb in 1983.”).

⁹³ National Oceanic and Atmospheric Administration (5 April 2023) *Greenhouse gases continued to increase rapidly in 2022* (“Atmospheric methane, which is far less abundant but much more potent than CO₂ at trapping heat in the atmosphere, increased to an average of 1,911.9 parts per billion (ppb). The 2022 methane increase was 14.0 ppb, the fourth-largest annual increase recorded since NOAA’s systematic measurements began in 1983, and follows record

growth in 2020 and 2021. Methane levels in the atmosphere are now more than two and a half times their pre-industrial level.”). *See also* National Oceanic and Atmospheric Administration Global Monitoring Laboratory (2023) *Global CH₄ Monthly Means* (Preliminary data posted on 5 April 2023 showed atmospheric CH₄ concentrations in December 2022 reached 1924.99 ppb compared with 1908.84 ppb in December 2021.).

⁹⁴ White House (18 September 2021) *Joint US-EU Press Release on the Global Methane Pledge*, Statements and Releases (“Methane is a potent greenhouse gas and, according to the latest report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, accounts for about half of the 1.0 degree Celsius net rise in global average temperature since the pre-industrial era. Rapidly reducing methane emissions is complementary to action on carbon dioxide and other greenhouse gases, and is regarded as the single most effective strategy to reduce global warming in the near term and keep the goal of limiting warming to 1.5 degrees Celsius within reach.”). For the IPCC report referenced, *see* Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), Figure SPM.2.

⁹⁵ United Nations Environment Programme and Climate & Clean Air Coalition (2022) *Summary for Policymakers*, in *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: 2030 BASELINE REPORT*, 5 (“The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)’s Sixth Assessment shows that human-driven methane emissions are responsible for nearly 45 per cent of current net warming. The IPCC has continuously emphasized the critical urgency of reducing anthropogenic emissions – from methane and from other climate pollutants – if the world is to stay below 1.5° and 2°C targets.”).

⁹⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), Figure SPM.2.

⁹⁷ Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Bernsten T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 853–854 (“For methane emissions, in addition to their direct effect, there are indirect positive ERFs from methane enhancing its own lifetime, causing ozone production, enhancing stratospheric water vapor, and influencing aerosols and the lifetimes of HCFCs and HFCs (Myhre *et al.*, 2013b; O’Connor *et al.*, 2021). The ERF from methane emissions is considerably higher than the ERF estimate resulting from its abundance change. The central estimate with the very likely range is 1.21 (0.90 to 1.51) W m⁻² for emission-based estimate versus 0.54 W m⁻² for abundance-based estimate (cf. section 7.3.5). The abundance-based ERF estimate for CH₄ results from contributions of its own emissions and the effects of several other compounds, some decreasing CH₄ lifetime, notably NO_x, which importantly reduce the CH₄ abundance-based ERF.”). *See also* Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, ENVIRON. SCI. POLICY 134: 127–136, 129 (*see* Table 1 on Present-day anthropogenic radiative forcing directly and indirectly attributable to CH₄ and its chemistry, showing that the radiative forcing contributed by methane to ozone formation, CO₂ formation, increased stratospheric water vapor, and reduction in sulfate aerosol formation are 0.241 W m⁻², 0.018 W m⁻², 0.05 W m⁻², and 0.1 W m⁻², respectively, in addition to methane’s direct forcing of 0.54 W m⁻²).

⁹⁸ Mar K. A., Unger C., Walderdorff L., & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, ENV. SCI. POL. 134: 127–136, 128–129 (“Methane is a GHG and thereby a direct climate forcer; that is, it absorbs and re-radiates thermal radiation, contributing directly to the greenhouse effect. Unlike CO₂, CH₄ is chemically active, with atmospheric oxidation accounting for approximately 95% of its loss. Among other things, reactions of CH₄ lead to the production of tropospheric O₃ and stratospheric water vapor, and the end product of CH₄ oxidation is CO₂ itself (Forster *et al.*, 2021). In this way, CH₄ also acts as an indirect climate forcer because it leads to the production of other GHGs (Fig. 1). A quantitative overview of radiative forcing due to CH₄ and its associated photochemical products is provided in Table 1. The chemical reactions of CH₄ also alter the atmospheric

concentration of oxidants, especially the [hydroxy radical (OH)]. This in turn has an indirect effect on the abundance of other trace gases and aerosols in the troposphere. In particular, increased atmospheric CH₄ provides an increased sink for OH, reducing the formation of sulfate aerosol (via SO₂ + OH). Since sulfate aerosol has a cooling effect on the climate (see also Fig. 2) its reduction can be seen as an additional, indirect positive radiative forcing attributable to CH₄ (Shindell et al., 2009). Shindell et al. (2009) calculate that this effect is equivalent to a radiative forcing of approximately +0.1 W m⁻² (Table 1), comparable to the CH₄-induced radiative forcing due to stratospheric water vapor.”).

⁹⁹ Canadell J. G., et al. (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 927 (“The assessed global warming potentials (GWP) and global temperature-change potentials (GTP) for methane and nitrous oxide are slightly lower than in AR5 due to revised estimates of their lifetimes and updated estimates of their indirect chemical effects (medium confidence). The assessed metrics now also include the carbon cycle response for non-CO₂ gases. The carbon cycle estimate is lower than in AR5, but there is high confidence in the need for its inclusion and in the quantification methodology. Metrics for methane from fossil fuel sources account for the extra fossil CO₂ that these emissions contribute to the atmosphere and so have slightly higher emissions metric values than those from biogenic sources (high confidence).”).

¹⁰⁰ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 17 (“Mitigation of methane is very likely the strategy with the greatest potential to decrease warming over the next 20 years.”), 21 (“This is because a realistically paced phase-out of fossil fuels, or even a rapid one under aggressive decarbonization, is likely to have minimal net impacts on near-term temperatures due to the removal of co-emitted aerosols (Shindell and Smith 2019). As methane is the most powerful driver of climate change among the short-lived substances (Myhre et al. 2013), mitigation of methane emissions is very likely to be the most powerful lever in reducing near-term warming. This is consistent with other assessments; for example, the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (IPCC AR5) showed that methane controls implemented between 2010 and 2030 would lead to a larger reduction in 2040 warming than the difference between RCPs 2.6, 4.5 and 6.0 scenarios. (The noted IPCC AR5-era scenarios are called representative concentration pathways (RCPs, with the numerical value indicating the target radiative forcing in 2100 (Kirtman et al. 2013))).”). See also Shindell D. & Smith C. J. (2019) *Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels*, NATURE 573: 408–411, Addendum “Methods” (“We note that, although this study focuses on the effects of fossil-fuel related emissions, accounting for the effects of reductions in greenhouse gases from non-fossil sources—including fluorinated gases and both methane and nitrous oxide from agriculture—along with biofuels that are a large source of warming black carbon, could eliminate any near-term penalty entirely. In fact, given that the net effect of the fossil-fuel phase-out on temperature is minimal during the first 20 years (Fig. 3), reducing those other emissions is the only plausible way in which to decrease warming during that period.”).

¹⁰¹ Zhang Y., Held I., & Fueglistaler S. (2021) *Projections of tropical heat stress constrained by atmospheric dynamics*, NAT. GEO. 14(3): 133–137, 133 (“For each 1 °C of tropical mean warming, global climate models project extreme TW (the annual maximum of daily mean or 3-hourly values) to increase roughly uniformly between 20° S and 20° N latitude by about 1 °C. This projection is consistent with theoretical expectation based on tropical atmospheric dynamics, and observations over the past 40 years, which gives confidence to the model projection. For a 1.5 °C warmer world, the probable (66% confidence interval) increase of regional extreme TW is projected to be 1.33–1.49 °C, whereas the uncertainty of projected extreme temperatures is 3.7 times as large. These results suggest that limiting global warming to 1.5 °C will prevent most of the tropics from reaching a TW of 35 °C, the limit of human adaptation.”).

¹⁰² Lenton T. M., Xu C., Abrams J. F., Ghadiali A., Loriani S., Sakschewski B., Zimm C., Ebi K. L., Dunn R. R., Svenning J.-C., & Scheffer M. (2023) *Quantifying the human cost of global warming*, NAT. SUSTAIN. 6(10): 1–11, calculated based on Supplementary Data 1 “Country-level results for population, land area and land fraction exposed

to MAT > 29°C”, 7 (“The ~2.7 °C global warming expected under current policies puts around a third of the world population outside the niche. It exposes almost the entire area of some countries (for example, Burkina Faso, Mali) to unprecedented heat, including some Small Island Developing States (for example, Aruba, Netherlands Antilles; Fig. 5b)—a group with members already facing an existential risk from sea-level rise. The gains from fully implementing all announced policy targets and limiting global warming to ~1.8 °C are considerable, but would still leave nearly 10% of people exposed to unprecedented heat. Meeting the goal of the Paris Agreement to limit global warming to 1.5 °C halves exposure outside the temperature niche relative to current policies and limits those exposed to unprecedented heat to 5% of people.”), 1 (“By end-of-century (2080–2100), current policies leading to around 2.7 °C global warming could leave one-third (22–39%) of people outside the niche. Reducing global warming from 2.7 to 1.5 °C results in a ~5-fold decrease in the population exposed to unprecedented heat (mean annual temperature ≥29 °C). The lifetime emissions of ~3.5 global average citizens today (or ~1.2 average US citizens) expose one future person to unprecedented heat by end-of-century. That person comes from a place where emissions today are around half of the global average. These results highlight the need for more decisive policy action to limit the human costs and inequities of climate change.”), 5 (“Assuming a future world of 9.5 billion, India has the greatest population exposed under 2.7 °C global warming, >600 million, but this reduces >6-fold to ~90 million at 1.5 °C global warming. Nigeria has the second largest population exposed, >300 million under 2.7 °C global warming, but this reduces >7-fold to 20-fold, from ~100 million under 2.7 °C global warming to 80 million exposed under 2.7 °C global warming, there are even larger proportional reductions at 1.5 °C global warming. Sahelian–Saharan countries including Sudan (sixth ranked) and Niger (seventh) have a ~2-fold reduction in exposure, because they still have a large fraction of land area hot exposed at 1.5 °C global warming (Fig. 5b). The fraction of land area exposed approaches 100% for several countries under 2.7 °C global warming (Fig. 5b). Brazil has the greatest absolute land area exposed under 2.7 °C global warming, despite almost no area being exposed at 1.5 °C, and Australia and India also experience massive increases in absolute area exposed (Fig. 4). (If the future population reaches 11.1 billion, the ranking of countries by population exposed remains similar, although the numbers exposed increase.) Those most exposed under 2.7 °C global warming come from nations that today are above the median poverty rate and below the median per capita emissions (Fig. 6).”). See also Xu C., Kohler T. A., Lenton T. M., Svenning J.-C., & Scheffer M. (2020) *Future of the human climate niche*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 117(21): 11350–11355, 11352 (“Such a calculation suggests that for the RCP8.5 business-as-usual climate scenario, and accounting for expected demographic developments (the SSP3 scenario[15]), ~3.5 billion people (roughly 30% of the projected global population; SI Appendix, Fig. S12) would have to move to other areas if the global population were to stay distributed relative to temperature the same way it has been for the past millennia (SI Appendix, Fig. S13). Strong climate mitigation following the RCP2.6 scenario would substantially reduce the geographical shift in the niche of humans and would reduce the theoretically needed movement to ~1.5 billion people (~13% of the projected global population; SI Appendix, Figs. S12 and S13).”).

¹⁰³ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 8 (“Reducing human-caused methane emissions is one of the most cost-effective strategies to rapidly reduce the rate of warming and contribute significantly to global efforts to limit temperature rise to 1.5°C. Available targeted methane measures, together with additional measures that contribute to priority development goals, can simultaneously reduce human-caused methane emissions by as much as 45 per cent, or 180 million tonnes a year (Mt/yr) by 2030. This will avoid nearly 0.3°C of global warming by the 2040s and complement all long-term climate change mitigation efforts. It would also, each year, prevent 255 000 premature deaths, 775 000 asthma related hospital visits, 73 billion hours of lost labour from extreme heat, and 26 million tonnes of crop losses globally.”).

¹⁰⁴ Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, NATURE 575(7784): 592–595, 592 (“Models suggest that the Greenland ice sheet could be doomed at 1.5 °C of warming³, which could happen as soon as 2030. ...The world’s remaining emissions budget for a 50:50 chance of staying within 1.5 °C of warming is only about 500 gigatonnes (Gt) of CO₂. Permafrost emissions could take an estimated 20% (100 Gt CO₂) off this budget, and that’s without including methane from deep permafrost or undersea hydrates. If forests are close to tipping points, Amazon dieback could

release another 90 Gt CO₂ and boreal forests a further 110 Gt CO₂. With global total CO₂ emissions still at more than 40 Gt per year, the remaining budget could be all but erased already. ...We argue that the intervention time left to prevent tipping could already have shrunk towards zero, whereas the reaction time to achieve net zero emissions is 30 years at best. Hence we might already have lost control of whether tipping happens. A saving grace is that the rate at which damage accumulates from tipping — and hence the risk posed — could still be under our control to some extent.”). See also Ripple W. J., Wolf C., Newsome T. M., Gregg J. W., Lenton T. M., Palomo I., Eikelboom J. A. J., Law B. E., Huq S., Duffy P. B., & Rockström J. (2021) *World Scientists’ Warning of a Climate Emergency 2021*, *BIOSCIENCE* 71(9): 894–898, 894 (“There is also mounting evidence that we are nearing or have already crossed tipping points associated with critical parts of the Earth system, including the West Antarctic and Greenland ice sheets, warm-water coral reefs, and the Amazon rainforest.”).

¹⁰⁵ Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) *Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points*, *SCIENCE* 377(6611): 1–10, 7 (“Current warming is ~1.1°C above preindustrial and even with rapid emission cuts warming will reach ~1.5°C by the 2030s (23). We cannot rule out that WAIS and GrIS tipping points have already been passed (see above) and several other tipping elements have minimum threshold values within the 1.1 to 1.5°C range. Our best estimate thresholds for GrIS, WAIS, REEF, and abrupt permafrost thaw (PFAT) are ~1.5°C although WAIS and GrIS collapse may still be avoidable if GMST returns below 1.5°C within an uncertain overshoot time (likely decades) (94).”). See also Lenton T. M., Armstrong McKay D. I., Loriani S., Abrams J. F., Lade S. J., Donges J. F., Buxton J. E., Milkoreit M., Powell T., Smith S. R., Zimm C., Bailey E., Dyke J. G., Ghadiali A., & Laybourn L. (2023) *GLOBAL TIPPING POINTS SUMMARY REPORT 2023*, 13 (“Already, at today’s 1.2°C global warming, tipping of warm-water coral reefs is likely and we cannot rule out that four other systems may pass tipping points: the ice sheets of Greenland and West Antarctica, the North Atlantic Subpolar Gyre circulation, and parts of the permafrost subject to abrupt thaw.”).

¹⁰⁶ Canadell J. G., *et al.* (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 5-78 (“Abrupt change is defined as a change in the system that is substantially faster than the typical rate of the changes in its history (Chapter 1, Section 1.4.5). A related matter is a tipping point: a critical threshold beyond which a system reorganizes, often abruptly and/or irreversibly.”).

¹⁰⁷ Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, *NATURE*, 575(7784): 592–595, 594 (“In our view, the clearest emergency would be if we were approaching a global cascade of tipping points that led to a new, less habitable, ‘hothouse’ climate state¹¹. Interactions could happen through ocean and atmospheric circulation or through feedbacks that increase greenhouse-gas levels and global temperature. Alternatively, strong cloud feedbacks could cause a global tipping point^{12,13}. We argue that cascading effects might be common. Research last year¹⁴ analysed 30 types of regime shift spanning physical climate and ecological systems, from collapse of the West Antarctic ice sheet to a switch from rainforest to savanna. This indicated that exceeding tipping points in one system can increase the risk of crossing them in others. Such links were found for 45% of possible interactions¹⁴. In our view, examples are starting to be observed. ... If damaging tipping cascades can occur and a global tipping point cannot be ruled out, then this is an existential threat to civilization. No amount of economic cost–benefit analysis is going to help us. We need to change our approach to the climate problem. ... In our view, the evidence from tipping points alone suggests that we are in a state of planetary emergency: both the risk and urgency of the situation are acute....”). See also Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) *Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points*, *SCIENCE* 377(6611): 1–10, 7 (“Current warming is ~1.1°C above preindustrial and even with rapid emission cuts warming will reach ~1.5°C by the 2030s (23). We cannot rule out that WAIS and GrIS tipping points have already been passed (see above) and several other tipping elements have minimum threshold values within the 1.1 to 1.5°C range. Our best estimate

thresholds for GrIS, WAIS, REEF, and abrupt permafrost thaw (PFAT) are $\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ although WAIS and GrIS collapse may still be avoidable if GMST returns below 1.5°C within an uncertain overshoot time (likely decades) (94).”)

¹⁰⁸ Drijfhout S., Bathiany S., Beaulieu C., Brovkin V., Claussen M., Huntingford C., Scheffer M., Sgubin G., & Swingedouw D. (2015) *Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 112(43): E5777–E5786, E5777 (“Abrupt transitions of regional climate in response to the gradual rise in atmospheric greenhouse gas concentrations are notoriously difficult to foresee. However, such events could be particularly challenging in view of the capacity required for society and ecosystems to adapt to them. We present, to our knowledge, the first systematic screening of the massive climate model ensemble informing the recent Intergovernmental Panel on Climate Change report, and reveal evidence of 37 forced regional abrupt changes in the ocean, sea ice, snow cover, permafrost, and terrestrial biosphere that arise after a certain global temperature increase. Eighteen out of 37 events occur for global warming levels of less than 2° , a threshold sometimes presented as a safe limit.”). See also Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, NATURE 575(7784): 592–595, 593 (“A further key impetus to limit warming to 1.5°C is that other tipping points could be triggered at low levels of global warming. The latest IPCC models projected a cluster of abrupt shifts between 1.5°C and 2°C , several of which involve sea ice. This ice is already shrinking rapidly in the Arctic...”); Arias P. A., et al. (2021) *Technical Summary*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), TS-71–TS-72 (“It is likely that under stabilization of global warming at 1.5°C , 2.0°C , or 3.0°C relative to 1850–1900, the AMOC will continue to weaken for several decades by about 15%, 20% and 30% of its strength and then recover to pre-decline values over several centuries (medium confidence). At sustained warming levels between 2°C and 3°C , there is limited evidence that the Greenland and West Antarctic Ice Sheets will be lost almost completely and irreversibly over multiple millennia; both the probability of their complete loss and the rate of mass loss increases with higher surface temperatures (high confidence). At sustained warming levels between 3°C and 5°C , near-complete loss of the Greenland Ice Sheet and complete loss of the West Antarctic Ice Sheet is projected to occur irreversibly over multiple millennia (medium confidence); with substantial parts or all of Wilkes Subglacial Basin in East Antarctica lost over multiple millennia (low confidence). Early-warning signals of accelerated sea-level-rise from Antarctica, could possibly be observed within the next few decades. For other hazards (e.g., ice sheet behaviour, glacier mass loss and global mean sea level change, coastal floods, coastal erosion, air pollution, and ocean acidification) the time and/or scenario dimensions remain critical, and a simple and robust relationship with global warming level cannot be established (high confidence)... The response of biogeochemical cycles to anthropogenic perturbations can be abrupt at regional scales and irreversible on decadal to century time scales (high confidence). The probability of crossing uncertain regional thresholds increases with climate change (high confidence). It is very unlikely that gas clathrates (mostly methane) in deeper terrestrial permafrost and subsea clathrates will lead to a detectable departure from the emissions trajectory during this century. Possible abrupt changes and tipping points in biogeochemical cycles lead to additional uncertainty in 21st century atmospheric GHG concentrations, but future anthropogenic emissions remain the dominant uncertainty (high confidence). There is potential for abrupt water cycle changes in some high-emission scenarios, but there is no overall consistency regarding the magnitude and timing of such changes. Positive land surface feedbacks, including vegetation, dust, and snow, can contribute to abrupt changes in aridity, but there is only low confidence that such changes will occur during the 21st century. Continued Amazon deforestation, combined with a warming climate, raises the probability that this ecosystem will cross a tipping point into a dry state during the 21st century (low confidence). {TS3.2.2, 5.4.3, 5.4.5, 5.4.8, 5.4.9, 8.6.2, 8.6.3, Cross-chapter Box 12.1}”); and Lee J.-Y., Marotzke J., Bala G., Cao L., Corti S., Dunne J. P., Engelbrecht F., Fischer E., Fyfe J. C., Jones C., Maycock A., Mutemi J., Ndiaye O., Panickal S., & T. Zhou (2021) *Chapter 4: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 4-96 (Table 4.10 lists 15 components of the Earth system susceptible to tipping points).

¹⁰⁹ Hoegh-Guldberg O., et al. (2018) *Chapter 3: Impacts of 1.5°C of Global Warming on Natural and Human Systems*, in GLOBAL WARMING OF 1.5°C , Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-

Delmotte V., *et al.* (eds.), 262 (“Tipping points refer to critical thresholds in a system that, when exceeded, can lead to a significant change in the state of the system, often with an understanding that the change is irreversible. An understanding of the sensitivities of tipping points in the physical climate system, as well as in ecosystems and human systems, is essential for understanding the risks associated with different degrees of global warming. This subsection reviews tipping points across these three areas within the context of the different sensitivities to 1.5°C versus 2°C of global warming. Sensitivities to less ambitious global temperature goals are also briefly reviewed. Moreover, an analysis is provided of how integrated risks across physical, natural and human systems may accumulate to lead to the exceedance of thresholds for particular systems. The emphasis in this section is on the identification of regional tipping points and their sensitivity to 1.5°C and 2°C of global warming, whereas tipping points in the global climate system, referred to as large-scale singular events, were already discussed in Section 3.5.2. A summary of regional tipping points is provided in Table 3.7.”). *See also* Abram N., *et al.* (2019) *Chapter 1: Framing and Context of the Report, in THE OCEAN AND CRYOSPHERE IN A CHANGING CLIMATE, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., *et al.* (eds.), 1-81 (“While some aspects of the ocean and cryosphere might respond in a linear (i.e., directly proportional) manner to a perturbation by some external forcing, this may change fundamentally when critical thresholds are reached. A very important example for such a threshold is the transition from frozen water to liquid water at around 0 °C that can lead to rapid acceleration of ice-melt or permafrost thaw (e.g., Abram *et al.*, 2013; Trusel *et al.*, 2018). Such thresholds often act as tipping points, as they are associated with rapid and abrupt changes even when the underlying forcing changes gradually (Figure 1.1a, 1.1c). Tipping elements include, for example, the collapse of the ocean’s large-scale overturning circulation in the Atlantic (Section 6.7), or the collapse of the West Antarctic Ice Sheet through a process called marine ice sheet instability (Cross-Chapter Box 8 in Chapter 3; Lenton, *et al.* 2008). Potential ocean and cryosphere tipping elements form part of the scientific case for efforts to limit climate warming to well below 2°C (IPCC, 2018).”).

¹¹⁰ Here we distinguish between abrupt shifts, as in Drijfhout *et al.* (2015), and the more restrictive definition of “core climate tipping points” defined by Armstrong McKay *et al.* (2022) as “when change in part of the climate system becomes (i) self-perpetuating beyond (ii) a warming threshold as a result of asymmetry in the relevant feedbacks, leading to (iii) substantial and widespread Earth system impacts.” *See* Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) *Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points*, *SCIENCE* 377(6611): 1–10, 7 (“Current warming is ~1.1°C above preindustrial and even with rapid emission cuts warming will reach ~1.5°C by the 2030s (23). We cannot rule out that WAIS and GrIS tipping points have already been passed (see above) and several other tipping elements have minimum threshold values within the 1.1 to 1.5°C range. Our best estimate thresholds for GrIS, WAIS, REEF, and abrupt permafrost thaw (PFAT) are ~1.5°C although WAIS and GrIS collapse may still be avoidable if GMST returns below 1.5°C within an uncertain overshoot time (likely decades) (94). ... The chance of triggering CTPs is already non-negligible and will grow even with stringent climate mitigation (SSP1-1.9 in Fig. 2, B and C). Nevertheless, achieving the Paris Agreement’s aim to pursue efforts to limit warming to 1.5°C would clearly be safer than keeping global warming below 2°C (90) (Fig. 2). Going from 1.5 to 2°C increases the likelihood of committing to WAIS and GrIS collapse near complete warm-water coral die-off, and abrupt permafrost thaw; further, the best estimate threshold for LABC collapse is crossed. The likelihood of triggering AMOC collapse, Boreal forest shifts, and extra-polar glacier loss becomes non-negligible at >1.5°C and glacier loss becomes likely by ~2°C. A cluster of abrupt shifts occur in ESMs at 1.5 to 2°C (19). Although not tipping elements, ASSI loss could become regular by 2°C, gradual permafrost thaw would likely become widespread beyond 1.5°C, and land carbon sink weakening would become significant by 2°C.”).

¹¹¹ Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, *NATURE* 575(7784): 592–595, 594 (“In our view, the clearest emergency would be if we were approaching a global cascade of tipping points that led to a new, less habitable, ‘hothouse’ climate state 11. Interactions could happen through ocean and atmospheric circulation or through feedbacks that increase greenhouse-gas levels and global temperature.”). *See also* Wunderling N., Donges J. F., Kurths J., & Winkelmann R. (2021) *Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming*, *EARTH SYST. DYN.* 12(2): 601–619, 614 (“In this study, we show that this risk increases significantly when considering

interactions between these climate tipping elements and that these interactions tend to have an overall destabilising effect. Altogether, with the exception of the Greenland Ice Sheet, interactions effectively push the critical threshold temperatures to lower warming levels, thereby reducing the overall stability of the climate system. The domino-like interactions also foster cascading, non-linear responses. Under these circumstances, our model indicates that cascades are predominantly initiated by the polar ice sheets and mediated by the AMOC. Therefore, our results also imply that the negative feedback loop connecting the Greenland Ice Sheet and the AMOC might not be able to stabilise the climate system as a whole.”); and Rocha J. C., Peterson G., Bodin Ö., & Levin S. (2018) *Cascading regime shifts within and across scales*, SCIENCE 362(6421): 1379–1383, 1383 (“A key lesson from our study is that regime shifts can be interconnected. Regime shifts should not be studied in isolation under the assumption that they are independent systems. Methods and data collection need to be further developed to account for the possibility of cascading effects. Our finding that ~45% of regime shift couplings can have structural dependence suggests that current approaches to environmental management and governance underestimate the likelihood of cascading effects.”).

¹¹² McIntyre M. E. (2023) *Climate tipping points: A personal view*, PHYSICS TODAY 76(3): 44–49, 45–46 (“Nearly all the climate system’s real complexity is outside the scope of any model, whether it’s a global climate model that aims to represent the climate system as a whole or a model that only simulates the carbon cycle, ice flow, or another subsystem.... Changes taking only a few years are almost instantaneous from a climate-system perspective. They’re a warning to take seriously the possibility of tipping points in the dynamics of the real climate system.⁹ The warning is needed because some modelers have argued that tipping points are less probable for the real climate system than for the simplified, low-order climate models studied by dynamic-systems researchers.³ Other researchers, however, have suggested that such a tipping point may be reached sometime in the next few decades or even sooner.^{6,7} Some of its mechanisms resemble those of the Dansgaard–Oeschger warmings and would suddenly accelerate the rate of disappearance of Arctic sea ice. As far as I am aware, no such tipping points have shown up in the behavior of the biggest and most sophisticated climate models. The suggested tipping-point behavior depends on fine details that are not well resolved in the models, including details of the sea ice and the layering of the upper ocean. Also of concern are increases in the frequency and intensity of destructive weather extremes. Such increases have already been observed in recent years. Climate scientists are asking how much further the increases will go and precisely how they will develop. That question is, of course, bound up with the question of tipping points. A failure to simulate many of the extremes themselves, especially extremes of surface storminess, must count as another limitation of the climate models. The reasons are related to the resolution constraints of climate models.”). See also Spratt D. (19 April 2023) *Faster than forecast, climate impacts trigger tipping points in the Earth system*, BULLETIN OF THE ATOMIC SCIENTISTS (“While observed warming has been close to climate model projections, the impacts have in many instances been faster and even more extreme than the models forecasted. William Ripple and his co-researchers show that many positive feedbacks are not fully accounted for in climate models.... In September 2022, Stockholm University’s David Armstrong McKay and his colleagues concluded that even global warming of 1-degree Celsius risks triggering some tipping points, just one data point in an alarming mountain of research on tipping points presented in the last year and a half. ... Speaking in 2018, Steffen said that the dominant linear, deterministic framework for assessing climate change is flawed, especially at higher levels of temperature rise. Model projections that don’t include these feedback and cascading processes “become less useful at higher temperature levels... or, as my co-author John Schellnhuber says, we are making a big mistake when we think we can ‘park’ the Earth System at any given temperature rise – say 2°C – and expect it to stay there.”); and Spratt D. & Dunlop I. (2017) *What lies beneath? The scientific understatement of climate risks*, Breakthrough & The National Centre for Climate Restoration, 21 (“As discussed above, climate models are not yet good at dealing with tipping points. This is partly due to the nature of tipping points, where a particular and complex confluence of factors abruptly change a climate system characteristic and drive it to a different state. To model this, all the contributing factors and their forces have to be well identified, as well as their particular interactions, plus the interactions between tipping points. Researchers say that “complex, nonlinear systems typically shift between alternative states in an abrupt, rather than a smooth manner, which is a challenge that climate models have not yet been able to adequately meet.”).

¹¹³ Ritchie P. D. L., Alkhayoun H., Cox P. M., & Wieczorek S. (2023) *Rate-induced tipping in natural and human systems*, EARTH SYST. DYN. 14(3): 669–683, 669–670 (“However, there is another, less obvious potential consequence

of changes in external forcing. When an external forcing changes faster than some critical rate rather than necessarily by a large amount, this can lead to rate-induced tipping points (Stocker and Schmittner, 1997; Luke and Cox, 2011; Wieczorek et al., 2011; Ashwin et al., 2012; Ritchie and Sieber, 2016; Siteur et al., 2016; Suchithra et al., 2020; Arumugam et al., 2020; Pierini and Ghil, 2021; Wieczorek et al., 2023; Longo et al., 2021; Kuehn and Longo, 2022; Kaur and Sharathi Dutta, 2022; Hill et al., 2022; Arnscheidt and Rothman, 2022). In contrast to bifurcation-induced tipping, rate-induced tipping occurs due to fast-enough changes in external forcing and usually does not exceed any critical levels as a result of external forcing. Such tipping points are much less widely known and yet are arguably even more relevant to contemporary issues such as climate change (Lohmann and Ditlevsen, 2021; Clarke et al., 2021; O’Sullivan et al., 2022), ecosystem collapse (Scheffer et al., 2008; Vanselow et al., 2019; van der Bolt and van Nes, 2021; Neijns et al., 2021; Vanselow et al., 2022), and the resilience of human systems (Witthaut et al., 2021).”), 678 (“This paper highlights the importance of considering how fast external forcing is changing as opposed to solely focusing on levels of change. Consequently, the actions taken to control the rate of change in forcing are equally as important as the actions taken to control the level at which forcing is halted.”), *discussed in* Morrison A. (14 July 2023) *Tipping Points Can Be Triggered Unexpectedly By Dangerous Rates Of Change*, UNIVERSITY OF EXETER NEWS (“Until now, critical thresholds have been assumed to be a point of no return, but the new study – published in the journal *Earth System Dynamics* – concludes that dangerous rates could trigger permanent shifts in human and natural systems before these critical levels are reached... Whilst the latest Intergovernmental Panel on Climate Change 6th Assessment Report rightly highlighted the urgency to limit global warming levels, it fell short of identifying the rate of warming as a key risk factor for climate tipping points” said joint lead author [Dr Paul Ritchie](#), of Exeter’s [Global Systems Institute](#) and the Department of Mathematics and Statistics.”).

¹¹⁴ Willcock S., Cooper G. S., Addy J., & Dearing J. A. (2023) *Earlier collapse of Anthropocene ecosystems driven by multiple faster and noisier drivers*, NAT. SUSTAIN. 6(11): 1–12, 3 (“In addition to earlier breakpoint dates, extra drivers can also cause ATDCs [Abrupt Threshold-Dependent Change] at levels where it would be resilient to the primary slow driver in isolation (Supplementary Section 2).”), 4 (“The addition of high noise (normalized $\sigma > 0.666$) shows that increasing the variability of the primary slow driver (in isolation) across all four models can bring forward the date of system collapse (Fig. 3). The effects outlined above are synergistic—combining multiple drivers with noise further reduces the breakpoint date beyond the effects of either multiple drivers or noise acting alone (Fig. 4)”), 5 (“Our findings also show that 1.2–14.8% of ATDCs can be triggered by additional drivers and/or noise below the threshold of driver strengths required to collapse the system if only a single driver were in effect.”).

¹¹⁵ Drijfhout S., Bathiany S., Beaulieu C., Brovkin V., Claussen M., Huntingford C., Scheffer M., Sgubin G., & Swingedouw D. (2015) *Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 112(43): E5777–E5786, E5784 (“Permafrost carbon release (51) and methane hydrates release (52) were not expected in CMIP5 simulations, because of missing biogeochemical components in those models capable of simulating such changes.”). *See also* Bathiany S., Hidding J., & Scheffer M. (2020) *Edge Detection Reveals Abrupt and Extreme Climate Events*, J. CLIM. 33(15): 6399–6421, 6416 (“Despite their societal relevance, our knowledge about the risks of future abrupt climate shifts is far from robust. Several important aspects are highly uncertain: future greenhouse gas emissions (scenario uncertainty), the current climate state (initial condition uncertainty), the question whether and how to model specific processes (structural uncertainty), and what values one should choose for parameters appearing in the equations (parametric uncertainty). Such uncertainties can be explored using ensemble simulations. For example, by running many simulations with different combinations of parameter values a perturbed-physics ensemble can address how parameter uncertainty affects the occurrence of extreme events (Clark et al. 2006). This strategy can be particularly beneficial for studying abrupt events as well since abrupt shifts are associated with region-specific processes, whereas models are usually calibrated to produce a realistic global mean climate at the expense of regional realism (Mauritsen et al. 2012; McNeall et al. 2016). The currently available model configurations are therefore neither reliable nor sufficient to assess the risk of abrupt shifts (Drijfhout et al. 2015). It is hence very plausible that yet-undiscovered tipping points can occur in climate models.”); Canadell J. G., *et al.* (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 5-78 (“There is low confidence in the estimate of the

non-CO₂ biogeochemical feedbacks, due to the large range in the estimates of α for some individual feedbacks (Figure 5.29c), which can be attributed to the diversity in how models account for these feedbacks, limited process-level understanding, and the existence of known feedbacks for which there is not sufficient evidence to assess the feedback strength.”); and Permafrost Pathways, *Course of Action: Mitigation Policy*, Woodwell Climate Research Center (*last visited* 5 February 2023) (“Depending on how hot we let it get, carbon emissions from Arctic permafrost thaw are expected to be in the range of 30 to more than 150 billion tons of carbon (110 to more than 550 Gt CO₂) this century, with upper estimates on par with the cumulative emissions from the entire United States at its current rate. To put it another way, permafrost thaw emissions could use up between 25 and 40 percent of the remaining carbon budget that would be necessary to cap warming at the internationally agreed-upon 2 degrees Celsius global temperature threshold established in the Paris Agreement.... Despite the enormity of this problem, gaps in permafrost carbon monitoring and modeling are resulting in permafrost being left out of global climate policies, rendering our emissions targets fundamentally inaccurate. World leaders are in a race against time to reduce emissions and prevent Earth’s temperature from reaching dangerous levels. The problem is, without including current and projected emissions from permafrost, this race will be impossible to finish. ... 82% [o]f IPCC models do not include carbon emissions from permafrost thaw.”).

¹¹⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Annex VII Glossary*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.).

¹¹⁷ Boers N. & Rypdal M. (2021) *Critical slowing down suggests that the western Greenland Ice Sheet is close to a tipping point*, *PROC. NAT’L. ACAD. SCI.* 118(21): 1–7, 1 (“A crucial nonlinear mechanism for the existence of this tipping point is the positive melt-elevation feedback: Melting reduces ice sheet height, exposing the ice sheet surface to warmer temperatures, which further accelerates melting. We reveal early-warning signals for a forthcoming critical transition from ice-core-derived height reconstructions and infer that the western Greenland Ice Sheet has been losing stability in response to rising temperatures. We show that the melt-elevation feedback is likely to be responsible for the observed destabilization. Our results suggest substantially enhanced melting in the near future.”).

¹¹⁸ Duffy K. A., Schwalm C. R., Arcus V. L., Koch G. W., Liang L. L., & Schipper L. A. (2021) *How close are we to the temperature tipping point of the terrestrial biosphere?*, *SCI. ADV.* 7(3): 1–8, 1 (“The temperature dependence of global photosynthesis and respiration determine land carbon sink strength. While the land sink currently mitigates ~30% of anthropogenic carbon emissions, it is unclear whether this ecosystem service will persist and, more specifically, what hard temperature limits, if any, regulate carbon uptake. Here, we use the largest continuous carbon flux monitoring network to construct the first observationally derived temperature response curves for global land carbon uptake. We show that the mean temperature of the warmest quarter (3-month period) passed the thermal maximum for photosynthesis during the past decade. At higher temperatures, respiration rates continue to rise in contrast to sharply declining rates of photosynthesis. Under business-as-usual emissions, this divergence elicits a near halving of the land sink strength by as early as 2040.”).

¹¹⁹ Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., & Malley J. (eds.), SPM-22 (“In pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot global net CO₂ emissions are reduced compared to modelled 2019 emissions by 48% [36–69%] in 2030 and by 80% [61–109%] in 2040; and global CH₄ emissions are reduced by 34% [21–57%] in 2030 and 44% [31–63%] in 2040. There are similar reductions of non-CO₂ emissions by 2050 in both types of pathways: CH₄ is reduced by 45% [25–70%]; N₂O is reduced by 20% [-5 – 55%]; and F-Gases are reduced by 85% [20–90%]. [FOOTNOTE 44] Across most modelled pathways, this is the maximum technical potential for anthropogenic CH₄ reductions in the underlying models (*high confidence*). Further emissions reductions, as illustrated by the IMP-SP pathway, may be achieved through changes in activity levels and/or technological innovations beyond those represented in the majority of the pathways (*medium*

confidence). Higher emissions reductions of CH₄ could further reduce peak warming. (*high confidence*) (Figure SPM.5) {3.3}”). See also Intergovernmental Panel on Climate Change (2018) *Summary for Policymakers*, in *GLOBAL WARMING OF 1.5 °C, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-15 (“In model pathways with no or limited overshoot of 1.5 °C, global net anthropogenic CO₂ emissions decline by about 45% from 2010 levels by 2030 (40–60% interquartile range), reaching net zero around 2050 (2045–2055 interquartile range).... Modelled pathways that limit global warming to 1.5 °C with no or limited overshoot involve deep reductions in emissions of methane and black carbon (35% or more of both by 2050 relative to 2010).”).

¹²⁰ Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Bernsten T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-8 (“Additional CH₄ and BC mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with SO₂ reductions that would accompany decarbonization (*high confidence*).”). See also Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasiija A., Lisboa G., Luz S., & Malley J. (eds.), SPM-31 (“In modelled global low emission pathways, the projected reduction of cooling and warming aerosol emissions over time leads to net warming in the near- to mid-term. In these mitigation pathways, the projected reductions of cooling aerosols are mostly due to reduced fossil fuel combustion that was not equipped with effective air pollution controls.”).

¹²¹ Dreyfus G. B., Xu Y., Shindell D. T., Zaelke D., & Ramanathan V. (2022) *Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming*, *PROC. NAT’L. ACAD. SCI.* 119(22): 1–8, 1 (“We find that mitigation measures that target only decarbonization are essential for strong long-term cooling but can result in weak near-term warming (due to unmasking the cooling effect of co-emitted aerosols) and lead to temperatures exceeding 2°C before 2050. In contrast, pairing decarbonization with additional mitigation measures targeting short-lived climate pollutants (SLCPs) and N₂O, slows the rate of warming a decade or two earlier than decarbonization alone and avoids the 2°C threshold altogether. These non-CO₂ targeted measures when combined with decarbonization can provide net cooling by 2030, reduce the rate of warming from 2030 to 2050 by about 50%, roughly half of which comes from methane, significantly larger than decarbonization alone over this timeframe.”). See also Ramanathan V. & Feng Y. (2008) *On avoiding dangerous anthropogenic interference with the climate system: Formidable challenges ahead*, *PROC. NAT’L. ACAD. SCI.* 105(38): 14245–14250, 14248 (“Switching from coal to “cleaner” natural gas will reduce CO₂ emission and thus would be effective in minimizing future increases in the committed warming. However, because it also reduces air pollution and thus the ABC [Atmospheric Brown Cloud] masking effect, it may speed up the approach to the committed warming of 2.4°C (1.4–4.3°C).”); Hansen J. E. & Sato M. (2021) *July Temperature Update: Faustian Payment Comes Due* (“It follows that the global warming acceleration is due to the one huge climate forcing that we have chosen not to measure: the forcing caused by imposed changes of atmospheric aerosols... We should expect the global warming rate for the quarter of a century 2015-2040 to be about double the 0.18°C/decade rate during 1970-2015 (see Fig. 2), unless appropriate countermeasures are taken.”); and Dvorak M. T., Armour K. C., Frierson D. M. W., Proistosescu C., Baker M. B., & Smith C. J. (2022) *Estimating the timing of geophysical commitment to 1.5 and 2.0 °C of global warming*, *NAT. CLIM. CHANGE* 12: 547–552, 547 (“Following abrupt cessation of anthropogenic emissions, decreases in short-lived aerosols would lead to a warming peak within a decade, followed by slow cooling as GHG concentrations decline. This implies a geophysical commitment to temporarily crossing warming levels before reaching them. Here we use an emissions-based climate model (FaIR) to estimate temperature change following cessation of emissions in 2021 and in every year thereafter until 2080 following eight Shared Socioeconomic Pathways (SSPs). Assuming a medium-emissions trajectory (SSP2–4.5), we find that we are already committed to peak warming greater than 1.5 °C with 42% probability, increasing to 66% by 2029 (340 GtCO₂ relative to 2021). Probability of peak warming greater than 2.0 °C is currently 2%, increasing to 66% by 2057 (1,550 GtCO₂ relative to 2021). Because climate will cool from peak warming as GHG

concentrations decline, committed warming of 1.5 °C in 2100 will not occur with at least 66% probability until 2055.”).

¹²² Climate scientist and IPCC author Joeri Rogelj, *as quoted in* Berwyn B. (15 September 2021) *The Rate of Global Warming During Next 25 Years Could Be Double What it Was in the Previous 50, a Renowned Climate Scientist Warns*, INSIDE CLIMATE NEWS (“James Hansen, a climate scientist who shook Washington when he told Congress 33 years ago that human emissions of greenhouse gases were cooking the planet, is now **warning** that he expects the rate of global warming to double in the next 20 years. While still warning that it is carbon dioxide and methane that are driving global warming, Hansen said that, in this case, warming is being accelerated by the decline of other industrial pollutants that they’ve cleaned from it. ... In Hansen’s latest warning, he said scientists are dangerously underestimating the climate impact of reducing sulfate aerosol pollution. ‘Something is going on in addition to greenhouse warming,’ Hansen **wrote**, noting that July’s average global temperature soared to its second-highest reading on record even though the Pacific Ocean is in a cooling La Niña phase that temporarily dampens signs of warming. Between now and 2040, he wrote that he expects the climate’s rate of warming to double in an ‘acceleration that can be traced to aerosols.’ That acceleration could lead to total warming of 2 degrees Celsius by 2040, the upper limit of the temperature range that countries in the Paris accord agreed was needed to prevent disastrous impacts from climate change. What’s more, Hansen and other researchers said the processes leading to the acceleration are not adequately measured, and some of the tools needed to gauge them aren’t even in place.... A doubling of the rate of global warming would put the planet in the fast lane of glacial melting, sea level rise and coral reef ecosystem die-offs, as well as escalating heatwaves, droughts and floods. But that future is not yet set in stone, said **Michael Mann**, a climate scientist at Penn State. He said Hansen’s prediction appears inconsistent with the scientific literature assessed by the **Intergovernmental Panel on Climate Change**. The IPCC’s latest **report** advises “that reductions of carbon emissions by 50 percent over the next decade and net-zero by 2100, along with a ramp-down in both aerosols and other short-term agents, including black carbon and other trace anthropogenic greenhouse gases, stabilizes warming well below 2 degrees Celsius,” Mann said. But the IPCC report also highlighted that declining aerosol pollution will speed warming. “The removal of air pollution, either through air quality measures or because combustion processes are phased out to get rid of CO₂, will result in an increase in the resulting rate of warming,” said climate scientist and IPCC report author **Joeri Rogelj**, director of research at the Imperial College London’s **Grantham Institute**. There’s a fix for at least some of this short-term increase in the rate of warming, he said. “The only measures that can counteract this increased rate of warming over the next decades are methane reductions,” Rogelj said. “I just want to highlight that methane reductions have always been part of the portfolio of greenhouse gas emissions reductions that are necessary to meet the goals of the Paris Agreement. This new evidence only further emphasizes this need.”). *See also* Spring J. & Stanway D. (2 November 2023) *Climate’s ‘catch-22’: cutting pollution heats up the planet*, REUTERS (“[Scientists] stressed the need for more aggressive action to cut emissions of climate-warming greenhouse gases, with reducing methane seen as one of the most promising paths to offset pollution unmasking in the short term.”).

¹²³ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in **CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS**, *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), SPM-36 (“Strong, rapid and sustained reductions in CH₄ emissions would also limit the warming effect resulting from declining aerosol pollution and would improve air quality.”). *See also* Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in **CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS**, *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 6-7 (“Across the SSPs, the collective reduction of CH₄, ozone precursors and HFCs can make a difference of global mean surface air temperature of 0.2 with a very likely range of [0.1–0.4] °C in 2040 and 0.8 with a very likely range of [0.5–1.3] °C at the end of the 21st century (comparing SSP3-7.0 and SSP1-1.9), which is substantial in the context of the Paris Agreement. Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*). {6.6.3, 6.7.3, 4.4.4}”), 6-8 (“Additional CH₄ and BC mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with SO₂ reductions that would accompany decarbonization (*high*

confidence).”); United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 21 (“This is because a realistically paced phase-out of fossil fuels, or even a rapid one under aggressive decarbonization, is likely to have minimal net impacts on near-term temperatures due to the removal of co-emitted aerosols (Shindell and Smith 2019). As methane is the most powerful driver of climate change among the short-lived substances (Myhre et al. 2013), mitigation of methane emissions is very likely to be the most powerful lever in reducing near-term warming. This is consistent with other assessments; for example, the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (IPCC AR5) showed that methane controls implemented between 2010 and 2030 would lead to a larger reduction in 2040 warming than the difference between RCPs 2.6, 4.5 and 6.0 scenarios. (The noted IPCC AR5-era scenarios are called representative concentration pathways (RCPs, with the numerical value indicating the target radiative forcing in 2100 (Kirtman et al. 2013)).”); and Shindell D. & Smith C. J. (2019) *Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels*, NATURE 573: 408–411, Addendum “Methods” (“We note that, although this study focuses on the effects of fossil-fuel related emissions, accounting for the effects of reductions in greenhouse gases from non-fossil sources—including fluorinated gases and both methane and nitrous oxide from agriculture—along with biofuels that are a large source of warming black carbon, could eliminate any near-term penalty entirely. In fact, given that the net effect of the fossil-fuel phase-out on temperature is minimal during the first 20 years (Fig. 3), reducing those other emissions is the only plausible way in which to decrease warming during that period.”).

¹²⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., Skea J., Slade R., Al Khouradajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., & Malley J. (eds.), SPM-30–SPM-31 (“Deep GHG emissions reductions by 2030 and 2040, particularly reductions of methane emissions, lower peak warming, reduce the likelihood of overshooting warming limits and lead to less reliance on net negative CO₂ emissions that reverse warming in the latter half of the century... Future non-CO₂ warming depends on reductions in non-CO₂ GHG, aerosol and their precursor, and ozone precursor emissions. In modelled global low emission pathways, the projected reduction of cooling and warming aerosol emissions over time leads to net warming in the near- to mid-term. In these mitigation pathways, the projected reductions of cooling aerosols are mostly due to reduced fossil fuel combustion that was not equipped with effective air pollution controls. Non-CO₂ GHG emissions at the time of net zero CO₂ are projected to be of similar magnitude in modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) or lower. These non-CO₂ GHG emissions are about 8 [5–11] GtCO₂-eq per year, with the largest fraction from CH₄ (60% [55–80%]), followed by N₂O (30% [20–35%]) and F-gases (3% [2–20%]). [FOOTNOTE 52] Due to the short lifetime of CH₄ in the atmosphere, projected deep reduction of CH₄ emissions up until the time of net zero CO₂ in modelled mitigation pathways effectively reduces peak global warming. (*high confidence*)”).

¹²⁵ Fiore A. M., Jacob D. J., Field B. D., Streets D. G., Fernandes S. D., & Jang C. (2002) *Linking ozone pollution and climate change: The case for controlling methane*, GEOPHYS. RES. LETT. 29(19): 25-1–25-4, 25-1 (“Methane is a known major source of the tropospheric O₃ background, but is not generally considered a precursor to regional O₃ pollution episodes in surface air because of its long lifetime (8–9 years)... Our global 3-D model analysis shows that reducing CH₄ emissions enables a simultaneous pursuit of O₃ air quality and climate change mitigation objectives. Whereas reductions in NO_x emissions achieve localized decreases in surface O₃ concentrations, reductions in CH₄ emissions lower the global O₃ background and improve surface air quality everywhere.”). See also United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT*, 45 (“Next, the linearity of the response to different magnitudes of methane concentration change was examined. At the national level, population weighted ozone changes are extremely linear across a range of methane increases and decreases (Figure 3.4). Though the response itself varies from country to country (i.e. the slopes are different), the ozone change at the national level is directly proportional to the methane concentration change regardless of the ozone metric chosen. This result is consistent with prior studies which also indicate that the ozone/methane relationship is approximately linear (Fiore et al. 2008) but its magnitude depends on the local availability of nitrogen oxides, and, through nitrogen oxides, of hydroxyl (West et al. 2006; Wang and Jacob 1998).”).

¹²⁶ Turner M. C., Jerrett M., Pope C. A., Krewski D., Gapstur S. M., Diver W. R., Beckerman B. S., Marshall J. D., Su J., Crouse D. L., & Burnett R. T. (2016) *Long-Term Ozone Exposure and Mortality in a Large Prospective Study*, AM. J. RESPIR. CRIT. CARE MED. 193(10): 1134–1142, 1134 (“We observed significant positive associations between long-term O₃ and all-cause, circulatory, and respiratory mortality with 2%, 3%, and 12% increases in risk per 10 ppb, respectively, in this large-scale study with 22 years of follow-up.”). See also Global Climate and Health Alliance (2023) *MITIGATING METHANE: A GLOBAL HEALTH STRATEGY*, 7 (“Methane emissions are directly detrimental to human health by contributing to the formation of tropospheric, or ground-level ozone, an air pollutant and GHG. Tropospheric ozone can damage airways, trigger asthma attacks, and aggravate lung diseases. Long-term exposure to tropospheric ozone can lead to premature mortality from respiratory illnesses, cardiovascular diseases, and cancer. The 2022 Global Methane Assessment identified a linear relationship in tropospheric ozone responses to methane concentrations — as methane concentrations increase, so does ozone. An estimated 1.04 to 1.23 million respiratory deaths in adults over 30 years old are associated with exposure to ground-level ozone.”).

¹²⁷ Feng Z., Xu Y., Kobayashi K., Dai L., Zhang T., Agathokleous E., Calatayud V., Paoletti E., Mukherjee A., Agrawal M., Park R. J., Oak Y. J., & Yue X. (2022) *Ozone pollution threatens the production of major staple crops in East Asia*, NAT. FOOD 3: 47–56, 47 (“East Asia is a hotspot of surface ozone (O₃) pollution, which hinders crop growth and reduces yields. Here, we assess the relative yield loss in rice, wheat and maize due to O₃ by combining O₃ elevation experiments across Asia and air monitoring at about 3,000 locations in China, Japan and Korea. China shows the highest relative yield loss at 33%, 23% and 9% for wheat, rice and maize, respectively. The relative yield loss is much greater in hybrid than inbred rice, being close to that for wheat. Total O₃-induced annual loss of crop production is estimated at US\$63 billion.”).

¹²⁸ Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, ENVIRON. SCI. POLICY 134: 127–136, 129–130 (“Beyond this, however, O₃ damage to plants may significantly reduce the ability of terrestrial ecosystems to absorb carbon, negating some of the enhanced carbon uptake due to CO₂ fertilization that is expected to partially offset rising atmospheric CO₂ concentrations (Sitch et al., 2007; Ciais et al., 2013; Arneth et al., 2010; Ainsworth et al., 2012). However, the magnitude of this effect remains the subject of scientific debate, largely due to the complexity of interactions between plant response to O₃ and other environmental variables, including other air pollutants, CO₂ concentrations, temperature, precipitation, and nitrogen availability (Ainsworth et al., 2012; Kvalevåg and Myhre, 2013; Sitch et al., 2007; Simpson et al., 2014). For instance, Sitch et al. (2007) estimated that the present-day indirect radiative forcing due to O₃-induced plant damage could be as high as 0.21–0.38 W m⁻², comparable to the direct radiative forcing of tropospheric O₃. However, Kvalevåg and Myhre (2013) argue that this estimate is far too high and that accounting for nitrogen limitation on plant growth reduces the expected impact; they estimate an indirect radiative.”).

¹²⁹ Butler T., Lupascu A., & Nalam A. (2020) *Attribution of ground-level ozone to anthropogenic and natural sources of nitrogen oxides and reactive carbon in a global chemical transport model*, ATMOS. CHEM. PHYS. 20(17): 10707–10731, 10726 (“As a reactive carbon precursor, methane contributes 35 % of the tropospheric ozone burden and 41 % of the Northern Hemisphere annual average surface mixing ratio, which is more than any other source of reactive carbon.”).

¹³⁰ Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, ENVIRON. SCI. POLICY 134: 127–136, 130 (“Importantly, the role of methane’s contribution to O₃ production is expected to increase in the future, as emissions of other anthropogenic precursors (primarily NO_x and VOCs) are anticipated to decrease as a result of current and planned air quality regulations across much of the globe. For instance, Young et al. (2013) showed that rising CH₄ concentrations could be a major driver of increased surface O₃ by 2100 under the high-emission scenario developed for the IPCC 5th Assessment report. Turnock et al. (2018) showed that increased O₃ production from rising CH₄ concentrations could offset the reduction in surface O₃ due to reductions in emissions of shorter-lived O₃ precursors.”).

¹³¹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 8 (Figure ES1: Current and projected anthropogenic methane emissions and the identified sectoral mitigation potential in 2030 along with several benefits associated with sectoral-level methane emissions mitigation. Avoided warming occurs in the 2040s, other impacts are annual values beginning in 2030 that would continue thereafter).

¹³² Staniaszek Z., Griffiths P. T., Folberth G. A., O'Connor F. M., Abraham N. L., Archibald A. T. (2021) *The role of future anthropogenic methane emissions in air quality and climate*, NPJ CLIM. ATMOS. SCI. 5(21): 1–8, 2–3 (“To quantify the air-quality impacts of anthropogenic methane, we calculated the long-term ozone-related mortality for SSP3-7.0 and ZAME for 2050, according to the method in Malley et al.³⁰. We found that the ozone associated with anthropogenic methane is responsible for 690,000 premature deaths per year (456,000–910,000, lower and upper bounds of mortality rate) in 2050: 43% from respiratory causes and 57% from cardiovascular causes. This corresponds to around 1270 annual deaths per million tonnes (Tg) of methane emissions, or 65% higher total (ozone-related) deaths per year compared to ZAME.”).

¹³³ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 78 (“The total valuation per tonne of methane for all market and non-market impacts assessed here is roughly US\$ 4 300 using a cross-nation income elasticity for WTP of 1.0 and US\$ 7 900 using an elasticity of 0.4 (Figure 3.19) – values are ~US\$ 150 per tonne larger for fossil-related emissions. This value is dominated by mortality effects, of which US\$ 2 500 are due to ozone and ~US\$ 700 are due to heat using the more conservative 500 deaths per million tonnes of methane of this analysis’ two global-scale estimates and a WTP income elasticity of 1.0, followed by climate impacts.”).

¹³⁴ United Nations Environment Program (2 December 2023) *Bending the warming curve through action on non-CO2 gases at COP28 Summit*. See also United States Department of State (2 December 2023) *Accelerating Fast Mitigation: Summit on Methane and Non-CO2 Greenhouse Gases*, Fact Sheet (“The United States, People’s Republic of China, and United Arab Emirates today convened a Summit to accelerate actions to cut methane and other non-CO2 greenhouse gases as the fastest way to reduce near-term warming and keep a goal of limiting global average temperature increase to 1.5 degrees Celsius within reach.”) and Escudero J. (18 December 2023) *COP28: “The Methane COP”*, LEGAL PLANET (“In a high-profile event at the main stage of COP28, the U.S., China, and United Arab Emirates hosted the Summit on Methane and non-CO2 Greenhouse Gases that called on the parties of the Paris Agreement to include methane and other GHGs in their nationally determined contributions (NDC). This statement is relevant since the parties did not always inform methane emissions; therefore, they were usually ignored in the actions that followed Nationally Determined Contributions, or NDCs. Another significant announcement from the Summit was the incorporation of Turkmenistan – one of the world’s top emitters-Kazakhstan, Angola, Kenya, and Romania to the Global Methane Pledge, a commitment to reduce methane emissions by 30% from 202 levels by 2030. With these incorporations, 156 countries have joined the pledge, notably not China. In addition, Kazakhstan and the U.S. announced a cooperation partnership to help the Central Asian country meet the Global Methane Pledge’s goals by developing national standards to eliminate non-emergency venting of methane, among other actions.”),

¹³⁵ United Nations Framework Convention on Climate Change. (2023) *First global stocktake, Proposal by the President Draft decision -/CMA.5 Outcome of the first global stocktake*, S28 (“Further recognizes the need for deep, rapid and sustained reductions in greenhouse gas emissions in line with 1.5 °C pathways and calls on Parties to contribute to the following global efforts, in a nationally determined manner, taking into account the Paris Agreement and their different national circumstances, pathways and approaches.” (f) “Accelerating and substantially reducing non-carbon-dioxide emissions globally, including in particular methane emissions by 2030.”).

¹³⁶ See generally (3 December 2021) *Methane matters*, Editorial, NAT. GEOSCI. 14: 875.

¹³⁷ Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, NATURE 575(7784): 592–595, 594 (“In our view, the

clearest emergency would be if we were approaching a global cascade of tipping points that led to a new, less habitable, 'hothouse' climate state¹¹. Interactions could happen through ocean and atmospheric circulation or through feedbacks that increase greenhouse-gas levels and global temperature. Alternatively, strong cloud feedbacks could cause a global tipping point^{12,13}. We argue that cascading effects might be common. . . . If damaging tipping cascades can occur and a global tipping point cannot be ruled out, then this is an existential threat to civilization. No amount of economic cost–benefit analysis is going to help us. We need to change our approach to the climate problem. . . . In our view, the evidence from tipping points alone suggests that we are in a state of planetary emergency: both the risk and urgency of the situation are acute. . . .”). See also Steffen W., *et al.* (2018) *Trajectories of the Earth System in the Anthropocene*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 115(33): 8252–8259, 8254 (“This analysis implies that, even if the Paris Accord target of a 1.5 °C to 2.0 °C rise in temperature is met, we cannot exclude the risk that a cascade of feedbacks could push the Earth System irreversibly onto a “Hothouse Earth” pathway. The challenge that humanity faces is to create a “Stabilized Earth” pathway that steers the Earth System away from its current trajectory toward the threshold beyond which is Hothouse Earth (Fig. 2). The human-created Stabilized Earth pathway leads to a basin of attraction that is not likely to exist in the Earth System’s stability landscape without human stewardship to create and maintain it.”).

¹³⁸ United States Department of State (11 October 2021) *Joint U.S.-EU Statement on the Global Methane Pledge*, Press Release (“Successful implementation of the Pledge would reduce warming by at least 0.2 degrees Celsius by 2050.”). It would also keep the planet on a pathway consistent with staying within 1.5 °C, according to the *Global Methane Assessment*. United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *Briefing on the Global Methane Pledge* (“The Global Methane Pledge is a strong first step as the first-ever Heads-of State global commitment to cut methane emissions at a level consistent with a 1.5 C pathway.”). See also United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 9 (“Currently available measures could reduce emissions from these major sectors by approximately 180 Mt/yr, or as much as 45 per cent, by 2030. This is a cost-effective step required to achieve the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) 1.5° C target. According to scenarios analysed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), global methane emissions must be reduced by between 40–45 per cent by 2030 to achieve least cost-pathways that limit global warming to 1.5° C this century, alongside substantial simultaneous reductions of all climate forcers including carbon dioxide and short-lived climate pollutants. (Section 4.1).”). Deploying all available and additional measures could lead to a 45% reduction below 2030 levels to achieve nearly 0.3 °C in avoided warming by the 2040s.¹³⁸ Further, implementing the GMP would provide additional benefits, including prevention of approximately 200,000 premature ozone-related deaths, avoidance of ~580 million tons of yield losses of staple crops like rice and maize annually, avoidance of ~\$500 billion per year in losses due to non-mortality health impacts, and impacts on forestry and agriculture, and avoidance of ~1,600 billion hours of work per year due to heat exposure. Nearly 85% of targeted measures have benefits that outweigh the net costs. United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2022) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: 2030 BASELINE REPORT SUMMARY FOR POLICYMAKERS*, 11 (“Using the results from the 2021 Global Methane Assessment, we calculate that Global Methane Pledge would provide additional benefits worldwide through 2050, beyond keeping the planet cool, including: - Prevention of roughly 200,000 premature deaths per year due to ozone exposure - Avoidance of ~580 million tonnes of yield losses to wheat, maize (corn), rice and soybeans per year - Avoidance of ~\$500 billion (2018 US\$) per year in losses per year due to non-mortality health impacts, forestry and agriculture - Avoidance of ~1,600 billion lost work hours per year due to heat exposure.”). According to the International Energy Agency, total methane emissions from human activity are reduced by 45% and the energy sector by 75% between 2020 and 2030, costing less than 3% of net income from oil and gas in 2022. International Energy Agency (2023) *Credible pathways to 1.5 °C - Four pillars for action in the 2020s*, 1–15, 11 (“In the NZE Scenario, methane emissions from the energy sector fall by around 75% between 2020 and 2030 and total methane emissions from human activity fall by around 45%. The IEA’s latest update of its Global Methane Tracker found that methane emissions from oil and gas alone could be reduced by 75% with existing technologies. Around \$100 billion in total investment is needed over the period to 2030 to achieve this reduction—equivalent to less than 3% of oil and gas net income in 2022. To address methane emissions from fossil energy production and consumption, countries covering over half of global gas imports and over one-third of global gas exports released a Joint Declaration from

Energy Importers and Exporters on Reducing Greenhouse Gas Emissions from Fossil Fuels at COP27 calling for minimizing flaring, methane, and CO₂ emissions across the supply chain to the fullest extent practicable.”).

¹³⁹ (16 September 1987) *Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*, 26 I.L.M. 1541 (entered into force 1 January 1989). For a discussion of the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, *see generally* Miller A. S., Zaelke D., & Andersen S. O. (2021) *RESETTING OUR FUTURE: CUT SUPER CLIMATE POLLUTANTS NOW! THE OZONE TREATY'S URGENT LESSONS FOR SPEEDING UP CLIMATE ACTION*, John Hunt Publishing; and Andersen S., Zaelke D., Taddonio K., Ferris R., & Sherman N. (2021) *Ozone Layer, International Protection*, in MAX PLANCK ENCYCLOPEDIA OF PUBLIC INTERNATIONAL LAW, Oxford University Press, Peters A., & Wolfrum R. (eds.).

¹⁴⁰ *See, e.g.*, Volcovici V. (27 November 2023) *COP28 climate summit puts spotlight on turning methane pledges into action*, REUTERS (“‘If it’s just a pledge, it will land with a thump,’ said Rachel Kyte, the World Bank’s former climate envoy. ‘The UAE needs to commit companies and countries to sit down and negotiate a binding agreement to x-out methane’ and ‘there are a lot of pieces coming together,’ said Durwood Zaelke, president of the Institute for Governance and Sustainable Development, a Washington, D.C.-based think tank. ‘With major emitters like the U.S., China and EU announcing new rules, the time is right for an agreement.’”). *See also* International Chamber of Commerce (23 November 2023) *Strengthening the Global Methane Pledge to keep 1.5 °C within reach* (“While businesses across our network are firmly committed to reducing methane emissions, clear policy signals from governments – backed by strong accountability measures within the GMP framework – are urgently needed to scale-up the mitigation efforts that are ultimately required by the end of this decade.”); and Climate & Clean Air Coalition (9 December 2023) *Ministers Unite for Immediate Action on Climate and Clean Air, Urging Bold Financing and Swift Measures on Non-CO2 Super Pollutant Greenhouse Gases* (“As CCAC High-level Advocate for Finance Rachel Kyte, who moderated the session, said in her closing: ‘It’s 2023. With peak oil, peak coal, and peak emissions, we are also ‘peak-pledge.’ This Coalition has proven to turn ambition into action, it set out as the Coalition of the Working.”).

¹⁴¹ Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Bernsten T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7 (“Across the SSPs, the collective reduction of CH₄, ozone precursors and HFCs can make a difference of global mean surface air temperature of 0.2 with a very likely range of [0.1–0.4] °C in 2040 and 0.8 with a very likely range of [0.5–1.3] °C at the end of the 21st century (comparing SSP3-7.0 and SSP1-1.9), which is substantial in the context of the Paris Agreement. Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*)”), 6-8 (“Additional CH₄ and BC mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with SO₂ reductions that would accompany decarbonization (*high confidence*).”).

¹⁴² Solomon S., Daniel J. S., Sanford T. J., Murphy D. M., Plattner G.-K., Knutti R., & Friedlingstein P. (2010) *Persistence of climate changes due to a range of greenhouse gases*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 107(43): 18354–18359, 18357 (“In the case of a gas with a 10-y lifetime, for example, energy is slowly stored in the ocean during the period when concentrations are elevated, and this energy is returned to the atmosphere from the ocean after emissions cease and radiative forcing decays, keeping atmospheric temperatures somewhat elevated for several decades. Elevated temperatures last longer for a gas with a 100-y lifetime because, in this case, radiative forcing and accompanying further ocean heat uptake continue long after emissions cease. As radiative forcing decays further, the energy is ultimately restored from the ocean to the atmosphere. Fig. 3 shows that the slow timescale of ocean heat uptake has two important effects. It limits the transfer of energy to the ocean if emissions and radiative forcing occur only for a few decades or a century. However, it also implies that any energy that is added to the ocean remains available to be transferred back to the atmosphere for centuries after cessation of emissions.”).

¹⁴³ Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change are required to report emissions on a gas-by-gas basis in units of mass. *See* United Nations Framework Convention on Climate Change, Dec. 18/CMA.1,

FCCC/PA/CMA/2018/3/Add.2, at Annex ¶47 (2019) (“47. Each Party shall report estimates of emissions and removals for all categories, gases and carbon pools considered in the GHG inventory throughout the reported period on a gas-by-gas basis in units of mass at the most disaggregated level, in accordance with the IPCC guidelines referred to in paragraph 20 above, using the common reporting tables, including a descriptive summary and figures underlying emission trends, with emissions by sources listed separately from removals by sinks, except in cases where it may be technically impossible to separate information on emissions and removals in the LULUCF sector, and noting that a minimum level of aggregation is needed to protect confidential business and military information.”). *See also* Allen M. R., *et al.* (2022) *Indicate separate contributions of long-lived and short-lived greenhouse gases in emission targets*, NPJ CLIM. ATMOS. SCI. 5(5): 1–4, 1 (“As researchers who have published over recent years on the issue of comparing the climate effects of different greenhouse gases, we would like to highlight a simple innovation that would enhance the transparency of stocktakes of progress towards achieving any multi-decade-timescale global temperature goal. In addition to specifying targets for total CO₂-equivalent emissions of all greenhouse gases, governments and corporations could also indicate the separate contribution to these totals from greenhouse gases with lifetimes around 100 years or longer, notably CO₂ and nitrous oxide, and the contribution from Short-Lived Climate Forcers (SLCFs), notably methane and some hydrofluorocarbons. This separate indication would support an objective assessment of the implications of aggregated emission targets for global temperature, in alignment with the UNFCCC Parties’ Decision (4/CMA.1)1 to provide ‘information necessary for clarity, transparency and understanding’ in nationally determined contributions (NDCs) and long-term low-emission development strategies (LT-LEDSs).”).

¹⁴⁴ Abernethy S. & Jackson R. B. (2022) *Global temperature goals should determine the time horizons for greenhouse gas emission metrics*, ENVIRON. RES. LETT. 17(2): 1–10, 7 (“Although NDCs and long-term national pledges are currently insufficient to keep warming below 2 °C, let alone 1.5 °C [50–52], the time horizons used for emission metrics should nevertheless be consistent with that central goal of the Paris Agreement. We therefore support the use of the 20 year time horizon over the 100 year version, when binary choices between these two must be made, due to the better alignment of the former with the temperature goals of the Paris Agreement. The 50 year time horizon, not yet in widespread use but now included in IPCC AR6, is in fact the only time horizon that the IPCC presents that falls within the range of time horizons that align with the Paris Agreement temperature goals (24–58 years). However, to best align emission metrics with the Paris Agreement 1.5 °C goal, we recommend the use of the 24 year time horizon, using 2045 as the end point time, with its associated GWP_{1.5°C} = 75 and GTP_{1.5°C} = 41.”); *discussed in* McKenna P. (9 February 2022) *To Counter Global Warming, Focus Far More on Methane, a New Study Recommends*, INSIDE CLIMATE NEWS (“The Environmental Protection Agency is drastically undervaluing the potency of methane as a greenhouse gas when the agency compares methane’s climate impact to that of carbon dioxide, a new study concludes. The EPA’s climate accounting for methane is “arbitrary and unjustified” and three times too low to meet the goals set in the Paris climate agreement, the research report, published Wednesday in the journal *Environmental Research Letters*, found.”); *and* Rathi A. (15 February 2022) *The Case Against Methane Emissions Keeps Getting Stronger*, BLOOMBERG.

¹⁴⁵ Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) are required to report emissions on a gas-by-gas basis in units of mass. Framework Convention on Climate Change Dec. 18/CMA.1, FCCC/PA/CMA/2018/3/Add.2, at Annex ¶ 37 (March 19, 2019) (“37. Each Party shall use the 100-year time-horizon global warming potential (GWP) values from the IPCC Fifth Assessment Report, or 100-year time-horizon GWP values from a subsequent IPCC assessment report as agreed upon by the CMA, to report aggregate emissions and removals of GHGs, expressed in CO₂ eq. Each Party may in addition also use other metrics (e.g., global temperature potential) to report supplemental information on aggregate emissions and removals of GHGs, expressed in CO₂ eq. In such cases, the Party shall provide in the national inventory document information on the values of the metrics used and the IPCC assessment report they were sourced from.”).

¹⁴⁶ Cohen-Shields N., Sun T., Hamburg S. P., & Ocko I. B. (2023) *Distortion of sectoral roles in climate change threatens climate goals*, FRONT. CLIM. 5: 1–6, 4 (“Given how GWP100-based CO₂e calculations distort the roles of economic sectors in contributing to future warming, relying solely on GWP100 can lead to suboptimal policies and priorities by misleading climate actors from the top levels of government (e.g., U.S. NDC)² to grassroots organizations.

This is because the importance of methane emissions in several sectors is systematically underestimated by GWP100. ... there are examples of acknowledgment of the metric issue by stakeholders (such as work by the Irish Climate Change Advisory Council to establish multi-gas GHG budgets, as well as the State of New York publishing their emissions inventory using GWP20). Given that prioritizing sectoral mitigation efforts is often necessary under cost and political constraints, the current sectoral share distortion imposed by GWP100/CO₂e risks mis-prioritizing sectors for emissions reductions, undervaluing the benefits of methane-sector mitigation—especially in the near-term—and potentially overlooking important abatement measures. This can have implications for the temperature outcomes of climate policies. For example, if CO₂-dominated sectors are regularly prioritized for mitigation, the realized temperature benefits in the near-term will be lower than anticipated because the remaining warming impact from methane-dominated sectors will be underestimated. The bottom line is that GWP100 should never be singularly relied upon for emissions assessments.”).

¹⁴⁷ Forster P., Storelvmo T., Armour K., Collins W., Dufresne J.-L., Frame D., Lunt D. J., Mauritsen T., Palmer M. D., Watanabe M., Wild M., & Zhang H. (2021) *Chapter 7: The Earth’s Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), Table 7.SM.7.

¹⁴⁸ Lynch J., Cain M., Pierrehumbert R., & Allen M. (2020) *Demonstrating GWP*: a means of reporting warming-equivalent emissions that captures the contrasting impacts of short- and long-lived climate pollutants*, *ENVIRON. RES. LETT.* 15(4): 1–13, 2 (“Following these behaviours, sustained emissions of an SLCP therefore result in a similar impact to a one-off release of a fixed amount of CO₂: both lead to a relatively stable long-term increase in radiative forcing. Thus an alternative means of equivalence can be derived, relating a change in the rate of emissions of SLCPs to a fixed quantity of CO₂...”). See also Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, *ENVIRON. SCI. POLICY* 134: 127–136, 132 (“However, this practice of assigning “equivalence” belies the physical reality, namely that CH₄’s impact on climate is distinct from CO₂’s in several important ways, as described in Section 3. In effect, only the long-term climate impact of CH₄ (i.e., its radiative forcing over a 100-year time horizon) is robustly taken into account under the Kyoto Protocol and the Paris Agreement. Among other things, this means that CH₄’s outsized contribution to near-term climate warming is overlooked.... The focus on CO₂ equivalence under the UNFCCC also leads to an information and transparency gap. The common practice of expressing mitigation targets in terms of aggregate CO₂e, without specifying which reductions come from which GHGs, compromises the ability of modelers to evaluate in detail how the climate will respond to pledged emission reductions; this is because the climate responds differently to the different climate forcers (Fig. 2).”).

¹⁴⁹ Cain M., Lynch J., Allen M. R., Fuglestedt J. S., Frame D. J., & Macey A. H. (2019) *Improved calculation of warming-equivalent emissions for short-lived climate pollutants*, *NPJ CLIM. ATMOS. SCI.* 2(29): 1–7, 1 (“We have used an empirical method to find a definition of GWP* that preserves the link between an emission and the warming it generates in the medium term up to 2100. The physical interpretation of equation 1 is that the flow term (with coefficient r) represents the fast climate response to a change in radiative forcing, generated by the atmospheric and ocean mixed-layer response.³⁰ The timescale of this response is about 4 years here.³¹ The stock term (with coefficient s) represents the slower timescale climate response to a change in radiative forcing, due to the deep ocean response. This effect means that the climate responds slowly to past changes in radiative forcing, and is why the climate is currently far from equilibrium. We have approximated this response by treating a quarter of the climate response to a SLCP as “cumulative”).

¹⁵⁰ Rogelj J. & Schlessner C.-F. (2021) *Reply to Comment on ‘Unintentional unfairness when applying new greenhouse gas emissions metrics at country level’*, *ENVIRON. RES. LETT.* 16(6): 1–8, 2 (“These ethical issues arise from moving away from an emissions centered metric like GWP-100—where every unit of emissions of a certain GHG is treated equally and independent of the emitter or timing of emissions—to metrics like GWP*—which focus on additional warming and where the treatment of a unit of emissions depends on the emitter and their emission

history... Meanwhile, a group of the world’s biggest dairy producers seems happy to consider the grandfathering GWP* perspective and explicitly dismisses other fairness perspectives that would increase their companies’ responsibility for reducing methane emissions (Cady 2020).”), citing Cady R. (2020) *A Literature Review of GWP*: A proposed method for estimating global warming potential (GWP*) of short-lived climate pollutants like methane*, GLOBAL DAIRY PLATFORM, discussed in Elgin B. (19 October 2021) *Beef Industry Tries to Erase Its Emissions With Fuzzy Methane Math*, BLOOMBERG GREEN. See also Carter N. & Urbancic N. (2023) *Seeing stars: The new metric that could allow the meat and dairy industry to avoid climate action*, CHANGING MARKETS.

¹⁵¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-19 (“With every additional increment of global warming, changes in extremes continue to become larger. For example, every additional 0.5°C of global warming causes clearly discernible increases in the intensity and frequency of hot extremes, including heatwaves (*very likely*), and heavy precipitation (*high confidence*), as well as agricultural and ecological droughts in some regions (*high confidence*). Discernible changes in intensity and frequency of meteorological droughts, with more regions showing increases than decreases, are seen in some regions for every additional 0.5°C of global warming (*medium confidence*). Increases in frequency and intensity of hydrological droughts become larger with increasing global warming in some regions (*medium confidence*). There will be an increasing occurrence of some extreme events unprecedented in the observational record with additional global warming, even at 1.5°C of global warming. Projected percentage changes in frequency are higher for rarer events (*high confidence*).”).

¹⁵² Fischer E. M., Sippel S., & Knutti R. (2021) *Increasing probability of record-shattering climate extremes*, NAT. CLIM. CHANGE 11(8): 689–695, 689 (“Here, we show models project not only more intense extremes but also events that break previous records by much larger margins. These record-shattering extremes, nearly impossible in the absence of warming, are likely to occur in the coming decades. We demonstrate that their probability of occurrence depends on warming rate, rather than global warming level, and is thus pathway-dependent. In high-emission scenarios, week-long heat extremes that break records by three or more standard deviations are two to seven times more probable in 2021–2050 and three to 21 times more probable in 2051–2080, compared to the last three decades.”).

¹⁵³ Xu Y., Ramanathan V., & Victor D. G. (2018) *Global warming will happen faster than we think*, Comment, NATURE 564(7734): 30–32, 30–31 (“But the latest IPCC special report underplays another alarming fact: global warming is accelerating. Three trends—rising emissions, declining air pollution and natural climate cycles—will combine over the next 20 years to make climate change faster and more furious than anticipated. In our view, there’s a good chance that we could breach the 1.5 °C level by 2030, not by 2040 as projected in the special report (see ‘Accelerated warming’). The climate-modelling community has not grappled enough with the rapid changes that policymakers care most about, preferring to focus on longer-term trends and equilibria.”). Since Xu, Ramanathan, and Victor Comment was published, the IPCC has updated its estimate for when 1.5 °C will be exceeded: see Arias P. A., et al. (2021) *Technical Summary*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), TS-9 (“Timing of crossing 1.5°C global warming: Slightly different approaches are used in SR1.5 and in this Report. SR1.5 assessed a likely range of 2030 to 2052 for reaching a global warming level of 1.5°C (for a 30-year period), assuming a continued, constant rate of warming. In AR6, combining the larger estimate of global warming to date and the assessed climate response to all considered scenarios, the central estimate of crossing 1.5°C of global warming (for a 20-year period) occurs in the early 2030s, ten years earlier than the midpoint of the likely range assessed in the SR1.5, assuming no major volcanic eruption. (TS.1.3, Cross-Section Box TS.1)”). See also Matthews H. D., Tokarska K. B., Rogelj J., Smith C. J., MacDougall A. H., Haustein K., Mengis N., Sippel S., Forster P. M., & Knutti R. (2021) *An integrated approach to quantifying uncertainties in the remaining carbon budget*, COMMUN. EARTH ENVIRON. 2(7): 1–11, 5 (“It is worth noting however, that the spread of our [remaining carbon budget (RCBs)] estimate does include negative values, with a 17% chance that the RCB for 1.5 °C is less than zero (i.e. is already exceeded). This outcome could arise due to current and/or unrealised future warming being at the higher end of their respective distributions, or in the case that the current non-CO₂ forcing fraction is small or negative owing to very

strong current aerosol forcing. In this case, we would expect 1.5 °C to be exceeded even in the absence of additional emissions, and any future emissions between now and the time of net-zero CO₂ emissions would cause temperatures to rise further above this threshold.”).

¹⁵⁴ World Meteorological Organization (2023) [WMO GLOBAL ANNUAL TO DECADEAL CLIMATE UPDATE](#), 2 (“The chance of global near-surface temperature exceeding 1.5°C above preindustrial levels for at least one year between 2023 and 2027 is more likely than not (66%). It is unlikely (32%) that the five-year mean will exceed this threshold.”). For previous years, *see* Madge G. (8 May 2022) [Temporary breaching of 1.5C in next five years?](#), UK MET OFFICE (“The chance of at least one year exceeding 1.5°C above pre-industrial levels between 2022–2026 is about as likely as not (48%). However, there is only a very small chance (10%) of the five-year mean exceeding this threshold.”); *discussing* World Meteorological Organization (2022) [GLOBAL ANNUAL TO DECADEAL CLIMATE UPDATE](#). *See also* Hook L. (9 May 2022) [World on course to breach global 1.5C warming threshold within five years](#), FINANCIAL TIMES. World Meteorological Organization (2021) [WMO GLOBAL ANNUAL TO DECADEAL CLIMATE UPDATE](#), 5 (“Relative to pre-industrial conditions, the annual mean global near surface temperature is predicted to be between 0.9°C and 1.8°C higher (90% confidence interval). The chance of at least one year exceeding 1.5°C above pre-industrial levels is 44% and is increasing with time. There is a very small chance (10%) of the five-year mean exceeding this threshold. The Paris Agreement refers to a global temperature increase of 1.5°C, which is normally interpreted as the long-term warming, but temporary exceedances would be expected as global temperatures approach the threshold.”); *discussed in* Hodgson C. (26 May 2021) [Chance of temporarily reaching 1.5C in warming is rising, WMO says](#), FINANCIAL TIMES; World Meteorological Organization (2020) [UNITED IN SCIENCE 2020](#), 16 (“Figure 2 shows that in the five-year period 2020–2024, the annual mean global near surface temperature is predicted to be between 0.91 °C and 1.59 °C above pre-industrial conditions (taken as the average over the period 1850 to 1900). The chance of at least one year exceeding 1.5 °C above pre-industrial levels is 24%, with a very small chance (3%) of the five-year mean exceeding this level. Confidence in forecasts of global mean temperature is high. However, the coronavirus lockdown caused changes in emissions of greenhouse gases and aerosols that were not included in the forecast models. The impact of changes in greenhouse gases is likely small based on early estimates (Le Quéré et al. 2020 and Carbonbrief.org.)”); *and* McGuire B. (12 September 2022) [Why we should forget about the 1.5C global heating target](#), THE GUARDIAN.

¹⁵⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) [AR6 SYNTHESIS REPORT: CLIMATE CHANGE 2023, Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change](#), Arias P., Bustamante M., Elgizouli I., Flato G., Howden M., Méndez C., Pereira J., Pichs-Madruga R., Rose S. K., Saheb Y., Sánchez R., Ürge-Vorsatz D., Xiao C., & Yassaa N. (eds.), 6 (“Global surface temperature was around 1.1°C above 1850–1900 in 2011–2020 (1.09°C [0.95°C– 1.20°C])⁷, with larger increases over land (1.59 [1.34 to 1.83]°C) than over the ocean (0.88°C [0.68°C– 1.01°C])⁸. Observed warming is human-caused, with warming from greenhouse gases (GHG), dominated by CO₂ and methane (CH₄), partly masked by aerosol cooling (Figure 2.1).”).

¹⁵⁶ Forster P. M., *et al.* (2023) [Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence](#), EARTH SYST. SCI. DATA 15(6): 2295–2327, 2296 (“The indicators show that human-induced warming reached 1.14 [0.9 to 1.4] °C averaged over the 2013–2022 decade and 1.26 [1.0 to 1.6] °C in 2022. Over the 2013–2022 period, human-induced warming has been increasing at an unprecedented rate of over 0.2 °C per decade.”).

¹⁵⁷ Copernicus Climate Change Service (6 July 2023) [Record-breaking North Atlantic Ocean temperatures contribute to extreme marine heatwaves](#) (“So far this year, discussions of our oceans and climate have largely focused on the onset of El Niño, recently [declared by the World Meteorological Organization](#), and its potential for pushing global temperatures into “uncharted territory” by the end of 2023 and into 2024. But in fact, we have already entered uncharted territory due to the exceptionally warm conditions in the north Atlantic Ocean.”).

¹⁵⁸ This value is averaged from five agencies’ reported 2023 temperature anomalies. Datasets used by different scientific agencies tend to have fewer data (and thus different baselines) for the pre-industrial period of 1850–1900, and so report slightly different values for the temperature anomaly. For data reported by the five agencies, *see*

Hausfather Z. (12 January 2024) *State of the Climate: 2023 smashes records for surface temperature and ocean heat*, CARBONBRIEF.

¹⁵⁹ Copernicus Climate Change Service, *Global Climate Highlights 2023* (last visited 10 January 2024) (“2023 is confirmed as the warmest calendar year in global temperature data records going back to 1850 ... 2023 was 0.60°C warmer than the 1991-2020 average and 1.48°C warmer than the 1850-1900 pre-industrial level ... The year-to-year increase in global-average temperature was exceptionally large from 2022 to 2023. It follows a transition from three years of La Niña in 2020–2022 to El Niño conditions in 2023, although other factors appear to have also played a role.”).

¹⁶⁰ Rohde R. (12 January 2024) *Global Temperature Report for 2023*, BERKELEY EARTH (“Over the long-term man-made global warming is responsible for gradually increasing temperatures at a rate of ~0.20 °C / decade. Greenhouse gas emissions, which are the underlying cause of global warming, reached record highs in 2023. While global warming controls the long-term trend, it changes only gradually. Short-term fluctuations in global mean temperature are primarily driven by internal variations in the climate system, such as the state of the El Niño / La Niña oscillation. ... The temperature change from 2023 to 2024, +0.29 °C (+0.52 °F) can largely be understood as the combined effect of the transition from La Niña to El Niño, alongside other sources of natural variability (e.g. the North Atlantic) and combined with modest warming from several additional factors. The North Atlantic variations appear to be mostly a form of random natural variability. This is different from El Niño, which is a dynamical process with predictable seasonal variations that can be used for forecasting. However, it does appear likely that the inclusion unforced natural variability in the North Atlantic or elsewhere is necessary to explain the full magnitude of the warming observed in 2024. Other factors likely influencing 2023 climate include the ~11-year solar cycle, which is nearing its expected peak in 2024 or 2025. The current solar cycle appears to be modestly stronger than the previous cycle, but is close to 20th century averages. In addition, we consider it plausible that the [2022 Hunga Tonga eruption](#) is contributing to unusual weather in 2024. Unlike most volcanoes, the eruption of Hunga Tonga was rich in water vapor and low in sulfur. Usually, a large eruption results in a temporary period of cooling due to excess sulfur in the atmosphere, but the Hunga Tonga eruption may have contributed warming instead due to its large water vapor contribution. ... Another likely factor in the warmth witnessed during 2023 is the reduction in man-made sulfur aerosols. In 2020, new international rules governing heavy fuels for marine shipping abruptly reduced sulfur emissions from large ships by ~85%. This change was made to preserve human health, due to the toxic nature of sulfur aerosols. However, such aerosols also reflect sunlight, and as a result have a cooling effect. These sulfur aerosols are believed to have masked some of the effects of global warming, especially in the heavily trafficked North Pacific and North Atlantic regions. An analysis suggests that removing the sulfur aerosols may have added ~0.2 °C (~0.4 °F) to the North Atlantic region. This would not explain all of the recent North Atlantic temperature spike, but may have added to its severity.”).

¹⁶¹ Hausfather Z. (12 January 2024) *State of the Climate: 2023 smashes records for surface temperature and ocean heat*, CARBONBRIEF (“However, 2023 was so exceptionally warm that it suggests that this El Niño might be behaving differently, with global surface temperatures responding more rapidly than in the past. If this is the case, 2024 would not necessarily follow the pattern of past El Niño events and is less likely to be substantially warmer than 2023. ... The Met Office, Dr Schmidt, Berkeley Earth and Carbon Brief estimates all have 2024 as more likely than not to be warmer than 2023 – but only by a small margin. In all estimates it is close to a coin flip which will end up as the warmer year. Against a 1880-99 pre-industrial baseline, the central estimate of all four forecasts is just below 1.5C of warming, with ranges suggesting that temperatures could top 1.5C next year.”). See also Madge G. (8 December 2023) *2024: First chance of a 1.5 °C year*, UK MET OFFICE (“The anticipated two-stage spike in global temperature has received a temporary and partial boost by the current El Niño event warming the tropical Pacific. But, says the Met Office’s Prof Adam Scaife: “The main driver for record-breaking temperatures is the ongoing human-induced warming since the start of the Industrial Revolution.” ... Global average temperatures are measured as the difference between 1850-1900: a proxy for the Industrial Revolution. The global average temperature for 2023 is expected to be below 1.5 °C, but next year’s forecast suggests for the first time that values of 1.5 °C or above cannot be ruled out.”).

¹⁶² Molina M., Zaelke D., Sarma K. M., Andersen S. O., Ramanathan V., & Kaniaru D. (2009) *Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 106(49): 20616–20621, 20616 (“Current emissions of anthropogenic greenhouse gases (GHGs) have already committed the planet to an increase in average surface temperature by the end of the century that may be above the critical threshold for tipping elements of the climate system into abrupt change with potentially irreversible and unmanageable consequences. This would mean that the climate system is close to entering if not already within the zone of ‘dangerous anthropogenic interference’ (DAI). Scientific and policy literature refers to the need for ‘early,’ ‘urgent,’ ‘rapid,’ and ‘fast-action’ mitigation to help avoid DAI and abrupt climate changes. We define “fast-action” to include regulatory measures that can begin within 2–3 years, be substantially implemented in 5–10 years, and produce a climate response within decades.”). See also Molina M., Ramanathan V. & Zaelke D. (2020) *Best path to net zero: Cut short-lived climate pollutants*, BULLETIN OF THE ATOMIC SCIENTISTS (“And let us be clear: By “speed,” we mean measures—including regulatory ones—that can begin within two-to-three years, be substantially implemented in five-to-10 years, and produce a climate response within the next decade or two.”).

¹⁶³ von Braun J., Ramanathan V., & Turkson P. K. A. (2022) *Resilience of people and ecosystems under climate stress*, Pontifical Academy of Sciences (“Recommendations: *Resilience building must rest on three pillars: Mitigation, Adaptation & Transformation. Mitigation: Reduce climate risks... . Adaptation: Reduce exposure and vulnerability to unavoidable climate risks. Exposure & vulnerability reduction has three faces: Reductions in sensitivity to climate change; Reductions in risk exposure; & enhancement of adaptive capacity. There are limits to adaptation and hence adaptation has to be integrated with mitigation actions to avoid crossing the limits.*”); where the definition of resilience is taken from Möller V., van Diemen R., Matthews J. B. R., Méndez C., Semenov S., Fuglestedt J. S., & Resinger A. (2022) *Annex II: Glossary*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), AII-37–AII-38 (“The capacity of interconnected social, economic and ecological systems to cope with a hazardous event, trend or disturbance, responding or reorganising in ways that maintain their essential function, identity and structure. Resilience is a positive attribute when it maintains capacity for adaptation, learning and/or transformation (Arctic Council, 2016).”). See also Zaelke D., Picolotti R., & Dreyfus G. (14 November 2021) *Glasgow climate summit: A glass half full*, THE HILL (“The new architecture also includes cutting not just carbon dioxide but also non-carbon dioxide climate emissions, with a specific focus on methane, a super climate pollutant responsible for 0.5 degrees Celsius of today’s observed warming of 1.1 degrees Celsius. Cutting methane presents the *single biggest and fastest mitigation action* the world can take to keep warming from breaching the 1.5 degrees Celsius guardrail. This makes fast reductions of methane essential for adaptation as well.”); Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), SPM-13 (“Near-term actions that limit global warming to close to 1.5°C would substantially reduce projected losses and damages related to climate change in human systems and ecosystems, compared to higher warming levels, but cannot eliminate them all (*very high confidence*).”); and Intergovernmental Panel on Climate Change (2018) *GLOBAL WARMING OF 1.5 °C, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 22 (“Social justice and equity are core aspects of climate-resilient development pathways that aim to limit global warming to 1.5°C as they address challenges and inevitable trade-offs, widen opportunities, and ensure that options, visions, and values are deliberated, between and within countries and communities, without making the poor and disadvantaged worse off (*high confidence*).”).

¹⁶⁴ Xu Y., Ramanathan V., & Victor D. G. (2018) *Global warming will happen faster than we think*, Comment, NATURE 564(7734): 30–32, 30–31 (“But the latest IPCC special report underplays another alarming fact: global warming is accelerating. Three trends—rising emissions, declining air pollution and natural climate cycles—will combine over the next 20 years to make climate change faster and more furious than anticipated. In our view, there’s a good chance that we could breach the 1.5 °C level by 2030, not by 2040 as projected in the special report (see

‘Accelerated warming’). The climate-modelling community has not grappled enough with the rapid changes that policymakers care most about, preferring to focus on longer-term trends and equilibria.”). Since Xu, Ramanathan, and Victor Comment was published, the IPCC has updated its estimate for when 1.5 °C will be exceeded: *see* Arias P. A., *et al.* (2021) *Technical Summary*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), TS-9 (“Timing of crossing 1.5°C global warming: Slightly different approaches are used in SR1.5 and in this Report. SR1.5 assessed a likely range of 2030 to 2052 for reaching a global warming level of 1.5°C (for a 30-year period), assuming a continued, constant rate of warming. In AR6, combining the larger estimate of global warming to date and the assessed climate response to all considered scenarios, the central estimate of crossing 1.5°C of global warming (for a 20-year period) occurs in the early 2030s, ten years earlier than the midpoint of the likely range assessed in the SR1.5, assuming no major volcanic eruption. (TS.1.3, Cross-Section Box TS.1)”).

¹⁶⁵ Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, *NATURE* 575(7784): 592–595, 594 (“In our view, the clearest emergency would be if we were approaching a global cascade of tipping points that led to a new, less habitable, ‘hothouse’ climate state¹¹. Interactions could happen through ocean and atmospheric circulation or through feedbacks that increase greenhouse-gas levels and global temperature.”). *See also* Wunderling N., Donges J. F., Kurths J., & Winkelmann R. (2021) *Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming*, *EARTH SYST. DYN.* 12(2): 601–619, 614 (“In this study, we show that this risk increases significantly when considering interactions between these climate tipping elements and that these interactions tend to have an overall destabilising effect. Altogether, with the exception of the Greenland Ice Sheet, interactions effectively push the critical threshold temperatures to lower warming levels, thereby reducing the overall stability of the climate system. The domino-like interactions also foster cascading, non-linear responses. Under these circumstances, our model indicates that cascades are predominantly initiated by the polar ice sheets and mediated by the AMOC. Therefore, our results also imply that the negative feedback loop connecting the Greenland Ice Sheet and the AMOC might not be able to stabilise the climate system as a whole.”); *and* Rocha J. C., Peterson G., Bodin Ö., & Levin S. (2018) *Cascading regime shifts within and across scales*, *SCIENCE* 362(6421): 1379–1383, 1383 (“A key lesson from our study is that regime shifts can be interconnected. Regime shifts should not be studied in isolation under the assumption that they are independent systems. Methods and data collection need to be further developed to account for the possibility of cascading effects. Our finding that ~45% of regime shift couplings can have structural dependence suggests that current approaches to environmental management and governance underestimate the likelihood of cascading effects.”).

¹⁶⁶ Steffen W., *et al.* (2018) *Trajectories of the Earth System in the Anthropocene*, *PROC. NAT’L. ACAD. SCI.* 115(33): 8252–8259, 8254, 8256 (“This risk is represented in Figs. 1 and 2 by a planetary threshold (horizontal broken line in Fig. 1 on the Hothouse Earth pathway around 2 °C above preindustrial temperature). Beyond this threshold, intrinsic biogeophysical feedbacks in the Earth System (*Biogeophysical Feedbacks*) could become the dominant processes controlling the system’s trajectory. Precisely where a potential planetary threshold might be is uncertain (15, 16). We suggest 2 °C because of the risk that a 2 °C warming could activate important tipping elements (12, 17), raising the temperature further to activate other tipping elements in a domino-like cascade that could take the Earth System to even higher temperatures (*Tipping Cascades*). Such cascades comprise, in essence, the dynamical process that leads to thresholds in complex systems (section 4.2 in ref. 18). This analysis implies that, even if the Paris Accord target of a 1.5 °C to 2.0 °C rise in temperature is met, we cannot exclude the risk that a cascade of feedbacks could push the Earth System irreversibly onto a “Hothouse Earth” pathway. ... Hothouse Earth is likely to be uncontrollable and dangerous to many, particularly if we transition into it in only a century or two, and it poses severe risks for health, economies, political stability (12, 39, 49, 50) (especially for the most climate vulnerable), and ultimately, the habitability of the planet for humans.”). Note limitations in current models means IPCC has low confidence in its ability to assess these feedbacks. *See* Canadell J. G., *et al.* (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 5-78 (“There is *low confidence* in the estimate of the non-CO₂ biogeochemical feedbacks, due to the large range in the estimates of α for some individual feedbacks (Figure 5.29c), which can be attributed to the diversity in how models

account for these feedbacks, limited process-level understanding, and the existence of known feedbacks for which there is not sufficient evidence to assess the feedback strength.”).

¹⁶⁷ Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, NATURE 575: 592–595.

¹⁶⁸ Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, NATURE, 575(7784): 592–595, 594 (“In our view, the evidence from tipping points alone suggests that we are in a state of planetary emergency: both the risk and urgency of the situation are acute....”).

¹⁶⁹ Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) *Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points*, SCIENCE 377(6611): 1–10, 7 (“Current warming is ~1.1°C above preindustrial and even with rapid emission cuts warming will reach ~1.5°C by the 2030s (23). We cannot rule out that WAIS and GrIS tipping points have already been passed (see above) and several other tipping elements have minimum threshold values within the 1.1 to 1.5°C range. Our best estimate thresholds for GrIS, WAIS, REEF, and abrupt permafrost thaw (PFAT) are ~1.5°C although WAIS and GrIS collapse may still be avoidable if GMST returns below 1.5°C within an uncertain overshoot time (likely decades) (94).”). See also Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) *AR6 SYNTHESIS REPORT: CLIMATE CHANGE 2023, Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Arias P., Bustamante M., Elgizouli I., Flato G., Howden M., Méndez C., Pereira J., Pichs-Madruga R., Rose S. K., Saheb Y., Sánchez R., Ürge-Vorsatz D., Xiao C., & Yassaa N. (eds.), 6 (“Global surface temperature was around 1.1°C above 1850–1900 in 2011–2020 (1.09°C [0.95°C– 1.20°C])⁷, with larger increases over land (1.59 [1.34 to 1.83]°C) than over the ocean (0.88°C [0.68°C– 1.01°C])⁸. Observed warming is human-caused, with warming from greenhouse gases (GHG), dominated by CO₂ and methane (CH₄), partly masked by aerosol cooling (Figure 2.1).”).

¹⁷⁰ Lenton T. M., Armstrong McKay D. I., Loriani S., Abrams J. F., Lade S. J., Donges J. F., Buxton J. E., Milkoreit M., Powell T., Smith S. R., Zimm C., Bailey E., James G. Dyke, Ghadiali A., & Laybourn L. (2023) *GLOBAL TIPPING POINTS SUMMARY REPORT 2023*, 13 (“Already, at today’s 1.2°C global warming, tipping of warm-water coral reefs is likely and we cannot rule out that four other systems may pass tipping points: the ice sheets of Greenland and West Antarctica, the North Atlantic Subpolar Gyre circulation, and parts of the permafrost subject to abrupt thaw.”).

¹⁷¹ Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) *Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points*, SCIENCE 377(6611): 1–10, 7 (“The chance of triggering CTPs is already non-negligible and will grow even with stringent climate mitigation (SSP1-1.9 in Fig. 2, B and C). Nevertheless, achieving the Paris Agreement’s aim to pursue efforts to limit warming to 1.5°C would clearly be safer than keeping global warming below 2°C (90) (Fig. 2). Going from 1.5 to 2°C increases the likelihood of committing to WAIS and GrIS collapse near complete warm-water coral die-off, and abrupt permafrost thaw; further, the best estimate threshold for LABC collapse is crossed. The likelihood of triggering AMOC collapse, Boreal forest shifts, and extra-polar glacier loss becomes non-negligible at >1.5°C and glacier loss becomes likely by ~2°C. A cluster of abrupt shifts occur in ESMs at 1.5 to 2°C (19). Although not tipping elements, ASSI loss could become regular by 2°C, gradual permafrost thaw would likely become widespread beyond 1.5°C, and land carbon sink weakening would become significant by 2°C.”). See also Lenton T. M., Armstrong McKay D. I., Loriani S., Abrams J. F., Lade S. J., Donges J. F., Buxton J. E., Milkoreit M., Powell T., Smith S. R., Zimm C., Bailey E., James G. Dyke, Ghadiali A., & Laybourn L. (2023) *GLOBAL TIPPING POINTS SUMMARY REPORT 2023*, 13 (At 2°C global warming and beyond, several more systems could tip, including the Amazon rainforest and subglacial basins in East Antarctica, and irreversible collapse of the Greenland and West Antarctic ice sheets is likely to become locked in.”).

¹⁷² King M. D., Howat I. M., Candela S. G., Noh M. J., Jeong S., Noël B. P. Y., van den Broeke M. R., Wouters B., & Negrete A. (2020) *Dynamic ice loss from the Greenland Ice Sheet driven by sustained glacier retreat*, COMM. EARTH & ENV'T.: 1–7, 1 (“The Greenland Ice Sheet is losing mass at accelerated rates in the 21st century, making it the largest single contributor to rising sea levels. Faster flow of outlet glaciers has substantially contributed to this loss, with the cause of speedup, and potential for future change, uncertain.”).

¹⁷³ Box J. E., Hubbard A., Bahr D. B., Colgan W. T., Fettweis X., Mankoff K. D., Wehrlé A., Noël B., van den Broeke M. R., Wouters B., Björk A. A., & Fausto R. S. (2022) *Greenland ice sheet climate disequilibrium and committed sea-level rise*, NAT. CLIM. CHANGE: 1–11, 2 (“Application of the average 2000–2019, hereafter ‘recent’, climatology to Greenland’s entire glacierized area of 1,783,090 km² gives an AAR/AAR₀ (α) disequilibrium with the current ice configuration corresponding with a $3.3 \pm 0.8\%$ committed area and volume loss. Taken in perpetuity, this imbalance with recent climate results in $59 \pm 15 \times 10^3$ km² of committed retreat of Greenland’s ice area, equivalent to $110 \pm 27 \times 10^3$ km³ of the ice sheet volume or 274 ± 68 mm of global eustatic SLR.”), 5 (“Given the breadth and potency of those processes, we contend that known physical mechanisms can deliver most of the committed ice volume loss from Greenland’s disequilibrium with its recent climate within this century. Nevertheless, we underscore that a SLR of at least 274 ± 68 mm is already committed, regardless of future climate warming scenarios.”); *discussed in* Mooney C. (29 August 2022) *Greenland ice sheet set to raise sea levels by nearly a foot, study finds*, THE WASHINGTON POST; and Funes Y. (29 August 2022) *The Greenland Ice Sheet’s Terrifying Future*, ATMOS.

¹⁷⁴ Nature Research Briefing (2023) *How rapidly can ice sheets retreat?*, NATURE, 1 (“Our results demonstrate that ice sheets can retreat at up to 600 metres per day — 20 times faster than the highest rate observed in Antarctica by satellites¹. Furthermore, our findings reveal the vulnerability of regions of ice sheets with flat beds (those shallower than 1°) to pulses of extremely rapid retreat. Notably, we calculate that present-day rates of ocean-driven melting in Antarctica⁴ could be sufficient to initiate retreat of tens to hundreds of metres per day across similar bed settings. This includes regions of the vast and potentially unstable Thwaites Glacier in West Antarctica, which, in the past few years, has retreated to within about 4 km of a flat area of its bed. Although the rates of ice-sheet retreat revealed in this study are much higher than those detected so far by satellites, we note that they do not necessarily represent the upper limit at which retreat can occur. As such, we would not be surprised if similar landforms record even higher rates of retreat in regions that experienced more substantial ice-sheet melting in the past.”); *summarizing* Batchelor C. L., Christie F. D. W., Ottesen D., Montelli A., Evans J., Dowdeswell E. K., Bjarnadóttir L. R., & Dowdeswell J. A. (2023) *Rapid, buoyancy-driven ice-sheet retreat of hundreds of metres per day*, NATURE: 1–6.

¹⁷⁵ Fox-Kemper B., et al. (2021) *Chapter 9: Ocean, Cryosphere and Sea Level Change*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 9-122 (“[T]he main uncertainty related to high-end sea-level rise is “when” rather than “if” it arises: the upper limit of 1.02 m of *likely* sea-level range by 2100 for the SSP 5-8.5 scenario will be exceeded in any future warming scenario on time scales of centuries to millennia (*high confidence*), but it is uncertain how quickly the long-term committed sea level will be reached (Section 9.6.3.5). Hence, global-mean sea level might rise well above the *likely* range before 2100, which is reflected by assessments of ice-sheet contributions based on structured expert judgment (Bamber et al., 2019) leading to a 95th percentile of projected future sea-level rise as high as 2.3 m in 2100 (Section 9.6.3.3)... High-end sea-level rise can therefore occur if one or two processes related to ice-sheet collapse in Antarctica result in an additional sea-level rise at the maximum of their plausible ranges (Sections 9.4.2.5, 9.6.3.3; Table 9.7) or if several of the processes described in this box result in individual contributions to additional sea-level rise at moderate levels. In both cases, global-mean sea-level rise by 2100 would be substantially higher than the assessed *likely* range, as indicated by the projections including *low confidence* processes reaching in 2100 as high as 1.6 m at the 83rd percentile and 2.3 m at the 95th percentile (Section 9.6.3.3).”), 9-116 (“While ice-sheet processes in whose projection there is *low confidence* have little influence up to 2100 on projections under SSP1-1.9 and SSP1-2.6 (Table 9.9), this is not the case under higher emissions scenarios, where they could lead to GMSL rise well above the *likely* range. In particular, under SSP5-8.5, *low confidence* processes could lead to a total GMSL rise of 0.6-1.6 m over this time period (17th-83rd percentile range of p-box including SEJ- and MICI-based projections), with 5th-95th percentile projections extending to 0.5-2.3

m (*low confidence*).”). See also Wang S., Foster A., Lenz E. A., Kessler J. D., Stroeve J. C., Anderson L. O., Turetsky M., Betts R., Zou S., Liu W., Boos W. R., & Hausfather Z. (2023) *Mechanisms and Impacts of Earth System Tipping Elements*, REV. GEOPHYS. 61: 1–81, 19–20 (“Nevertheless, ice-sheet losses may contribute to regional sea level rise under RCP8.5 and worst-case scenarios that reaches 1–2 m for many cities globally by 2100, seriously threatening existing communities and infrastructure (Trisos et al., 2022). Over longer timescales, sustained high rates of global sea-level rise (>1 cm/yr by 2200, with further acceleration to up to a couple centimeters per year beyond) may broadly strain coastal adaptation efforts (Oppenheimer et al., 2019). ... As mentioned above, reduction of the GIS will likely require a millennium. Yet the weakening of ice shelf buttressing directly accelerates ice flow and discharge independent of MISI and MICI processes, with immediate implications for observed rates of sea-level rise. Consequently, under our current best understanding, Greenland and Antarctic ice-sheet collapse cannot be considered an abrupt or fast phenomenon in which most sea level impacts manifest within decades. Nevertheless, ice-sheet losses may contribute to regional sea level rise under RCP8.5 and worst-case scenarios that reaches 1–2 m for many cities globally by 2100, seriously threatening existing communities and infrastructure (Trisos et al., 2022). Over longer timescales, sustained high rates of global sea-level rise (>1 cm/yr by 2200, with further acceleration to up to a couple centimeters per year beyond) may broadly strain coastal adaptation efforts (Oppenheimer et al., 2019). ... At the same time, models indicate that strong climate mitigation may avert significant fractions of potential sea-level rise and prevent ice-sheet collapse across large regions. In several modeling studies the RCP2.6 scenario prevents collapse of the WAIS (Bulthuis et al., 2019; DeConto & Pollard, 2016) and may reduce the Antarctic contribution to global sea level rise by 2100 to 13 cm (Edwards et al., 2021). ... Although significant uncertainties remain regarding the precise temperature thresholds that could trigger ice-sheet collapse, research to date suggests that aggressive climate mitigation could limit risks from ice-sheet instabilities (Table 4).”).

¹⁷⁶ Wunderling N., Winkelmann R., Rockström J., Loriani S., Armstrong-McKay D., Ritchie P., Sakschewski B., & Donges J. (2022) *Global warming overshoots increase risk of triggering climate tipping points and cascades*, NATURE 76–82, 78–79 (“We define a high climate-risk zone as the region where the likelihood for no tipping event is smaller than 66% or the risk that one or more elements tip is higher than 33%. We compute this risk and find a marked increase for increasing convergence temperatures (compare Fig. 3d–f). For convergence temperatures of 1.5 °C and above, our results indicate that the high climate-risk zone spans the entire state space for final convergence temperatures of 1.5–2.0 °C. Only if final convergence temperatures are limited to or, better, below today’s levels of global warming, while peak temperatures are below 3.0 °C, the tipping risks remain below 33% (Fig. 3d) ... In the worst case of a convergence temperature of 2.0 °C (Fig. 3f), the tipping risk for at least one tipping event to occur is on the order of above 90% if peak temperatures of 4.0 °C are not prevented. The devastating negative consequences of such a scenario with high likelihood of triggering tipping events would entail notable sea-level rise, biosphere degradation or considerable North Atlantic temperature drops.”).

¹⁷⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) *AR6 SYNTHESIS REPORT: CLIMATE CHANGE 2023, Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Arias P., Bustamante M., Elgizouli I., Flato G., Howden M., Méndez C., Pereira J., Pichs-Madruga R., Rose S. K., Saheb Y., Sánchez R., Ürgen-Vorsatz D., Xiao C., & Yassaa N. (eds.), 36 (“At 2°C of global warming, overall risk levels associated with the unequal distribution of impacts (RFC3), global aggregate impacts (RFC4) and large-scale singular events (RFC5) would be transitioning to high (*medium confidence*), those associated with extreme weather events (RFC2) would be transitioning to very high (*medium confidence*), and those associated with unique and threatened systems (RFC1) would be very high (*high confidence*) (Figure 3.3, panel a). With about 2°C warming, climate-related changes in food availability and diet quality are estimated to increase nutrition-related diseases and the number of undernourished people, affecting tens (under low vulnerability and low warming) to hundreds of millions of people (under high vulnerability and high warming), particularly among low-income households in low- and middle-income countries in sub-Saharan Africa, South Asia and Central America (*high confidence*). For example, snowmelt water availability for irrigation is projected to decline in some snowmelt dependent river basins by up to 20% (*medium confidence*). Climate change risks to cities, settlements and key infrastructure will rise sharply in the mid- and long-term with further global warming, especially in places already exposed to high temperatures, along coastlines, or with high vulnerabilities (*high confidence*).”); Footnote 64 (“RFC5: Large-scale singular events:

relatively large, abrupt and sometimes irreversible changes in systems caused by global warming, such as ice sheet instability or thermohaline circulation slowing.”). See also Wunderling N., Winkelmann R., Rockström J., Loriani S., Armstrong-McKay D., Ritchie P., Sakschewski B., & Donges J. (2022) *Global warming overshoots increase risk of triggering climate tipping points and cascades*, NATURE 13: 76–82, 78–79 (“We define a high climate-risk zone as the region where the likelihood for no tipping event is smaller than 66% or the risk that one or more elements tip is higher than 33%. We compute this risk and find a marked increase for increasing convergence temperatures (compare Fig. 3d–f). For convergence temperatures of 1.5 °C and above, our results indicate that the high climate-risk zone spans the entire state space for final convergence temperatures of 1.5–2.0 °C. Only if final convergence temperatures are limited to or, better, below today’s levels of global warming, while peak temperatures are below 3.0 °C, the tipping risks remain below 33% (Fig. 3d) ... In the worst case of a convergence temperature of 2.0 °C (Fig. 3f), the tipping risk for at least one tipping event to occur is on the order of above 90% if peak temperatures of 4.0 °C are not prevented. The devastating negative consequences of such a scenario with high likelihood of triggering tipping events would entail notable sea-level rise, biosphere degradation or considerable North Atlantic temperature drops.”).

¹⁷⁸ Xu Y. & Ramanathan V. (2017) *Well below 2 °C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 114(39): 10319–10323, 10320 (“Box 2. Risk Categorization of Climate Change to Society. ... [A] 2 °C warming would double the land area subject to deadly heat and expose 48% of the population. A 4 °C warming by 2100 would subject 47% of the land area and almost 74% of the world population to deadly heat, which could pose existential risks to humans and mammals alike unless massive adaptation measures are implemented, such as providing air conditioning to the entire population or a massive relocation of most of the population to safer climates. ... This bottom 3 billion population comprises mostly subsistent farmers, whose livelihood will be severely impacted, if not destroyed, with a one- to five-year megadrought, heat waves, or heavy floods; for those among the bottom 3 billion of the world’s population who are living in coastal areas, a 1- to 2-m rise in sea level (likely with a warming in excess of 3 °C) poses existential threat if they do not relocate or migrate. It has been estimated that several hundred million people would be subject to famine with warming in excess of 4 °C (54). However, there has essentially been no discussion on warming beyond 5 °C. Climate change-induced species extinction is one major concern with warming of such large magnitudes (>5 °C). The current rate of loss of species is ~1,000-fold the historical rate, due largely to habitat destruction. At this rate, about 25% of species are in danger of extinction in the coming decades (56). Global warming of 6 °C or more (accompanied by increase in ocean acidity due to increased CO₂) can act as a major force multiplier and expose as much as 90% of species to the dangers of extinction (57). The bodily harms combined with climate change-forced species destruction, biodiversity loss, and threats to water and food security, as summarized recently (58), motivated us to categorize warming beyond 5 °C as unknown??, implying the possibility of existential threats.”). See also Kemp L., Xu C., Depledge J., Ebi K. L., Gibbins G., Kohler T. A., Rockström J., Scheffer M., Schellnhuber H. J., Steffen W., & Lenton T. M. (2022) *Climate Endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 119(34): 1–9, 2 (“Despite 30 y of efforts and some progress under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) anthropogenic greenhouse gas (GHG) emissions continue to increase. Even without considering worst-case climate responses, the current trajectory puts the world on track for a temperature rise between 2.1 °C and 3.9 °C by 2100 (11). If all 2030 nationally determined contributions are fully implemented, warming of 2.4 °C (1.9 °C to 3.0 °C) is expected by 2100. Meeting all long-term pledges and targets could reduce this to 2.1 °C (1.7 °C to 2.6 °C) (12). Even these optimistic assumptions lead to dangerous Earth system trajectories. Temperatures of more than 2 °C above preindustrial values have not been sustained on Earth’s surface since before the Pleistocene Epoch (or more than 2.6 million years ago) (13).”), 3 (“This is particularly alarming, as human societies are locally adapted to a specific climatic niche. The rise of large-scale, urbanized agrarian societies began with the shift to the stable climate of the Holocene ~12,000 y ago (42). Since then, human population density peaked within a narrow climatic envelope with a mean annual average temperature of ~13 °C. Even today, the most economically productive centers of human activity are concentrated in those areas (43). The cumulative impacts of warming may overwhelm societal adaptive capacity.”).

¹⁷⁹ Dreyfus G. B., Xu Y., Shindell D. T., Zaelke D., & Ramanathan V. (2022) *Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 119(22): 1–8, 1 (“We find that mitigation measures that target only decarbonization are essential for strong long-term

cooling but can result in weak near-term warming (due to unmasking the cooling effect of co-emitted aerosols) and lead to temperatures exceeding 2°C before 2050. In contrast, pairing decarbonization with additional mitigation measures targeting short-lived climate pollutants (SLCPs) and N₂O, slows the rate of warming a decade or two earlier than decarbonization alone and avoids the 2°C threshold altogether. These non-CO₂ targeted measures when combined with decarbonization can provide net cooling by 2030, reduce the rate of warming from 2030 to 2050 by about 50%, roughly half of which comes from methane, significantly larger than decarbonization alone over this timeframe.”). See also Ou Y., Roney C., Alsalam J., Calvin K., Creason J., Edmonds J., Fawcett A. A., Kyle P., Narayan K., O’Rourke P., Patel P., Ragnauth S., Smith S. J., & McJeon H. (2021) *Deep mitigation of CO₂ and non-CO₂ greenhouse gases toward 1.5 °C and 2 °C futures*, NAT. COMMUN. 12(6245): 1–9, 4 (“CO₂ abatement only cannot achieve the 1.5 °C target under all modeled 1.5 °C pathways but achieves the 2 °C target if reaching net-zero CO₂ by 2030 under 2 °C pathways; CO₂-driven GHG abatement achieves the 1.5 °C target if reaching net-zero CO₂ by 2032 under 1.5 °C pathways or achieves the 2 °C target if reaching net-zero CO₂ by 2045 under 2 °C pathways; Comprehensive GHG abatement achieves the 1.5 °C target if reaching net-zero CO₂ by 2053 under 1.5 °C pathways or achieves the 2 °C target if reaching net-zero CO₂ by 2075 under 2 °C pathways.”).

¹⁸⁰ Lelieveld J., Klingmüller K., Pozzer A., Burnett R. T., Haines A., & Ramanathan V. (2019) *Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 116(15): 7192–7197, 7194 (“Finally, our model simulations show that fossil-fuel-related aerosols have masked about 0.51(±0.03) °C of the global warming from increasing greenhouse gases (Fig. 3).”). See also Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-2 (Figure SPM.2c shows that Sulfur dioxide (SO₂) contributes –0.49 °C (–0.10 to –0.93 °C) to observed warming in 2010–2019 relative to 1850–1900).

¹⁸¹ Ramanathan V. & Feng Y. (2008) *On avoiding dangerous anthropogenic interference with the climate system: Formidable challenges ahead*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 105(38): 14245–14250, 14248 (“Switching from coal to “cleaner” natural gas will reduce CO₂ emission and thus would be effective in minimizing future increases in the committed warming. However, because it also reduces air pollution and thus the ABC [Atmospheric Brown Cloud] masking effect, it may speed up the approach to the committed warming of 2.4°C (1.4–4.3°C).”). See also United Nations Environment Programme & World Meteorological Organization (2011) *INTEGRATED ASSESSMENT OF BLACK CARBON AND TROPOSPHERIC OZONE*, 254 (“Evaluating global mean temperature change, it was found that the targeted measures to reduce emissions of methane and BC could greatly reduce warming rates over the next few decades (Figure 6.1; Box 6.1). When all measures are fully implemented, warming during the 2030s relative to the present would be only half as much as in the reference scenario. In contrast, even a fairly aggressive strategy to reduce CO₂ emissions, as for the CO₂-measures scenario, does little to mitigate warming until after the next 20–30 years (Box 6.2). In fact, sulphur dioxide (SO₂) is coemitted with CO₂ in some of the most highly emitting activities, coal burning in large-scale combustion such as in power plants, for example, that are obvious targets for reduced usage under a CO₂-emissions mitigation strategy. Hence such strategies can lead to additional near-term warming (Figure 6.1), in a well-known temporary effect (e.g. Raes and Seinfeld, 2009), although most of the near-term warming is driven by CO₂ emissions in the past. The CO₂-measures scenario clearly leads to long-term benefits however, with a dramatically lower warming rate at 2070 under that scenario than under the scenario with only CH₄ and BC measures (see Figure 6.1 and timescales in Box 6.2). Hence the near-term measures clearly cannot be substituted for measures to reduce emissions of long-lived GHGs. The near-term measures largely target different source sectors for emissions than the CO₂ measures, so that the emissions reductions of the short-lived pollutants are almost identical regardless of whether the CO₂ measures are implemented or not, as shown in Chapter 5. The near-term measures and the CO₂ measures also impact climate change over different timescales owing to the different lifetimes of these substances. In essence, the near-term CH₄ and BC measures are effectively uncoupled from CO₂ measures examined here.”); Shindell D. & Smith C. J. (2019) *Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels*, NATURE 573: 408–411, 409–410 (“These results differ greatly from the idealized picture of a near-instantaneous response to the removal of aerosol cooling followed by a slow transition to dominance by the effects of CO₂. In these more plausible cases, the temperature effects of the reduction in CO₂, SO₂ and CH₄ roughly balance one another until about 2035. After this,

the cooling effects of reduced CO₂ continue to increase, whereas the warming induced by a reduction in SO₂ and the cooling induced by the reduction in CH₄ taper off, such that the cooling induced by the reduction in CO₂ dominates (Fig. 3). Examining the effects of CO₂ and SO₂ alone (Fig. 3d), the faster response of SO₂ to the changes in emissions means that the net effect of these two pollutants would indeed be a short-term warming—but a very small one, of between 0.02 °C and 0.10 °C in the ensemble mean temperature response (up to 0.30 °C for the 95th percentile across pathways). Accounting for all fossil-related emissions (Fig. 3e), any brief climate penalty decreases to no more than 0.05 °C (0.19 °C at the 95th percentile), with the smaller value largely due to the additional near-term cooling from reductions in methane. Nearly all the warming in the 2020s and 2030s (Fig. 2) is therefore attributable to the effect of the residual emissions (mainly of CO₂) during the gradual fossil phase-out, as well as the response to historical emissions.”), Addendum “Methods” (“We note that, although this study focuses on the effects of fossil-fuel related emissions, accounting for the effects of reductions in greenhouse gases from non-fossil sources—including fluorinated gases and both methane and nitrous oxide from agriculture—along with biofuels that are a large source of warming black carbon, could eliminate any near-term penalty entirely. In fact, given that the net effect of the fossil-fuel phase-out on temperature is minimal during the first 20 years (Fig. 3), reducing those other emissions is the only plausible way in which to decrease warming during that period.”); Hansen J. E. & Sato M. (13 July 2021) *July Temperature Update: Faustian Payment Comes Due*, Columbia University (“It follows that the global warming acceleration is due to the one huge climate forcing that we have chosen not to measure: the forcing caused by imposed changes of atmospheric aerosols... We should expect the global warming rate for the quarter of a century 2015-2040 to be about double the 0.18°C/decade rate during 1970-2015 (see Fig. 2), unless appropriate countermeasures are taken.”); discussed in Berwyn B. (15 September 2021) *The Rate of Global Warming During Next 25 Years Could Be Double What it Was in the Previous 50, a Renowned Climate Scientist Warns*, INSIDE CLIMATE NEWS; and Feijoo F., Mignone B. K., Kheshgi H. S., Hartin C., McJeon H., & Edmonds J. (2019) *Climate and carbon budget implications of linked future changes in CO₂ and non-CO₂ forcing*, ENVIRON. RES. LETT. 14(4): 1–11.

¹⁸² Xu Y. & Ramanathan V. (2017) *Well below 2 °C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 114(39): 10315–10323, Supplemental Information (Table S1). See also Dreyfus G. B., Xu Y., Shindell D. T., Zaelke D., & Ramanathan V. (2022) *Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 119(22): 1–8, 5 (“Aggressive decarbonization to achieve net-zero CO₂ emissions in the 2050s (as in the decarb-only scenario) results in weakly accelerated net warming compared to the reference case, with a positive warming up to 0.03 °C in the mid-2030s, and no net avoided warming until the mid-2040s due to the reduction in co-emitted cooling aerosols (Figure 3a). By 2050, decarbonization measures result in very limited net avoided warming (0.07°C), consistent with Shindell and Smith (43), but rise to a likely detectable 0.25°C by 2060 and a major benefit of 1.4°C by 2100 (Table S5). In contrast, pairing decarbonization with mitigation measures targeting CH₄, BC, HFC, and N₂O (not an SLCP due to its longer lifetime) independent from decarbonization are essential to slowing the rate of warming by the 2030s to under 0.3°C per decade (Table 1, Figure 3b), similar to the 0.2°C to 0.25°C per decade warming prior to 2020 (38, 53). Recent studies suggest that rate of warming rather than level of warming controls likelihood of record-shattering extreme weather events (54, 55). By 2050, the net avoided warming from the targeted non-CO₂ measures is 0.26°C, almost 4 times larger than the net benefit of decarbonization alone (0.07°C) (Table S5).”).

¹⁸³ Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), Figure 6.12 (“Contribution to effective radiative forcing (ERF) (a) and global mean surface air temperature (GSAT) change (b) from component emissions between 1750 to 2019 based on CMIP6 models (Thornhill et al., 2021b).”).

¹⁸⁴ Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7 (“Across the SSPs, the collective

reduction of CH₄, ozone precursors and HFCs can make a difference of global mean surface air temperature of 0.2 with a very likely range of [0.1–0.4] °C in 2040 and 0.8 with a very likely range of [0.5–1.3] °C at the end of the 21st century (comparing SSP3-7.0 and SSP1-1.9), which is substantial in the context of the Paris Agreement. Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*).”, 6-8 (“Additional CH₄ and BC mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with SO₂ reductions that would accompany decarbonization (*high confidence*).”). See also Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-36 (“Strong, rapid and sustained reductions in CH₄ emissions would also limit the warming effect resulting from declining aerosol pollution and would improve air quality.”). See also Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., Skea J., Slade R., Al Khouradajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., & Malley J. (eds.), SPM-31 (“In modelled global low emission pathways, the projected reduction of cooling and warming aerosol emissions over time leads to net warming in the near- to mid-term. In these mitigation pathways, the projected reductions of cooling aerosols are mostly due to reduced fossil fuel combustion that was not equipped with effective air pollution controls.”).

¹⁸⁵ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 17 (“Mitigation of methane is very likely the strategy with the greatest potential to decrease warming over the next 20 years.”).

¹⁸⁶ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 21 (“This is because a realistically paced phase-out of fossil fuels, or even a rapid one under aggressive decarbonization, is likely to have minimal net impacts on near-term temperatures due to the removal of co-emitted aerosols (Shindell and Smith 2019). As methane is the most powerful driver of climate change among the short-lived substances (Myhre et al. 2013), mitigation of methane emissions is very likely to be the most powerful lever in reducing near-term warming. This is consistent with other assessments; for example, the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (IPCC AR5) showed that methane controls implemented between 2010 and 2030 would lead to a larger reduction in 2040 warming than the difference between RCPs 2.6, 4.5 and 6.0 scenarios. (The noted IPCC AR5-era scenarios are called representative concentration pathways (RCPs, with the numerical value indicating the target radiative forcing in 2100 (Kirtman et al. 2013)).”). See also Ocko I. B., Sun T., Shindell D., Oppenheimer M., Hristov A. N., Pacala S.W., Mauzerall D. L., Xu Y., & Hamburg S. P. (2021) *Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming*, ENVIRON. RES. LETT. 16(5): 1–11, 1 (“Pursuing all mitigation measures now could slow the global-mean rate of near-term decadal warming by around 30%, avoid a quarter of a degree centigrade of additional global-mean warming by midcentury, and set ourselves on a path to avoid more than half a degree centigrade by end of century. On the other hand, slow implementation of these measures may result in an additional tenth of a degree of global-mean warming by midcentury and 5% faster warming rate (relative to fast action), and waiting to pursue these measures until midcentury may result in an additional two tenths of a degree centigrade by midcentury and 15% faster warming rate (relative to fast action).”); and Shindell D. & Smith C. J. (2019) *Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels*, NATURE 573: 408–411, Addendum “Methods” (“We note that, although this study focuses on the effects of fossil-fuel related emissions, accounting for the effects of reductions in greenhouse gases from non-fossil sources—including fluorinated gases and both methane and nitrous oxide from agriculture—along with biofuels that are a large source of warming black carbon, could eliminate any near-term penalty entirely. In fact, given that the net effect of the fossil-fuel phase-out on temperature is minimal during the first 20 years (Fig. 3), reducing those other emissions is the only plausible way in which to decrease warming during that period.”).

¹⁸⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), SPM-36 (“Strong, rapid and sustained reductions in CH₄ emissions would also limit the warming effect resulting from declining aerosol pollution and would improve air quality.”). See also Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7 (“Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*).”).

¹⁸⁸ Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., & Malley J. (eds.), SPM-30–SPM-31 (“Deep GHG emissions reductions by 2030 and 2040, particularly reductions of methane emissions, lower peak warming, reduce the likelihood of overshooting warming limits and lead to less reliance on net negative CO₂ emissions that reverse warming in the latter half of the century. Reaching and sustaining global net zero GHG emissions results in a gradual decline in warming. (*high confidence*) (Table SPM.1)”).

¹⁸⁹ Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., & Malley J. (eds.), SPM-22 (“C.1.2 In modelled pathways that limit warming to 2°C (>67%) assuming immediate action, global net CO₂ emissions are reduced compared to modelled 2019 emissions by 27% [11–46%] in 2030 and by 52% [36–70%] in 2040; and global CH₄ emissions are reduced by 24% [9–53%] in 2030 and by 37% [20–60%] in 2040. In pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot global net CO₂ emissions are reduced compared to modelled 2019 emissions by 48% [36–69%] in 2030 and by 80% [61–109%] in 2040; and global CH₄ emissions are reduced by 34% [21–57%] in 2030 and 44% [31–63%] in 2040. There are similar reductions of non-CO₂ emissions by 2050 in both types of pathways: CH₄ is reduced by 45% [25–70%]; N₂O is reduced by 20% [-5 – 55%]; and F-Gases are reduced by 85% [20–90%]. [FOOTNOTE 44] Across most modelled pathways, this is the maximum technical potential for anthropogenic CH₄ reductions in the underlying models (*high confidence*). Further emissions reductions, as illustrated by the IMP-SP pathway, may be achieved through changes in activity levels and/or technological innovations beyond those represented in the majority of the pathways (*medium confidence*). Higher emissions reductions of CH₄ could further reduce peak warming. (*high confidence*) (Figure SPM.5)”).

¹⁹⁰ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, Figure 5.1.

¹⁹¹ Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7 (“An additional concomitant methane mitigation (consistent with SSP1’s stringent climate mitigation policy implemented in the SSP3 world) would not only alleviate this warming but would turn this into a cooling of 0.07 with a likely range of [-0.02 to 0.14] °C (compared with SSP3-7.0 in 2040). Across the SSPs, the collective reduction of CH₄, ozone precursors and HFCs can make a difference of GSAT of 0.2 with a very likely range of [0.1–0.4] °C in 2040 and 0.8 with a very likely range of [0.5–1.3] °C at the end of the 21st century (comparing SSP3-7.0 and SSP1-1.9), which is substantial in the context of the Paris Agreement. Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near-

and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*). {6.6.3, 6.7.3, 4.4.4}”), 6-8 (“Additional CH₄ and BC mitigation would contribute to offsetting the additional warming associated with SO₂ reductions that would accompany decarbonization (*high confidence*).”). See also Forster P. M., et al. (2023) *Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence*, EARTH SYST. SCI. DATA 15(6): 2295–2327, 2312–2313 (“The RCB for limiting warming to 1.5 °C is becoming very small. It is important, however, to correctly interpret this information. RCB estimates consider projected reductions in non-CO₂ emissions that are aligned with a global transition to net zero CO₂ emissions. These estimates assume median reductions in non-CO₂ emissions between 2020–2050 of CH₄ (50 %), N₂O (25 %) and SO₂ (77 %). If these non-CO₂ greenhouse gas emission reductions are not achieved, the RCB will be smaller (see Supplement, Sect. S8).”).

¹⁹² United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, Figure 5.1.

¹⁹³ Nzotungicimpaye C. M., MacIsaac A. J., & Zickfeld K. (2023) *Delaying methane mitigation increases the risk of breaching the 2 °C warming limit*, COMMUN. EARTH. ENVIRON. 4(250): 1–8, 2–3 (“For every 10-year delay in CH₄ mitigation, our model simulates an additional peak warming of ~0.1 °C (Fig. 2d). Delaying CH₄ mitigation to or around mid-century will increase the peak warming by 0.2–0.3 °C relative to a CH₄ mitigation initiated at present-day.... In our model simulations, SAT changes are influenced by biogeochemical feedbacks in addition to the timing of CH₄ mitigation. In particular, we find that the feedback of SAT changes on the atmospheric CO₂ concentration (referred to as the carbon-climate feedback) contributes to increasing peak SAT differences between early and delayed CH₄ mitigation. While we prescribe the same anthropogenic CO₂ emissions in all our model simulations (See Methods), atmospheric CO₂ levels are projected to be higher for delayed CH₄ mitigation scenarios than for early CH₄ mitigation scenarios (Fig. 2c). In comparison to early CH₄ mitigation, delayed CH₄ mitigation results in high [CH₄] levels that lead to high SAT levels. Enhanced global warming results in high [CO₂] levels, which in turn contribute to increase the SAT differences between early and delayed CH₄ mitigation scenarios. Such feedbacks between SAT and [CO₂] involve the response of natural CO₂ sinks to global warming and climate change. For instance, increased SAT enhances the release of CO₂ through soil respiration and weakens the uptake of atmospheric CO₂ by oceans through the solubility pump, resulting in enhanced [CO₂] and an amplification of global warming¹⁴. Overall, we deduce that the carbon-climate feedback amplifies the SAT response in late versus early CH₄ mitigation scenarios (Fig. 2d and Fig. 3). To quantify the contribution of the carbon-climate feedback to additional peak warming from delayed CH₄ mitigation, we performed additional model simulations with prescribed CO₂ concentration from the early mitigation scenario (i.e. Early CH₄ Mitig SSP1-2.6). These model simulations suppress the warming signal from delayed CH₄ mitigation that is due to the carbon-climate feedback, and their difference with our standard model simulations allows to quantify the magnitude of the feedback. According to our results, the contribution of the carbon-climate feedback to the peak warming increases for every 10-year delay in CH₄ mitigation (Fig. 3). The peak warming attributable to the feedback ranges from ~0.03 °C for CH₄ mitigation initiated in 2020 to ~0.06 °C for CH₄ mitigation initiated in 2050 (Fig. 3).”).

¹⁹⁴ Staniaszek Z., Griffiths P. T., Folberth G. A., O’Connor F. M., Abraham N. L., Archibald A. T. (2021) *The role of future anthropogenic methane emissions in air quality and climate*, NPJ CLIM. ATMOS. SCI. 5(21): 1–8, 3 (“Between 2015 to 2050 alone, SSP3-7.0 leads to almost 2° of warming in UKCA-CH₄ (see Fig. 3a)—the entirety of the temperature limit compared to pre-industrial levels set in the Paris agreement¹. The total temperature increase (pre-industrial to 2050) in SSP3-7.0 is 2.82 ± 0.12 K. The ZAME experiment shows that 1° of this warming (or one-third of the SSP3-7.0 total temperature increase to 2050) can be attributed to the effects of future anthropogenic methane emissions. This further highlights the potential of methane emissions reductions for climate mitigation^{6-8,32} but shows that even the zero methane scenario breaches 1.5°, and underscores the necessity of CO₂ mitigation.”).

¹⁹⁵ United Nations Environment Programme & World Meteorological Organization (2011) *INTEGRATED ASSESSMENT OF BLACK CARBON AND TROPOSPHERIC OZONE*, 239 (“Evaluating global mean temperature change, it was found that the targeted measures to reduce emissions of methane and BC could greatly reduce warming rates over the next few

decades (Figure 6.1; Box 6.1). When all measures are fully implemented, warming during the 2030s relative to the present would be only half as much as in the reference scenario. In contrast, even a fairly aggressive strategy to reduce CO₂ emissions, as for the CO₂-measures scenario, does little to mitigate warming until after the next 20-30 years (Box 6.2).”), 246 (“Large impacts of the measures examined here were also seen for the Arctic despite the minimal amount of emissions currently taking place there. This occurs due to the high sensitivity of the Arctic both to pollutants that are transported there from remote sources and to radiative forcing that takes place in areas of the northern hemisphere outside the Arctic. The 16 measures examined here, including the measures on pellet stoves and coal briquettes, reduce warming in the Arctic by 0.7 °C (range 0.2 to 1.3 °C) at 2040. This is a large portion of the 1.1 °C (range 0.7 to 1.7 °C) warming projected under the reference scenario for the Arctic, and hence implementation of the measures would be virtually certain to substantially slow, but not halt, the pace of Arctic climate change.”).

¹⁹⁶ Ocko I. B., Sun T., Shindell D., Oppenheimer M., Hristov A. N., Pacala S. W., Mauzerall D. L., Xu Y., & Hamburg S. P. (2021) *Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming*, ENVIRON. RES. LETT. 16(5): 1–11, 1 (“Pursuing all mitigation measures now could slow the global-mean rate of near-term decadal warming by around 30%, avoid a quarter of a degree centigrade of additional global-mean warming by midcentury, and set ourselves on a path to avoid more than half a degree centigrade by end of century. On the other hand, slow implementation of these measures may result in an additional tenth of a degree of global-mean warming by midcentury and 5% faster warming rate (relative to fast action), and waiting to pursue these measures until midcentury may result in an additional two tenths of a degree centigrade by midcentury and 15% faster warming rate (relative to fast action).”).

¹⁹⁷ Staniaszek Z., Griffiths P. T., Folberth G. A., O’Connor F. M., Abraham N. L., Archibald A. T. (2021) *The role of future anthropogenic methane emissions in air quality and climate*, NPJ CLIM. ATMOS. SCI. 5(21): 1–8, 2 (“In the ZAME scenario, (following the cessation of anthropogenic methane emissions, Fig. 1a), surface methane decreases globally with an e-folding timescale of 6.55 ± 0.06 years, and reaches below pre-industrial levels by 2030 (i.e. within 15 years; see Fig. 1b). The whole atmosphere methane burden declines to below pre-industrial levels within 12 years, stabilising at 1775 ± 15 Tg, 71% below the counterfactual in 2050.”).

¹⁹⁸ Sun T., Ocko I. B., Hamburg S. P., (2022) *The value of early methane mitigation in preserving Arctic summer sea ice*, ENVIRON. RES. LETT. 17(4): 1–11, 1 (“While drastic cuts in carbon dioxide emissions will ultimately control the fate of Arctic summer sea ice, we show that simultaneous early deployment of feasible methane mitigation measures is essential to avoiding the loss of Arctic summer sea ice this century. In fact, the benefit of combined methane and carbon dioxide mitigation on reducing the likelihood of a seasonally ice-free Arctic can be greater than the simple sum of benefits from two independent greenhouse gas policies. The extent to which methane mitigation can help preserve Arctic summer sea ice depends on the implementation timeline. The benefit of methane mitigation is maximized when all technically feasible measures are implemented within this decade, and it decreases with each decade of delay in implementation due to its influence on end-of-century temperature. A key insight is that methane mitigation substantially lowers the risk of losing Arctic summer sea ice across varying levels of concomitant carbon dioxide mitigation.”).

¹⁹⁹ Meier W. N., Petty A., Hendricks S., Kaleschke L., Divine D., Farrell S., Gerland S., Perovich D., Ricker R., Tian-Kunze X., Webster M. (2023) *Sea Ice, in ARCTIC REPORT CARD 2023*, Thoman R. L., Moon T. A., & Druckenmiller M. L. (eds.), National Oceanic and Atmospheric Administration, 40 (“This satellite record tracks long-term trends, variability, and seasonal changes from the annual extent maximum in late February or March and the annual extent minimum in September. Extents in recent years are ~50% lower than values in the 1980s. In 2023, March and September extents were lower than other recent years (Fig. 1), and though not a new record low, they continue the long-term downward trends (Table 1).”). See also Arctic Monitoring and Assessment Programme (2021) *ARCTIC CLIMATE CHANGE UPDATE 2021: KEY TRENDS AND IMPACTS*, Summary for Policymakers, 6 (“The extent of Arctic sea ice in September declined by 43% between 1979 and 2019, and—with the exception of the Bering Sea—sea-ice extent and area are declining throughout the Arctic in all months. Sea-ice cover also continues to be younger and thinner than during the 1980s, 1990s, and early 2000s.”); and Druckenmiller M. L., et al. (2021) *The Arctic*, BULL. AM. MET.

SOC. 102(8): S263–S316, S280 (“September is the month when the minimum annual sea ice extent occurs. In 2020, this average monthly ice extent was 3.92 million km² (Fig. 5.8b), the second lowest monthly extent in the 42-year satellite record. On 15 September, the annual minimum Arctic sea ice extent of 3.74 million km² was reached; this was also the second lowest on record. The September monthly extent has been decreasing at an average rate of –82,700 km² per year since 1979 (–13.1% per decade relative to the 1981–2010 average; Fig. 5.8c).”).

²⁰⁰ International Cryosphere Climate Initiative (2023) *STATE OF THE CRYOSPHERE REPORT 2023 – TWO DEGREES IS TOO HIGH*, 41 (“This former “ecosystem of ice” no longer exists. ... The occurrence of the first sea ice-free Arctic summer is therefore unpredictable, but scientists now believe it is inevitable, and likely to occur at least once before 2050 even under a “very low” emissions scenario.^{13,27,28,30} ... In contrast, continuing on the current emissions trajectory may lead to the Arctic becoming ice free in the summer as soon as the 2030s.²³ Even moderate emissions will lead to ice-free conditions most summers once global mean temperature rise reaches about 1.7°C. The length of this ice-free state would increase in lock-step with emissions and temperature,^{10,28,29,39} eventually stretching from July–October at 2°C.^{21,29}”). See also Docquier D. & Koenigk T. (2021) *Observation-based selection of climate models projects Arctic ice-free summers around 2035*, COMMUN. EARTH ENVIRON. 2(144): 1–8, 4 (“In the high-emission scenario, five out of six selection criteria that include ocean heat transport provide a first ice-free Arctic in September before 2040 (range of multi-model means: 2032–2039), more than 20 years before the date of ice-free Arctic for the multi-model mean without model selection (i.e. 2061)”), 6 (“This model selection reveals that sea-ice area and volume reach lower values at the end of this century compared to the multi-model mean without selection. This arises both from a more rapid reduction in these quantities through this century and from a lower present-day sea-ice area. Using such a model selection, the timing of an almost ice-free Arctic in summer is advanced by up to 29 years in the high-emission scenario, i.e. it could occur as early as around 2035.”); Peng G., Matthews J. L., Wang M., Vose R., & Sun L. (2020) *What Do Global Climate Models Tell Us about Future Arctic Sea Ice Coverage Changes?*, CLIMATE 8(15): 1–24, 17 (“Excluding the values later than 2100, the averaged projected [first ice-free Arctic summer year (FIASY)] value for RCP4.5 was 2054 with a spread of 74 years; for RCP8.5, the averaged FIASY was 2042 with a spread of 42 years. ... which put the mean FIASY at 2037. The RCP8.5 projections tended to push FIASY earlier, except for those of the MICRO-ESM and MICRO-ESM-CHEM models. Those two models also tended to project earlier Arctic ice-free dates and longer durations.”); and Overland J. E. & Wang M. (2013) *When will the summer Arctic be nearly sea ice free?*, GEOPHYS. RES. LETT. 40(10): 2097–2101, 2097 (“Three recent approaches to predictions in the scientific literature are as follows: (1) extrapolation of sea ice volume data, (2) assuming several more rapid loss events such as 2007 and 2012, and (3) climate model projections. Time horizons for a nearly sea ice-free summer for these three approaches are roughly 2020 or earlier, 2030 ± 10 years, and 2040 or later. Loss estimates from models are based on a subset of the most rapid ensemble members. ... Observations and citations support the conclusion that most global climate model results in the CMIP5 archive are too conservative in their sea ice projections. Recent data and expert opinion should be considered in addition to model results to advance the very likely timing for future sea ice loss to the first half of the 21st century, with a possibility of major loss within a decade or two.”).

²⁰¹ Bonan D. B., Schneider T., Eisenman I., & Wills R. C. J. (2021) *Constraining the Date of a Seasonally Ice-Free Arctic Using a Simple Model*, GEOPHYS. RES. LETT. 48(18): 1–12, 1 (“Under a high-emissions scenario, an ice-free Arctic will likely (>66% probability) occur between 2036 and 2056 in September and between 2050 and 2068 from July to October. Under a medium-emissions scenario, the “likely” date occurs between 2040 and 2062 in September and much later in the 21st century from July to October.”).

²⁰² Pistone K., Eisenman I., & Ramanathan V. (2019) *Radiative Heating of an Ice-Free Arctic Ocean*, GEOPHYS. RES. LETT. 46(13): 7474–7480, 7474 (“Here we use satellite observations to estimate the amount of solar energy that would be added in the worst-case scenario of a complete disappearance of Arctic sea ice throughout the sunlit part of the year. Assuming constant cloudiness, we calculate a global radiative heating of 0.71 W/m² relative to the 1979 baseline state. This is equivalent to the effect of one trillion tons of CO₂ emissions. These results suggest that the additional heating due to complete Arctic sea ice loss would hasten global warming by an estimated 25 years.”).

²⁰³ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 21 (“This is because a realistically paced phase-out of fossil fuels, or even a rapid one under aggressive decarbonization, is likely to have minimal net impacts on near-term temperatures due to the removal of co-emitted aerosols (Shindell and Smith 2019). As methane is the most powerful driver of climate change among the short-lived substances (Myhre et al. 2013), mitigation of methane emissions is very likely to be the most powerful lever in reducing near-term warming. This is consistent with other assessments; for example, the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (IPCC AR5) showed that methane controls implemented between 2010 and 2030 would lead to a larger reduction in 2040 warming than the difference between RCPs 2.6, 4.5 and 6.0 scenarios. (The noted IPCC AR5-era scenarios are called representative concentration pathways (RCPs, with the numerical value indicating the target radiative forcing in 2100 (Kirtman et al. 2013))).”). See also Shindell D. & Smith C. J. (2019) *Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels*, NATURE 573: 408–411, Addendum “Methods” (“We note that, although this study focuses on the effects of fossil-fuel related emissions, accounting for the effects of reductions in greenhouse gases from non-fossil sources—including fluorinated gases and both methane and nitrous oxide from agriculture—along with biofuels that are a large source of warming black carbon, could eliminate any near-term penalty entirely. In fact, given that the net effect of the fossil-fuel phase-out on temperature is minimal during the first 20 years (Fig. 3), reducing those other emissions is the only plausible way in which to decrease warming during that period.”).

²⁰⁴ Saunio M., et al. (2020) *The Global Methane Budget 2000–2017*, EARTH SYST. SCI. DATA 12(3): 1561–1623, 1561 (“For the 2008–2017 decade, global methane emissions are estimated by atmospheric inversions (a top-down approach) to be 576 Tg CH₄ yr⁻¹ (range 550–594, corresponding to the minimum and maximum estimates of the model ensemble). Of this total, 359 Tg CH₄ yr⁻¹ or ~ 60 % is attributed to anthropogenic sources, that is emissions caused by direct human activity (i.e. anthropogenic emissions; range 336–376 Tg CH₄ yr⁻¹ or 50 %–65 %).”).

²⁰⁵ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 25 (“Anthropogenic methane emissions come primarily from three sectors: fossil fuels, ~35 per cent; agriculture, ~40 per cent; and waste, ~20 per cent.”).

²⁰⁶ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 29 (“In comparison, biomass burning, which has a mixture of anthropogenic and natural causes, and the use of biofuels are relatively minor sources of methane. Agricultural waste burning, included in the biofuels category in the US EPA inventory and in the agricultural sector in CEDS, GAINS, EDGAR and FAO estimates for this category but not included in Figure 2.1, range from 1 to 3 Mt/yr. ... Though some biomass burning is natural, current burning results largely from anthropogenic activities. Large amounts of biomass are burned in the tropics in human induced fires related to shifting cultivation, deforestation, burning of agricultural wastes and the use of biofuels (Dlugokencky and Houweling 2015). Biomass burning remains a relatively small source of methane and it accounts for approximately 5 per cent of global methane emissions, an estimated 10–25 Mt/yr (Figure 2.1) (Saunio et al. 2020).”).

²⁰⁷ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 9–10 (“Currently available measures could reduce emissions from these major sectors by approximately 180 Mt/yr, or as much as 45 per cent, by 2030. This is a cost-effective step required to achieve the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) 1.5° C target... Roughly 60 per cent, around 75 Mt/yr, of available targeted measures have low mitigation costs², and just over 50 per cent of those have negative costs – the measures pay for themselves quickly by saving money.”).

²⁰⁸ United Nations Environment Programme (2021) *EMISSIONS GAP REPORT 2021: THE HEAT IS ON – A WORLD OF CLIMATE PROMISES NOT YET DELIVERED*, 47 (“Over the last two decades, the main cause of increasing atmospheric methane is likely increasing anthropogenic emissions, with hotspot contributions from agriculture and waste in South and South-East Asia, South America and Africa, and from fossil fuels in China, the Russian Federation and the United States of America (Jackson et al. 2020). Emissions from natural sources may also be increasing, as wetlands warm,

tropical rainfall increases and permafrost thaws.”). See also Lan X., Nisbet E. G., Dlugokencky E. J., & Michel S. E. (2021) *What do we know about the global methane budget? Results from four decades of atmospheric CH₄ observations and the way forward*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 1–14, 11 (“Explaining the renewed and accelerating increase in atmospheric CH₄ burden since 2007 remains challenging, and the exact causes are not yet clear. But, the observations we describe suggest that increased emissions from microbial sources are the strongest driver, with a relatively smaller contribution from other processes, e.g., fossil fuel exploitation. A more difficult question to answer is the one posed by this special issue: is warming feeding the warming? We cannot say for certain, but we cannot rule out the possibility that climate change is increasing CH₄ emissions. The strong signals from the tropics combined with the isotopic data are consistent with increased emissions from natural wetlands, but large [interannual variability (IAV)] and inter-decadal variability in wetland drivers like precipitation make it difficult to identify small trends. Observations are needed that will help process models capture this variability. The size of the IAV illustrates the potential scope of uncontrollable near-future change and emphasizes the urgency of reducing the global methane burden by mitigating the methane emissions that we can control, from the fossil fuel and agricultural sectors.”). However, other studies suggest a more limited increase in recent emissions from natural wetlands compared to agriculture and waste and energy production sectors. See Zhang Z., et al. (2021) *Anthropogenic emissions are the main contribution to the rise of atmospheric methane (1993-2017)*, NAT’L SCI. REV. 9(5): 1–13, 1 (“Our emission scenarios that have the fewest biases with respect to isotopic composition suggest that the agriculture, landfill, and waste sectors were responsible for 53±13% of the renewed growth over the period 2007-2017 compared to 2000-2006; industrial fossil fuel sources explained an additional 34±24%, and wetland sources contributed the least at 13±9%. The hypothesis that a large increase in emissions from natural wetlands drove the decrease in atmospheric δ¹³C-CH₄ values cannot be reconciled with current process-based wetland CH₄ models. This finding suggests the need for increased wetland measurements to better constrain the contemporary and future role of wetlands in the rise of atmospheric methane and climate feedbacks. Our findings highlight the predominant role of anthropogenic activities in driving the growth of atmospheric CH₄ concentrations.”); and Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, ENVIRON. SCI. POLICY 134: 127–136, 128 (“While the precise explanation for the stabilization and subsequent growth of atmospheric CH₄ over the past two decades has been a subject of debate within the scientific community (Nisbet et al., 2019; Kirschke et al., 2013; Rigby et al., 2017; Turner et al., 2019; Schaefer, 2019; Saunio et al., 2016, 2020), a new study concludes that the recent growth is due in roughly equal parts to emissions from fossil fuel sources and the combined emissions from agricultural and waste sources (Jackson et al., 2020).”), 129 (“Wetlands are currently the largest natural source of atmospheric CH₄ (Saunio et al., 2020), with emissions controlled by environmental factors including the soil temperature, water table depth, and vegetation cover and composition (Dean et al., 2018; Gedney et al., 2004); all of these variables are affected by climate change. Zhang et al. (2017) calculate that increased CH₄ emissions from wetlands under climate change scenarios could result in an increased radiative forcing ranging from 0.08 W m⁻² for RCP2.6 (strong climate mitigation with the possibility of reaching the 2° target) to 0.19 W m⁻² for RCP8.5 (business-as-usual). Beyond 2100, climate change-induced CH₄ emissions from marine and freshwater systems and permafrost could also become important (Armeth et al., 2010; Dean et al., 2018; O’Connor et al., 2010).”).

²⁰⁹ Peng S., Lin X., Thompson R. L., Xi Y., Liu G., Hauglustaine D., Lan X., Poulter B., Ramonet M., Saunio M., Yin Y., Zhang Z., Zheng B., & Ciais P. (2022) *Wetland emission and atmospheric sink changes explain methane growth in 2020*, NATURE 612(7940): 477–482, 481 (“In summary, our results show that an increase in wetland emissions, owing to warmer and wetter conditions over wetlands, along with decreased OH, contributed to the soaring methane concentration in 2020. The large positive MGR anomaly in 2020, partly due to wetland and other natural emissions, reminds us that the sensitivity of these emissions to interannual variation in climate has had a key role in the renewed growth of methane in the atmosphere since 2006. The wetland methane–climate feedback is poorly understood, and this study shows a high interannual sensitivity that should provide a benchmark for future coupled CH₄ emissions–climate models. We also show that the decrease in atmospheric CH₄ sinks, which resulted from a reduction of tropospheric OH owing to less NO_x emissions during the lockdowns, contributed 53 ± 10% of the MGR anomaly in 2020 relative to 2019. Therefore, the unprecedentedly high methane growth rate in 2020 was a compound event with both a reduction in the atmospheric CH₄ sink and an increase in Northern Hemisphere natural sources. With emission recovery to pre-pandemic levels in 2021, there could be less reduction in OH. The persistent high MGR

anomaly in 2021 hints at mechanisms that differ from those responsible for 2020, and thus awaits an explanation.”). See also Allen G. H. (2022) *Cause of the 2020 surge in atmospheric methane clarified*, NATURE 612(7940): 413–414; and Qu Z., Jacob D. J., Zhang Y., Shen L., Varon D. J., Lu X., Scarpelli T., Bloom A., Worden J., & Parker R. J. (2022) *Attribution of the 2020 surge in atmospheric methane by inverse analysis of GOSAT observations*, ENVIRON. RES. LETT. 17(9): 1–8.

²¹⁰ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 28 (“Fossil fuels: release during oil and gas extraction, pumping and transport of fossil fuels accounts for roughly 23 per cent of all anthropogenic emissions, with emissions from coal mining contributing 12 per cent.”).

²¹¹ Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model*, ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 1–21, 7–8 (Table 2 and Supplementary material tab “World”). See also International Energy Agency (2022) *GLOBAL METHANE TRACKER 2022*, 4 (“We estimate that the global energy sector was responsible for around 135 million tonnes of methane emitted into the atmosphere in 2021. Following the Covid-induced decline in 2020, this represents a year-on-year increase in energy-related methane emissions of almost 5%, largely due to higher fossil fuel demand and production as economies recovered from the shock of the pandemic... Of the 135 million tonnes of energy-related emissions, an estimated 42 Mt are from coal operations, 41 Mt from oil, 39 Mt are from extracting, processing and transporting natural gas, 9 Mt from the incomplete combustion of bioenergy (largely when wood and other solid biomass is used as a traditional cooking fuel), and 4 Mt leaks from end-use equipment.”).

²¹² United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 29 (“Within the fossil fuel sector, extraction, processing and distribution of the three main fuels have comparable impacts, with emissions from oil and gas each contributing 34 per cent followed by coal with 32 per cent of sectoral emissions in 2020 (Höglund-Isaksson 2020). Emissions from the coal subsector are entirely from mining-related activities, including both active and abandoned facilities. Within oil and gas, methane emissions associated with onshore conventional extraction along with downstream gas usage are the largest sources (Figure 2.3). Venting, the deliberate release of unwanted gas, is the primary cause of emissions during onshore conventional extraction, whereas fugitive emissions, the inadvertent release or escape of gas from fossil fuel systems, dominate downstream gas emissions. Within the fossil fuel sector, at the national level, emissions from the oil subsector in Russia and the coal subsector in China appear to be far larger than any other national level subsectors (Scarpelli *et al.* 2020). While these types of data based on national inventories are useful, it is important to note that many local measurements show large differences and often substantially higher emissions than conventional reporting, in many cases due to the presence of a small number of super-emitters, and imply these estimates may be too low (Zhang *et al.* 2020; Duren *et al.* 2019; Varon *et al.*, 2019; Zavala-Araiza *et al.* 2018). These emissions give a sense of mitigation opportunities by region and sector, which is explored in Chapter 4.”).

²¹³ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 30 (Figure 2.3, “Within the fossil fuel sector, extraction, processing and distribution of the three main fuels have comparable impacts, with emissions from oil and gas each contributing 34 per cent followed by coal with 32 per cent of sectoral emissions in 2020 (Höglund-Isaksson 2020). Emissions from the coal subsector are entirely from mining-related activities, including both active and abandoned facilities. Within oil and gas, methane emissions associated with onshore conventional extraction along with downstream gas usage are the largest sources (Figure 2.3). Venting, the deliberate release of unwanted gas, is the primary cause of emissions during onshore conventional extraction, whereas fugitive emissions, the inadvertent release or escape of gas from fossil fuel systems, dominate downstream gas emissions. Within the fossil fuel sector, at the national level, emissions from the oil subsector in Russia and the coal subsector in China appear to be far larger than any other national level subsectors (Scarpelli *et al.* 2020). While these types of data based on national inventories

are useful, it is important to note that many local measurements show large differences and often substantially higher emissions than conventional reporting, in many cases due to the presence of a small number of super-emitters, and imply these estimates may be too low (Zhang *et al.* 2020; Duren *et al.* 2019; Varon *et al.*, 2019; Zavala-Araiza *et al.* 2018). These emissions give a sense of mitigation opportunities by region and sector, which is explored in Chapter 4.”).

²¹⁴ Hope M. (2014) *Explained: Fugitive methane emissions from natural gas production*, CARBONBRIEF (“Natural gas is mainly methane, some of which escapes during the drilling, extraction, and transportation process. Such outbreaks are known as fugitive emissions.”). See also Picard D. (2000) *Fugitive emissions from oil and natural gas activities*, Background Paper in IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories (“In general, fugitive emissions from oil and gas activities may be attributed to the following primary types of sources: • fugitive equipment leaks; • process venting; • evaporation losses; • disposal of waste gas streams (e.g., by venting or flaring), and • accidents and equipment failures.”).

²¹⁵ International Energy Agency (2022) *GLOBAL METHANE TRACKER 2022*, 6 (“Globally, our analysis finds that methane emissions from the energy sector are about 70% greater than the sum of estimates submitted by national governments.”).

²¹⁶ International Energy Agency (2022) *GLOBAL METHANE TRACKER 2022*, 18 (“Emissions from abandoned coal mines and oil and gas wells are not included in the Global Methane Tracker: existing measurements cover a limited number of facilities and regions, and reliable data on abandoned mines and wells is not available for most countries. These sources could, nonetheless, represent significant levels of emissions. The U.S. Environmental Protection Agency indicates they are responsible for close to 5% of energy-related methane in the United States; and a recent study estimated that abandoned mines could account for almost one fifth of methane emissions from worldwide coal production.”); citing Kholod N., Evans M., Pilcher R. C., Roshchanka V., Ruiz F., Coté M., & Collings R. (2020) *Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production*, J. CLEAN. PROD. 256(120489): 1–12. See also Williams J. P., Regehr A., & Kang M. (2021) *Methane Emissions from Abandoned Oil and Gas Wells in Canada and the United States*, ENVIRON. SCI. TECHNOL. 55: 563–570, 563 (“We estimate the number of abandoned wells to be at least 4,000,000 wells for the U.S. and at least 370,000 for Canada. Methane emission factors range from 1.8×10^{-3} g/h to 48 g/h per well depending on the plugging status, well type, and region, with the overall average at 6.0 g/h. We find that annual methane emissions from abandoned wells are underestimated by 150% in Canada and by 20% in the U.S. Even with the inclusion of two to three times more measurement data than used in current inventory estimates, we find that abandoned wells remain the most uncertain methane source in the U.S. and become the most uncertain source in Canada.”).

²¹⁷ United States Environmental Protection Agency, *About Coal Mine Methane* (last visited 5 February 2023) (“CMM is released by different types of mines: **Active underground mines**, which release methane through degasification systems (drainage system methane) and ventilation systems (ventilation air methane or VAM); **Abandoned or closed mines** release abandoned mine methane (AMM) from diffuse vents, ventilation pipes, boreholes, or fissures in the ground; **Surface mines** emit less methane than underground mines, but because surface mines produce large volumes of coal, some surface mines can also emit methane in large quantities.”).

²¹⁸ Assan S. (2022) *Tackling Australia’s Coal Mine Methane Problem*, EMBER, 5 (“The IEA estimated that Australian coal mines emitted 1.8 million tonnes of methane in 2021, double the officially reported figures. Independent satellite measurements have also uncovered underreporting of methane emissions from Australian coal mines. Open-pit mines show the greatest disparity between reported and measured emissions.”).

²¹⁹ Coal production increased in 2021 and 2022 despite hopes that it had peaked in 2018, and is now forecast to peak in 2022 or 2023 before plateauing. See International Energy Agency (2022) *Coal 2022: Analysis and forecast to 2025* (“Coal markets have been shaken severely in 2022, with traditional trade flows disrupted, prices soaring and demand set to grow by 1.2%, reaching an all-time high and surpassing 8 billion tonnes for the first time. In last year’s annual

market report, Coal 2021, we said that global coal demand might well reach a new peak in 2022 or 2023 before plateauing thereafter. Despite the global energy crisis, our overall outlook remains unchanged this year, as various factors are offsetting each other. Russia's invasion of Ukraine has sharply altered the dynamics of coal trade, price levels, and supply and demand patterns in 2022.”); International Energy Agency (2021) *Coal 2021: Analysis and forecast to 2024* (“The declines in global coal-fired power generation in 2019 and 2020 led to expectations that it might have peaked in 2018. But 2021 dashed those hopes.”); and International Energy Agency (2023) *NET ZERO ROADMAP*, 15 (“Stringent and effective policies in the NZE Scenario spur clean energy deployment and cut fossil fuel demand by more than 25% by 2030 and 80% in 2050. Coal demand falls from around 5 800 million tonnes of coal equivalent (Mtce) in 2022 to 3 250 Mtce by 2030 and around 500 Mtce by 2050.”).

²²⁰ Kholod N., Evans M., Pilcher R. C., Roshchanka V., Ruiz F., Coté M., & Collings R. (2020) *Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production*, J. CLEAN. PROD. 256(120489): 1–12, 9–10 (“The results show that regardless of future coal production scenario used by the model, [abandoned mine methane (AMM)] emissions will increase in the future. AMM emissions accounted for 17% of the total methane from coal mining in 2010. For comparison, data reported to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) from key coal producing countries show that the share of AMM in total methane emissions from coal mining in the latest available year (2015) was 1% in Germany, 2% in each Australia and Poland, 11% in the United States and 34% in the United Kingdom (UNFCCC, 2017). AMM emissions can be difficult to inventory because of ownership issues, measurement problems, the extent of mine flooding, and other factors. Because AMM emissions grow faster than [coal mine methane (CMM)], the share of AMM in total methane emissions may increase to 23% by 2050 and 27% in 2100 in the reference scenario.”).

²²¹ International Energy Agency (2021) *NET ZERO BY 2050: A ROADMAP FOR THE GLOBAL ENERGY SECTOR*, 104 (“In the NZE, total methane emissions from fossil fuels fall by around 75% between 2020 and 2030, equivalent to a 2.5 gigatonne of carbon-dioxide equivalent (GtCO₂-eq) reduction in GHG emissions (Figure 3.5).”). See also Smirnov A. (2 November 2021) *Why the world must act on coal mine methane*, EMBER (“The IEA estimates that 40.5 million tonnes (MT) of methane leaked from global operational coal mines in 2020. Using a multiplier of 86, as recommended by the IPCC to assess the short-term climate impact of methane, this means coal mines leak methane equivalent to 3,490 million tonnes of CO₂ each year. This is much bigger than the multiplier of 30 used by the IEA when they calculated coal mine methane’s impact was already bigger than aviation and shipping combined. This means coal mine methane’s short-term climate impact – at 3,490 million tonnes CO₂e – is greater than the EU-27’s CO₂ emissions, which were 2,920 million tonnes in 2019. ... The IEA’s *Net Zero by 2050* report shows that coal power generation needs to fall by two thirds this decade – a massive 67% fall from 2020 to 2030 – to keep warming to 1.5 degrees.”).

²²² International Energy Agency (28 July 2022) *Global coal demand is set to return to its all-time high in 2022*, Press Release (“Based on current economic and market trends, global coal consumption is forecast to rise by 0.7% in 2022 to 8 billion tonnes, assuming the Chinese economy recovers as expected in the second half of the year, the IEA’s July 2022 *Coal Market Update* says. This global total would match the annual record set in 2013, and coal demand is likely to increase further next year to a new all-time high.”). See also International Energy Agency (2022) *Coal 2022: Analysis and forecast to 2025* (“Coal markets have been shaken severely in 2022, with traditional trade flows disrupted, prices soaring and demand set to grow by 1.2%, reaching an all-time high and surpassing 8 billion tonnes for the first time. In last year’s annual market report, Coal 2021, we said that global coal demand might well reach a new peak in 2022 or 2023 before plateauing thereafter. Despite the global energy crisis, our overall outlook remains unchanged this year, as various factors are offsetting each other. Russia’s invasion of Ukraine has sharply altered the dynamics of coal trade, price levels, and supply and demand patterns in 2022.”). However, the rise in coal use in Europe in 2022 was lower than initially expected, see Jones D., et al. (31 January 2023) *European Electricity Review 2023*, EMBER, 5 (“It could have been much worse: wind, solar and a fall in electricity demand prevented a much larger return to coal. In context, the rise was not substantial: coal power increased by just 1.5 percentage points to generate 16% of EU electricity in 2022, remaining below 2018 levels. The 28 TWh rise in EU’s coal generation added only 0.3% to global coal generation.”). See also Hancock A. *Norway’s Equinor and German state energy group sign €50bn long-term gas deal*, FINANCIAL TIMES (“Norway’s Equinor signed its biggest long-term gas contract in nearly 40 years

on Tuesday in a €50bn deal with German state energy group SEFE. It comes as EU countries seek stable supplies to compensate for the loss of piped gas from Russia.”).

²²³ Zhu R., Khanna N., Gordon J., Dai F., & Lin J. (2023) *ABANDONED COAL MINE METHANE REDUCTION: LESSONS FROM THE UNITED STATES*, California-China Climate Institute, 3 (“In 2021, U.S. abandoned coal mines produced an estimated 330,000 metric tons of methane – about 12.5% of the country’s methane emissions from coal mining.”).

²²⁴ Zhu R., Khanna N., Gordon J., Dai F., & Lin J. (2023) *ABANDONED COAL MINE METHANE REDUCTION: LESSONS FROM THE UNITED STATES*, California-China Climate Institute, 11 (“To date, insufficient data makes it impossible to accurately estimate AMM emissions in the U.S. Abandoned mines do not report emission data to the GHGRP, for example. Further, the data for three important parameters used in predicting AMM emissions rates – the coal’s adsorption isotherm, methane flow capacity as expressed by permeability, and gas pressure at abandonment – are not available for every abandoned coal mine. Therefore, these values must be estimated using ranges of values established in IPCC guidelines. ... Although remote sensing data from satellite or aerial methane surveys is available in some regions, identifying AMM emissions from specific abandoned coal mines is difficult due to the detection threshold of these technologies. By contrast, ground-based technologies can measure AMM emissions more accurately. Vehicle-mounted methane detection systems (such as GasFinder3-VB, Remote Methane Leak Detector, and Portable Methane Leak Observatory system) should therefore be considered for road-accessible sites. Future R&D investment should target lowering the methane detection threshold of aerial survey instruments and improving their precision for low-emissions sources.”).

²²⁵ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 28 (“Agriculture: emissions from enteric fermentation and manure management represent roughly 32 per cent of global anthropogenic emissions. Rice cultivation adds another 8 per cent to anthropogenic emissions. Agricultural waste burning contributes about 1 per cent or less.”).

²²⁶ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 29 (“The two largest sources are livestock and fossil fuels. Within the livestock subsector, enteric fermentation and manure management are the two processes generating emissions, with the former dominant and cattle the dominant animal (Figure 2.2). Within the manure category, pigs play the largest role though cattle are again important.”).

²²⁷ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 29 (see Figure 2.2 showing annual livestock methane emissions with cattle accounting for majority of enteric methane emissions). See also Food and Agriculture Organization of the United Nations (2016) *Reducing Enteric Methane for Improving Food Security and Livelihoods*, 3 (“Globally, ruminant livestock produce about 2.7 Gt CO₂ eq. of enteric methane annually, or about 5.5% of total global greenhouse gas emissions from human activities. Cattle account for 77% of these emissions (2.1 Gt), buffalo for 14% (0.37 Gt) and small ruminants (sheep and goats) for the remainder (0.26 Gt).”).

²²⁸ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 29 (“The two largest sources are livestock and fossil fuels. Within the livestock subsector, enteric fermentation and manure management are the two processes generating emissions, with the former dominant and cattle the dominant animal (Figure 2.2). Within the manure category, pigs play the largest role though cattle are again important.”).

²²⁹ Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model*, ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 1–21, 7–8 (Table 2) and Supplementary material tab “World.”

²³⁰ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2022) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: 2030 BASELINE REPORT](#), SPM-7 (“Emissions in the agricultural sector are expected to increase over the decade to about 11 million tonnes per year by 2030 ranging between 6 and 23 million tonnes. This is equivalent to an 5-16 per cent increase from 2020 levels. This is almost entirely due to livestock, with minimal growth (or perhaps even a decrease) in the rice sector (Figure ES4).”).

²³¹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 29 (“While rice cultivation feeds up to a third of the world’s population, rice fields are a significant source of methane (Mbow *et al.* 2019; Dlugokencky and Houweling 2015). Methane is produced through anaerobic decomposition of organic material in flooded rice fields which are responsible for approximately 8–11 per cent of global anthropogenic methane emissions (Saunio *et al.* 2020; Mbow *et al.* 2019).”).

²³² United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), Figure 2.6 (Showing that rice cultivation accounted for an estimated 26.6 million tons of methane emissions in 2017, out of a total of 129 million tons of methane emissions in Asia and a total of 10.4 million tons in Southeast Asia, Korea, and Japan.).

²³³ Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) [Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model](#), ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 1–21, 7–8 (Table 2) and Supplementary material tab “World.”

²³⁴ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 28 (“Waste: landfills and waste management represents the next largest component making up about 20 per cent of global anthropogenic emissions.”).

²³⁵ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), Table 2.1 (showing estimated natural and anthropogenic source and sinks of methane in 2017, with landfill and waste accounting for 68 [64-71] MtCH₄). See also Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) [Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model](#), ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 1–21.

²³⁶ Maasackers J. D., Varon D. J., Elfarsdóttir A., McKeever J., Jervis D., Mahapatra G., Pandey S., Lorente A., Borsdorff T., Foorhuis L. R., Schuit B. J., Tol P., van Kempen T. A., van Hees R., & Aben I. (2022) [Using satellites to uncover large methane emissions from landfills](#), SCI. ADV. 8(32): 1–8, 1 (“We use the global surveying Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) to identify large emission hot spots and then zoom in with high-resolution target-mode observations from the GHGSat instrument suite to identify the responsible facilities and characterize their emissions. Using this approach, we detect and analyze strongly emitting landfills (3 to 29 t hour⁻¹) in Buenos Aires, Delhi, Lahore, and Mumbai. Using TROPOMI data in an inversion, we find that city-level emissions are 1.4 to 2.6 times larger than reported in commonly used emission inventories and that the landfills contribute 6 to 50% of those emissions.”).

²³⁷ Kaza S., Yao L. C., Bhada-Tata P., & Van Woerden F. (2018) [WHAT A WASTE 2.0: A GLOBAL SNAPSHOT OF SOLID WASTE MANAGEMENT TO 2050](#), World Bank Urban Development Series, 3 (“The world generates 2.01 billion tonnes of municipal solid waste annually, with at least 33 percent of that—extremely conservatively—not managed in an environmentally safe manner. ... When looking forward, global waste is expected to grow to 3.40 billion tonnes by 2050.”); discussed in World Bank (20 September 2018) [Global Waste to Grow by 70 Percent by 2050 Unless Urgent Action is Taken: World Bank Report](#), Press Release (“Without urgent action, global waste will increase by 70 percent on current levels by 2050, according to the World Bank’s new *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste*”).

Management to 2050 report. Driven by rapid urbanization and growing populations, global annual waste generation is expected to jump to 3.4 billion tonnes over the next 30 years, up from 2.01 billion tonnes in 2016, the report finds.”).

²³⁸ Miner K. R., Turetsky M. R., Malina E., Bartsch A., Tamminen J., McGuire A. D., Fix A., Sweeney C., Elder C. D., & Miller C. E. (2022) *Permafrost carbon emissions in a changing Arctic*, NAT. REV. EARTH ENVIRON. 3: 55–67, 55 (“Permafrost underlies ~25% of the Northern Hemisphere land surface and stores an estimated ~1,700Pg (1,700Gt) of carbon in frozen ground, the active layer and talik^{1,2}. Rapid anthropogenic warming and resultant thaw threaten to mobilize permafrost carbon stores^{3,4}, potentially increasing atmospheric concentrations of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄), and converting the Arctic from a carbon sink to a carbon source.”). See also Schuur E. A. G., et al. (2015) *Climate Change and the Permafrost Carbon Feedback*, NATURE 520: 171–179, 171 (“The first studies that brought widespread attention to permafrost carbon estimated that almost 1,700 billion tons of organic carbon were stored in terrestrial soils in the northern permafrost zone. The recognition of this vast pool stored in Arctic and sub-Arctic regions was in part due to substantial carbon stored at depth (.1 m) in permafrost, below the traditional zone of soil carbon accounting.”).

²³⁹ Canadell J. G., et al. (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 5-66 (“This new assessment, based on studies included in or published since SROCC (Schaefer et al., 2014; Koven et al., 2015c; Schneider von Deimling et al., 2015; Schuur et al., 2015; MacDougall and Knutti, 2016a; Gasser et al., 2018; Yokohata et al., 2020), estimates that the permafrost CO₂ feedback per degree of global warming (Figure 5.29) is 18 (3.1–41, 5th–95th percentile range) PgC °C⁻¹. The assessment is based on a wide range of scenarios evaluated at 2100, and an assessed estimate of the permafrost CH₄-climate feedback at 2.8 (0.7–7.3 5th–95th percentile range) Pg C_{eq} °C⁻¹ (Figure 5.29). This feedback affects the remaining carbon budgets for climate stabilisation and is included in their assessment (Section 5.5.2).”). See also Lawrence D. M., Slater A. G., Tomas R. A., Holland M. M., & Deser C. (2008) *Accelerated Arctic land warming and permafrost degradation during rapid sea ice loss*, GEOPHYS. RES. LETT. 35(L11506): 1–6, 5 (“We find that rapid sea ice loss forces a strong acceleration of Arctic land warming in CCSM3 (3.5-fold increase, peaking in autumn) which can trigger rapid degradation of currently warm permafrost and may increase the vulnerability of colder permafrost for subsequent degradation under continued warming. Our results also suggest that talik formation may be a harbinger of rapid subsequent terrestrial change. This sea ice loss – land warming relationship may be immediately relevant given the record low sea ice extent in 2007.”); and Vaks A., Mason A., Breitenbach S., Kononov A., Osinzev A., Rosensaft M., Borshevsky A., Gutareva O., & Henderson G. (2020) *Palaeoclimate evidence of vulnerable permafrost during times of low sea ice*, NATURE 577(7789): 221–225, 221 (“The robustness of permafrost when sea ice is present, as well as the increased permafrost vulnerability when sea ice is absent, can be explained by changes in both heat and moisture transport. Reduced sea ice may contribute to warming of Arctic air, which can lead to warming far inland. Open Arctic waters also increase the source of moisture and increase autumn snowfall over Siberia, insulating the ground from low winter temperatures. These processes explain the relationship between an ice-free Arctic and permafrost thawing before 0.4 Ma. If these processes continue during modern climate change, future loss of summer Arctic sea ice will accelerate the thawing of Siberian permafrost.”). For more on impacts of melting permafrost to climate and water supply, see Taillant J. D. (2021) *Chapter 5. A Thawing Earth*, in MELTDOWN: THE EARTH WITHOUT GLACIERS, Oxford University Press; and Taillant J. D. (2015) *Chapter 4. Invisible Glaciers*, in GLACIERS: THE POLITICS OF ICE, Oxford University Press.

²⁴⁰ Wang S., Foster A., Lenz E. A., Kessler J. D., Stroeve J. C., Anderson L. O., Turetsky M., Betts R., Zou S., Liu W., Boos W. R., & Hausfather Z. (2023) *Mechanisms and Impacts of Earth System Tipping Elements*, REV. GEOPHYS. 61: 1–81, 22 (“From a carbon emission perspective, both gradual and abrupt thaw will contribute to climate change slowly over a century or longer rather than being released all at once (Turetsky et al., 2019, 2020).”).

²⁴¹ Schaefer K., Lantuit H., Romanovsky V. E., Schuur E. A. G., & Witt R. (2014) *The Impact of the Permafrost Carbon Feedback on Global Climate*, ENVIRON. RES. LETT. 9(8): 1–9, 2 (“If temperatures rise and permafrost thaws, the organic material will also thaw and begin to decay, releasing carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) into the

atmosphere and amplifying the warming due to anthropogenic greenhouse gas emissions ... The PCF is irreversible on human time scales because in a warming climate, the burial mechanisms described above slow down or stop, so there is no way to convert CO₂ into organic matter and freeze it back into the permafrost.”). See also Schaefer K., Zhang T., Bruhwiler L., & Barrett A. P. (2011) *Amount and timing of permafrost carbon release in response to climate warming*, TELLUS B 63(2): 165–180, 166 (“The permafrost carbon feedback (PCF) is an amplification of surface warming due to the release into the atmosphere of carbon currently frozen in permafrost (Fig. 1). As atmospheric CO₂ and methane concentrations increase, surface air temperatures will increase, causing permafrost degradation and thawing some portion of the permafrost carbon. Once permafrost carbon thaws, microbial decay will resume, increasing respiration fluxes to the atmosphere and atmospheric concentrations of CO₂ and methane. This will in turn amplify the rate of atmospheric warming and accelerate permafrost degradation, resulting in a positive PCF feedback loop on climate (Zimov et al., 2006b).”); and Chen Y., Liu A., & Moore J.C. (2020) *Mitigation of Arctic permafrost carbon loss through stratospheric aerosol geoengineering*, NAT. COMMUN. 11(2430): 1–35, 2 (“Between 2020 and 2069, PInc-Panther simulations of soil C change, driven by outputs of 7 ESMs for the RCP4.5 projection, varied from 19.4 Pg C gain to 52.7 Pg C loss (mean 25.6 Pg C loss), while under G4 the ensemble mean was 11.9 Pg C loss (range: 29.2 Pg C gain to 44.9 Pg C loss). Projected C losses are roughly linearly proportional to changes in soil temperature, and each 1 °C warming in the Arctic permafrost would result in ~13.7 Pg C loss; the yintercept indicates that the Arctic permafrost, if maintained in current state, would remain a weak carbon sink. MIROC-ESM and MIROC-ESM-CHEM, with simulations of warming above 3°C, produce severe soil C losses, while GISS-E2-R with minor soil temperature change produces net soil C gains under both scenarios before 2070.”), 3 (“PIncPanTher simulations of the anoxic respiration rates over the period 2006–2010 are 1.2–1.7 Pg C year⁻¹, and so the estimated range of CH₄ emissions is 28–39 Tg year⁻¹, which is very close to the 15–40 Tg CH₄ year⁻¹ estimates of current permafrost wetland CH₄ emissions.”).

²⁴² Canadell J. G., et al. (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 728 (“This new assessment, based on studies included in or published since SROCC (Schaefer et al., 2014; Koven et al., 2015c; Schneider von Deimling et al., 2015; Schuur et al., 2015; MacDougall and Knutti, 2016a; Gasser et al., 2018; Yokohata et al., 2020), estimates that the permafrost CO₂ feedback per degree of global warming (Figure 5.29) is 18 (3.1–41, 5th–95th percentile range) PgC °C⁻¹. The assessment is based on a wide range of scenarios evaluated at 2100, and an assessed estimate of the permafrost CH₄-climate feedback at 2.8 (0.7–7.3 5th–95th percentile range) Pg C_{eq} °C⁻¹ (Figure 5.29). This feedback affects the remaining carbon budgets for climate stabilisation and is included in their assessment (Section 5.5.2). ... Beyond 2100, models suggest that the magnitude of the permafrost carbon feedback strengthens considerably over the period 2100–2300 under a high-emissions scenario (Schneider von Deimling et al., 2015; McGuire et al., 2018). Schneider von Deimling et al., (2015) estimated that thawing permafrost could release 20–40 PgC of CO₂ in the period from 2100 to 2300 under a RCP2.6 scenario, and 115–172 PgC of CO₂ under a RCP8.5 scenario. The multi-model ensemble in (McGuire et al., 2018) project a much wider range of permafrost soil carbon losses of 81–642 PgC (mean 314 PgC) for an RCP8.5 scenario from 2100 to 2300, and of a gain of 14 PgC to a loss of 54 PgC (mean loss of 17 PgC) for an RCP4.5 scenario over the same period... Methane release from permafrost thaw (including abrupt thaw) under high-warming RCP8.5 scenario has been estimated at 836–2614 Tg CH₄ over the 21st century and 2800–7400 Tg CH₄ from 2100–2300 (Schneider von Deimling et al., 2015), and as 5300 Tg CH₄ over the 21st century and 16000 Tg CH₄ from 2100–2300 (Turetsky et al., 2020). For RCP4.5, these numbers are 538–2356 Tg CH₄ until 2100 and 2000–6100 Tg CH₄ from 2100–2300 (Schneider von Deimling et al., 2015), and 4100 Tg CH₄ until 2100 and 10000 Tg CH₄ from 2100–2300 (Turetsky et al., 2020).”); 739 (“Other feedback contributions, such as the non-CO₂ biogeochemical feedback, can be converted into a carbon-equivalent feedback term (γ ; Section 5.4.5.5, 7.6) by reverse application of the linear feedback approximation (Gregory et al., 2009). The contributions of non-CO₂ biogeochemical feedbacks combine to a linear feedback term of 30 ± 27 PgC_{eq} °C⁻¹ (1 standard deviation range, 111 ± 98 Gt CO₂-eq °C⁻¹), including a feedback term of -11 [–18 to –5] PgC_{eq} °C⁻¹ (5–95% range, -40 [–62 to –18] Gt CO₂-eq °C⁻¹) from natural CH₄ and N₂O sources. The biogeochemical feedback from permafrost thaw leads to a combined linear feedback term of -21 ± 12 PgC_{eq} °C⁻¹ (1 standard deviation range – 77 ± 44 Gt CO₂-eq °C⁻¹).”). Note that PgC_{eq} for the methane feedback is converted to GtCO₂eq by multiplying by

44/12. See also Canadell J. G., *et al.* (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 737 (“Land biosphere models show high agreement that long-term warming will increase N₂O release from terrestrial ecosystems (XuRi *et al.*, 2012; B.D. Stocker *et al.*, 2013; Zaehle, 2013; Tian *et al.*, 2019). A positive land N₂O climate feedback is consistent with paleoevidence based on reconstructed and modelled emissions during the last deglacial period (Schilt *et al.*, 2014; H. Fischer *et al.*, 2019; Joos *et al.*, 2020). The response of terrestrial N₂O emissions to atmospheric CO₂ increase and associated warming is dependent on nitrogen availability (van Groenigen *et al.*, 2011; Butterbach-Bahl *et al.*, 2013; Tian *et al.*, 2019). Model-based estimates do not account for the potentially strong emissions increases in boreal and arctic ecosystems associated with future warming and permafrost thaw (Elberling *et al.*, 2010; Voigt *et al.*, 2017). There is medium confidence that the land N₂O climate feedback is positive, but low confidence in the magnitude (0.02 ± 0.01 W m⁻² °C⁻¹).”).

²⁴³ Armstrong McKay D. I., *et al.* (2023) *Section 1: Earth systems tipping points*, in *GLOBAL TIPPING POINTS REPORT 2023*, Lenton T. M., *et al.* (eds.), 26 (“Current-generation climate models suggest a net positive impact of the permafrost carbon-climate feedback on global climate with estimates of additional warming of 0.05–0.7°C by 2100 (Schaefer *et al.*, 2014, Burke *et al.*, 2018, Kleinen and Brovkin, 2018, Nitzbon *et al.*, 2023) based on low- to high-emissions scenarios, respectively. Methane emissions from permafrost could temporarily contribute up to 50 per cent of the permafrost-induced radiative forcing due to its higher warming potential (Walter Anthony *et al.*, 2016, Turetsky *et al.*, 2020, Miner *et al.*, 2022). Overall, however, Canadell *et al.*, (2021) summarise that “thawing terrestrial permafrost will lead to carbon release (high confidence), but there is low confidence in the timing, magnitude and relative roles of CO₂ and CH₄” of the permafrost carbon-climate feedback.”).

²⁴⁴ Canadell J. G., *et al.* (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 5–66 (“This new assessment, based on studies included in or published since SROCC (Schaefer *et al.*, 2014; Koven *et al.*, 2015c; Schneider von Deimling *et al.*, 2015; Schuur *et al.*, 2015; MacDougall and Knutti, 2016a; Gasser *et al.*, 2018; Yokohata *et al.*, 2020), estimates that the permafrost CO₂ feedback per degree of global warming (Figure 5.29) is 18 (3.1–41, 5th–95th percentile range) PgC °C⁻¹. The assessment is based on a wide range of scenarios evaluated at 2100, and an assessed estimate of the permafrost CH₄-climate feedback at 2.8 (0.7–7.3 5th–95th percentile range) Pg C_{eq} °C⁻¹ (Figure 5.29). This feedback affects the remaining carbon budgets for climate stabilisation and is included in their assessment (Section 5.5.2). ... Beyond 2100, models suggest that the magnitude of the permafrost carbon feedback strengthens considerably over the period 2100–2300 under a high-emissions scenario (Schneider von Deimling *et al.*, 2015; McGuire *et al.*, 2018). Schneider von Deimling *et al.*, (2015) estimated that thawing permafrost could release 20–40 PgC of CO₂ in the period from 2100 to 2300 under a RCP2.6 scenario, and 115–172 PgC of CO₂ under a RCP8.5 scenario. The multi-model ensemble in (McGuire *et al.*, 2018) project a much wider range of permafrost soil carbon losses of 81–642 PgC (mean 314 PgC) for an RCP8.5 scenario from 2100 to 2300, and of a gain of 14 PgC to a loss of 54 PgC (mean loss of 17 PgC) for an RCP4.5 scenario over the same period... Methane release from permafrost thaw (including abrupt thaw) under high-warming RCP8.5 scenario has been estimated at 836–2614 Tg CH₄ over the 21st century and 2800–7400 Tg CH₄ from 2100–2300 (Schneider von Deimling *et al.*, 2015), and as 5300 Tg CH₄ over the 21st century and 16000 Tg CH₄ from 2100–2300 (Turetsky *et al.*, 2020). For RCP4.5, these numbers are 538–2356 Tg CH₄ until 2100 and 2000–6100 Tg CH₄ from 2100–2300 (Schneider von Deimling *et al.*, 2015), and 4100 Tg CH₄ until 2100 and 10000 Tg CH₄ from 2100–2300 (Turetsky *et al.*, 2020).”).

²⁴⁵ Chadburn S. E., Burke E. J., Cox P. M., Friedlingstein P., Hugelius G., & Westermann S. (2017) *An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming*, *NAT. CLIM. CHANGE* 7(5): 340–344, 340 (“The estimated permafrost area is 15.5 million km² using this technique (12.0–18.2 million km² using minimum/maximum curves), which compares well to 15.0 million km² from observations (12.6–18.4 million km²).”). See also Obu J., *et al.* (2019) *Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale*, *EARTH-SCI. REV.* 193: 299–316, 305 (“The best estimate of the permafrost area in the Northern Hemisphere is 13.9 × 10⁶ km²”).

(14.6% of the exposed land area), representing the total area with where $MAGT < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Fig. 3). The borehole temperature comparison can be used to incorporate uncertainty into this estimate, giving a minimum permafrost extent of $10.1 \times 10^6\text{ km}^2$ (10.5% of exposed land area; the area within $MAGT < -2\text{ }^{\circ}\text{C}$) and a maximum extent of $19.6 \times 10^6\text{ km}^2$ (20.6% of exposed land area; the area within $MAGT < +2\text{ }^{\circ}\text{C}$). The extent of the permafrost region (i.e. all permafrost zones) inferred from permafrost occurrence probabilities is $20.8 \times 10^6\text{ km}^2$ (21.8% of exposed land area). The continuous permafrost zone occupies about half of this area, underlying $10.7 \times 10^6\text{ km}^2$ (11.2% of exposed land area), while the discontinuous ($3.1 \times 10^6\text{ km}^2$; 3.3% of exposed land area), sporadic ($3.5 \times 10^6\text{ km}^2$; 3.6% of exposed land area), and isolated patches zones ($3.5 \times 10^6\text{ km}^2$; 3.6% of exposed land area) almost equally divide the remainder.”); and Obu J. (2021) *How Much of the Earth’s Surface is Underlain by Permafrost?*, J. GEOPHYS. RES. EARTH SURF. 126(5): 1–5, 5 (“Globally, permafrost underlies between 14 and $15.7 \times 10^6\text{ km}^2$ of the exposed land area (Gruber, 2012; Obu, Westermann, Bartsch, et al. (2019)), which equates to approximately 11% of the exposed land surface with around 2% uncertainty. No subglacial, relict, or subsea permafrost is included in the above estimates. Circum-Arctic subsea permafrost extent was estimated to be $2.5 \times 10^6\text{ km}^2$ (Overduin et al., 2019). Thus, the permafrost area including Circum-Arctic subsea permafrost can be estimated to be around $17 \times 10^6\text{ km}^2$.”).

²⁴⁶ Chadburn S. E., Burke E. J., Cox P. M., Friedlingstein P., Hugelius G., & Westermann S. (2017) *An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming*, NAT. CLIM. CHANGE 7(5): 340–344, 340 (“Under a $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ stabilization scenario, 4.8 (+2.0, -2.2) million km^2 of permafrost would be lost compared with the 1960–1990 baseline (corresponding to the IPA map, Fig. 1b), and under a $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ stabilization we would lose 6.6 (+2.0, -2.2) million km^2 , over 40% of the present-day permafrost area. Therefore, stabilizing at $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ rather than $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ could potentially prevent approximately 2 million km^2 of permafrost from thawing.”). See also Burke E.J., Zhang Y., & Krinner G. (2020) *Evaluating permafrost physics in the Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6) models and their sensitivity to climate change*, THE CRYOSPHERE 14(9): 3155–3174, 3173 (“The CMIP6 models project a loss of permafrost under future climate change of between 1.7 and $2.7 \times 10^6\text{ km}^2\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. A more impact-relevant statistic is the decrease in annual mean frozen volume (3.0 to $5.3 \times 10^3\text{ km}^3\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) or around 10%–40% $\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.”); and Wang X., et al. (2022) *Contrasting characteristics, changes, and linkages of permafrost between the Arctic and the Third Pole*, EARTH SCI. REV. 230(104042): 1–21, 9 (“The future reduction in near-surface permafrost (permafrost in the topmost ground layers, < 10–15 m depth, (Hjort et al., 2022) area exhibits different magnitudes in the two regions. In the Arctic, the near-surface permafrost area is projected to gradually decline, from 22% (28%) in 2041–2060 to 29% (49%) in 2061–2080 under the RCP 4.5 (RCP 8.5) scenarios relative to the baseline (Table 3). This means that almost one-half of the near-surface permafrost would be lost by the end of the 21st century under the high emission scenario. In western Siberia, permafrost is projected by the CMIP6 models to disappear under SSP5–8.5 because of the MAAT $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ isocline moving toward the north (Alexandrov et al., 2021). On the TP, near-surface permafrost exhibits more rapid thaw than in the Arctic, especially under RCP 8.5: 58% in 2041–2060 and 84% in 2061–2080 (Table 3), indicating that near-surface permafrost on the TP is more susceptible to rising air temperatures than the Arctic near-surface permafrost. The near-surface permafrost area on the TP is projected to decrease to $0.54 \times 10^6\text{ km}^2$ in 2099 under a future air temperature increase of $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (warming magnitude under RCP 4.5) using an “altitude model” (Li and Cheng, 1999), which is close to the projection under RCP 4.5 (Table 3).”).

²⁴⁷ Hunt K. (14 March 2022) *Holes the size of city blocks are forming in the Arctic seafloor*, CNN (“Marine scientists have discovered deep sinkholes – one larger than a city block of six-story buildings – and ice-filled hills that have formed “extraordinarily” rapidly on a remote part of the Arctic seafloor.”).

²⁴⁸ Wang S., Foster A., Lenz E. A., Kessler J. D., Stroeve J. C., Anderson L. O., Turetsky M., Betts R., Zou S., Liu W., Boos W. R., & Hausfather Z. (2023) *Mechanisms and Impacts of Earth System Tipping Elements*, REV. GEOPHYS. 61: 1–81, 50 (“Gradual permafrost thaw (Section 2.4) could contribute significant additional carbon emissions over the near-term (92 Gt C by 2100 under RCP8.5) (Meredith et al., 2019). Abrupt permafrost thaw processes acting over faster timescales could emit up to $\sim 18\text{ Gt C}$ by 2100 including considerable methane (Turetsky et al., 2019, 2020). Over this century, emissions from abrupt thaw could contribute approximately 6,771 Mt CH_4 (Mt C) and 10.95 Gt CO_2 (Gt C) under the worst-case RCP8.5 scenario (Turetsky et al., 2020).”). See also Turetsky M. R., Abbott B. W., Jones M. C., Anthony K. W., Olefeldt D., Schuur E. A. G., Grosse G., Kuhry P., Hugelius G., Koven C., Lawrence

D. M., Gibson C., Sannel A. B. K., & McGuire A. D. (2020) *Carbon release through abrupt permafrost thaw*, NAT. GEOSCI. 13(2): 138–143, 139 (“Gradual permafrost thaw (Section 2.4) could contribute significant additional carbon emissions over the near-term (92 Gt C by 2100 under RCP8.5) (Meredith et al., 2019). Abrupt permafrost thaw processes acting over faster timescales could emit up to ~18 Gt C by 2100 including considerable methane (Turetsky et al., 2019, 2020). Over this century, emissions from abrupt thaw could contribute approximately 6,771 Mt CH₄ (Mt C) and 10.95 Gt CO₂ (Gt C) under the worst-case RCP8.5 scenario (Turetsky et al., 2020).”).

²⁴⁹ Abbott B. W., et al. (2016) *Biomass offsets little or none of permafrost carbon release from soils, streams, and wildfire: an expert assessment*, ENVIRON. RES. LETT. 11(3): 1–13, 2 (“Precise empirical or model-based assessments of the critical factors driving carbon balance are unlikely in the near future, so to address this gap, we present estimates from 98 permafrost-region experts of the response of biomass, wildfire, and hydrologic carbon flux to climate change. Results suggest that contrary to model projections, total permafrost-region biomass could decrease due to water stress and disturbance, factors that are not adequately incorporated in current models. Assessments indicate that end-of-the-century organic carbon release from Arctic rivers and collapsing coastlines could increase by 75% while carbon loss via burning could increase four-fold. Experts identified water balance, shifts in vegetation community, and permafrost degradation as the key sources of uncertainty in predicting future system response. In combination with previous findings, results suggest the permafrost region will become a carbon source to the atmosphere by 2100 regardless of warming scenario but that 65%–85% of permafrost carbon release can still be avoided if human emissions are actively reduced.”).

²⁵⁰ Schuur E. A. G., et al. (2022) *Permafrost and Climate Change: Carbon Cycle Feedbacks from the Warming Arctic*, ANNU. REV. ENVIRON. RESOUR. 47: 343–371, 362 (“The recent appearance of “craters” with high concentrations of CH₄ in some parts of Siberia have raised new questions (133). This phenomenon is a surprise to the permafrost community and appears to be connected with potential CH₄ emissions. Each crater does not contain exceptional levels of CH₄ but could represent new pathways from deep fossil methane that have previously been capped by permafrost. Sources of geologic methane have been observed where ice and permafrost are retreating (116), including subsea (25, 134), and could be new sources to the atmosphere at levels that are only poorly constrained by the projections synthesized in this review.”). See also Froitzheim N., Majka J., & Zastrozhnov D. (2021) *Methane release from carbonate rock formations in the Siberian permafrost area during and after the 2020 heat wave*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 118(32): 1–3, 1 (“In the Taymyr Peninsula and surroundings in North Siberia, the area of the worldwide largest positive surface temperature anomaly for 2020, atmospheric methane concentrations have increased considerably during and after the 2020 heat wave. Two elongated areas of increased atmospheric methane concentration that appeared during summer coincide with two stripes of Paleozoic carbonates exposed at the southern and northern borders of the Yenisey-Khatanga Basin, a hydrocarbon-bearing sedimentary basin between the Siberian Craton to the south and the Taymyr Fold Belt to the north. Over the carbonates, soils are thin to nonexistent and wetlands are scarce. The maxima are thus unlikely to be caused by microbial methane from soils or wetlands. We suggest that gas hydrates in fractures and pockets of the carbonate rocks in the permafrost zone became unstable due to warming from the surface. This process may add unknown quantities of methane to the atmosphere in the near future.”); discussed in Carrington D. (2 August 2021) *Climate crisis: Siberian heatwave led to new methane emissions, study says*, THE GUARDIAN (“The Siberian heatwave of 2020 led to new methane emissions from the permafrost, according to research. Emissions of the potent greenhouse gas are currently small, the scientists said, but further research is urgently needed. Analysis of satellite data indicated that fossil methane gas leaked from rock formations known to be large hydrocarbon reservoirs after the heatwave, which peaked at 6C above normal temperatures. Previous observations of leaks have been from permafrost soil or under shallow seas.”); and Mufson S. (3 August 2021) *Scientists expected thawing wetlands in Siberia’s permafrost. What they found is ‘much more dangerous’*, THE WASHINGTON POST.

²⁵¹ Natali S. M., Holdren J. P., Rogers B. M., Treharne R., Duffy P. B., Pomerance R., & MacDonald E. (2021) *Permafrost carbon feedbacks threaten global climate goals*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 118(21): 1–3, 1 (“This global climate feedback is being intensified by the increasing frequency and severity of Arctic and boreal wildfires (8, 9) that emit large amounts of carbon both directly from combustion and indirectly by accelerating permafrost thaw. Fire-induced permafrost thaw and the subsequent decomposition of previously frozen organic matter may be a dominant

source of Arctic carbon emissions during the coming decades (9).”). See also Walker X. J., Baltzer J. L., Cumming S. G., Day N. J., Ebert C., Goetz S., Johnstone J. F., Potter S., Rogers B. M., Schuur E. A. G., Turetsky M. R., & Mack M. C. (2019) *Increasing wildfires threaten historic carbon sink of boreal forest soils*, NATURE 572(7770): 520–523, 523 (“The frequency of boreal forest fires is projected to increase even more with expected climate warming and drying²⁸ and, as a result, the total burned area is expected to increase to 130%–350% by mid-century²⁹. These changes will increase the proportion of young forests vulnerable to burning and increase both the loss of legacy C per unit area burned and the expanse of forests transitioning from net C uptake over consecutive fire intervals to net C loss.”); and Genet H., McGuire A. D., Barrett K., Breen A., Euskirchen E. S., Johnstone J. F., Kasischke E. S., Melvin A. M., Bennett A., Mack M. C., Rupp T. S., Schuur A. E. G., Turetsky M. R., & Yuan F. (2013) *Modeling the effects of fire severity and climate warming on active layer thickness and soil carbon storage of black spruce forests across the landscape in interior Alaska*, ENVIRON. RES. LETT. 8(4): 1–13, 2 (“In simulations that included the effects of both warming and fire at the regional scale, fire was primarily responsible for a reduction in organic layer thickness of 0.06 m on average by 2100 that led to an increase in active layer thickness of 1.1 m on average by 2100. The combination of warming and fire led to a simulated cumulative loss of 9.6 kgC m⁻² on average by 2100. Our analysis suggests that ecosystem carbon storage in boreal forests in interior Alaska is particularly vulnerable, primarily due to the combustion of organic layer thickness in fire and the related increase in active layer thickness that exposes previously protected permafrost soil carbon to decomposition.”).

²⁵² Wang S., Foster A., Lenz E. A., Kessler J. D., Stroeve J. C., Anderson L. O., Turetsky M., Betts R., Zou S., Liu W., Boos W. R., & Hausfather Z. (2023) *Mechanisms and Impacts of Earth System Tipping Elements*, REV. GEOPHYS. 61: 1–81, 13 (“Early estimates of high rates of methane emissions from hydrate dissociation on the East Siberian Arctic Shelf (Shakhova et al., 2014) have been revised substantially downwards by numerous subsequent studies (Berchet et al., 2016; Thornton et al., 2016, 2020; Tohjima et al., 2020). Present-day marine methane release from Arctic hydrate dissociation is probably primarily of natural origin, resulting from the pressure decrease associated with isostatic uplift following the last glacial maximum, rather than a response to anthropogenic forcing (Wallmann et al., 2018). And in the Beaufort Sea, fossil methane possibly from hydrate emissions was observed in deeper waters but was removed, likely via oxidation, prior to atmospheric emission (Sparrow et al., 2018)...As a result of being positioned at shallower depths and the significant warming currently experienced at high latitudes, Arctic methane hydrate deposits are thought to be the most vulnerable pool of marine methane hydrates to warming-induced thaw.... In conclusion, while levels of warming exist beyond which large quantities of methane in hydrate deposits may eventually become destabilized, numerous physical, thermodynamic, chemical, and biological factors combine to substantially limit the rate at which this methane might escape to the atmosphere. For more moderate warming of ~2°C, methane hydrates might well exert a negligible overall impact on atmospheric temperatures. Methane hydrate dissociation would additionally take place on extremely long timescales of millennia, rather than over abrupt or fast timescales that would produce an acute warming spike. ... With all of this in mind, in relation to other candidate tipping elements covered within this review, marine methane hydrates represent a relatively lower-impact climate feedback especially for warming in the Anthropocene (Table 3).”). See generally Wadhams P. (2017) *A FAREWELL TO ICE: A REPORT FROM THE ARCTIC*, Oxford University Press; and Shakhova N., Semiletov I., & Chuvilin E. (2019) *Understanding the Permafrost-Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf*, GEOSCI. 9(6): 251, 1–23.

²⁵³ Weldeab S., Schneider R. R., Yu J., & Kylander-Clark A. (2022) *Evidence for massive methane hydrate destabilization during the penultimate interglacial warming*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 119(35): 1–9, 7 (“While further studies are needed to determine the extent of methane hydrate destabilization during the weakened AMOC interval of the Eemian, the consequence of broad methane hydrate destabilization is increased atmospheric CH₄ and CO₂ concentrations. Taking age model uncertainties into consideration, during the peak in anomalously low carbon isotopes, the atmospheric CO₂ and CH₄ concentrations rose by 17 to 10 parts per million per volume and 20 parts per billion per volume, respectively (SI Appendix, Fig. S9) (49–51). Although the magnitude of this change varies between ice cores and analytical laboratories, the δ¹³C values of atmospheric CO₂ declined by 0.3 to 0.4‰ coeval with the δ¹³C anomaly recorded in the Gulf of Guinea sediment sequence (SI Appendix, Fig. S9) (50, 52), indicating that a source with a significantly negative δ¹³C signature contributed to the increase of atmospheric CO₂. Methane release

and methane oxidation due to massive methane hydrate destabilization is the likely source.”). *See also* Wang S., Foster A., Lenz E. A., Kessler J. D., Stroeve J. C., Anderson L. O., Turetsky M., Betts R., Zou S., Liu W., Boos W. R., & Hausfather Z. (2023) *Mechanisms and Impacts of Earth System Tipping Elements*, REV. GEOPHYS. 61: 1–81, 10 (“A significant time lag separates atmospheric warming due to climate change and the much longer timescales required for transport and diffusion of heat anomalies into the ocean and sediment. As sediment warming is required for methane hydrate instability, dissociation may not be initiated until centuries to millennia after the requisite warming spike (Archer, 2015; Archer et al., 2009; K. Kretschmer et al., 2015; Ruppel, 2011). For deep ocean sediments, tens of millennia might be required for the methane hydrate zone to begin appreciably warming, let alone for hydrate to begin dissociating (Archer et al., 2009; Ruppel, 2011). This factor does not preclude eventual significant release of carbon from methane hydrate, but does mean that this climate feedback occurs with a very substantial delay between commitment and realization.”).

²⁵⁴ Whiteman G., Hope C., & Wadhams P. (2013) *Vast costs of Arctic change*, NATURE 499(7459): 401–403, 401 (“We calculate that the costs of a melting Arctic will be huge, because the region is pivotal to the functioning of Earth systems such as oceans and the climate. The release of methane from thawing permafrost beneath the East Siberian Sea, off northern Russia, alone comes with an average global price tag of \$60 trillion in the absence of mitigating action — a figure comparable to the size of the world economy in 2012 (about \$70 trillion). The total cost of Arctic change will be much higher... The methane pulse will bring forward by 15–35 years the average date at which the global mean temperature rise exceeds 2°C above pre-industrial levels — to 2035 for the business-as-usual scenario and to 2040 for the low-emissions case (see ‘Arctic methane’). This will lead to an extra \$60 trillion (net present value) of mean climate-change impacts for the scenario with no mitigation, or 15% of the mean total predicted cost of climate-change impacts (about \$400 trillion). In the low-emissions case, the mean net present value of global climate-change impacts is \$82 trillion without the methane release; with the pulse, an extra \$37 trillion, or 45% is added. ... These costs remain the same irrespective of whether the methane emission is delayed by up to 20 years, kicking in at 2035 rather than 2015, or stretched out over two or three decades, rather than one. A pulse of 25 Gt of methane has half the impact of a 50 Gt pulse. The economic consequences will be distributed around the globe, but the modelling shows that about 80% of them will occur in the poorer economies of Africa, Asia and South America. ... The full impacts of a warming Arctic, including, for example, ocean acidification and altered ocean and atmospheric circulation, will be much greater than our cost estimate for methane release alone. To find out the actual cost, better models are needed to incorporate feedbacks that are not included ...”). *See generally* Wadhams P. (2017) *A FAREWELL TO ICE: A REPORT FROM THE ARCTIC*, Oxford University Press; and Shakohva N., Semiletov I., & Chuvilin E. (2019) *Understanding the Permafrost-Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf*, GEOSCI. 9(6): 251, 1–23.

²⁵⁵ Wang S., Foster A., Lenz E. A., Kessler J. D., Stroeve J. C., Anderson L. O., Turetsky M., Betts R., Zou S., Liu W., Boos W. R., & Hausfather Z. (2023) *Mechanisms and Impacts of Earth System Tipping Elements*, REV. GEOPHYS. 61: 1–81, 13 (“Early estimates of high rates of methane emissions from hydrate dissociation on the East Siberian Arctic Shelf (Shakhova et al., 2014) have been revised substantially downwards by numerous subsequent studies (Berchet et al., 2016; Thornton et al., 2016, 2020; Tohjima et al., 2020). Present-day marine methane release from Arctic hydrate dissociation is probably primarily of natural origin, resulting from the pressure decrease associated with isostatic uplift following the last glacial maximum, rather than a response to anthropogenic forcing (Wallmann et al., 2018). And in the Beaufort Sea, fossil methane possibly from hydrate emissions was observed in deeper waters but was removed, likely via oxidation, prior to atmospheric emission (Sparrow et al., 2018). ... In conclusion, while levels of warming exist beyond which large quantities of methane in hydrate deposits may eventually become destabilized, numerous physical, thermodynamic, chemical, and biological factors combine to substantially limit the rate at which this methane might escape to the atmosphere. For more moderate warming of ~2°C, methane hydrates might well exert a negligible overall impact on atmospheric temperatures. Methane hydrate dissociation would additionally take place on extremely long timescales of millennia, rather than over abrupt or fast timescales that would produce an acute warming spike. ... With all of this in mind, in relation to other candidate tipping elements covered within this review, marine methane hydrates represent a relatively lower-impact climate feedback especially for warming in the Anthropocene (Table 3).”). *See also* Malakhova V. V. & Eliseev A. V. (2024) *Subsea permafrost and*

associated methane hydrate stability zone: how long can they survive in the future?, THEOR. APPL. CLIMATOL.: 1–19, 1 (“This Earth System Model was forced by idealized scenarios of CO₂ emissions and by changes of the parameters of the Earth’s orbit ... We found that at the other shelf, permafrost disappears either before the onset of the anthropogenic emissions or during a few centuries after it. In contrast, for the middle and shallow parts of the shelf, in the CO₂-emission forced runs, the subsea permafrost survive, at least, for 5 kyr after the emission onset or even for much longer. At the same parts of the self, methane hydrate stability. Zone (MHSZ) disappears not earlier than at 3 kyr after the CO₂ emission onset. ... In general, the CO₂-induced warming in our simulations is able to enhance the pan-Arctic subsea permafrost loss severalfold during 1 kyr after the emissions onset, but it is less important for the respective MHSZ loss. The dynamics of MHSZ is largely independent on the chosen climate projection, at least for the next several thousand years.”).

²⁵⁶ Ye W., Li Y., Wen J., Zhang J., Shakhova N., Liu J., Wu M., Semiletov I., & Zhan L. (2023) *Enhanced Transport of Dissolved Methane From the Chukchi Sea to the Central Arctic*, GLOB. BIOGEOCHEM. CYCLES 37(2): 1–21, 2 (“Here, based on our integrated data set (including 420 samples) and combined with previous studies (including 238 data points) (Fenwick et al., 2017; Kudo et al., 2018; Li et al., 2017; Lorenson et al., 2016), we find that CH₄ was significantly enhanced in the Chukchi Sea and distributed northward with the shelf-break jet, providing clear evidence of increased CH₄ transport from the Chukchi Sea shelf to the central Arctic in the 2010s compared with the 1990s.”).

²⁵⁷ Wadham J. L., Hawkings J. R., Tarasov L., Gregoire L. J., Spencer R. G. M., Gutjahr M., Ridgwell A., & Kohfeld K. E. (2019) *Ice sheets matter for the global carbon cycle*, NAT. COMMUN. 10(3567): 1–17, 8 (“There are substantial uncertainties regarding the magnitude of present day sub-ice sheet CH₄ hydrate reserves because of the difficulties of accessing sediments in subglacial sedimentary basins. Global subglacial methane hydrate stocks at the present day are likely to be dominated by those in Antarctic sedimentary basins (estimated at up to 300 Pg C as methane hydrate and free gas⁹⁵). At the LGM, the global sub-ice sheet hydrate reserve could have been much larger (>500 Pg C, 20% of the present day marine hydrate stocks), with hydrate also present beneath former northern hemisphere ice sheets^{17,18,122} (see Fig. 4 for details and calculation methods). The vulnerability of Antarctic subglacial CH₄ hydrate reserves to destabilization is high because of their predicted location around the continent’s periphery in sedimentary basins where ice thinning in a warming climate is probable.”). See also Dessandier P.-A., Knies J., Plaza-Faverola A., Labrousse C., Renoult M., & Panieri G. (2021) *Ice-sheet melt drove methane emissions in the Arctic during the last two interglacials*, GEOLOGY 49(7): 799–803, 799 (“Here, we argue that based on foraminiferal isotope studies on drill holes from offshore Svalbard, methane leakage occurred upon the abrupt Eurasian ice-sheet wastage during terminations of the last (Weichselian) and penultimate (Saalian) glaciations. Progressive increase of methane emissions seems to be first recorded by depleted benthic foraminiferal $\delta^{13}\text{C}$. This is quickly followed by the precipitation of methane-derived authigenic carbonate as overgrowth inside and outside foraminiferal shells, characterized by heavy $\delta^{18}\text{O}$ and depleted $\delta^{13}\text{C}$ of both benthic and planktonic foraminifera. The similarities between the events observed over both terminations advocate a common driver for the episodic release of geological methane stocks. Our favored model is recurrent leakage of shallow gas reservoirs below the gas hydrate stability zone along the margin of western Svalbard that can be re-activated upon initial instability of the grounded, marine-based ice sheets. Analogous to this model, with the current acceleration of the Greenland ice melt, instabilities of existing methane reservoirs below and nearby the ice sheet are likely.”).

²⁵⁸ United Nations Environment Programme (2021) *EMISSIONS GAP REPORT 2021: THE HEAT IS ON – A WORLD OF CLIMATE PROMISES NOT YET DELIVERED*, 47 (“Over the last two decades, the main cause of increasing atmospheric methane is likely increasing anthropogenic emissions, with hotspot contributions from agriculture and waste in South and South-East Asia, South America and Africa, and from fossil fuels in China, the Russian Federation and the United States of America (Jackson *et al.* 2020). Emissions from natural sources may also be increasing, as wetlands warm, tropical rainfall increases and permafrost thaws.”). See also Lan X., Nisbet E. G., Dlugokencky E. J., & Michel S. E. (2021) *What do we know about the global methane budget? Results from four decades of atmospheric CH₄ observations and the way forward*, PHIL. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 1–14, 11 (“Explaining the renewed and accelerating increase in atmospheric CH₄ burden since 2007 remains challenging, and the exact causes are not yet clear. But, the observations we describe suggest that increased emissions from microbial sources are the strongest

driver, with a relatively smaller contribution from other processes, e.g., fossil fuel exploitation. A more difficult question to answer is the one posed by this special issue: is warming feeding the warming? We cannot say for certain, but we cannot rule out the possibility that climate change is increasing CH₄ emissions. The strong signals from the tropics combined with the isotopic data are consistent with increased emissions from natural wetlands, but large [interannual variability (IAV)] and inter-decadal variability in wetland drivers like precipitation make it difficult to identify small trends. Observations are needed that will help process models capture this variability. The size of the IAV illustrates the potential scope of uncontrollable near-future change and emphasizes the urgency of reducing the global methane burden by mitigating the methane emissions that we can control, from the fossil fuel and agricultural sectors.”); Peng S., Lin X., Thompson R. L., Xi Y., Liu G., Hauglustaine D., Lan X., Poulter B., Ramonet M., Saunio M., Yin Y., Zhang Z., Zheng B., & Ciais P. (2022) *Wetland emission and atmospheric sink changes explain methane growth in 2020*, NATURE 612(7940): 477–482, 481 (“In summary, our results show that an increase in wetland emissions, owing to warmer and wetter conditions over wetlands, along with decreased OH, contributed to the soaring methane concentration in 2020. The large positive MGR anomaly in 2020, partly due to wetland and other natural emissions, reminds us that the sensitivity of these emissions to interannual variation in climate has had a key role in the renewed growth of methane in the atmosphere since 2006. The wetland methane–climate feedback is poorly understood, and this study shows a high interannual sensitivity that should provide a benchmark for future coupled CH₄ emissions–climate models. We also show that the decrease in atmospheric CH₄ sinks, which resulted from a reduction of tropospheric OH owing to less NO_x emissions during the lockdowns, contributed 53 ± 10% of the MGR anomaly in 2020 relative to 2019. Therefore, the unprecedentedly high methane growth rate in 2020 was a compound event with both a reduction in the atmospheric CH₄ sink and an increase in Northern Hemisphere natural sources. With emission recovery to pre-pandemic levels in 2021, there could be less reduction in OH. The persistent high MGR anomaly in 2021 hints at mechanisms that differ from those responsible for 2020, and thus awaits an explanation.”); Qu Z., Jacob D. J., Zhang Y., Shen L., Varon D. J., Lu X., Scarpelli T., Bloom A., Worden J., & Parker R. J. (2022) *Attribution of the 2020 surge in atmospheric methane by inverse analysis of GOSAT observations*, ENVIRON. RES. LETT. 17(9): 1–8, 6 (“The inversion shows an increase in the methane growth rate from 28 Tg a⁻¹ in 2019 to 59 Tg a⁻¹ in 2020, consistent with observations. This implies a forcing on the methane budget away from a steady state by 36 Tg a⁻¹ from 2019 to 2020, 86% (82 ± 18% in the nine-member inversion ensemble) of which is from the increase in emissions between the two years and the rest is from the decrease in tropospheric OH. Changes in methane mass offset the forcing by 5 Tg a⁻¹. The global mean OH concentration decreases by 1.2% (1.6 ± 1.5%) from 2019 to 2020, which could be due to reduced NO_x emissions from COVID-19 decreases in economic activity but accounts for only a small fraction of the methane surge. We find that half of the increase in methane emissions from 2019 to 2020 is due to Africa. High precipitation and flooding in East Africa leading to increased wetland methane emissions could explain the increase. We also find a large relative increase in Canadian emissions, also apparently driven by wetlands.”); Rehder Z., Kleinen T., Kutzbach L., Stepanenko V., Langer M., & Brovkin V. (2023) *Simulated methane emissions from Arctic ponds are highly sensitive to warming*, BIOGEOSCI. 20: 2837–2855, 2838 (“Most Arctic ponds emit predominantly contemporary, recently fixed, carbon (Negandhi et al., 2013; Bouchard et al., 2015; Dean et al., 2020). However, newly-formed ice-wedge ponds might emit older carbon than the average Arctic pond. When the permafrost adjacent to the thawing ice wedge degrades, old carbon can leech from the thawed sediments into the pond fueling methanogenesis (Langer et al., 2015; Preskienis et al., 2021) and exerting a positive climatic feedback. Furthermore, the composition of the ponds’ methanogenic communities might change in response to the warming Arctic.”), 2849 (“While ponds are not hotspots of methane emissions in our study area under the current climate, our model simulations indicate that they will become stronger methane sources under further warming. We project an increase of pond methane emissions of 1.33 g CH₄ m⁻² year⁻¹ °C⁻¹.”); Kleinen T., Gromov S., Steil B., & Brovkin V. (2021) *Atmospheric methane underestimated in future climate projections*, ENVIRON. RES. LETT. 16(9): 1–14, 4 (“In the case of the low radiative forcing scenarios SSP1–1.9 and SSP1–2.6, the concentration maximum occurs at the end of the historical period and does not differ significantly between our experiments and the published scenarios. The concentration decline after that maximum, however, occurs much more slowly in our experiments, leading to higher atmospheric methane concentrations than in the published scenarios. For the moderate to high warming scenarios SSP2–4.5, SSP3–7.0 and SSP5–8.5, however, the evolution of atmospheric methane is much more dramatic. Here, maximum atmospheric concentrations become substantially higher than in the published scenarios and stay at a very high level until the end of the experiments in 3000 CE. For SSP2–4.5, the maximum in CH₄ is 50% higher than

published previously, for SSP3–7.0 it is 131% higher and for SSP5–8.5 it is 130% higher.”); and (29 November 2023) *Do rising methane levels herald a climate feedback loop?*, THE ECONOMIST (“The evidence that wetlands might be to blame comes from the type of methane being emitted. Methane is made of four atoms of hydrogen atoms and one of carbon. That carbon atom can be either the “light” isotope, with six neutrons in its nucleus, or the heavy isotope, which has seven. Methane-making bacteria find the lighter sort easier to handle. The methane they produce is therefore lighter than methane from fossil fuels or forest fires, another major source of the gas. And over the past 15 years the methane in the atmosphere has indeed become lighter. ... In 2021 a group of researchers analysed improved satellite and ground observations and concluded, in a paper published in Atmospheric Chemistry and Physics, that 35% of the post-2006 increase came from wetlands. A more recent estimate by Dr Nisbet and colleagues puts the contribution at 45%. Those may even be underestimates. One way that methane is taken out of the atmosphere is through reactions with chlorine ions over the ocean, a process that preferentially targets the lighter sort of methane. A paper published in June suggests that interactions between dust and sea spray over the Atlantic may mean there is more chlorine out there than modellers previously thought. If so, the shift towards microbial methane sources may be even more pronounced than the lightness of the methane in the atmosphere suggests.”).

²⁵⁹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 9 (“Currently available measures could reduce emissions from [the fossil-fuel, waste, and agriculture] sectors by approximately 180 Mt/yr, or as much as 45 per cent, by 2030. This is a cost-effective step required to achieve the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) 1.5° C target. According to scenarios analysed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), global methane emissions must be reduced by between 40–45 per cent by 2030 to achieve least cost-pathways that limit global warming to 1.5° C this century, alongside substantial simultaneous reductions of all climate forcers including carbon dioxide and short-lived climate pollutants. (Section 4.1)”).

²⁶⁰ United Nations Environment Programme and Climate & Clean Air Coalition (2022) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: 2030 BASELINE REPORT*, 10 (“The Global Methane Pledge targets at least a 30 per cent reduction in human-caused methane emissions below 2020 levels by 2030. Achieving the GMP target would require a decrease in annual emissions from approximately 380 million tonnes in 2020 to less than 270 million tonnes in 2030—a drop of at least 110 million tonnes. Compared to baseline methane emissions in 2030, this represents a 36% reduction in methane emissions, equivalent to at least 150 million tonne reduction, by 2030 from baseline levels.”).

²⁶¹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 10 (“The levels of methane mitigation needed to keep warming to 1.5°C will not be achieved by broader decarbonization strategies alone. The structural changes that support a transformation to a zero-carbon society found in broader strategies will only achieve about 30 per cent of the methane reductions needed over the next 30 years. Focused strategies specifically targeting methane need to be implemented to achieve sufficient methane mitigation. At the same time, without relying on future massive-scale deployment of unproven carbon removal technologies, expansion of natural gas infrastructure and usage is incompatible with keeping warming to 1.5°C. (Sections 4.1, 4.2 and 4.3)”).

For a general discussion and list of policy recommendations on how to pursue effective decarbonization, see National Academy of Sciences (2023) *ACCELERATING DECARBONIZATION IN THE UNITED STATES*.

²⁶² United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 10 (“Roughly 60 per cent, around 75 Mt/yr, of available targeted measures have low mitigation costs², and just over 50 per cent of those have negative costs – the measures pay for themselves quickly by saving money (Figure SDM2). Low-cost abatement potentials range from 60–80 per cent of the total for oil and gas, from 55–98 per cent for coal, and approximately 30–60 per cent in the waste sector. The greatest potential for negative cost abatement is in the oil and gas subsector where captured methane adds to revenue instead of being released to the atmosphere. (Section 4.2) ... Less than US\$ 600 per tonne of methane reduced, which would correspond to ~US\$ 21 per tonne of carbon dioxide equivalent if converted using the IPCC Fifth Assessment Report’s GWP₁₀₀ value of 28 that excludes carbon-cycle feedbacks.”).

²⁶³ International Energy Agency (2023) [CREDIBLE PATHWAYS TO 1.5 °C - FOUR PILLARS FOR ACTION IN THE 2020s](#), 1–15, 11 (“In the NZE Scenario, methane emissions from the energy sector fall by around 75% between 2020 and 2030 and total methane emissions from human activity fall by around 45%. The IEA’s latest update of its Global Methane Tracker found that methane emissions from oil and gas alone could be reduced by 75% with existing technologies. Around \$100 billion in total investment is needed over the period to 2030 to achieve this reduction—equivalent to less than 3% of oil and gas net income in 2022. To address methane emissions from fossil energy production and consumption, countries covering over half of global gas imports and over one-third of global gas exports released a Joint Declaration from Energy Importers and Exporters on Reducing Greenhouse Gas Emissions from Fossil Fuels at COP27 calling for minimizing flaring, methane, and CO₂ emissions across the supply chain to the fullest extent practicable.”).

²⁶⁴ Lowe M. & Lowe-Skillern R. (2021) [Find, Measure, Fix: Jobs in the U.S. Methane Emissions Mitigation Industry](#), Datu Research, 6 (“Methane emissions mitigation means jobs. A wide and steadily expanding range of skills are required, from field technicians to chemical engineers to data scientists. Interviews with firms indicate that these jobs offer upward mobility. Many firms expect to expand their workforce if new federal and/or state methane rules are put into place. Of the eight states that either have methane rules or are considering them, seven are among the top states for employee locations in the methane emissions mitigation industry, including California, Colorado, Pennsylvania, New York, Wyoming, New Mexico, and Ohio. This would suggest that employee locations are poised to grow if the federal government and/or states roll out new rules on methane emissions.”).

²⁶⁵ Example of methane mitigation technical potentials and costs include: Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) [Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model](#), ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 1–21; International Energy Agency (2021) [Methane Tracker 2021](#); United States Environmental Protection Agency (2019) [GLOBAL NON-CO₂ GREENHOUSE GAS EMISSION PROJECTIONS & MITIGATION 2015-2050](#), EPA-430-R-19-010; and DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggstad C., & Ulanov A. (2021) [CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT](#), McKinsey Sustainability.

²⁶⁶ See Solar Impulse Foundation, [Solutions Explorer](#).

²⁶⁷ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 87 (“Analysis of the technical potential to mitigate methane from four separate studies shows that for 2030, reductions of 29–57 Mt/yr could be made in the oil and gas subsector, 12–25 Mt/yr from coal mining, 29–36 Mt/yr in the waste sector and 6–9 Mt/yr from rice cultivation. Values for the livestock subsector are less consistent, ranging from 4–42 Mt/yr.”).

²⁶⁸ International Energy Agency (2021) [Curtailing Methane Emissions from Fossil Fuel Operations: Pathways to a 75% cut by 2030](#), 11–13 (“Reducing methane from oil and gas operations is particularly promising because more than 70% of emissions can be abated with existing technologies. In addition, the cost of mitigation is often lower than the market value of the gas that is captured. Based on average natural gas prices from 2017–2021, we estimate that almost 45% of oil and gas methane emissions can be avoided with measures that would come at no net cost. While new investments to abate the remaining emissions would total about USD 13 billion, those costs would be more than offset by revenues from the sale of captured methane. ... Under the Net Zero Scenario, total methane emissions from fossil fuels fall by around 75% from 2020 levels by 2030. About one-third of this drop results from overall reduction in fossil fuel consumption. Most of it depends on the accelerated deployment of mitigation measures and technologies leading to the elimination of all technically avoidable methane emissions by 2030.”); and International Energy Agency (2024) [GLOBAL METHANE TRACKER 2024](#) (“In our Net Zero Emissions by 2050 (NZE) Scenario – which sees the global energy sector achieving net zero emissions by mid-century, limiting the temperature rise to 1.5 °C – methane emissions from fossil fuel operations fall by around 75% by 2030. By that year, all fossil fuel producers have an

emissions intensity similar to the world's best operators today. Targeted measures to reduce methane emissions are necessary even as fossil fuel use begins to decline; cutting fossil fuel demand alone is not enough to achieve the deep and sustained reductions needed.”).

²⁶⁹ International Energy Agency (2024) *Global Methane Tracker 2024* (“Methane abatement in the fossil fuel industry is one of the most pragmatic and lowest cost options to reduce greenhouse gas emissions. The technologies and measures to prevent emissions are well known and have already been deployed successfully around the world. Around 40% of the 120 Mt of methane emissions from fossil fuels could be avoided at no net cost, based on average energy prices in 2023. This is because the required outlays for abatement measures are less than the market value of the additional methane gas captured and sold or used.”). *See also* International Energy Agency (2021) *METHANE TRACKER 2021* (“We estimate that it is technically possible to avoid around three quarters of today’s methane emissions from global oil and gas operations. Moreover, a significant share of these could be avoided at no net cost, as the cost of the abatement measure is less than the market value of the additional gas that is captured. Natural gas prices around the world affect the share of global emissions that can be abated at no net cost; this share is typically around 40-50%, although the plunge in natural gas prices in 2020 temporarily brought this down to around 10%.”).

²⁷⁰ International Energy Agency (2022) *GLOBAL METHANE TRACKER 2022*, 4–5 (“Methane leaks in 2021 from fossil fuel operations, if captured and marketed, would have made an additional 180 billion cubic metres of gas available to the market, an amount similar to all the gas used in Europe’s power sector. This would have been comfortably enough to ease today’s price pressures.”).

²⁷¹ International Energy Agency (2024) *GLOBAL METHANE TRACKER 2024* (“The methane emissions intensity of oil and gas production varies widely. The best-performing countries score more than 100 times better than the worst. Norway and the Netherlands have the lowest emissions intensities. Countries in the Middle East, such as Saudi Arabia and the United Arab Emirates, also have relatively low emissions intensities. Turkmenistan and Venezuela have the highest. High emissions intensities are not inevitable; they can be addressed cost-effectively through a combination of high operational standards, policy action and technology deployment. On all these fronts, best practices are well established.”).

²⁷² International Energy Agency (2022) *GLOBAL METHANE TRACKER 2022*, 5 (“The best companies and countries are showing what can be done to reduce emissions from oil and gas operations, but the intensity of methane emissions (emissions per unit of production) ranges widely. The best performing countries are more than 100 times better than the worst. Norway and the Netherlands have the lowest emissions intensities in our updated Tracker, and countries in the Middle East such as Saudi Arabia and the United Arab Emirates also have relatively low emissions intensities; Turkmenistan and Venezuela have the highest. If all producing countries were to match Norway’s emissions intensity, global methane emissions from oil and gas operations would fall by more than 90%.”), 24 (“The methane emissions intensity of oil and gas operations varies greatly across countries, with the best performing countries having an emission intensity over 100 times lower than the worst performers. High emission intensities from oil and gas operations are not inevitable; they are an “above-ground issue” that can be addressed cost-effectively through a well-established combination of high operational standards, firm policy action and technology deployment.”). *See also* Ocko I. B., Sun T., Shindell D., Oppenheimer M., Hristov A. N., Pacala S.W., Mauzerall D. L., Xu Y., & Hamburg S. P. (2021) *Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming*, *ENVIRON. RES. LETT.* 16(5): 1–11, 5 (“For oil and gas, we supplement the IEA (2017) abatement potential of 75% below current levels with voluntary company commitments of capping upstream leakage. This results in an 83% below 2030 level abatement potential rather than 77% without industry targets.”).

²⁷³ International Energy Agency (2023) *EMISSIONS FROM OIL AND GAS OPERATIONS IN NET ZERO TRANSITIONS: A WORLD ENERGY OUTLOOK SPECIAL REPORT ON THE OIL AND GAS INDUSTRY AND COP28*, 16 (“We estimate that the oil and gas industry is responsible for 80 Mt of methane emissions, equivalent to 2.4 Gt CO₂-eq. There is a wide variety of well-known technologies and measures available to reduce methane emissions from operations, and in the NZE Scenario emissions fall by over 60 Mt – a 75% reduction – to 2030. One-third of this drop occurs because of

reductions in oil and gas use to 2030 in the NZE Scenario, with the remaining two-thirds stemming from widespread efforts across all parts of the supply chain to reduce the emissions intensity of oil and gas operations (the methane emissions intensity of oil and gas production falls by more than 70% to 2030). By 2030, all oil and gas producers have an emissions intensity similar to the world’s best operators today.”).

²⁷⁴ International Energy Agency (2023) [EMISSIONS FROM OIL AND GAS OPERATIONS IN NET ZERO TRANSITIONS: A WORLD ENERGY OUTLOOK SPECIAL REPORT ON THE OIL AND GAS INDUSTRY AND COP28](#), 16 (“We estimate that the oil and gas industry is responsible for 80 Mt of methane emissions, equivalent to 2.4 Gt CO₂-eq. There is a wide variety of well-known technologies and measures available to reduce methane emissions from operations, and in the NZE Scenario emissions fall by over 60 Mt – a 75% reduction – to 2030. One-third of this drop occurs because of reductions in oil and gas use to 2030 in the NZE Scenario, with the remaining two-thirds stemming from widespread efforts across all parts of the supply chain to reduce the emissions intensity of oil and gas operations (the methane emissions intensity of oil and gas production falls by more than 70% to 2030). By 2030, all oil and gas producers have an emissions intensity similar to the world’s best operators today.”).

²⁷⁵ International Energy Agency (2023) [EMISSIONS FROM OIL AND GAS OPERATIONS IN NET ZERO TRANSITIONS: A WORLD ENERGY OUTLOOK SPECIAL REPORT ON THE OIL AND GAS INDUSTRY AND COP28](#), 16 (“We estimate that the oil and gas industry is responsible for 80 Mt of methane emissions, equivalent to 2.4 Gt CO₂-eq. There is a wide variety of well-known technologies and measures available to reduce methane emissions from operations, and in the NZE Scenario emissions fall by over 60 Mt – a 75% reduction – to 2030. One-third of this drop occurs because of reductions in oil and gas use to 2030 in the NZE Scenario, with the remaining two-thirds stemming from widespread efforts across all parts of the supply chain to reduce the emissions intensity of oil and gas operations (the methane emissions intensity of oil and gas production falls by more than 70% to 2030). By 2030, all oil and gas producers have an emissions intensity similar to the world’s best operators today.”).

²⁷⁶ Global Climate and Health Alliance (2023) [MITIGATING METHANE FROM THE ENERGY SECTOR](#), 7 (“Targeted technical solutions to reduce methane emissions from fossil fuels can deliver multiple human health benefits. First, they can limit tropospheric ozone, a harmful air pollutant created by methane emitted from sources such as oil and natural gas extraction, production, combustion, as well as coal mining. Methane-driven tropospheric ozone can lead to adverse health outcomes, such as cardiovascular diseases, asthma, respiratory illness, and premature death, resulting in roughly 1 million premature deaths yearly, as discussed in the Overview Report. Furthermore, reducing methane can avoid health impacts from exposure to air pollutants co-emitted with methane, including: NO_x, which is linked to asthma incidences and hospitalization, respiratory illnesses, cardiovascular disease mortality; PM_{2.5}, which can lead to the same adverse health outcomes as NO_x, as well as premature birth, lung cancer, and low birth weight; Hydrogen sulfide (H₂S), which can cause eye and respiratory system irritations, as well as apnea, coma, convulsions, dizziness, headache, weakness, irritability, insomnia, and upset stomach. BTEX, which can increase cancer risks. Finally, reducing methane can avoid safety risks from explosions and fires caused by methane leaks in natural gas pipelines or high methane concentrations in coal mines.”).

²⁷⁷ Clean Air Task Force, [Oil and Gas Mitigation Program](#) (last visited 5 February 2023) (“Fortunately, most leaks are straightforward to repair (and [fixing leaks is paid for by the value of the gas that is saved by repairing them](#)). Further, finding leaks has become efficient with modern technology. The standard approach today is to use special cameras that can detect infrared light (think of night-vision goggles) which are tuned to make methane, which is invisible to our eyes, visible. They allow inspectors to directly image leaking gas in real time, with the ability to inspect entire components (not just connections and other areas most likely to leak) and pinpoint the precise source, making repair more straightforward. And, technology promises to make this process [even more efficient \(and cheaper\) over the coming years](#). These technologies can be utilized to reduce harmful leak emissions, by using regular inspections as the lynchpin of rigorous “leak detection and repair” (LDAR) programs. These programs require operators to regularly survey all of their facilities for leaks and improper emissions, and repair all the leaks they identify in a reasonable time. For example, [California](#) requires operators to survey all sites four times a year. [Colorado](#) has a

different approach, requiring operators of the largest sites to survey them monthly, but requiring less frequent inspections for site with smaller potential emissions.”).

²⁷⁸ Clean Air Task Force, *Oil and Gas Mitigation Program* (last visited 5 February 2023) (Listing pneumatic equipment venting, compressor seal venting, tank venting, well completion venting, oil well venting and flaring, and dehydrator venting as sources of the “biggest mitigation opportunities.”).

²⁷⁹ International Energy Agency (2021) *Methane Tracker 2021* (“Many pieces of equipment in the oil and natural gas value chains emit natural gas in their regular course of operation, including valves, and gas-driven pneumatic controllers and pumps. Retrofitting these devices or replacing them with lower-emitting versions can reduce emissions.”). See also Dreyfus G. & Ferris T. (2023) *Metrics and Measurement of Methane Emissions*, in *INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND CARBON SEQUESTRATION MONITORING*, China Council for International Cooperation on Environment and Development, 29 (“Leak detection and repair (LDAR) is an essential component of monitoring and reducing methane emissions”); and United Nations Economic Commission for Europe (2019) *BEST PRACTICE GUIDANCE FOR EFFECTIVE METHANE MANAGEMENT IN THE OIL AND GAS SECTOR*, xiii (“Major gaps exist in information about emissions originating from the oil and gas sector. Reported estimates often diverge by 10% or more, and revisions of national inventory reports from some of the largest emitters highlight the lack of reliable data. Methane emissions cannot be quantified through continuous measurement alone. Emissions originate from a vast number of sources and monitoring each source would be prohibitively expensive. Emission detection and measurement must complement calculation-based approaches that quantify emissions by multiplying activity data by relevant emission factors. Estimates will be more reliable if they reflect field and country specific circumstances, so empirical studies of emissions and emission intensities are a key to improved quantification. Detection and measurement consist of top-down methods that measure concentrations of methane in the atmosphere and bottom-up methods involving on-site quantification of emissions from individual sources. The technology for both top-down and bottom-up approaches is improving and the choice of approach depends on the objective. Best practices for top-down or bottom-up detection and measurement and for calculation-based methods depend on the objectives and the manner of reporting.”).

²⁸⁰ International Energy Agency (2021) *Methane Tracker 2021* (Listing replacement of existing devices, installing new emissions control devices, leak detection and repair (LDAR), and alternative and innovative technologies as the four “main mitigation measures.”). See also Clean Air Task Force, *Oil and Gas Mitigation Program* (last visited 5 February 2023) (“Fortunately, most leaks are straightforward to repair (and [fixing leaks is paid for by the value of the gas that is saved by repairing them](#)). Further, finding leaks has become efficient with modern technology. The standard approach today is to use special cameras that can detect infrared light (think of night-vision goggles) which are tuned to make methane, which is invisible to our eyes, visible. They allow inspectors to directly image leaking gas in real time, with the ability to inspect entire components (not just connections and other areas most likely to leak) and pinpoint the precise source, making repair more straightforward. And, technology promises to make this process [even more efficient \(and cheaper\) over the coming years](#). These technologies can be utilized to reduce harmful leak emissions, by using regular inspections as the lynchpin of rigorous “leak detection and repair” (LDAR) programs. These programs require operators to regularly survey all of their facilities for leaks and improper emissions, and repair all the leaks they identify in a reasonable time. For example, [California](#) requires operators to survey all sites four times a year. [Colorado](#) has a different approach, requiring operators of the largest sites to survey them monthly, but requiring less frequent inspections for site with smaller potential emissions.”).

²⁸¹ Clean Air Task Force, *Oil and Gas Mitigation Program* (last visited 5 February 2023) (“Venting is even more harmful than flaring, since methane warms the climate so powerfully, and VOC and toxic pollutants are released unabated. Venting of this gas should be prohibited in all cases as an absolutely unnecessary source of harmful air pollution. There are numerous low-cost (and usually profitable) ways to utilize natural gas from oil wells. Flaring should be a last resort: only in the most extreme cases should oil producers be allowed to flare gas, and it should be strictly a temporary measure. Rules prohibiting venting of natural gas can easily reduce emissions by 95%.”).

²⁸² World Bank (5 May 2022) *Global Flaring and Venting Regulations* (“Flared and vented gas can replace more-polluting fuels in local communities, cutting emissions and expanding energy access for the poorest. In 2021, an estimated 144 billion cubic meters of associated gas were wastefully flared around the world. If captured and put to productive purposes, this gas could power the entirety of sub-Saharan Africa.”).

²⁸³ Curry T., Hellgren L., Russell P., & Fraioli S. (2022) *BENCHMARKING METHANE AND OTHER GHG EMISSIONS OF OIL AND NATURAL GAS PRODUCTION IN THE UNITED STATES*, Ceres & Clean Air Task Force, 3 (“Of 303 oil and natural gas producers with reported data, the top 100 oil and gas producers by total energy production were responsible for approximately 74% and 77%, respectively, of total reported methane and GHG emissions in 2020. While most top-100 producers are also among the top 100 emitters, production rank does not correspond to emissions rank. The methane emissions intensity of natural gas production and the GHG emissions intensity of oil and gas production varies dramatically across producers. Natural gas producers in the highest quartile of methane emissions intensity have an average emissions intensity that is nearly 24 times higher than natural gas producers in the lowest quartile of methane emissions intensity. Oil and gas producers in the highest quartile of GHG emissions intensity have an average emissions intensity that is more than 13 times higher than oil and gas producers in the lowest quartile.”); *discussed in* Clean Air Task Force (14 July 2022) *Greenhouse gas emissions vary dramatically across U.S. oil and gas companies, according to updated analysis*, News and Media; and Budryk Z. (14 July 2022) *Four companies are top sources of US greenhouse gas, methane emissions: report*, THE HILL.

²⁸⁴ Curry T., Hellgren L., Russell P., & Fraioli S. (2022) *BENCHMARKING METHANE AND OTHER GHG EMISSIONS OF OIL AND NATURAL GAS PRODUCTION IN THE UNITED STATES*, Ceres & Clean Air Task Force, 3 (“Pneumatic controllers were the largest source of total reported production-segment methane emissions, making up 62% of total reported methane emissions. • Fuel combustion equipment, such as engines and heaters, were the largest source of total reported production-segment CO₂ emissions, responsible for 58% of total reported CO₂ emissions. In oil-heavy basins, associated gas venting and flaring can be a significant contributor to GHG emissions. In the Williston basin, for example, this source is responsible for 59% of total GHG emissions. In gas-heavy basins, associated gas is limited or non-existent; for example, there was no reported associated gas venting and flaring in the Appalachian basin. Across all basins, associated gas venting and flaring was responsible for 14% of total reported onshore production segment GHG emissions.”).

²⁸⁵ United Nations Environment Programme (24 November 2020) *Oil and Gas Industry commits to new framework to monitor, report and reduce methane emissions*, Press Release (“Crucially, the OGMP 2.0 includes not only a company’s own operations, but also the many joint ventures responsible for a substantial share of their production. The OGMP 2.0 framework applies to the full oil and gas value chain, not only upstream production, but also midstream transportation and downstream processing and refining – areas with substantial emissions potential that are often left out of reporting today.... In order to support the realization of global climate targets, OGMP 2.0 aims to deliver a 45 per cent reduction in the industry’s methane emissions by 2025, and a 60-75 per cent reduction by 2030.”).

²⁸⁶ World Bank (5 December 2023) *GGFR to evolve to the Global Flaring & Methane Reduction Partnership* (“GFMR will establish eligibility criteria so that support drives long term emissions reduction projects and initiatives. For example, access to project development and financing support through GFMR will be subject to a commitment to: measure and report emissions through the Oil and Gas Methane Partnership 2.0 framework, achieve near-zero absolute methane emissions by 2030 by reducing methane intensity to below 0.2%, and achieve zero routine flaring by 2030.”).

²⁸⁷ Proville J., Roberts K. A., Peltz A., Watkins L., Trask E., & Wiersma D. (2022) *The demographic characteristics of populations living near oil and gas wells in the USA*, POPUL. ENVIRON. 44: 1–14, 10 (“These results underscore the degree to which the US population and oil and gas production are intertwined. Over 18 million people live within one mile of wells. Many of these consist of marginalized groups (Hispanic: 3.3 m; Black: 1.8 m; Asian: 0.7 m; Native American: 0.5 m; below the poverty line: 2.9 m; over 64 years old: 2.7 m; under 5 years old: 1.2 m). From a relative standpoint, at a national aggregated scale, most population groups are found to be less prevalent near wells than their county-level controls. The exceptions to this are Native Americans, Whites, people over 64 years old, and people with

less than a high school degree. For these populations, we find a respective 25.0%, 9.5%, 6.6%, and 46.6% higher prevalence living within one mile of wells than controls.”), 11 (“Another important policy aspect for exploration in subsequent research is the relationship between employment and populations living near wells. Our results highlight widespread clusters of high unemployment near wells 4–12 times the national average (Online Resource 3).”); *discussed in* Proville J. & Roberts K. (21 June 2022) *Creating data to support communities on the front lines of oil and gas production in the US*, ENVIRONMENTAL DEFENSE FUND.

²⁸⁸ Raimi D., Nerurkar N., & Bordoff J. (2020) *GREEN STIMULUS FOR OIL AND GAS WORKERS: CONSIDERING A MAJOR FEDERAL EFFORT TO PLUG ORPHANED AND ABANDONED WELLS*, Columbia School of International and Public Affairs Center on Global Energy Policy & Resources for the Future, 20 (“A large federal effort to plug orphaned and abandoned oil and gas wells has the potential to provide tens of thousands of jobs—potentially up to 120,000. These efforts would reduce local air pollution, safety risks, and greenhouse gas emissions at a cost of \$67 to \$170 per ton of CO₂-equivalent, well within the range of other policy options. These costs are somewhat uncertain due to limited data on methane emissions from abandoned wells and potential changes to the future costs of carrying out such a program.”).

²⁸⁹ Alvarez R. A., *et al.* (2018) *Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain*, SCIENCE 361(6398): 186–188, 186 (“Methane emissions from the U.S. oil and natural gas supply chain were estimated by using ground-based, facility-scale measurements and validated with aircraft observations in areas accounting for ~30% of U.S. gas production. When scaled up nationally, our facility-based estimate of 2015 supply chain emissions is 13 ± 2 teragrams per year, equivalent to 2.3% of gross U.S. gas production. This value is ~60% higher than the U.S. Environmental Protection Agency inventory estimate, likely because existing inventory methods miss emissions released during abnormal operating conditions. Methane emissions of this magnitude, per unit of natural gas consumed, produce radiative forcing over a 20-year time horizon comparable to the CO₂ from natural gas combustion. Substantial emission reductions are feasible through rapid detection of the root causes of high emissions and deployment of less failure-prone systems.”).

²⁹⁰ Chen Y., Sherwin E. D., Berman E. S. F., Jones B. B., Gordon M. P., Wetherley E. B., Kort E. A., & Brandt A. R. (2022) *Quantifying Regional Methane Emissions in the New Mexico Permian Basin with a Comprehensive Aerial Survey*, ENVIRON. SCI. TECHNOL. 56(7): 4317–4323, 4321 (“Importance of Large Sample Size and Direct Measurement. Compared to an EPA GHGI estimate aligned to our study area and time period (Figure 4a), this study suggests total methane emissions from upstream and midstream O&G activities in the New Mexico Permian to be 6.5 (+2.4/–2.3) times larger. It is important to explore further a key strength of our method compared to prior bottom-up studies: very large study sample size.”).

²⁹¹ Sadavarte P., Pandey S., Maasackers J. D., Lorente A., Borsdorff T., van der Gon H. D., Houweling S., & Aben I. (2021) *Methane Emissions from Super-emitting Coal Mines in Australia quantified using TROPOMI Satellite Observations*, ENVIRON. SCI. TECHNOL. 55(24): 16537–16580, 16537 (“Our results indicate that for two of the three locations, our satellite-based estimates are significantly higher than reported to the Australian government. Most remarkably, 40% of the quantified emission came from a single surface mine (Hail Creek) located in a methane-rich coal basin.”); *discussed in* Clark A. (29 November 2021) *These Australian Coal Mines are Methane Super-Emitters*, BLOOMBERG GREEN.

²⁹² Lauvaux T., Giron C., Mazzolini M., d’Aspremont A., Duren R., Cusworth D., Shindell D., & Ciais P. (2022) *Global assessment of oil and gas methane ultra-emitters*, SCIENCE 375(6580): 557–561, 557 (“Ultra-emitters are primarily detected over the largest O&G basins throughout the world. With a total contribution equivalent to 8 to 12% (~8 million metric tons of methane per year) of the global O&G production methane emissions, mitigation of ultra-emitters is largely achievable at low costs and would lead to robust net benefits in billions of US dollars for the six major O&G-producing countries when considering societal costs of methane.”).

²⁹³ International Energy Agency (2022) [GLOBAL METHANE TRACKER 2022](#), 6 (“Globally, our analysis finds that methane emissions from the energy sector are about 70% greater than the sum of estimates submitted by national governments.”), 16 (“Accounting for the level of satellite coverage, very large emitting events detected by satellite are estimated to have been responsible for around 3.5 Mt of emissions from oil and gas operations in 2021 (6% of our estimate of oil and gas emissions in the 15 countries where events were detected).”).

²⁹⁴ Rocky Mountain Institute, *Profiling Supply Chain Emissions* (last visited 5 February 2023) (“Russian Federation Astrakhanskoye Total Emissions Intensity 1,060 kg CO₂ eq./barrel oil equivalent; Turkmenistan South Caspian Basin Total Emissions Intensity 1,010 kg CO₂ eq./barrel oil equivalent; United States Permian TX Total Emissions Intensity 908 kg CO₂ eq./barrel oil equivalent”). See also Malik N. S. (23 June 2022) *World’s Dirtiest Oil and Gas Fields Are in Russia, Turkmenistan and Texas*, BLOOMBERG (Graph, “The Worst Offenders”); and Gordon D., Koomey J., Brandt A., & Bergerson J. (2022) *KNOW YOUR OIL AND GAS: GENERATING CLIMATE INTELLIGENCE TO CUT PETROLEUM INDUSTRY EMISSIONS*, Rocky Mountain Institute.

²⁹⁵ Dreyfus G. & Ferris T. (2023) *Metrics and Measurement of Methane Emissions*, in [INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND CARBON SEQUESTRATION MONITORING](#), China Council for International Cooperation on Environment and Development, 32 (“Direct measurement and verification are essential to accurate and credible emissions quantification. A key challenge in the methane monitoring space in the O&G sector is integrating different measurement and monitoring techniques and approaches to provide accurate, comprehensive, and timely quantification of emissions with source attribution. Multiple research efforts are underway to develop methodologies for integrating bottom-up and top-down approaches to address this challenge (e.g., Energy Emissions Modeling and Data Lab, Veritas). In June, MiQ-Highwood released an index for integrating inventory and direct measurement data for national-level emissions intensity quantification.”). See also Tibrewal K., et al. (2024) *Assessment of methane emissions from oil, gas and coal sectors across inventories and atmospheric inversions*, COMMUN. EARTH ENVIRON. 5: 1–12, 1 (“Larger disagreement in emissions exists for the oil/gas sector across the inventories compared to coal, arising mostly from disparate data sources for emission factors. Moreover, emissions reported to the United Nations Framework Convention on Climate Change are lower than other bottom-up and inversion estimates, with many countries lacking reporting in the past decades.”), 8 (“Overall, total fossil emissions averaged over 2011–2020 from bottom-up inventories is within the range estimated by atmospheric inversions for countries examined here. Disagreements largely arise from the oil and gas sector, in both emissions magnitudes averaged over the last decade (2011–2020) and trends from 2000 to 2020. Disagreements exist not only between estimates from bottom-up inventories and inversions but also among the various bottom-up inventories. For Russia, Kazakhstan, Iran and countries under Arabian Peninsula, the spread of the bottomup inventories is larger than that of atmospheric inversions. Given the large contribution from fossil sectors to global methane emissions, using a single inventory may overestimate or underestimate the evaluation of future emissions reductions under methane pledge.”).

²⁹⁶ Shen L., Jacob D. J., Gautam R., Omara M., Scarpelli T. R., Lorente A., Zavala-Araiza D., Lu X., Chen Z., & Lin J. (2023) *National quantifications of methane emissions from fuel exploitation using high resolution inversions of satellite observations*, NAT. COMMUN. 14(4948): 1–9, 1 (“We find global emissions of 62.7 ± 11.5 (2 σ)Tg a⁻¹ for oil-gas and 32.7 ± 5.2 Tg a⁻¹ for coal. Oil-gas emissions are 30% higher than the global total from UNFCCC reports, mainly due to under-reporting by the four largest emitters including the US, Russia, Venezuela, and Turkmenistan. Eight countries have methane emission intensities from the oil-gas sector exceeding 5% of their gas production (20% for Venezuela, Iraq, and Angola), and lowering these intensities to the global average level of 2.4% would reduce global oil-gas emissions by 11 Tg a⁻¹ or 18%.”).

²⁹⁷ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 87 (“Analysis of the technical potential to mitigate methane from four separate studies shows that for 2030, reductions of 29–57 Mt/yr could be made in the oil and gas subsector, 12–25 Mt/yr from coal mining, 29–36 Mt/yr in the waste sector and 6–9 Mt/yr from rice cultivation. Values for the livestock subsector are less consistent, ranging from 4–42 Mt/yr.”).

²⁹⁸ Gordon D., Reuland F., Jacob D. J., Worden J. R., Shindell D., & Dyson M. (2023) *Evaluating net life-cycle greenhouse gas emissions intensities from gas and coal at varying methane leakage rates*, ENVIRON. RES. LETT. 18(8): 1–10, 2 (“Methane can be emitted from both coal and gas operations, including coal mines and conventional and unconventional gas systems. Unconventional gas includes coalbed methane (CBM), a production method that taps coal seams. Coal mine methane (CMM) is attributed to coal production systems, while leakage from CBM is attributable to gas supply chains.”). For best practice on managing and mitigating coal mine methane, see United Nations Economic Commission for Europe (2021) [BEST PRACTICE GUIDANCE FOR EFFECTIVE MANAGEMENT OF COAL MINE METHANE AT NATIONAL LEVEL](#).

²⁹⁹ Gordon D., Reuland F., Jacob D. J., Worden J. R., Shindell D., & Dyson M. (2023) *Evaluating net life-cycle greenhouse gas emissions intensities from gas and coal at varying methane leakage rates*, ENVIRON. RES. LETT. 18(8): 1–10, 2 (“Methane can be emitted from both coal and gas operations, including coal mines and conventional and unconventional gas systems. Unconventional gas includes coalbed methane (CBM), a production method that taps coal seams. Coal mine methane (CMM) is attributed to coal production systems, while leakage from CBM is attributable to gas supply chains.”).

³⁰⁰ International Energy Agency (2022) [GLOBAL METHANE TRACKER 2022](#), 29–30 (“In the IEA’s Net Zero Emissions by 2050 Scenario, coal use drops by 55% from 2020 to 2030, and by almost 90% by 2050. This decline would significantly cut methane emissions from coal mines as well as emissions of CO₂ and other air pollutants; emissions reductions would be even larger if concentrated on the worst-performing coal assets. For example, removing the worst-performing quartile of production would remove around 25 Mt of methane while removing the best performing quartile would only remove about 4 Mt.”).

³⁰¹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 107 (“Coal mining: pre-mining degasification; air methane oxidation with improved ventilation.”). See also DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggstad C., & Ulanov A. (2021) [CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT](#), McKinsey Sustainability, 22 (“Levers such as full ventilation and degasification of underground mines are standard coal mine methane (CMM) abatement technology but would likely see adoption rates of only 0.5 to 1.0 percent by 2030 and 2 to 4 percent by 2050. Other levers—such as ventilation air methane (VAM) capture and utilization, capture of abandoned mine gas, degasification of surface mines, and predrainage of surface mine—are less technically challenging but are expensive. They could see 2 to 16 percent adoption rates in 2030, growing to 20 to 30 percent adoption rates by 2050.”); and United States Environmental Protection Agency (2019) [GLOBAL NON-CO₂ GREENHOUSE GAS EMISSION PROJECTIONS & MITIGATION 2015-2050](#), EPA-430-R-19-010, 14 (“In 2030, VAM oxidation is the leading emission abatement measure, but using degasification for power generation presents the largest abatement potential at prices below \$0/tCO₂e. The two technologies combined contribute 90% of potential abatement in 2030.”).

³⁰² DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggstad C., & Ulanov A. (2021) [CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT](#), McKinsey Sustainability, 22 (“Levers such as full ventilation and degasification of underground mines are standard coal mine methane (CMM) abatement technology but would likely see adoption rates of only 0.5 to 1.0 percent by 2030 and 2 to 4 percent by 2050. Other levers—such as ventilation air methane (VAM) capture and utilization, capture of abandoned mine gas, degasification of surface mines, and predrainage of surface mine—are less technically challenging but are expensive. They could see 2 to 16 percent adoption rates in 2030, growing to 20 to 30 percent adoption rates by 2050.”). See also United States Environmental Protection Agency (2019) [GLOBAL NON-CO₂ GREENHOUSE GAS EMISSION PROJECTIONS & MITIGATION 2015-2050](#), EPA-430-R-19-010, 15 (“In 2030, the top 3 mitigation technologies globally are the use of stand-alone VAM, degasification for power generation, and degasification for pipeline injection. Using stand-alone VAM can abate up to 443 MtCO₂e (76% of coal mining’s total abatement potential), although it is one of the most expensive abatement options in coal mining because of three key factors: (1) the equipment itself is large and costly; (2) there is no revenue source; and (3) only a handful of

technologies have been demonstrated at a commercial scale and, as such, economies of scale in production have not been realized. Technology improvements have the potential to reduce the costs of VAM oxidation technology, making more of the potential abatement economically feasible for mine operators.”).

³⁰³ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), Table 4.1 (“Coal mining: flooding abandoned mines.”).

³⁰⁴ United Nations Economic Commission for Europe (2019) [BEST PRACTICE GUIDANCE FOR EFFECTIVE METHANE RECOVERY AND USE FROM ABANDONED COAL MINES](#), ECE Energy Series No. 64, 3 (“Technologies and management practices allow methane from abandoned mines to be extracted, providing significant environmental, economic, social and public safety benefits. The methods for extracting gas from abandoned mines differ from those employed to capture and recover gas from working mines. Once a mine is sealed from the atmosphere, gas from all underground sources becomes potentially available for extraction at a single production location. Methane concentrations recovered from a well-sealed former gassy mine typically range from 15% to 90%, and with no oxygen. The other major gaseous components may be nitrogen, including de-oxygenated air, and carbon dioxide. Low concentrations of carbon monoxide and trace hydrocarbons such as ethane are sometimes present.”).

³⁰⁵ United Nations Economic Commission for Europe. (2019) [BEST PRACTICE GUIDANCE FOR EFFECTIVE METHANE RECOVERY AND USE FROM ABANDONED COAL MINES](#), iii (“Closed mines can provide a small but significant opportunity to exploit a clean energy resource, known as Abandoned Mine Methane (AMM), that can be extracted and used. AMM capture and use offers many benefits, such as improved safety, air quality and health, energy supply and environmental performance. Technology exists that can recover methane from abandoned coal mines.”).

³⁰⁶ Zhu R., Khanna N., Gordon J., Dai F., & Lin J. (2023) [ABANDONED COAL MINE METHANE REDUCTION: LESSONS FROM THE UNITED STATES](#), California-China Climate Institute, 18 (“AMM can explode, posing hazards to residential and commercial buildings. AMM is also a precursor of air pollutants including volatile organic compounds, benzene (a carcinogen), and ozone. Mitigating AMM is therefore an important component of addressing health and safety issues on lands around abandoned coal mines, known as “abandoned mine lands” (AML).”). Note that this report focuses on U.S. federal and state examples of Abandoned Coal Mine Methane Regulation. For the Biden Administration’s announcement of \$725 million to fund the reclaiming of abandoned coal mine lands, as part of a broader total of \$11.3 billion in abandoned mine land (AML) funding being provided over 15 years, see United States Department of the Interior (1 June 2023) [Biden-Harris Administration Announces Availability of \\$725 Million from Investing in America Agenda to Clean Up Legacy Pollution](#), Press Release (“The Department of the Interior today announced that nearly \$725 million from President Biden’s Bipartisan Infrastructure Law is available to 22 states and the Navajo Nation to create good-paying jobs and catalyze economic opportunity by reclaiming abandoned coal mine lands. The law provides a total of \$11.3 billion in abandoned mine land (AML) funding over 15 years, which will help communities clean up dangerous environmental conditions and pollution caused by past coal mining. This funding is expected to enable reclamation of the majority of current inventoried abandoned mine lands in this country.”).

³⁰⁷ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 91 (“In addition, a transition away from fossil fuels could still leave abandoned infrastructure. There were more than 3.2 million abandoned oil and gas wells in the United States alone in 2018, which emit ~0.3 Mt/yr of methane according to the US EPA (US EPA report to UNFCCC; 2020). That agency acknowledges that this figure is likely a large underestimate due to incomplete data. Similarly, The International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) estimates that 2020 emissions of methane from abandoned coal mines around the world are just over 3.5 Mt/yr (Höglund-Isaksson 2020).”).

³⁰⁸ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 14 (“Additional measures, which reduce methane emissions but do not primarily target methane, could substantially contribute to methane mitigation over the

next few decades. Examples include decarbonization measures – such as a transition to renewable energy and economy-wide energy efficiency improvements. Various implementation levers exist. Emissions pricing, for example, can be an effective policy which could incentivize substantial methane mitigation and support the broad application of methane reduction measures. A rising global tax on methane emissions starting at around US\$ 800 per tonne could, for instance, reduce methane emissions by as much as 75 per cent by 2050. (Section 4.3)”

³⁰⁹ The higher boundary of the calculation comes from the following report’s value of 1,419 MtCO₂e using a 100 year GWP value of 27.9 for livestock. See Global Methane Hub & Climateworks Foundation (2023) *THE GLOBAL INNOVATION NEEDS ASSESSMENTS: FOOD SYSTEM METHANE*, 6 (Table on Methane abatement by food system sector). See also United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 87 (“Analysis of the technical potential to mitigate methane from four separate studies shows that for 2030, reductions of 29–57 Mt/yr could be made in the oil and gas subsector, 12–25 Mt/yr from coal mining, 29–36 Mt/yr in the waste sector and 6–9 Mt/yr from rice cultivation. Values for the livestock subsector are less consistent, ranging from 4–42 Mt/yr.”).

³¹⁰ The Global Methane Pledge calls for at least a 30% reduction in global anthropogenic methane emissions compared to 2020 levels by 2030, which translates into an annual reduction of 150 Mt in 2030 to be consistent with scenarios limiting warming to 1.5 °C with limited overshoot. Using the mitigation potential for livestock and rice (4–50 MtCH₄/yr and 6–9 MtCH₄/yr, respectively) results in a 7–39% progression towards the GMP target. See United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2022) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: 2030 BASELINE REPORT*, 10 (Figure ES6: “Illustrative example of the GMP-consistent methane emissions reduction pathway to 2030. Mitigation in all three main anthropogenic sectors is required to achieve the GMP target in 2030 with slightly more than half of the mitigation expected to come from the fossil fuels sector.”).

³¹¹ Global Methane Hub & Climateworks Foundation (2023) *THE GLOBAL INNOVATION NEEDS ASSESSMENTS: FOOD SYSTEM METHANE*, 6 (“Food system innovations analyzed in this GINAs study can help meet climate targets by reducing food system methane in line with the Global Methane Pledge. This study analyzes abatement potential and benefits of innovations across the food system value chain, including low-cost or cost-saving productivity measures as well as direct mitigation and diet shift measures, and finds food system methane innovations could abate up to 2 GtCO₂e in 2030 and 5.6 GtCO₂e in 2050 (reducing methane emissions in food system sectors in 25% by 2030 and up to 75% by 2050).”).

³¹² Note that this analysis assumes dietary patterns will remain constant, however several other studies find that dietary patterns are expected to experience many changes as population grows and demand for protein increases along with GDP per capita: Ivanovich C. C., Sun T., Gordon D. R., & Ocko I. B. (2023) *Future warming from global food consumption*, NAT. CLIM. CHANGE 13(3): 297–302, 297 (“We find that global food consumption alone could add nearly 1 °C to warming by 2100.”); 298 (“Methane is responsible for the majority of the projected increase, accounting for nearly 60% of the warming associated with food consumption by the end of the century.”).

³¹³ Shroff J. (28 September 2022) *Why smallholder farmers are central to new food security interventions*, WORLD ECONOMIC FORUM (“The 600 million smallholder farmers around the world working on less than two hectares of land, are estimated to produce 28-31% of total crop production and 30-34% of food supply on 24% of gross agricultural area.”).

³¹⁴ International Institute for Sustainable Development (21 June 2023) *FAO Guidelines Help ECA Countries Integrate LNOB in Development Planning* (“The report underscores that in agrifood systems, it is crucial to reach those furthest behind first. Citing the World Bank’s estimates, it notes that 80% of people living below the international poverty line reside in rural areas. In the ECA region, the prevalence of severe food insecurity in 2020 was 2.4%, or 22.8 million people, according to the report. At the same time, the report emphasizes, ‘smallholder farmers produce one-third of the world’s food but bear a double vulnerability burden,’ having to deal with vulnerabilities related to climate change

as well as those ‘associated with having limited access to productive resources such as land and water, public services and markets in food supply chains.’”).

³¹⁵ See the annual average emissions for 2017 in Skea J., et al. (2022) *Summary for Policymakers, in CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., & Malley J. (eds.), SPM-10 (“The annual average during the decade 2010–2019 was 56 ± 6.0 GtCO₂-eq, 9.1 GtCO₂-eq yr⁻¹ higher than in 2000–2009.”). See total food system emissions for 2017 in Zhu J., Luo Z., Sun T., Li W., Zhou W., Wang X., Fei X., Tong H., & Yin K. (2023) *Cradle-to-grave emissions from food loss and waste represent half of total greenhouse gas emissions from food systems*, NAT. FOOD 4(3): 1–13, 2 (“The global food system generated 18.6 ± 12.6 (1 σ) Gt of CO₂ equivalent (GtCO₂e) GHGs in 2017 (Fig. 1) in four food categories (cereals, pulses and others; roots and oil crops; vegetables and fruit; and meat and animal products).”).

³¹⁶ Global Methane Hub & Climateworks Foundation (2023) *THE GLOBAL INNOVATION NEEDS ASSESSMENTS: FOOD SYSTEM METHANE*, 6 (“Methane represents approximately a fifth of global greenhouse gases, 60% of which arise from the food system. An estimated 10.3 GtCO₂e of methane are emitted per year. Food system methane accounts for an estimated 6–7 GtCO₂e, including emissions arising from the agriculture sector (40% share of total methane) as well as waste emissions associated with food waste.”).

³¹⁷ Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Fund for Agriculture Development, United Nations Children’s Fund, World Food Programme, & World Health Organization (2023) *THE STATE OF FOOD SECURITY AND NUTRITION IN THE WORLD 2023: URBANIZATION, AGRIFOOD SYSTEMS TRANSFORMATION AND HEALTHY DIETS ACROSS THE RURAL–URBAN CONTINUUM*, xvi (“Global hunger, measured by the prevalence of undernourishment (Sustainable Development Goal [SDG] Indicator 2.1.1), remained relatively unchanged from 2021 to 2022 but is still far above pre-COVID-19-pandemic levels, affecting around 9.2 percent of the world population in 2022 compared with 7.9 percent in 2019.”), 32 (“Conflict, climate change and the enduring secondary effects of the COVID-19 pandemic continue to affect malnutrition, birthweights and caring practices like exclusive breastfeeding.”).

³¹⁸ Food and Agriculture Organization (2023) *ACHIEVING SDG 2 WITHOUT BREACHING THE 1.5C THRESHOLD*, 9 (“Methane emissions from the livestock sector have been reduced by 25 percent compared to 2020.”).

³¹⁹ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2022) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: 2030 BASELINE REPORT SUMMARY FOR POLICYMAKERS*, 11 (“Using the results from the 2021 Global Methane Assessment, we calculate that Global Methane Pledge would provide additional benefits worldwide through 2050, beyond keeping the planet cool, including: - Prevention of roughly 200,000 premature deaths per year due to ozone exposure - Avoidance of ~580 million tonnes of yield losses to wheat, maize (corn), rice and soybeans per year - Avoidance of ~\$500 billion (2018 US\$) per year in losses per year due to non-mortality health impacts, forestry and agriculture - Avoidance of ~1,600 billion lost work hours per year due to heat exposure.”).

³²⁰ United Nations, *Population* (last visited 25 October 2023) (“The world’s population is more than three times larger than it was in the mid-twentieth century. The global human population reached 8.0 billion in mid-November 2022 from an estimated 2.5 billion people in 1950, adding 1 billion people since 2010 and 2 billion since 1998. The world’s population is expected to increase by nearly 2 billion persons in the next 30 years, from the current 8 billion to 9.7 billion in 2050 and could peak at nearly 10.4 billion in the mid-2080s.”).

³²¹ Van Dijk M., Morley T., Rau M. L., & Saghai Y. (2021) *A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050*, NAT. FOOD 2(7): 494–501, 498 (“Our findings indicate that, under NOCC, per capita and total food demand are expected to change by +0% to +20% and +35% to +56% between 2010 and 2050, respectively, while population at risk of hunger is projected to change by –91% to +8%. Projections

that account for climate change show a somewhat wider range of outcomes (−1% to +20% for per capita food demand, +30% to +62% for total food demand and −91% to +30% for population at risk of hunger).”).

³²² Li Y., Zhong H., Shan Y., Hang Y., Wang D., Zhou Y., & Hubacek K. (2023) *Changes in global food consumption increase GHG emissions despite efficiency gains along global supply chains*, NAT. FOOD 4(6): 483–95, 483 (“In 2019, emissions throughout global food supply chains reached $30 \pm 9\%$ of anthropogenic GHG emissions, largely triggered by beef and dairy consumption in rapidly developing countries—while per capita emissions in developed countries with a high percentage of animal-based food declined. Emissions outsourced through international food trade dominated by beef and oil crops increased by ~ 1 Gt CO₂ equivalent, mainly driven by increased imports by developing countries. Population growth and per capita demand increase were key drivers to the global emissions increase (+30% and +19%, respectively) while decreasing emissions intensity from land-use activities was the major factor to offset emissions growth (−39%).”).

³²³ Clark M. A., Domingo N. G. G., Colgan K., Thakrar S. K., Tilman D., Lynch J., Azevedo I. L., & Hill J. D. (2020) *Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets*, SCIENCE 370(6517): 705–708, 705 (“Our analysis suggests that reducing GHG emissions from the global food system will likely be essential to meeting the 1.5° or 2°C target. Our estimate of cumulative business-as-usual food system emissions from 2020 to 2100 is 1356 Gt CO₂-we (Fig. 1). As such, even if all non-food system GHG emissions were immediately stopped and were net zero from 2020 to 2100, emissions from the food system alone would likely exceed the 1.5°C emissions limit between 2051 and 2063 (date range reflects uncertainties in the 1.5°C emissions limit; see supplementary materials).”), 706 (“We show that meeting the 1.5° and 2°C targets will likely require extensive and unprecedented changes to the global food system. ... The need for rapid reduction in GHG emissions from fossil fuels to meet the 1.5° or 2°C targets is widely acknowledged. We show that the same is true for food systems: Even if fossil fuel emissions were rapidly reduced, emissions from the global food system are on a trajectory that would prevent achievement of the 1.5° and 2°C targets before the end of the century. Our analyses also suggest there are many opportunities to meet the 1.5° or 2°C emission targets.”).

³²⁴ Clark M. A., Domingo N. G. G., Colgan K., Thakrar S. K., Tilman D., Lynch J., Azevedo I. L., & Hill J. D. (2020) *Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets*, SCIENCE 370(6517): 705–708, 707 (See Fig.2A for modeled food emission mitigation pathways that avoid crossing 1.5°C by 2050). Soil carbon sequestration strategies may additionally support temperature goals in avoiding 2 °C by 2050, see United Nations Environment Programme (2022) *EMISSIONS GAP REPORT 2022: THE CLOSING WINDOW — CLIMATE CRISIS CALLS FOR RAPID TRANSFORMATION OF SOCIETIES*, xxv (Figure ES.5 Food systems emissions trajectory and mitigation potentials by transformation domain); discussed in Harvey F. (4 July 2023) *Improving soil could keep world within 1.5C heating target, research suggests*, THE GUARDIAN.

³²⁵ Zhu J., Luo Z., Sun T., Li W., Zhou W., Wang X., Fei X., Tong H., & Yin K. (2023) *Cradle-to-grave emissions from food loss and waste represent half of total greenhouse gas emissions from food systems*, NAT. FOOD 4(3): 1–13, 2 (“The global food system generated 18.6 ± 12.6 (1 σ) Gt of CO₂ equivalent (GtCO₂e) GHGs in 2017 (Fig. 1) in four food categories (cereals, pulses and others; roots and oil crops; vegetables and fruit; and meat and animal products). Among these, meat and animal products led the GHG emissions (11.53 ± 8.12 GtCO₂e), followed by cereals, pulses and others (5.76 ± 3.49 GtCO₂e).”).

³²⁶ Ivanovich C. C., Sun T., Gordon D. R., & Ocko I. B. (2023) *Future warming from global food consumption*, NAT. CLIM. CHANGE 13(3): 297–302, 298–299 (“We found that the consumption of dairy and meat is responsible for more than half of the warming by the year 2030 and through to the year 2100 (Fig. 3).”).

³²⁷ Poore J. & Nemecek T. (2018) *Reducing food’s environmental impacts through producers and consumers*, SCIENCE 360(6392): 987–992, 988 (See Fig. 1 for breakdown of emissions by product compared to land use.).

³²⁸ Bonilla-Cedrez C., Steward P., Rosenstock T. S., Thornton P., Arango J., Kropff M., & Ramirez-Villegas J. (2023) *Priority areas for investment in more sustainable and climate-resilient livestock systems*, NAT. SUSTAIN. 6(10): 1279–1289, 1282–1283 (“From a global perspective, the weighting of adaptation and mitigation indicators highlights the geographies with the greatest problems, providing a regional focus. At local scales, however, these indicators emerge from farmers’ decisions on system management and, as such, are interconnected; any choice of adaptive or mitigating priorities needs understanding of the trade-offs that impact other goals. Adopting a livestock practice or technology nearly always involves trade-offs between adaptation and mitigation outcomes¹⁹. Thus, to avoid unintended consequences, actions need to be aligned with local demands and goals. The consideration that adaptation and mitigation need to be addressed jointly is especially important in areas where population growth and/or dietary change are most prominent²⁰. Yet, a lack of alignment at the policy level potentially hinders this objective. Roughly 50% of the NDCs that mention livestock note just one of the priorities²¹, and only 28 out of 184 countries’ NDCs include soil-related targets²². This omittance suggests that, as a global community, we are creating institutions and narratives that disincentivize or preclude action on adaptation, mitigation or both.”).

³²⁹ Herrero M., Henderson B., Havlík P., Thornton P. K., Conant R. T., Smith P., Wirsenius S., Hristov A. N., Gerber P., Gill M., Butterbach-Bahl K., Valin H., Garnett T., & Stehfest E. (2016) *Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector*, NAT. CLIM. CHANGE 6(5): 452–461, 453 (“We estimate that total emissions from livestock from 1995 to 2005 were between 5.6 and 7.5 GtCO₂e yr⁻¹ (Table 1). The most important sources of emissions were enteric CH₄ (E_{CH₄}; 1.6–2.7 GtCO₂e yr⁻¹; refs 9–13,15), N₂O emissions associated with feed production (1.3–2.0 GtCO₂e yr⁻¹; ref. 15) and land use for animal feed and pastures, including change in land use (~1.6 GtCO₂e yr⁻¹; ref. 15). ... Taking an aggregate view of the sector, and using all LCA sources of emissions, animal feed production accounts for about 45% of the sector’s emissions, with about half of these emissions related to fertilization of feed crops and pastures (manure and fertilizer included)¹⁵. The remaining animal feed emissions are shared between energy use and land use. Enteric fermentation contributes about 40% of total emissions, followed by manure storage and processing (~10% of emissions)^{17,18}.”).

³³⁰ Lazenby R. (2022) *Rethinking manure biogas: Policy considerations to promote equity and protect the climate and environment*, Vermont Law and Center for Agriculture and Food Systems, 24–25 (“Because manure biogas systems capture rather than reduce emissions, these systems require the ongoing generation of GHG emissions to be financially viable. The digester’s function is to capture the emissions, so the system breaks down if emissions are reduced at the source. Producers must continue to generate manure at scale for the facilities to remain financially sustainable. The large upfront investment in these systems then fixes the current numbers and concentration of livestock at facilities where they are installed, despite the range of harms generated by such concentrated operations. Simultaneously, the new subsidized revenue streams support the ongoing generation of manure at scale.”).

³³¹ United States Environmental Protection Agency (2019) *GLOBAL NON-CO₂ GREENHOUSE GAS EMISSION PROJECTIONS & MITIGATION 2015-2050*, EPA-430-R-19-010, 56 (“Many of the currently available enteric fermentation abatement options work indirectly by increasing animal growth rates and reducing time to finish (or increasing milk production for dairy cows). These abatement measures achieve emission reductions because increased productivity means fewer animals are required to produce the same amount of meat or milk. Furthermore, several of the abatement measures are inexpensive to implement and are cost-effective at reducing emissions.”). *See also* Herrero M., Henderson B., Havlík P., Thornton P. K., Conant R. T., Smith P., Wirsenius S., Hristov A. N., Gerber P., Gill M., Butterbach-Bahl K., Valin H., Garnett T., & Stehfest E. (2016) *Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector*, NAT. CLIM. CHANGE 6(5): 452–461, 455 (“*Animal productivity and health*. Improving the genetic potential of animals for production, their reproductive performance, health and liveweight gain rates are among the most effective approaches for reducing GHG emissions per unit of product^{32,58}. In subsistence agricultural systems, reduction of herd size by increased reproduction rates increases feed availability as well as the productivity of individual animals and the total herd, thus lowering E_{CH₄} and overall GHG emissions per unit of product.”).

³³² Bonilla-Cedrez C., Steward P., Rosenstock T. S., Thornton P., Arango J., Kropff M., & Ramirez-Villegas J. (2023) *Priority areas for investment in more sustainable and climate-resilient livestock systems*, NAT. SUSTAIN., 1279–1289,

1283 (“Adopting a livestock practice or technology nearly always involves trade-offs between adaptation and mitigation outcomes¹⁹. Thus, to avoid unintended consequences, actions need to be aligned with local demands and goals.”).

³³³ Balehegn M. (2021) *Livestock sustainability research in Africa with a focus on the environment*, ANIM. FRONT. 11(4): 47–56, 54 (“In Africa, sustainable livestock production must address food security and climate change concerns simultaneously in addition to social and economic aspects. The need for and principles of sustainable livestock production apply universally. Although many high-income countries focus on the environmental impacts of livestock production, low-income countries are concerned with increasing livestock productivity to improve income and food supply and reduce high rates of childhood undernutrition and stunting (Tricarico et al., 2020).”).

³³⁴ Balehegn M. (2021) *Livestock sustainability research in Africa with a focus on the environment*, ANIM. FRONT. 11(4): 47–56, 48 (“Such interventions include improving feed quality by upgrading crop residues, concentrate supplementation, that effectively reduce enteric CH₄ production and emission intensity while improving feed conversion efficiency and miscellaneous sustainable livestock intensification strategies that improve productivity while minimizing the negative environmental impact of livestock. Such strategies include manure management, animal breeding, grazing practices, and sustainable forage production or pastureland management practices such as intercropping, silvopastoral practices, etc. Perhaps more than the need for new research is that for awareness creation about best bet technologies and approaches for improving livestock production and sustainability and for sustained extension support to enhance the adoption and use of available technologies and approaches. Given that African countries are already critically affected by climate change as manifested by extreme weather variability and recurrent drought, strategies that provide synergetic opportunities for climate adaptation and mitigation are needed for resource-limited smallholder farmers. Implementation of successful adaptation and mitigation schemes, however, is costly to smallholder farmers, and therefore policy support towards providing financial and technical incentives is required.”). See also Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, White Paper, 7 (“Better feed quality primarily means more digestible feed – feed ruminants can more thoroughly digest and use for energy – and feed with balanced nutrients, including sufficient protein. Although ruminants can break down the cellulosic material that makes up much of the hard cell walls of grasses, leaves and other forages, some fibrous material is easier to digest than other material. As a result, more digestible feeds provide more energy for cattle and less that is lost to methane, other gases, or manure. Because cattle also cannot digest lignin, which increases with the age of the grass, consuming fresher grasses and reducing reliance on most crop residues also helps to reduce methane and improve growth.”).

³³⁵ Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, 7–8 (“As importantly, the quantity of feed that ruminants can eat is limited by the speed with which the material is digested. Because cattle cannot digest lignin at all, and digest carbohydrates more rapidly than cellulose, they can eat more overall feed when it is more digestible. That has an important effect because the first use of feed by an animal is to support its own maintenance: the energy an animal needs to live. It is the surplus of energy in feed over maintenance requirements that can contribute to milk production, or to weight gain, which means the addition of meat. Although cattle need a balance of different types of feed, in general, cattle fed more digestible feeds can eat more, produce more milk and grow faster than cattle fed less digestible feeds. Although they produce more methane per animal, the methane per kilogram of milk or meat decreases.”).

³³⁶ Bengston O., Feng S., Ganesan V., Katz, J., Kitchel H., Mannion P., Prabhala P., Richter A., Roen W., & Vleck J. (2023) *THE AGRICULTURAL TRANSITION: BUILDING A SUSTAINABLE FUTURE*, McKinsey & Company, 49 (See (19) Heat stress management).

³³⁷ Fox N. J., et al. (2018) *Ubiquitous parasites drive a 33% increase in methane yield from livestock*, INT. J. PARASITOL. 48(13): 1017–1021, 1017 (“This is to our knowledge the first study that empirically demonstrates disease-

driven increases in methane (CH₄) yield in livestock (grams of CH₄ per kg of dry matter intake). We do this by measuring methane emissions (in respiration chambers), dry matter intake, and production parameters for parasitized and parasite-free lambs. This study shows that parasite infections in lambs can lead to a 33% increase in methane yield (g CH₄/kg DMI).”).

³³⁸ von Soosten D., Meyer U., Flachowsky G., & Dänicke S. (2020) *Dairy Cow Health and Greenhouse Gas Emission Intensity*, DAIRY: 20–29, 26 (“In the case of illness in a dairy cow (clinical or subclinical), feed intake and milk yield are usually reduced. For this reason, GHG emissions then increase per kilogram of product. An extended productive life is desirable to achieve a reduction in emission intensity. It remains difficult to consider animal losses in terms of GHG emissions. Apart from the dead animal, we also have to consider the GHG emissions for the production of feed the dead animal had consumed during its life. More data that consider animal health up to animal losses seem to be necessary for a better quantification of GHG emission intensity.”). See also Özkan Gülzari Ş., Vosough Ahmadi B., Stott A. W. (2018) *Impact of subclinical mastitis on greenhouse gas emissions intensity and profitability of dairy cows in Norway*, PREV. VET. MED. 150: 19–29, 28 (“We concluded that there is a potential to reduce the total farm emissions intensity by 3.7% if the milk production was improved through reducing the level of [somatic cell count] SCC to 50,000 cells/mL in relation to SCC level 800,000 cells/mL. We, however, acknowledge that this may be an underestimation as [subclinical mastitis] SCM is usually accompanied by other diseases. Based on the presented results, it is concluded that preventing and/or controlling SCM consequently reduces the GHG emissions per unit of production on farm, which results in improved profits for the farmers through reductions in milk losses, optimum culling rate and reduced feed and other variable costs.”).

³³⁹ Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, 9 (“High quality feed and care can also make it possible to use breeds, particularly European breeds, that are more efficient at converting feed and produce more milk per animal and higher daily weight gains. The use of these breeds can be inefficient in warmer countries where these breeds can suffer from heat stress and are less resistant to local diseases or ticks. These breeds are also less efficient where feed has poor quality. Improvements in feed and health care, however, can often allow greater use of western breeds or, quite commonly, productive crossbreeds of western breeds and indigenous cattle breeds.”). See also O’Brien A. (17 June 2023) *New breeding values for sheep aim to reduce emissions*, AGRILAND (“The initiative is part of the €3 million research project ‘GREENBREED’, funded by the DAFM. The key research findings were: - Large differences in daily methane emissions were found between ewes, with 17% of these differences being traced to genetics; - The genetically identified highest 20% of emitting animals are expected to emit 15% more methane per day compared to the lowest 20% emitting animals.”).

³⁴⁰ Palangi V., Taghizadeh A., Abachi S., & Lackner M. (2022) *Strategies to Mitigate Enteric Methane Emissions in Ruminants: A Review*, SUSTAINABILITY 14(20): 1–15, 6 (“Singh and Sharma [46] recorded higher body weight gain in concentrate-fed goat kids. Accordingly, animals were fed concentrate at the early growth stage, followed by green fodder after weaning.”).

³⁴¹ Kauffman J. B., Beschta R. L., Lacy P. M., & Liverman M. (2022) *Livestock Use on Public Lands in the Western USA Exacerbates Climate Change: Implications for Climate Change Mitigation and Adaptation*, ENVIRON. MANAG. 69(6): 1137–1152, 1137 (“About 85% of public lands in the western USA are grazed by domestic livestock, and they influence climate change in three profound ways: (1) they are significant sources of greenhouse gases through enteric fermentation and manure deposition; (2) they defoliate native plants, trample vegetation and soils, and accelerate the spread of exotic species resulting in a shift in landscape function from carbon sinks to sources of greenhouse gases; and (3) they exacerbate the effects of climate change on ecosystems by creating warmer and drier conditions. On public lands one cow-calf pair grazing for one month (an “animal unit month” or “AUM”) produces 875 kg CO_{2e} through enteric fermentation and manure deposition with a social carbon cost of nearly \$36 per AUM. Over 14 million AUMs of cattle graze public lands of the western USA each year resulting in greenhouse gas emissions of 12.4 Tg CO_{2e} year⁻¹. The social costs of carbon are > \$500 million year⁻¹ or approximately 26 times greater than annual grazing fees collected by managing federal agencies. These emissions and social costs do not include the likely greater

ecosystems costs from grazing impacts and associated livestock management activities that reduce biodiversity, carbon stocks and rates of carbon sequestration.”).

³⁴² Castonguay A. C., Polasky S., Holden M. H., Herrero M., Mason-D’Croz D., Godde C., Chang J., Gerber J., Bradd Witt G., Game E. T., Bryan B. A., Wintle B., Lee K., Bal P., & McDonald-Madden E. (2023) *Navigating sustainability trade-offs in global beef production*, NAT. SUSTAIN. 6: 284–306, 284 (“Here we optimize global beef production at fine spatial resolution and identify trade-offs between economic and environmental objectives interpretable to global sustainability ambitions. We reveal that shifting production areas, compositions of current feeds and informed land restoration enable large emissions reductions of 34–85% annually (612–1,506 MtCO_{2e} yr⁻¹) without increasing costs. Even further reductions are possible but come at a trade-off with costs of production.”).

³⁴³ Herrero M., Henderson B., Havlík P., Thornton P. K., Conant R. T., Smith P., Wirseniuss S., Hristov A. N., Gerber P., Gill M., Butterbach-Bahl K., Valin H., Garnett T., & Stehfest E. (2016) *Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector*, NAT. CLIM. CHANGE 6(5): 452–461, 455 (“Improving the genetic potential of animals for production, their reproductive performance, health and liveweight gain rates are among the most effective approaches for reducing GHG emissions per unit of product^{32,58}. In subsistence agricultural systems, reduction of herd size by increased reproduction rates increases feed availability as well as the productivity of individual animals and the total herd, thus lowering ECH₄ and overall GHG emissions per unit of product. Reducing the age at slaughter by increasing liveweight gain rates significantly decreases GHG emissions per unit of product in beef and other meat production systems. Improved animal health and reduced mortality and morbidity can increase herd productivity and reduce emissions intensity in all livestock systems.”).

³⁴⁴ United States Climate Alliance (2018) *FROM SLCP CHALLENGE TO ACTION: A ROADMAP FOR REDUCING SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS TO MEET THE GOALS OF THE PARIS AGREEMENT*, 13 (“Actions to improve manure management and to reduce methane from enteric fermentation have the potential to significantly reduce agricultural methane emissions across U.S. Climate Alliance states. Improving manure storage and handling, composting manure, utilizing pasture-based systems, or installing anaerobic digesters significantly reduces methane from manure management on dairy, swine, and other livestock operations. These practices may reduce methane from manure management by as much as 70 percent in U.S. Climate Alliance states (Appendix A) and can help improve soil quality and fertility, reduce water use and increase water quality, reduce odors, and decrease the need for synthetic fertilizers and associated greenhouse gas emissions. Promising technologies are also emerging that may cut methane emissions from enteric fermentation by 30 percent or more (see A). Developing strategies that work for farmers and surrounding communities can significantly reduce methane emissions, increase and diversify farm revenues, and support water quality and other environmental benefits.”). See also Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model*, ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 1–21, 13–14 (“The technical abatement potential for agricultural sources is assessed at 21 percent below baseline emissions in year 2050. This includes relatively limited abatement potentials for livestock of 12 percent due to applicability limitations (see section S3.4. in the SI for details). Large farms with more than 100 LSU contribute about a third of global CH₄ emissions from livestock and for this group we find it technically feasible to reduce emissions by just over 30 percent below baseline emissions in year 2050 (see figures S6–2 in the SI). The available options include reduction of enteric fermentation emissions through animal feed changes (Gerber et al 2013, Hristov et al 2013) combined with implementation of breeding schemes that simultaneously target genetic traits for improved productivity and enhanced animal health/longevity and fertility. Increased productivity reduces system emissions by enabling the production of the same amount of milk using fewer animals. The dual objective in breeding schemes is important as a one-eyed focus on increased productivity leads to deteriorating animal health and fertility and a risk that system emissions increase due to a need to keep a larger fraction of unproductive replacement animals in the stock (Lovett et al 2006, Berglund 2008, Bell et al 2011). The enteric fermentation options are considered economically feasible for commercial/industrial farms with more than 100 LSU but not for smaller- and medium- sized farms. Breeding schemes are assumed to deliver impacts on emissions only after 20 years and feed changes are assumed applicable only while animals are housed indoor. Emissions from manure management can be reduced through treatment of manure in anaerobic

digesters (Ads) with biogas recovery. To be efficient from both an economic and environmental point of view, a certain scale is needed to accommodate both the fixed investment of the AD plant and the time farmers spend carefully attending to and maintaining the process (for details see section 3.3.1.3 in Höglund-Isaksson et al 2018).”).

³⁴⁵ United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero (2023) [CARBON BUDGET DELIVERY PLAN](#), 138 (“Feeding insect protein to animals has the potential to reduce overall global emissions from feed production (in comparison to conventional protein production e.g. soya grown overseas) and support a circular economy (e.g. if insects are raised on waste). There is ongoing research to determine the potential of these measures and the sector is at an early stage of development. This measure is unlikely to have significant UK GHG or land use impacts. It could, however, reduce supply chain emissions from feed supply occurring outside the scope of UK carbon budgets.”).

³⁴⁶ Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) [Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture](#), Princeton University School of Public and International Affairs, White Paper, 13 (“Despite these very promising signs, important issues remain to be resolved. Although studies have promising results so far, the world is unlikely to undertake a massive investment to incorporate these feed additives globally on the basis of a limited number of studies that have lasted each for only a few months for 3-NOP and three studies with live animals for algae. We believe a few steps are critical to widespread adoption although they could be undertaken with enough commitment in the next three years. . . . The first need is for studies that last at least two years for each of these products. Studies to date have at most lasted four months. . . . Longer-term studies also provide the opportunity to evaluate effects on yields and feed conversion efficiency...safety tests...costs of production....”).

³⁴⁷ For example, in Europe, South America and California. *See* European Commission (23 February 2022) [Daily News 23/02/2022](#), Press Release (“Today, Member States have approved the marketing in the EU of an innovative feed additive, as proposed by the Commission. The additive, consisting of 3-nitrooxypropanol, will help to reduce the emission of methane, a potent greenhouse gas, from cows. Commissioner for Health and Food Safety, Stella Kyriakides, said: “Innovation is key for a successful shift towards a more sustainable food system. The EU continues to lead the way in ensuring food safety while adapting to new technologies that can make food production more sustainable. Cutting farming-related methane emissions is key in our fight against climate change and today's approval is a very telling example of what we can achieve through new agricultural innovations.” The product went through a stringent scientific assessment by the European Food Safety Authority which concluded that it is efficacious in reducing methane emissions by cows for milk production. Once the decision is adopted by the Commission, expected in the coming months, the feed additive will be the first of its kind available on the EU market.”); Martin R. (20 April 2022) [Methane-reducing feed pilot to include 10,000 cows in three European countries](#), IRISH EXAMINER (“The cooperative is set to pilot the use of Bovaer[®] with 10,000 dairy cows across more than 50 farms in Denmark, Sweden and Germany, ensuring a diverse group of farms participate in the pilot programme. . . . If preliminary findings are as expected, Arla Foods plans to double the pilot project to include 20,000 cows in 2023. Bovaer[®] is currently commercially available in the EU, Brazil, Chile, and Australia.”); Byrne J. (5 July 2023) [dsm-firmenich: Bovaer has saved 50,000 tons of CO2e to date](#), FEED NAVIGATOR (“Authorities recently approved the sale of Bovaer in Paraguay, for use in dairy and beef cattle, making it the seventh country in Latin America to give the feed additives the green light, while Elance Animal Health, dsm-firmenich’s strategic partner for developing, manufacturing, and commercializing Bovaer in the US, anticipates US approval and launch of the supplement in the first half of 2024.”); de Sousa A. (9 September 2021) [World’s Top Beef Supplier Approves Methane-Busting Cow Feed](#), BLOOMBERG (“Latin America is the first region to grant approvals for the DSM product, which is also trying to get permission in the European Union, the U.S. and New Zealand. A trial on Brazilian beef showed Bovaer cut methane emissions from cows’ stomachs by as much as 55%, the company said. Bovaer has undergone trials in 13 countries, with more than 48 peer-reviewed studies published.”); and Duggan T. (6 May 2022) [To fight climate change, California approves seaweed that cuts methane emissions in cow burps](#), SAN FRANCISCO CHRONICLE (“On Friday, Blue Ocean Barns, which produces the red seaweed at a farm on the Big Island of Hawaii, announced that the supplement had been approved for use on both conventional and organic dairy farms. Called Brominata, the red seaweed variety has been shown to cut methane emissions in dairy cows by 52% over 50 days but so far has been used only in trials.”). For

hurdles, *see generally* Steele M. (22 June 2023) *Methane-reducing supplement for cows still trapped in regulatory limbo*, RADIO NEW ZEALAND.

³⁴⁸ McCulloch C. (1 July 2022) *Beef produced with 90% methane reducing feed hits shelves*, ALL ABOUT FEED (“The more environmentally friendly beef is available from June 30 in selected Coop supermarkets in Sweden. It is claimed 5% of the world’s greenhouse gas emissions come from methane produced by cows’ burps and farts.”). *See also* Peters A. (30 June 2022) *The world’s first ‘methane-reduced’ beef is now at grocery stores*, FAST COMPANY (“At the Swedish grocery chain, *Coop*, there’s now a new product that isn’t available anywhere else in the world: “low methane” beef. Selected stores are selling a limited-edition run of ground beef, sirloin steak, and beef fillets from cattle that have been fed red seaweed—a supplement that cuts emissions of methane, a potent greenhouse gas that cows and steers emit when they burp and fart.”).

³⁴⁹ Global Methane Hub (2 December 2023) *Enteric Fermentation Research & Development Accelerator, a \$200M Agricultural Methane Mitigation Funding Initiative* (“The Enteric Fermentation R&D Accelerator, or Accelerator, is the largest-ever, globally coordinated investment of breakthrough research tackling livestock methane emissions. The Global Methane Hub announced the intention to establish the Accelerator at COP27 as an AIM for Climate Innovation Sprint. The Accelerator will unite funders, guided by a science oversight committee, to invest in a globally coordinated research plan. This strategy aims to address gaps in current research and enhance existing efforts. The strategy includes work on exploring new and alternate livestock feed additives, tools to breed low-methane livestock, immunological studies for a methane vaccine, understanding the organisms in the rumen and their functions, and lowering the costs of measurement, essential to generate evidence for regulatory approval and validation of mitigation technologies.”).

³⁵⁰ Kebreab E. & Feng X. (2021) *Strategies to Reduce Methane Emissions from Enteric and Lagoon Sources*, California Air Resources Board, 69 (“In general, higher moisture contents in raw composting manure could enhance the CH₄ mitigation rates, however, the pH, and C/N content were not linearly related to CH₄ mitigation. Adding biochar, acids, and straw to manure could mitigate CH₄ emissions by 82.4%, 78.1%, and 47.7%, respectively. However, the data for straw is quite small so it should not be taken out of context as it may introduce a source of carbon into lagoons. The meta-analysis conducted with selected additives indicated manure additives were an effective method to reduce CH₄ emission, with biochar being the most effective. However, further studies of manure additives on CH₄ mitigation are required to support a more accurate quantitative analysis and potential impacts to water quality and crop yield after land application. Most of the research for biochar and straw is when used as additive to solid or semi solid manure so they should be interpreted in that context.”).

³⁵¹ Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, 26 (“Another emerging option involves adding acid to manure stored in wet form, which can almost eliminate methane emissions. Some experiments with acidification have occurred for many years (Fangueiro, Hjorth, and Gioelli 2015) (Søren O. Petersen, Andersen, and Eriksen 2012), but experimental work has been increasing (Rodhe et al. 2019). Acidification can be done at different stages of manure management: in the barn, in storage tanks, prior to field application. Methane reductions require a regular, but modest, insertion of acid into storage tanks. Acidifying manure also reduces ammonia losses when methane is applied, and in some experiments increases yields (Loide 2019). Yield gains probably occur if farmers either do not apply or are not allowed to apply more nitrogen fertilizer to replace the nitrogen lost with the releases of ammonia. The amount of acid required for sufficient acidification to greatly reduce methane is still unclear.”); (“There are also a variety of promising innovative methods to reduce methane. There is experimental evidence, for example, that some additives, such as sulfate, can be added in modest quantities and still reduce two-thirds of the methane emissions from storage even without significantly reducing pH (Petersen, Andersen & Eriksen 2012) (Petersen et al. 2014) (Sokolov et al. 2020).”).

³⁵² Kebreab E. & Feng X. (2021) *Strategies to Reduce Methane Emissions from Enteric and Lagoon Sources*, California Air Resources Board, 7 (“Effect size and meta-analyses were conducted to identify the additives with greatest potential for CH₄ mitigation. For feed additives, 3-nitrooxypropanol (3NOP), bromochloromethane, chestnut,

coconut, distillers dried grains and solubles, eugenol, grape pomace, linseed, monensin, nitrate, nitroethane, saifoin, fumaric acid, and tannins had significant impacts on enteric emissions. For manure additives, acidification, biochar, microbial digestion, physical agents, straw, and other chemicals significantly reduced CH₄ emissions.”).

³⁵³ Chiodini M. E., Costantini M., Zoli M., Bacenetti J., Aspesi D., Poggianella L., & Acutis M. (2023) *Real-Scale Study on Methane and Carbon Dioxide Emission Reduction from Dairy Liquid Manure with the Commercial Additive SOP LAGOON*, SUSTAINABILITY 15(3): 1–13, 1 (“After 3 and 4 months from the first additive applications, the SL storage tank showed lower and statistically significantly different emissions concerning the UNT (up to –80% for CH₄ and –75% for CO₂, $p < 0.001$), confirming and showing improved results from those reported in the previous small-scale works. The pH of the UNT tank was lower than that of the SL on two dates, while the other chemical characteristics of the slurry were not affected.”). See also Peterson C., El Mashad H. M., Zhao Y., Pan Y., & Mitloehner F. M. (2020) *Effects of SOP Lagoon Additive on Gaseous Emissions from Stored Liquid Dairy Manure*, SUSTAINABILITY 12(4): 1–17, 1 (“A variety of additives have been applied to reduce emissions from manure. Although the composition and mechanism of the emission reduction of several additives are known, information on many other commercial additives is not available because of confidentiality and limits in the marketing literature. Calcium sulfate (gypsum) can be found abundantly in nature and has been used to improve soil properties. ... Different forms of gypsum have been tested for the mitigation of GHG and ammonia emissions from livestock effluents. The results have had varying results: while some studies reported a decrease in ammonia emissions after the addition of gypsum, not all have demonstrated the efficacy of gypsum in reducing the release of GHGs. Many of the results were obtained using a considerable amount of material (3% to 10% of manure wet weight) making the application not practical in real-world conditions. Borgonovo et al. first published results on this specific commercial additive (SOP LAGOON), made of gypsum processed with proprietary technology, and found that the addition of the products to fresh liquid manure has a reduction potential of 21.5% of CH₄, 22.9% of CO₂, 100% of N₂O and 100% of NH₃ emissions on day 4, even at very low dosages. It should be mentioned that similar to other commercial additives, the exact manufacturing process of SOP Lagoon is unknown due to confidentiality.”); and Borgonovo F., Conti C., Lovarelli D., Ferrante V., & Guarino M. (2019) *Improving the sustainability of dairy slurry with a commercial additive treatment*, SUSTAINABILITY 11(18): 1–14, 8 (“N₂O, CO₂, and CH₄ emissions, from the treated slurry, were respectively 100%, 22.9% and 21.5% lower than the control at T4 when the emission peaks were recorded.”).

³⁵⁴ Babiker M., Berndes G., Blok K., Cohen B., Cowie A., Geden O., Ginzburg V., Leip A., Smith P., Sugiyama M., & Yamba F. (2022) *Chapter 12: Cross Sectoral Perspectives in CLIMATE CHANGE 2022: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Shukla P. R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., & Malley J. (eds.), 12-102 (“Anaerobic digestion of organic wastes (e.g., food waste, manure) produces a nutrient-rich digestate and biogas that can be utilised for heating and cooking or upgraded for use in electricity generation, industrial processes, or as transportation fuel (See Chapter 6) (Parsaee et al. 2019; Hamelin et al. 2021).”).

³⁵⁵ Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, 25 (“Several alternative manure management options exist. One starts with more quickly removing manure from barns because barn temperatures tend to be high, and higher temperatures increase methane formation (Montes et al. 2013). Barn storage can lead to high methane losses even in a few days, particularly in pig barns where temperatures are often higher than outside (Petersen et al. 2016). In many systems, it is common for manure to remain in pig or dairy barns for a few weeks – and some for much longer -- but it is possible to construct systems and sometimes to operate existing barns to remove manure each day. One analysis of different studies found average reduction rates for methane at the level of 50%, although that will obviously depend on climate and alternative management systems (Mohankumar, et al. 2018). A second set of options focuses on separating the solid portion of manure from the liquid portion. Even without adding water for barn cleaning, manure in pork and cattle systems tends to be wet enough to create the oxygen-less conditions that create methane. A variety of techniques with increasing sophistication can separate solids from liquids.”). See also Cameron K. C. & Di H. J. (2019) *A new method to treat farm dairy effluent*

to produce clarified water for recycling and to reduce environmental risks from the land application of effluent, J. SOILS SEDIMENTS 19(5): 2290–2302, 2291 (“The basis of the new method for treating FDE is to use a coagulant to coagulate and flocculate colloidal particles in the FDE into flocs that have sufficient mass for gravity to cause them to settle out of the liquid, thus producing: (i) clarified water and (ii) treated effluent. Coagulation involves the addition of a coagulant to neutralize the negative electrical charges on the surfaces of colloids (e.g. soil, dung, organic matter) that would normally prevent them from coagulating into flocs that have sufficient mass to settle out of the water under gravity. In addition, during mixing of the coagulant into the effluent, the coagulant can create a mechanism called ‘sweep floc’ which also causes the colloids to stick together producing flocs.”); *discussed in* Mulhollem J. (11 July 2022) *Researcher gets grant to study biofilters to reduce livestock facility methane*, THE PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY.

³⁵⁶ Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, White Paper, 24 (“Much of the focus on manure management has been to encourage the use of digesters. Digesters turn even more of the [manure] into methane into biogas, but in a way that can be captured and burned for energy. Millions of small, low-technology digesters are in use in Asia for household energy use, and larger, modern digesters have also received significant investments in Western countries. For farms that now produce large quantities of methane – for example, that use large lagoons to store manure in warm parts of the world – digesters can be a cost-effective mechanism for reducing methane as well as overall greenhouse gas emissions (Searchinger et al. 2019). In other contexts, however, the climate benefits for methane are uncertain and probably unable to justify the expense. The purpose of a digester is to turn as much of the biomass in manure into methane as possible. As a result, digesters create more methane than normal storage systems. Although the intent is to capture and burn this methane for energy, if the digester has significant leakage rates the amount of methane released can exceed the methane released by present management, depending on the system in use. That seems particularly likely in informal, household systems studied so far (Bruun et al. 2014), although the leakage rates around the world have been little studied.”).

³⁵⁷ Lazenby R. (2022) *Rethinking manure biogas: Policy considerations to promote equity and protect the climate and environment*, Vermont Law and Center for Agriculture and Food Systems, 28 (“The massive quantities of manure produced at industrial scale livestock facilities can and do cause serious environmental, quality of life, and public health harms to neighboring communities. These harms do not cease to exist upon the addition of an anaerobic digester. In fact, while proponents of biogas systems sometimes argue that capping lagoons can address these issues, impacted environmental justice communities around the country have organized against the proliferation of biogas because it is viewed as maintaining and supporting a harmful system.¹⁰⁴”); *citing* Gittelsohn P., Diamond D., Henning L., Payan M., Utesch L., & Utesch N. (2021) *The False Promises of Biogas: Why Biogas Is an Environmental Justice Issue*, ENVIRONMENTAL JUSTICE. *See also* Hindenanch J. (27 October 2021) *Climate credits for factory farm gas violate civil rights, fail to achieve climate benefits, states petition submitted to CARB*, Leadership Counsel for Justice & Accountability (“The petition calls on [California Air Resources Board (CARB)] to exclude polluting factory farm-derived methane from the [Low Carbon Fuel Standard (LCFS)] or amend the credit system to better account for the actual climate impact of using factory farm-generated methane as a transportation fuel and exclude those projects that entrench and exacerbate local air and water pollution. As currently formulated, the credit system overstates the emission reduction benefits of factory farm gas by failing to account for the fuel’s life-cycle emissions — from crop production, intestinal emissions and animal feed to the disposal of manure and pipeline leaks. In the petition, groups also emphasize that factory farms have been able to exploit the credit systems to “double dip” — using public dollars to subsidize the construction of dairy digesters, while also receiving millions for the credits sold through the LCFS.”); *Oglesby C.* (28 March 2022) *‘This plan is a lie’: Biogas on hog farms could do more harm than good*, ENERGY NEWS NETWORK (“White-Williamson has been fighting the hog industry’s waste management practices in Sampson County for decades. A year ago, she launched the [Environmental Justice Community Action Network](#), a network of residents and organizations that educate and organize around hog farming and other local environmental hazards. She said widespread adoption of biogas systems will further cement the hog industry’s poor waste management practices in low-income communities of color. Others say it could actually increase water pollution in certain areas. Small-scale farmers are concerned that this newest strategy allows an industry where they see little of the profit to make more

money, without actually alleviating their waste problems.”); and Sainato M. (4 February 2022) *California subsidies for dairy cows' biogas are lose-lose, campaigners say*, THE GUARDIAN (“But environmental advocates argue that the environmental benefits of biogas are exaggerated, and that the LCFS encourages the expansion of factory farms and could end up increasing emissions and pollution. In a petition to the California Air Resources Board (Carb), the state government’s clean air agency that runs the LCFS, six environmental groups called for dairy farms to be excluded from the policy. In January, Carb turned down the request but said it would continue to engage with the petitioners.”).

³⁵⁸ Merrigan K., Giraud E. G., Scialabba N. E., Brook L., Johnson A., & Aird S. (2022) *GROW ORGANIC: THE CLIMATE, HEALTH, AND ECONOMIC CASE FOR EXPANDING ORGANIC AGRICULTURE*, Swette Center for Sustainable Food Systems at Arizona State University, Natural Resource Defense Council, & Californians for Pesticide Reform, 9 (“The CAFO system produces excessively high levels of methane and other emissions. In conventional livestock production, animals live in CAFOs for a significant portion of their lives, subsisting primarily on conventionally grown corn and soy-based feed that brings them to market weight quickly.¹¹⁴ This feed is produced with large amounts of synthetic fertilizers and pesticides that, as noted above, are GHG intensive.¹¹⁵ CAFOs also pack together thousands of animals, which leads to vast amounts of waste. This waste is often stored in liquid-based systems, including manure lagoons that can be as large as several football fields.¹¹⁶ In these liquid systems, the absence of oxygen leads manure to break down into methane. Due to a broad shift to the industrial CAFO model, with its waste management issues and reliance on manure lagoons and spray fields, methane emissions from manure increased by nearly 70 percent in the United States in recent decades.¹¹⁷”), 20 (“Methane emissions from pastured animals are also significantly lower due to dry manure management and the communities of microbial decomposers found on well- managed pastures.¹²² For example, holistic or rotational grazing, where animals move to different sections of pasture on a regular basis to allow grazed areas to recover and grow, may help reduce methane and other emissions and offer soil carbon sequestration benefits. This type of grazing disperses manure throughout the landscape in balance with the needs of the ecosystem, instead of concentrating it in a massive lagoon or spray field. Using grazing best practices can reduce net GHG emissions per pound of meat or milk production.¹²³”).

³⁵⁹ Ivanovich C. C., Sun T., Gordon D. R., & Ocko I. B. (2023) *Future warming from global food consumption*, NAT. CLIM. CHANG. 13(3): 297–302, 299 (“We used dietary recommendations provided by the Harvard Medical School, which focus on reduced meat intake, promoting a protein-rich diet with less saturated fat and cholesterol²⁷. These recommendations specifically prescribe the sparing consumption of red meat (beef and pork; about one serving per week) and the limited consumption of fish, poultry and eggs (up to two servings each per day)²⁷. We found that if these dietary changes were implemented globally, warming due to food consumption could be decreased by 0.19 °C by the end of the century, consistent with previous literature that has highlighted the potential for dietary recommendations to provide environmental as well as health benefits^{42,45,48–50}. This amounts to ~21% of the anticipated warming due to sustained dietary consumption rates.”). See also Laine J. E., et al. (2021) *Co-benefits from sustainable dietary shifts for population and environmental health: an assessment from a large European cohort study*, LANCET PLANET. HEALTH 5(11): 786–796, 794 (“Supporting the co-benefits of our findings, we also found that reductions in greenhouse gas emissions and land use could occur with higher adherence to the EAT–Lancet reference diet, whereby greenhouse gas emissions could be reduced by 50% and land use levels by 62%. Overall, adhering to the EAT–Lancet reference diet seems to be beneficial for reducing all-cause mortality and cancer while mutually reducing greenhouse gas emissions and land use; this is particularly concerning for Europe’s local environmental impacts, where agricultural production is among the most intensive in the world.²⁸”); and Springmann M., Mason-D’Croz D., Robinson S., Wiebe K., Godfray H. C. J., Rayner M., & Scarborough P. (2017) *Mitigation potential and global health impacts from emissions pricing of food commodities*, NAT. CLIM. CHANGE 7: 69–74, 69 (“Using a coupled agriculture and health modelling framework, we show that the global climate change mitigation potential of emissions pricing of food commodities could be substantial, and that levying greenhouse gas taxes on food commodities could, if appropriately designed, be a health-promoting climate policy in high-income countries, as well as in most low- and middle-income countries.”).

³⁶⁰ Swanson Z. Welsh C., & Majkut J. (2023) *MITIGATING RISK AND CAPTURING OPPORTUNITY: THE FUTURE OF ALTERNATIVE PROTEINS*, Center for Strategic & International Studies, 4 (“In response to these looming challenges,

alternative proteins offer the opportunity for food production with fewer GHG emissions and lower environmental impact. While still a relatively young industry, the production of alternative proteins—particularly plant-based products—is already more efficient than traditional animal husbandry, producing fewer GHG emissions and requiring fewer inputs.”). *See also* Bengston O., Feng S., Ganesan V., Katz J., Kitchel H., Mannion P., Prabhala P., Richter A., Roen W., & Vleck J. (2023) *THE AGRICULTURAL TRANSITION: BUILDING A SUSTAINABLE FUTURE*, McKinsey & Company, 16–17 (“In addition, alternative protein sources have smaller physical footprints and consequently limit future land conversion while creating opportunities for sequestration. For example, one kilogram of beef protein requires an estimated 326 square meters of land versus four for plant-based options, 12 for poultry, and only three for cell-based.⁴² Dietary shifts away from animal proteins could save nearly 640 million hectares of land, which could in turn be reforested or provide a locus for other nature-based solutions.⁴³”). For a discussion on climate concerns from traditional animal agriculture, *see* Xu X., Sharma P., Shu S., Lin T.-S., Ciais P., Tubiello F. N., Smith P., Campbell N., & Jain A. K. (2021) *Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods*, *NAT. FOOD* 2(9): 724–732, 724 (“Global GHG emissions from the production of food were found to be $17,318 \pm 1,675$ TgCO₂eq yr⁻¹, of which 57% corresponds to the production of animal-based food (including livestock feed), 29% to plant-based foods and 14% to other utilizations. Farmland management and land-use change represented major shares of total emissions (38% and 29%, respectively), whereas rice and beef were the largest contributing plant- and animal-based commodities (12% and 25%, respectively), and South and Southeast Asia and South America were the largest emitters of production-based GHGs.”).

³⁶¹ Kozicka M., Havlík P., Valin H., Wollenberg E., Deppermann A., Leclère D., Lauri P., Moses R., Boere E., Frank S., Davis C., Park E., & Gurwick N. (2023) *Feeding climate and biodiversity goals with novel plant-based meat and milk alternatives*, *NAT. COMMUN.* 14: 1–13, 6 (“We show that substituting 50% of [animal source food] ASF with novel alternatives can lead to profound system-wide impacts. Unlike previous studies that assessed dietary changes with novel foods, in this study we considered a more realistic composition of the plant ingredients that would be used to produce novel alternatives and analyzed them in a dynamic systemwide global framework. Instead of growing by 15% in the REF scenario, agriculture and land use emissions decline by 31%. A large part of this decline comes from CH₄ reduction, which could have significant near-term climate mitigation benefits⁵⁹. The result is comparable in relative terms to a previous analysis of replacing 60% of beef consumption in the USA with plant-based alternatives, which found agricultural emissions reduction in the USA by 13.5%⁴⁰.”).

³⁶² *See generally* Scarborough P., Clark M., Cobiac L., Papier K., Knuppel A., Lynch J., Harrington R., Key T., & Springmann M. (2023) *Vegans, vegetarians, fish-eaters and meat-eaters in the UK show discrepant environmental impacts*, *NAT. FOOD* 4(7): 565–74.

³⁶³ Global Methane Hub & Climateworks Foundation (2023) *THE GLOBAL INNOVATION NEEDS ASSESSMENTS: FOOD SYSTEM METHANE, TECHNICAL REPORT*, 19 (“The impacts of diet shifts towards non-ruminant and plant based as well as alternative proteins could abate up to 0.65 GtCO₂e per year by 2030, and even higher benefits between 2030 and 2050 (1.2 GtCO₂e).”).

³⁶⁴ As of 2022, plant-based foods accounted for 15% of the dollar share for milk options and 1.4% of total retail food and beverage dollar sales in the United States. *See* Ignaszewski E. & Piece B., *U.S. retail market insights for the plant-based industry*, Good Food Institute (*last visited* 14 February 2024) (*See* Table: Summarizing plant-based food market sales data).

³⁶⁵ Swanson Z. Welsh C., & Majkut J. (2023) *MITIGATING RISK AND CAPTURING OPPORTUNITY: THE FUTURE OF ALTERNATIVE PROTEINS*, Center for Strategic & International Studies, 3 (“The consumption of these alternative protein products is ultimately driven by consumer preference— preference that is, in large part, determined by taste and price parity. With time, investment, and technological improvements, the parity gaps that currently exist between meat and alternative proteins will continue to diminish. Under specific economic circumstances, price parity has already been achieved. In mid-2022, for example, the Netherlands saw the price of plant-based alternative proteins drop below that of conventional meat, due in part to meat price increases caused by European drought and the Russian war in Ukraine,

while the price of plant-based alternative proteins remained relatively unaffected. Shifting attitudes toward climate change and increased market exposure could additionally drive increased acceptance of alternative protein—particularly cultivated meat—in the future. Given existing and projected protein demand, even subtle dietary shifts toward increased consumption of alternative proteins could have a profound effect on the rate of market growth. This growth will determine the magnitude of the impact that alternative proteins will have on the environment, human health, and the economy.”).

³⁶⁶ Good Food Institute (2022) *STATE OF THE INDUSTRY REPORT: CULTIVATED MEAT AND SEAFOOD*, 91 (“Cultivated meat is on the cusp. Products have the potential to offer consumers the same meat-eating experience as conventional meat, which could present a breakthrough opportunity for mass adoption of alternative proteins. Yet the vast majority of consumers globally have yet to taste cultivated meat. Before taste and price considerations enter the picture, industry participants must make continued investments in R&D, infrastructure buildout, and regulatory processes to ensure consumers are even able to try cultivated meat. Considering the investment and regulatory progress made in 2022, the coming years will prove critical for the development of this market. As more products receive regulatory approval from governments around the world—and companies continue to improve and scale their offerings—the potential of a “meat without the animal” future will draw closer to reality.”).

³⁶⁷ Global Methane Hub & Climateworks Foundation (2023) *THE GLOBAL INNOVATION NEEDS ASSESSMENTS: FOOD SYSTEM METHANE, TECHNICAL REPORT*, 6 (“Innovations could support 118 million jobs, \$700 billion in gross value added (GVA) and multiple food security and nature goals. In the near term, job support is dominated by productivity innovations in cold chain technology and waste tracking and analytics, jointly generating roughly 30 million jobs globally by 2030. In the medium- to long-term, the scaling up of investment in alternative proteins required to facilitate a diet shift away from ruminant livestock products generates up to 83 million jobs by 2050. Total value generation follows a similar pattern to job support, scaling from roughly \$160 billion in 2030 to over \$700 billion by 2050. However, unlike job creation, value addition is dominated across the study period by alternative proteins, which represent close to 98% of total value generation across innovations, by 2050. GVA contributions are dominated by alternative protein investment throughout study period. This reflects the significant necessary investment in developing alternative protein production capacity to the scale required to contribute to a 1.5°C transition, while ensuring caloric requirements of a growing population are met. Innovations can have synergies with sustainable development goals in low- and middle-income regions while driving sustainable value creation in developed countries.”). See also Good Food Institute (2022) *State of Global Policy*, 3 (“Public funding for alternative proteins increased significantly, with governments worldwide more than doubling their investments in 2022 alone. GFI estimates that governments invested \$635 million in the alternative protein ecosystem in 2022, including approximately \$180 million on research and development, \$290 million on commercialization, and \$165 million on initiatives that mixed elements of both. As a result, all-time public support for the alternative protein ecosystem has likely surpassed \$1 billion. The United States became the second country after Singapore to complete a premarket consultation for cultivated meat. Food Standards Australia New Zealand (FSANZ) became the third regulatory body to receive an application for cultivated meat, and Israel granted regulatory approval for the country’s first precision fermentation-derived animal protein. Courts have largely rejected, overturned, or temporarily suspended efforts to constrain alternative protein sales through labeling restrictions, though a ban on plant-based cheese in Türkiye remains in effect. Governments increased their financial, political, and regulatory support for alternative proteins in 2022 but have yet to approach the annual support needed to realize alternative proteins’ benefits to the economy, climate, and global food system. Policymakers should consider increasing funding for research and development and product commercialization, as well as for regulatory instruments to ensure the safe, fair, and reliable entry of alternative proteins to the market.”); and Lee A., Hofmaier K., & Wright H. (1 November 2023) *Opinion: Why China’s alternative protein market matters*, CHINA DIALOGUE (“The 2022 FAIRR Sustainable Protein Transformation in China Index ranked 10 out of the 12 Chinese companies analysed as “high risk” in terms of greenhouse gas emissions. However, whilst still ranking as high risk on average across all sustainability categories, the average scores improved from 12 out of 100 in 2021 to 15 in 2022. According to the index, the number of Chinese companies that have developed an alternative protein product portfolio increased from three to four out of the 12. With this increase, FAIRR expects further regulatory developments in China to support alternative protein production, as its potential in building

a sustainable food system is increasingly recognized. ... Similarly, other countries in Asia have announced plans to innovate in the agri-food space, including on alternative protein, which may spur regional competition. Japan has announced plans to develop a cultivated meat industry, while South Korea opened a new centre on cellular agriculture, featuring the world's largest piece of cultivated meat. In 2021, Singapore famously became the first country to approve the sale of cell-based chicken.”).

³⁶⁸ United States Department of Agriculture, *Partnerships for Climate-Smart Commodities* (last visited 18 October 2023) (See Pilot Projects and Climate-Smart Production Practices section for strategies that have been shown to reduce methane, e.g., “Feed management to reduce enteric emissions.”).

³⁶⁹ California Department of Food and Agriculture (7 June 2023) *CDFA Awards \$4.1 Million For Climate-Smart Dairy And Livestock Research Projects*, News Release (“The California Department of Food and Agriculture (CDFA) today announced the award of \$4.1 million in grant funding to three research projects as part of the California Livestock Methane Measurement, Mitigation, and Thriving Environments Research Grant Program (CLIM³AATE-RP), funded by Budget Act of 2021 (SB 170, Chapter 240). The research projects’ goals are threefold: 1 - Verify the greenhouse gas and environmental co-benefits of climate-smart practices on California dairies 2 - Evaluate alternative methane mitigation strategies, including those that address enteric methane 3 - Advance manure recycling and innovative products development. ‘This funding will help ensure that California continues to see emissions benefits from ongoing projects and achieve additional reductions from new practices that address enteric methane and turn manure into useful products,’ said CDFA Secretary Karen Ross. ‘We are excited about these proposals from our grantees and look forward to seeing their innovative work.’”).

³⁷⁰ For a discussion on private sector efforts to reduce Scope 1–3 emissions, see Blue Ocean Barns (13 July 2022) *Blue Ocean Barns Completes \$20 Million Series A Financing, Accelerating Solution to Agricultural Methane Emissions*, PR NEWSWIRE (“Blue Ocean Barns works directly with companies to reduce GHG emissions from livestock within their own milk and beef supply chains, known as **Scope 3 reductions**. Companies pay Blue Ocean Barns to deliver the seaweed to their farmers; in return, companies earn verified carbon **certificates** that substantiate the reductions. These certificates are more valuable than so-called carbon offsets, which allow companies to fund climate-remediation projects outside their industry, such as wetlands restoration.”). For a discussion on differences between Scope 1, 2, and 3 emissions, see generally Rocky Mountain Institute (5 October 2023) *A Primer on Embodied Carbon in Climate Disclosure* (“Scopes 1 and 2 include direct and indirect emissions from sources controlled by the business, while Scope 3 emissions include a range of indirect impacts resulting from parts of the value chain the business does not control.”).

³⁷¹ Note that awards that recognize corporations for their mitigation efforts should account for a corporation’s total emissions. Some corporations, such as JBS, have pledged emissions reductions in part of their operations, despite efforts in other parts to increase herd sizes and shift production to countries with fewer restrictions on deforestation, which would increase absolute GHG emissions. For a review of JBS’s negative climate and environmental impact despite their Net Zero by 2040 goal, see Wasley A. (2 June 2023) *More than 800m Amazon trees felled in six years to meet beef demand*, THE GUARDIAN (“Researchers at the AidEnvironment consultancy used satellite imagery, livestock movement records and other data to calculate estimated forest loss over six years, between 2017 and 2022 on thousands of ranches near more than 20 slaughterhouses. All the meat plants were owned by Brazil’s big three beef operators and exporters – JBS, Marfrig and Minerva... More than 2,000 hectares of forest were apparently destroyed on a single ranch between 2018 and 2021 – São Pedro do Guaporé farm, in Pontes e Lacerda, Mato Grosso state – which sold nearly 500 cattle to JBS, though the company said the farm was ‘blocked’ when its due diligences identified irregularities with them. The JBS meat plant that processed these cattle sold beef to the UK and elsewhere in recent years. The farm was also connected to the indirect supply of more than 18,000 animals across the three meat packers between 2018 and 2019 according to Aidenvironment. All three companies said they were not currently being supplied by the ranch. More than 250 cases of deforestation were attributable to indirect suppliers – farms that rear or fatten cattle but send them to other ranches before slaughter. (Some farms act as both direct and indirect suppliers.”). For a

demonstration of a corporation's methane targets, *see generally* Lyubomirova T. (17 January 2023) *Danone to cut methane by 30% by 2030 through regenerative farming, feed innovation*, FEEDNAVIGATOR.

³⁷² Changing Markets Foundation & Institute for Agriculture & Trade Policy (2022) *EMISSIONS IMPOSSIBLE: HOW EMISSIONS FROM BIG MEAT AND DAIRY ARE HEATING UP THE PLANET, METHANE EDITION*, 7 (“IATP and Changing Markets’ recommendations for governments:... - Require companies to consistently and comprehensively report their GHG emissions, including scope 3, and set emission-reduction targets in line with science, including a system of independent third-party verification. Methane, nitrous oxide and carbon dioxide emissions must be reported separately. - Enact a phased and bottom-up transition for farms to reduce animal numbers in line with a just transition policy for the transformation of the animal agriculture sector.”).

³⁷³ *See generally* Carter N. & Urbancic N. (2023) *SEEING STARS: THE NEW METRIC THAT COULD ALLOW THE MEAT AND DAIRY INDUSTRY TO AVOID CLIMATE ACTION*, Changing Markets.

³⁷⁴ Rice cultivation constitutes 13% of food system methane emissions. Global Methane Hub & Climateworks Foundation (2023) *Technical Summary*, in *THE GLOBAL INNOVATION NEEDS ASSESSMENTS: FOOD SYSTEM METHANE*, 10 (Figure 2.1).

³⁷⁵ Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model*, ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 1–21, 14 (“For CH₄ emissions from rice cultivation, a halving of global emissions is considered possible through improved water management that shorten the period of continuous flooding of fields, combined with a use of low-CH₄ generating hybrids and different soil amendments (see section S6.5 of the SI for details).”). *See also* United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 16 (In Table SDM1 Measures To Reduce Methane By 45 Per Cent By 2030: “Rice paddies: improved water management or alternate flooding/drainage wetland rice; direct; phosphogypsum and sulphate addition to inhibit methanogenesis; composting rice straw; use of alternative hybrids species.”); Project Drawdown, *Technical Summary: Improved Rice Production* (last visited 25 October 2023) (“Improved rice production practices include: changes to water management (alternate wetting and drying); fertility management; use of aerobic cultivars; no-tillage; and direct seeding. Data was collected only from studies that used two or more of these practices.”); and Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, 18 (“One way to mitigate methane emissions from rice cultivation is simply to increase yields. Rice emissions are based on the number of hectares planted and harvested each year, and higher yields reduce the area planted for the same total production. Higher yielding crop varieties also appear to generate less methane per hectare (Jiang et al. 2017).”).

³⁷⁶ Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model*, ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 1–21, 14 (“For CH₄ emissions from rice cultivation, a halving of global emissions is considered possible through improved water management that shorten the period of continuous flooding of fields, combined with a use of low-CH₄ generating hybrids and different soil amendments (see section S6.5 of the SI for details).”).

³⁷⁷ Ahmed J., Almeida E., Aminetzah D., Denis N., Henderson K., Katz J., Kitchel H., & Mannion P. (2020) *AGRICULTURE AND CLIMATE CHANGE: REDUCING EMISSIONS THROUGH IMPROVED FARMING PRACTICES*, McKinsey & Company, 18 (“Several practices could reduce methane emissions in rice paddies, relative to what is observed in the continuous flooding systems used most widely across the world. Alternate wetting and drying, single season drainage, and other methods can increase in nitrous oxide emissions. However, this adverse impact is significantly outweighed in terms of tCO_{2e} by direct methane-emissions reduction.”).

³⁷⁸ Climate & Clean Air Coalition, *Paddy rice production* (last visited 25 October 2023) (“Alternate wetting and drying (AWD), the practice of allowing the water table to drop below the soil surface at one or multiple points during a growing season, is an effective alternative to continuous flooding, proven to reduce methane emissions by as much as 48%. The practice is also cost-saving for farmers, as it requires a third less water than continuous flooding and does not compromise yield.”). See also Project Drawdown, *Improved Rice Production* (last visited 25 October 2023) (“These techniques can make rice production efficient, dependable, and sustainable, helping to meet growing demand for this staple food while minimizing adverse climate impacts. We investigated two low-methane rice production solutions: Improved Rice Production (profiled here), with techniques suitable to both small- and large-scale operations, and System of Rice Intensification, currently limited to smallholders. This solution replaces conventional paddy rice production in mechanized (non-smallholder) regions. Given that many rice farming methods are long-entrenched customs, change requires helping farmers see what results are possible, cultivating necessary knowledge and skills, and implementing incentives that make new methods compelling.”).

³⁷⁹ Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, 17 (“Moreover, in addition to management, rice yield potential has continued to rise steadily through improved crop breeding (Kumar et al. 2021), and breeders for rice, as for other crops, have many ideas for potentially larger increases in yield potential (Qian et al. 2016).”), 20 (“Results of biochar in rice fields are promising for methane reduction, yields gains and other benefits. Many experiments have now been done, and global meta-analyses suggest that biochar amendment in rice fields can reduce methane emissions by 6-13% compared to not using biochar (Awad et al. 2018) (Liao et al. 2021). In theory, if all rice straws were charred and returned to the fields, the estimated global methane emission reductions along with our estimated changes in water management would increase to 12.55 million tons (Figure 6). In addition, accumulating evidence suggests that biochar amendment in rice fields can boost rice yield by about 9% (Liao et al. 2021). This level of yield benefits could significantly help defray the costs of using biochar.”).

³⁸⁰ Low J. (20 June 2022) *How Pakistan is navigating water scarcity in agriculture*, GOVINSIDER (“Mechanical rice transplanters may provide some relief. This is a machine that creates equal distancing between seedlings to optimize plant density in the field and maximise yield; ‘The technology helps automate manual work and will be able to reach a degree of precision that cannot be achieved physically,’ Shahrukh explains.”).

³⁸¹ Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, 18 (“Each 1% increase in rice yields roughly reduces rice methane emissions by 1%. If global rice yields rise only to 5.3 tons per hectare by 2050, the Globagri model estimates that rice methane emissions would rise 13% from 2010 levels (T. Searchinger et al. 2019). But achieving a global average yield of 6.4 tons per hectare per year in 2050 would result in a 4% drop in emissions.”).

³⁸² Kumar A., et al. (2021) *Genetic gain for rice yield in rainfed environments in India*, FIELD CROPS RES. 260(107977): 1–12, 9 (“This study documents the significant genetic gain for grain yield of a breeding program targeting rainfed lowland rice in India that was based on direct selection for grain yield under both irrigated control and drought conditions. The study utilized extensive multi-season evaluation in target environments under irrigated control, moderate drought stress and severe drought stress between 2004–2014 with number of popular varieties as checks to enable accurate estimation of the genetic gain. The yield improvement of the newly developed stress-tolerant varieties over the best currently grown varieties was also demonstrated on farmers’ fields. The developed STRVs have potential to protect farmers from crop losses against an increasing impact of extreme droughts under climate change.”).

³⁸³ Wang W., Wu X., Chen A., Xie X., Wang Y., & Yin C. (2016) *Mitigating effects of ex situ application of rice straw on CH₄ and N₂O emissions from paddy-upland coexisting system*, SCI. REP. 6(37402): 1–8, 1 (“Year-round measurements of CH₄ and N₂O emissions were conducted to evaluate the system-scaled GWP. The results showed that CH₄ accounted for more than 98% of GWP in paddy. Straw removal from paddy decreased 44.7% (302.1 kg ha⁻¹ yr⁻¹) of CH₄ emissions and 51.2% (0.31 kg ha⁻¹ yr⁻¹) of N₂O emissions, thus decreased 44.8% (7693 kg CO₂-eqv

ha⁻¹ yr⁻¹) of annual GWP.”). *See also* Bengston O., Feng S., Ganesan V., Katz. J., Kitchel H., Mannion P., Prabhala P., Richter A., Roen W., & Vleck J. (2023) *THE AGRICULTURAL TRANSITION: BUILDING A SUSTAINABLE FUTURE*, McKinsey & Company, 42 (*See* (4) Improved rice straw management).

³⁸⁴ California Air Resources Board, *Rice Cultivation Projects* (*last visited* 18 October 2023) (“The eligible practices for California are: 1) replacing wet seeding with dry seeding and 2) early drainage at the end of growing season; and the eligible practices for the Mid-South: 1) intermittent flooding and 2) early drainage at the end of growing season.”).

³⁸⁵ United Nations Development Programme (20 December 2022) *Strengthening capacity to protect the environment* (“The United Nations Development Programme (UNDP) in partnership with the Ministry of Environment, Science, Technology and Innovation (MESTI), and the Environmental Protection Agency (EPA) is building the capacity of Agricultural and Environmental Officers including Irrigation Scheme Managers for the promotion and the adoption of the AWD technology by rice farmers to reduce methane emissions. The training is a key capacity building activity of the “Alternative Wetting and Drying for Sustainable Rice Production” project which was developed out of the cooperative agreement between the Governments of Ghana and Switzerland under Article 6.2 of the Paris Agreement. The agreement falls under a \$42 million pay-for-results collaboration between the Swiss Federal Office for the Environment (FOEN) and UNDP.”); *discussed in* Ghana Business News (22 May 2023) *UNDP leads sustainable rice production in Ghana while reducing greenhouse gas emission*.

³⁸⁶ The World Bank (31 May 2023) *World Bank Loan Will Support Reducing Methane, Saving Water in Hunan’s Rice Paddies*, Press Release (“The World Bank’s Board of Executive Directors approved a US\$255 million loan today to support a program that will reduce methane emissions, improve irrigation and drainage services, and provide agricultural support for climate-resilient rice production in Hunan province, China’s largest rice production area.”); *discussed in* Devdiscourse (1 June 2023) *World Bank approves US\$255M loan to provide agricultural support for climate-resilient rice production in Hunan province*.

³⁸⁷ Romero-Briones A. (19 April 2022) *The Future of Agriculture in a Warming World Panel*, Speech.

³⁸⁸ Heller M. (4 November 2021) *It’s not weird, it’s nuts: Farmers graze cows in groves of trees*, E&E GREENWIRE (“It’s part of a broader set of practices called agroforestry that combine food production with trees. Advocates say it could help in the fight against climate change by encouraging both the planting of trees and less-intensive livestock farming. ‘Research suggests silvopasture far outpaces any grassland technique for counteracting the methane emissions of livestock and sequestering carbon under-hoof,’ said Project Drawdown, a San Francisco group inspired by the 2017 best-selling book ‘Drawdown’ by Paul Hawken, on its website. ‘Pastures strewn or crisscrossed with trees sequester five to ten times as much carbon as those of the same size that are treeless, storing it in both biomass and soil.’”).

³⁸⁹ Heller M. (3 January 2022) *Solar grazing: Sheep tidy up at solar farms*, E&E GREENWIRE (“Promoters say the benefits are far-reaching. Site managers are looking for ways to keep vegetation from overgrowing and shading the panels, and some research suggests grazing saves as much as \$300 per acre each year over other methods. Land owners are looking for whatever value they can draw from their property. And farmers who need places for livestock to munch on grass or other ground cover can charge for the service. The practice has environmental benefits, too, supporters say, by keeping land in agricultural production, controlling runoff and improving soil quality through rotational grazing, in which animals are moved from pasture to pasture over a season.”).

³⁹⁰ Cui J., Liu H., Wang H., Wu S., Bashir M. A., Reis S., Sun Q., Xu J., & Gu B. (2023) *Rice-Animal Co-Culture Systems Benefit Global Sustainable Intensification*, *EARTH’S FUTURE* 11(2): 1–18, 1 (“Compared to traditional monoculture of rice or animal production, the RAC [rice-animal co-culture] can not only reduce the demand for agricultural land areas, but also increase rice yields (+4%) as well as nitrogen use efficiency of rice (+6%). At the same time, RAC reduces nitrogen losses (–16% runoff and –13% leaching) and methane emissions (–11%), except for rice-fish coculture systems, which are likely to increase methane emissions (+29%). Furthermore, RAC increases

the net income of farmers through reducing cost of fertilizer and pesticide input and achieving higher outputs with more marketable products. According to the development stage of different countries, promotion of RAC will thus realize multiple benefits and aid sustainable intensification.”); *discussed in SciTechDaily* (15 April 2023) *A Rice Idea: Old Farming Techniques Unlock New Sustainable Solutions*.

³⁹¹ McGrath S. R., Thomas D. T., & Greer A. W. (2021) *Dual-purpose cropping: the opportunity for a step change in production in the temperate region of Australia*, ANIM. PROD. SCI. 61(11): i–iv, i (“Dual-purpose cropping refers to the establishment of annual crops such as cereals (e.g. wheat, barley, oats and triticale) and brassicas (mainly canola) with the intended purpose of grazing during the vegetative stage and harvesting grain after the crop matures. Twelve years ago, a special issue published in Animal Production Science reported key studies from Grain and Graze, a research and extension program which provided impetus for increased uptake of dual-purpose cropping and highlighted management of crops and livestock to optimise production.”).

³⁹² Kebreab E. & Feng X. (2021) *Strategies to Reduce Methane Emissions from Enteric and Lagoon Sources*, California Air Resources Board, 69 (“In general, higher moisture contents in raw composting manure could enhance the CH₄ mitigation rates, however, the pH, and C/N content were not linearly related to CH₄ mitigation. Adding biochar, acids, and straw to manure could mitigate CH₄ emissions by 82.4%, 78.1%, and 47.7%, respectively. However, the data for straw is quite small so it should not be taken out of context as it may introduce a source of carbon into lagoons. The meta-analysis conducted with selected additives indicated manure additives were an effective method to reduce CH₄ emission, with biochar being the most effective. However, further studies of manure additives on CH₄ mitigation are required to support a more accurate quantitative analysis and potential impacts to water quality and crop yield after land application. Most of the research for biochar and straw is when used as additive to solid or semi solid manure so they should be interpreted in that context.”). *See also* Peskett M. (15 November 2021) *Reducing methane emissions from cattle and dairy farming*, FOOD AND FARMING TECHNOLOGY (“Nearly all dairy farms use effluent or slurry ponds and they are the second largest source of on-farm methane emissions. At New Zealand’s Lincoln University, scientists Emeritus Professor Keith Cameron and Professor Hong Di have developed technology that reduces the methane emissions from dairy farm effluent ponds by up to 99%. Built in conjunction with New Zealand ag solutions firm Ravensdown, the ‘EcoPond’ virtually eliminates the methane emitted from effluent ponds. A computer-controlled pump and mixing system precisely administers iron sulphate – a safe additive used in the treatment of drinking water, to neutralise methane production.”).

³⁹³ Slade E. M., Riutta T., Roslin T., & Tuomisto H. L. (2016) *The role of dung beetles in reducing greenhouse gas emissions from cattle farming*, SCI. REP. 6: 1–8, 1 (“Several recent papers suggest that dung beetles may affect fluxes of GHGs from cattle farming. Here, we put these previous findings into context. Using Finland as an example, we assessed GHG emissions at three scales: the dung pat, pasture ecosystem and whole lifecycle of milk or beef production. At the first two levels, dung beetles reduced GHG emissions by up to 7% and 12% respectively, mainly through large reductions in methane (CH₄) emissions. However, at the lifecycle level, dung beetles accounted for only a 0.05–0.13% reduction of overall GHG emissions. This mismatch derives from the fact that in intensive production systems, only a limited fraction of all cow pats end up on pastures, offering limited scope for dung beetle mitigation of GHG fluxes. In contrast, we suggest that the effects of dung beetles may be accentuated in tropical countries, where more manure is left on pastures and dung beetles remove and aerate dung faster and that this is thus a key area for future research.”).

³⁹⁴ Dore S., Deverel S. J., & Christen N. (2022) *A vermifiltration system for low methane emissions and high nutrient removal at a California dairy*, BIORESOUR. TECHNOL. REP. 18(101044): 1–10, 1 (“Methane fluxes and wastewater removal rate of volatile solids, N species, salinity, major ions, and trace elements were monitored for 12 months. Vermifiltration reduced methane emissions relative to an anaerobic lagoon by 97–99% and removed 87% of the volatile solids, contaminants such as salts and trace elements, P (83%) and N (84%) from the wastewater. Vermifiltration of dairy wastewater demonstrated to be a useful tool to mitigate methane emissions, regulate *excess nutrients* and improve water quality at dairy farms.”). *See also* Singh R., Ray C., Miller D. N., Durso L. M., Meneses Y., Bartelt-Hunt S., & D’Alessio M. (2022) *Effects of feeding mode on the performance, life span and greenhouse gas*

emissions of a vertical flow macrophyte assisted vermifilter, NPJ CLEAN WATER 5(31): 1– 9, 1 (“This study was conducted to investigate the impact of intermittent feeding on performance, clogging, and gaseous emission on macrophyte assisted vermifiltration (MAVF) based treatment system. Synthetic slaughterhouse wastewater was applied to two different integrated vertical flow based MAVFs. Triplicates were used throughout the study. Eisenia fetida earthworms were added to MAVFs, and Carex muskingmenis plants were planted. Wastewater was applied to the reactors on 1) intermittent (8 h/day) (IMAVF) and 2) continuous (24 h/day) (CMAVF) basis. The average chemical oxygen demand, total nitrogen, and total phosphorous removals achieved by the IMAVF were $80.2 \pm 1.6\%$, $53.9 \pm 1.3\%$ and $66.5 \pm 1\%$ respectively, and $68.3 \pm 1.3\%$, $61.2 \pm 1.4\%$, and $60.5 \pm 1.4\%$ by the CMAVF, respectively. The diffusion of air to the bedding of IMAVFs during no-flow conditions facilitated higher organics oxidation, adsorption of phosphorous, nitrification, and ammonification.... Intermittent application of influent could be considered for improving the performance and lifespan of MAVFs, causing lower environmental footprints.”), *discussed in* van Deelan G. (15 July 2022) *Manure-Eating Worms Could Be the Dairy Industry’s Climate Solution*, INSIDE CLIMATE NEWS (“Some scientists even say that vermifiltration could reduce greenhouse gas emissions from dairy farms by preventing the production of methane, a powerful greenhouse gas. As such, vermifiltration could be a possible alternative to manure digesters, controversial technologies that capture methane produced by manure ponds, then sell that methane as a fuel source.”).

³⁹⁵ N2–Applied, *N2 Solution* (last visited 25 October 2023) (“N2 Applied has developed a technology that enables local production of fertiliser using only livestock slurry, air and electricity, – dramatically reducing harmful emissions and improving yield at the same time. The technology adds nitrogen from the air into slurry, which increases the nitrogen content. The reaction prevents the loss of ammonia and eliminates methane emissions, making it a real solution helping to achieve climate target commitments on an industrial scale. The end-product is a nitrogen enriched organic fertiliser (NEO), which has the same characteristics as normal slurry, but contains more nitrogen and significantly less emissions. It can still be spread using existing farm equipment, enabling farmers to improve their own food production, reduce the need for chemical fertiliser, and make farming more circular.”).

³⁹⁶ El Abbadi S. H., Sherwin E. D., Brandt A. R., Luby S. P., & Criddle C. S. (2022) *Displacing fishmeal with protein derived from stranded methane*, NAT. SUSTAIN. 5: 47–56, 47 (“Methane emitted and flared from industrial sources across the United States is a major contributor to global climate change. Methanotrophic bacteria can transform this methane into useful protein-rich biomass, already approved for inclusion into animal feed. In the rapidly growing aquaculture industry, methanotrophic additives have a favourable amino acid profile and can offset ocean-caught fishmeal, reducing demands on over-harvested fisheries. ... Our results show that current technology can enable production, in the United States alone, equivalent to 14% of the global fishmeal market at prices at or below the current cost of fishmeal (roughly US\$1,600 per metric ton).”).

³⁹⁷ Bryant R. W., Burns E. E. R., Feidler-Cree C., Carlton D., Flythe M. D., & Martin L. J. (2021) *Spent Craft Brewer’s Yeast Reduces Production of Methane and Ammonia by Bovine Rumen Microbes*, FRONT. ANIM. SCI. 2: 1–10, 1 (“Our research suggests that adding spent craft brewer’s yeast to rumen microbes by single time-point 24-h *in vitro* incubations suppresses production of methane and ammonia. This project examines the correlation between the quantities of hop acids in spent yeast and the production of methane and ammonia by bovine rumen microbes *in vitro*. We determined, by HPLC, the hop acid concentrations in spent yeast obtained from six beer styles produced at a local brewery. We performed anaerobic incubation studies on bovine rumen microbes, comparing the effects of these materials to a baker’s yeast control and to the industry-standard antibiotic monensin. Results include promising decreases in both methane (measured by GC–FID) and ammonia (measured by colorimetric assay) in the presence of craft brewer’s yeast, and a strong correlation between the quantities of hop acids in the spent yeast and the reduction of methane and ammonia. Notably, two of the yeast samples inhibited methane production to a greater degree than the industry-standard antibiotic monensin. Our results suggest that spent brewer’s yeast has potential to improve ruminant growth while reducing anthropogenic methane emission.”).

³⁹⁸ See *Number 8 Bio* (last visited 25 October 2023).

³⁹⁹ Searchinger T., Herrero M., Yan X., Wang J., Dumas P., Beauchemin K., & Kebreab E. (2021) *Opportunities to Reduce Methane Emissions from Global Agriculture*, Princeton University School of Public and International Affairs, 12 (“Vaccines have so far proved frustrating and only temporarily effective but merit continued research. Breeding is another option. Variation in methane production among different individual animals (Wallace et al. 2019), which appears to be heritable, suggests that breeding can over time reduce methane levels. One study estimated methane reductions might approach 15% (González-Recio et al. 2020). These efforts merit serious work but will only show results over several decades.”).

⁴⁰⁰ Roston E. (3 January 2022) *Inside the Project to Genetically Modify Rice to Emit Fewer Greenhouse Gases*, TIME (“Now, 15 years after their initial meeting, Banfield, Doudna and a large team of co-authors have published a [paper](#) that takes a major step toward solving the thorny problem of how to study and alter genomes of microbes living in complicated real-world environments, such as the gut microbiome or soil. The complexity of microbial communities has been a major obstacle to discovering technologies that can prevent diseases and improve agriculture. It’s a critical step toward curbing methane, a harmful greenhouse gas that is emitted during rice production.... Rice fields are like smokestacks for soil methane, and to shut down those emissions, scientists first need to understand the microbes. The trouble has been that culturing microbial communities and tinkering with them in a lab with traditional tools ‘could take years or might fail altogether,’ IGI authors write. Their new paper demonstrates that using a Crispr-based system can ‘accelerate this process to weeks.’”). See also Rubin B. E., et al. (2022) *Species- and site-specific genome editing in complex bacterial communities*, NAT. MICROBIOL. 7: 34–47.

⁴⁰¹ GHGSat (2 March 2022) *Cow burps seen from space*, Press Release (“On March 2nd 2022, high-resolution satellites owned and operated by GHGSat, the environmental data company, detected methane (CH₄) emissions coming from an agricultural area in California’s Joaquin Valley. ... This highlights the importance of tracking greenhouse gas emission from cattle farming, and the ability to do so even from space.”).

⁴⁰² Liu L., et al. (2022) *KGML-ag: A Modeling Framework of Knowledge-Guided Machine Learning to Simulate Agroecosystems: A Case Study of Estimating N₂O Emission Using Data from Mesocosm Experiments*, GEOSCI. MODEL DEV. 15(7): 2839–2858, 2839 (“The development of KGML-ag in our study is suitable to predict not only N₂O but also other variables, such as CO₂, CH₄ and ET, with complicated generation processes relying on the historical states. To develop a capable KGML model, we need to carefully address three questions.”); *discussed in* University of Minnesota (28 April 2022) *New study could help reduce agricultural greenhouse gas emissions*, Research Brief (“A team of researchers led by the University of Minnesota has significantly improved the performance of numerical predictions for agricultural nitrous oxide emissions. The first-of-its-kind knowledge-guided machine learning model is 1,000 times faster than current systems and could significantly reduce greenhouse gas emissions from agriculture... Accurate, scalable, and cost-effective monitoring and reporting of greenhouse gas emissions are needed to verify what are called “carbon credits” or permits that offset greenhouse gas emissions. Farmers can be reimbursed for practices that reduce greenhouse gas emissions. The KGML-ag framework opens tremendous opportunities for quantifying the agricultural nitrous oxide, carbon dioxide, and methane emissions, helping to verify carbon credits and optimize farming management practices and policy making.”).

⁴⁰³ Kang M., Cho S., Kim J., Sohn S., Ryu Y., & Kang N. (2023) *On securing continuity of eddy covariance flux time-series after changing the measurement height: Correction for flux differences due to the footprint difference*, AGRIC. FOR. METEOROL. 331(109339): 1–11, 1 (“In this study, before changing the flux measurement height of the CRK (Cheorwon Rice paddy, Korea) site from 10 m to 5 m, we installed another eddy covariance system at 5 m and compared the sensible and H₂O/CO₂/CH₄ fluxes at both heights from April 2020 to April 2021. Although random errors could explain substantial portions of the flux differences between the two heights, it was confirmed that systematic errors also existed because the means of the flux differences were not zero, and the distributions of the flux differences were also significantly skewed. Further analysis showed that the primary cause of these systematic errors was the footprint differences rather than the difference in turbulent transport between the two heights. Based on the results, we proposed a strategy for securing the continuity of the flux time-series, which is necessary to understand the long-term variability using all data before and after a measurement change, and discussed the necessity of such a

comparative observation.”); *discussed in* Syed N. (29 June 2023) *Cutting-Edge Tech Boosts Methane Measurement in Rice*, ASIANA TIMES.

⁴⁰⁴ Cusworth D. H., Thorpec A. K., Ayassea A. K., Steppb D., Hecklerd J., Asnerd G. P., Millerc C. E., Yadavc V., Chapmanc J. W., Eastwood M. L., Greenc R. O., Hmiele B., Lyone D. R., & Duren R. M. (2022) *Strong methane point sources contribute a disproportionate fraction of total emissions across multiple basins in the United States*, PROC. NATL. ACAD. SCI. 119(38): 1–7, 6 (“We demonstrated an application of this system using remote sensing platforms across multiple basins in the United States during 2019 to 2021. The results from this multibasin tiered analysis show that point sources make up around 40% of the total CH₄ flux (13 to 67% range) and highlight the heavy-tailed nature of point sources across many regions and sectors. It is likely that if a basin is known to be made of up of any combination of emission sectors that are characteristically heavy tailed (e.g., O&G, coal, manure management, waste), there is a strong likelihood that point sources will make up a significant fraction of the entire region’s emissions.”).

⁴⁰⁵ International Fund for Agricultural Development (8 May 2023) *New IFAD initiative will help reduce global warming by lowering methane emissions from small-scale farming*, Press Release (“IFAD will provide technical assistance to 15 countries to support integrating methane reductions in their updated NDC for submissions to the United Nations Framework Convention on Climate Change in 2025. The Fund will also assist these countries to design projects and blended finance solutions, to reduce methane emissions in agriculture and food systems.”). *See also* Global Alliance for the Future of Food (2022) *UNTAPPED OPPORTUNITIES FOR CLIMATE ACTION: AN ASSESSMENT OF FOOD SYSTEMS IN NATIONALLY DETERMINED CONTRIBUTIONS*, 9–10 (“But for most of the countries assessed, there was little indication that studies addressing food systems in an integrated manner were used to support NDC development and implementation plans. For instance, in the United States, where animal-based foods account for 82% of diet-related GHG emissions,⁶ the NDC does not include any actions to make healthy and sustainable food more accessible and affordable. Where the NDCs assessed indicated alignment with existing and forthcoming food systems policies, certain inconsistencies persist. A case in point is the U.K.’s NDC, which makes important references to the National Food Strategy, the U.K.’s Agriculture Act, and the Sustainable Fisheries Policies yet lacks concrete measures that can catalyze a transition to more sustainable and diversified diets in the country. While the mentioning of food-related strategies and policies in the NDC are per se a very positive development, the absence of any specific actions and articulation on the food–climate nexus generates uncertainty over how consistency between these policies will actually be ensured. China’s NDC, for instance, commits to comprehensively reform existing laws and regulations that are incompatible with carbon neutrality but does not provide further details as to how this will be accomplished.”).

⁴⁰⁶ Bonilla-Cedrez C., Steward P., Rosenstock T. S., Thornton P., Arango J., Kropff M., & Ramirez-Villegas J. (2023) *Priority areas for investment in more sustainable and climate-resilient livestock systems*, NAT. SUSTAIN. 6: 1279–1289, 1282–1283 (“From a global perspective, the weighting of adaptation and mitigation indicators highlights the geographies with the greatest problems, providing a regional focus. At local scales, however, these indicators emerge from farmers’ decisions on system management and, as such, are interconnected; any choice of adaptive or mitigating priorities needs understanding of the trade-offs that impact other goals. Adopting a livestock practice or technology nearly always involves trade-offs between adaptation and mitigation outcomes¹⁹. Thus, to avoid unintended consequences, actions need to be aligned with local demands and goals. The consideration that adaptation and mitigation need to be addressed jointly is especially important in areas where population growth and/or dietary change are most prominent²⁰. Yet, a lack of alignment at the policy level potentially hinders this objective. Roughly 50% of the NDCs that mention livestock note just one of the priorities²¹, and only 28 out of 184 countries’ NDCs include soil-related targets²². This omittance suggests that, as a global community, we are creating institutions and narratives that disincentivize or preclude action on adaptation, mitigation or both.”).

⁴⁰⁷ Zhu J., Luo Z., Sun T., Li W., Zhou W., Wang X., Fei X., Tong H., & Yin K. (2023) *Cradle-to-grave emissions from food loss and waste represent half of total greenhouse gas emissions from food systems*, NAT. FOOD 4(3): 1–13, 6 (“Analysis of the interactions between the various interventions reveals potential trade-offs. When multiple interventions are combined, possible synergy or antagonism should be understood. For example, the shift to more

plant-based diets is key to the sustainability of the food system⁴¹; however, this shift will increase waste-management-related emissions. This may be compensated via adopting more advanced waste management technologies such as AD or COM. The outcomes of combined interventions are also region dependent and time sensitive; these complexities are not investigated here but need further case studies.”).

⁴⁰⁸ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) [GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS](#), 87 (“Analysis of the technical potential to mitigate methane from four separate studies shows that for 2030, reductions of 29–57 Mt/yr could be made in the oil and gas subsector, 12–25 Mt/yr from coal mining, 29–36 Mt/yr in the waste sector and 6–9 Mt/yr from rice cultivation. Values for the livestock subsector are less consistent, ranging from 4–42 Mt/yr.”).

⁴⁰⁹ United States Climate Alliance (2018) [FROM SLCP CHALLENGE TO ACTION: A ROADMAP FOR REDUCING SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS TO MEET THE GOALS OF THE PARIS AGREEMENT](#), 102 (“Within the waste sector, all cost abatement potential is concentrated within the solid waste subsector which has three to six times the potential found in the wastewater (sewage) subsector (Figure 4.9). Totals in the three available analyses are very similar for the full waste sector, so that the full range is captured by 32 ± 4 Mt/ yr. Hence this sector has about half the potential of the fossil sector for all cost measures and a much narrower uncertainty range. Evaluating this mitigation potential as a share of projected 2030 waste sector emissions is complicated by a large divergence between them, which were ~70 Mt/yr in the Harmsen and US EPA analyses, whereas there was a much larger value of 114 Mt/yr in the IIASA analysis. Hence although all the studies find similar abatement potential, the share of 2030 emissions from waste estimated to be abatable ranges from just 25 per cent in the IIASA analysis to ~40-50 per cent in the US EPA and Harmsen analyses. For low-cost measures in the waste sector, the analyses are again fairly consistent with all falling within the range 16 ± 5 Mt/yr.”).

⁴¹⁰ United States Environmental Protection Agency (2019) [GLOBAL NON-CO₂ GREENHOUSE GAS EMISSION PROJECTIONS & MITIGATION 2015-2050](#), EPA-430-R-19-010, 70 (“Collection of LFG is feasible at most engineered landfills. It prevents high concentrations of gas in the landfill, which addresses public health and facility safety concerns. After collecting LFG, the least capital-intensive way to reduce emissions is flaring, which burns off the gas. However, flaring does not deliver any economic benefits for landfill operators. Energy production represents a potential revenue stream for landfills. It includes electricity generation, anaerobic digestion, and direct use. A variety of engine types and waste-to-energy processes can achieve electricity generation. Anaerobic digestion provides CH₄ for on-site electricity or for selling to the market. Direct use implies that a landfill transports captured methane to a facility, which uses it for electricity generation, as process heat, or as an input into other processes.”).

⁴¹¹ United States Environmental Protection Agency, [Basic information about landfill gas](#) (last visited 5 February 2023).

⁴¹² United States Environmental Protection Agency (2019) [GLOBAL NON-CO₂ GREENHOUSE GAS EMISSION PROJECTIONS & MITIGATION 2015-2050](#), EPA-430-R-19-010, 70 (“Energy production represents a potential revenue stream for landfills. It includes electricity generation, anaerobic digestion, and direct use. A variety of engine types and waste-to-energy processes can achieve electricity generation. Anaerobic digestion provides CH₄ for on-site electricity or for selling to the market. Direct use implies that a landfill transports captured methane to a facility, which uses it for electricity generation, as process heat, or as an input into other processes.”).

⁴¹³ DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggestad C., & Ulanov A. (2021) [CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT](#), McKinsey Sustainability, 55 (See Reference Path for modeling maximum technical opportunity by 2030 and 2050 (continued)).

⁴¹⁴ United States Environmental Protection Agency, [Basic information about landfill gas](#) (last visited 5 February 2023) (“About 69 percent of currently operational LFG energy projects in the United States generate electricity. A variety

of technologies, including reciprocating internal combustion engines, turbines, microturbines and fuel cells, can be used to generate electricity for onsite use and/or sale to the grid. The reciprocating engine is the most commonly used conversion technology for LFG electricity applications because of its relatively low cost, high efficiency and size ranges that complement the gas output of many landfills. Gas turbines are typically used in larger LFG energy projects while microturbines are generally used for smaller LFG volumes and in niche applications.”). *See also* Fuel Cell & Hydrogen Energy Association (27 April 2020) *Reducing waste emissions by using fuel cells and hydrogen*.

⁴¹⁵ Winn Z. (2 February 2022) *Reducing methane emissions at landfills*, MIT NEWS (“Now a startup that began at MIT is aiming to significantly reduce methane emissions from landfills with a system that requires no extra land, roads, or electric lines to work. The company, Loci Controls, has developed a solar-powered system that optimizes the collection of methane from landfills so more of it can be converted into natural gas. At the center of Loci’s (pronounced “low-sigh”) system is a lunchbox-sized device that attaches to methane collection wells, which vacuum the methane up to the surface for processing. The optimal vacuum force changes with factors like atmospheric pressure and temperature. Loci’s system monitors those factors and adjusts the vacuum force at each well far more frequently than is possible with field technicians making manual adjustments.”).

⁴¹⁶ DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggestad C., & Ulanov A. (2021) *CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT*, McKinsey Sustainability, 45–46 (“Methane emissions from solid waste could be abated by about 40 percent by 2030 and 90 percent by 2050 (Exhibit 18). Almost all of the reduction would be through diversion of organic material to secondary purposes, such as composting or biogas extraction. Organic waste could be sorted and processed through anaerobic digestion facilities to generate feedstock, fertilizer, soil enhancer, and renewable natural gas—or incinerated for energy.”). *See also* United States Environmental Protection Agency (2019) *GLOBAL NON-CO₂ GREENHOUSE GAS EMISSION PROJECTIONS & MITIGATION 2015-2050*, EPA-430-R-19-010, 70 (“Furthermore, enhanced waste diversion practices redirect biodegradable components of the waste stream from the landfill for reuse through recycling or conversion to a value-added product (e.g., energy or compost). Diverting organic waste components lowers the amount of CH₄ generated at the landfill. Other benefits from the measures under this category include the sale of recyclables, electricity, and cost savings in avoided tipping fees.”); and United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 87 (“Solid waste management: (residential) source separation with recycling/reuse; no landfill of organic waste; treatment with energy recovery or collection and flaring of landfill gas; (industrial) recycling or treatment with energy recovery; no landfill of organic waste.”).

⁴¹⁷ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 114 (“While more than 10 per cent of the global population lives in hunger (FAO 2017) roughly a third of all food produced for human consumption turns into lost or wasted at some point along the food supply chain (Porter *et al.* 2018; Gustavsson *et al.* 2011). Many studies highlight the mitigation benefits of reducing this large volume and indicate that the potential reductions of emissions can be substantial but also diverse (FAO 2019; Springmann *et al.* 2018; Wollenberg *et al.* 2015; Bajželi *et al.* 2014). Most of these provide both base case emissions and emissions reductions estimates only in terms of carbon dioxide equivalent rather than separating the various greenhouse gases. For example, an FAO report (2019) suggests that the global carbon footprint of food loss and waste, excluding emissions from land-use change, is 3.3 gigatonnes¹² of carbon dioxide equivalent (Gt CO₂e). Similarly, an earlier report from the FAO estimated total emissions related to food loss and waste of 2.7 Gt CO₂e (FAO, 2014). Based on the source data reported in Chapter 2, methane emissions from ruminants and rice cultivation are ~145 Mt/yr. Hence if it is assumed here that loss and waste in these two categories is similar to the total across all food types, methane emissions associated with food loss and waste would be nearly 50 Mt/yr.”). *See also* DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggestad C., & Ulanov A. (2021) *CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT*, McKinsey Sustainability, 46 (“As the world accelerates its efforts to align with the 1.5°C pathway, a key lever would be to reduce the volume of organic municipal solid waste. This would mean reducing food and paper waste by changing individual behaviors (for example, broad adoption of composting) and improving efficiency

in supply chains (for example, ensuring food does not rot in transit and reducing overstocking at supermarkets). Local volumes of organic waste are linked to population size, but there are actions society can take to control organic-waste volumes. Recycling of organic materials, such as paper, cardboard, and leather, as well as reduction of food waste are two effective approaches.”).

⁴¹⁸ Zhu J., Luo Z., Sun T., Li W., Zhou W., Wang X., Fei X., Tong H., & Yin K. (2023) *Cradle-to-grave emissions from food loss and waste represent half of total greenhouse gas emissions from food systems*, NAT. FOOD 4(3): 1–13, 5 (“Globally, halving FLW generation (acknowledged as one of the SDG targets by 203014) will achieve an annual reduction of 3.23 GtCO₂e in supply-embodied emissions (Fig. 3a). Through reducing the FLW input to waste management, it will further mitigate the annual GHG emissions from waste management by 1.42 GtCO₂e (Fig. 3a). The total intervention outcome is equivalent to approximately one-quarter of the GHG emissions from the global food system in 2017.”).

⁴¹⁹ For the links between extreme heat, crop harvest losses, and cooling, see Parajuli R., Thoma G., & Matlock M. D. (2019) *Environmental sustainability of fruit and vegetable production supply chains in the face of climate change: A review*, SCI. TOTAL ENVIRON. 650(2): 2863–2879, 2875 (“The basic factors that can support sustainable supply of F&V products are climate, proximity to the producers and the growing seasons. Likewise, *logistic management*, including facility-locations in the overall supply of F&V products is also connected with the *seasonality* of production, cost of transportation and the refrigeration/preservation requirements. In the logistic management areas, understanding the relationship between storage and waste is also relevant. Only less than 12% of the reviewed study (Table 1) explicitly considered the *wastage* at some part of the supply chain. The significance of such considerations can be explained from a Brazilian study, which compared food stores, with and without refrigerated units (Garnett, 2006). The study revealed that waste generation in the un-refrigerated store was 28% higher than the refrigerated store. Furthermore, refrigeration can also assist to improve self-sufficiency of F&V product supplies, and undoubtedly it is important aspect while addressing the consequences of climate change on the food security. However, it is important to evaluate the environmental and economic costs of whether storing indigenous products beyond their growing season would outweigh the energy use and other emissions resulting from the transport of imported foods.”); and Kibiti B. & Strubenhoff H. (16 October 2019) *How off-grid cold storage systems can help farmers reduce post-harvest losses*, BROOKINGS (“It is estimated that less than 10 percent of all perishable foods is currently being refrigerated, despite the fact that post-harvest losses add up to 30 percent of food production worldwide. The cold chain innovations around decentralized renewable energy (DRE) are paramount in Africa and Asia given that access and connection to electricity in rural areas, where food is produced, is still a luxury. In Kenya, an estimated 40 to 50 percent of food is lost or wasted throughout the entire food chain as it goes from farm to fork—twice the global average. In 2017, \$1.5 billion worth of food went to waste—tossed out or left to rot—according to the National Bureau of Statistics (KNBS), resulting in lost earnings for farmers and others. In Nigeria, 45 percent of postharvest output spoils due to the unavailability of cold storage, resulting in a 25 percent loss of income for the country’s 93 million small farmers. Cold stores reduce waste, and also help to improve the negotiation power of smallholders in the market.”). See also Parker L. E., McElrone A. J., Ostojka S. M., & Forrestel E. J. (2020) *Extreme heat effects on perennial crops and strategies for sustaining future production*, PLANT SCI. 295: 1–8, 1, (“Extreme heat exposure can stress plants, stunt development, and cause plant mortality, which often results in reduced quality and lower yield in agricultural crops [1]. Diminished crop yields due to extreme heat can have cascading effects on global economies and heighten concerns around food availability [[2], [3], [4]]. Recent heatwaves in Europe [2,3], Russia [4], and the central United States [5] reduced yields for *cereal crops*, and in some instances led to significant commodity price increases and spikes in food insecurity. Warming anomalies have also caused significant losses in woody *perennial* cropping systems.”).

⁴²⁰ See generally Fitzpatrick A. (18 January 2023) *A new startup wants to turn your food waste into chicken feed*, AXIOS.

⁴²¹ Zhu J., Luo Z., Sun T., Li W., Zhou W., Wang X., Fei X., Tong H., & Yin K. (2023) *Cradle-to-grave emissions from food loss and waste represent half of total greenhouse gas emissions from food systems*, NAT. FOOD 4(3): 1–13, 4–5 (“The growing international food trade between developed and developing countries results in long food supply

chains, which exacerbate FLW and associated GHG emissions due to long transport distances and multiple transactions³⁴. The complicated relationship is evident in the positive correlation between the food logistic GHG emissions and GDP, except for EA + SEA (Fig. 2c). Developed countries tend to generate more food logistic emissions from their food supply than developing countries (Fig. 2c), due in part to systematic management systems for the food supply³⁵ involving more complex requirements and standards for food handling.”).

⁴²² Geyik Ö., Hadjikakou M., & Bryan B. A. (2022) *Climate-friendly and nutrition-sensitive interventions can close the global dietary nutrient gap while reducing GHG emissions*, NAT. FOOD. 4: 61–73, 61 (“Here, we estimate the non-CO₂ greenhouse gas emissions resulting from closing the world’s dietary nutrient gap—that between country-level nutrient supply and population requirements—for energy, protein, iron, zinc, vitamin A, vitamin B12 and folate under five climate-friendly intervention scenarios in 2030. We show that improving crop and livestock productivity and halving food loss and waste can close the nutrient gap with up to 42% lower emissions (3.03 Gt CO₂eq yr⁻¹) compared with business-as-usual supply patterns with a persistent nutrient gap (5.48 Gt CO₂eq yr⁻¹).”).

⁴²³ Global Climate and Health Alliance (2023) *MITIGATING METHANE FROM THE WASTE SECTOR*, 8–9 (“The health benefits include:

- Avoid physical injuries, avoid respiratory infections, heart disease, stroke, and lung cancer associated with air pollution, such as the toxic smoke created from waste burning and landfill fires, which contain black carbon, carbon dioxide, and particulate matter, improved lung health and quality of life, especially for vulnerable and marginalized populations and communities living near sites. Improved waste management would help reduce the 7 million premature deaths attributed to air pollution globally.
- Avoid odor exposure, infection and disease from insects, rodents, and scavenging animals, and reduced pollution pathways in surface and groundwater caused by open dumping and unsanitary landfills. Diverting organic waste from landfills, and managing landfills with landfill gas collection, daily cover for waste, and liners in place to prevent leachate migration into groundwater can both mitigate methane and improve the overall health and livelihoods of communities surrounding landfill sites.
- Avoid physical injuries from landfills that are not engineered and rehabilitated to be resilient to extreme weather events and sea-level rise caused by climate change. For example, landfills that are not tightly compacted increase the risks of landfill slides and cause injuries and even casualties. In 2017, a garbage landslide in Addis Ababa, Ethiopia killed 116 people and buried dozens of homes surrounding the landfill.
- Avoid waterborne and foodborne diseases from the ingestion of water contaminated with leachate.
- Reduce the health impacts from producing and consuming fossil fuels as a source of energy by using biogas created by processing of organic waste through anaerobic digestion or capturing waste from landfills [see the Energy Sector report and GCHA’s From Cradle to Grave brief].
- Improve nutrition and food security by improving soil quality and availability of soil amendments via composting and anaerobic digestion.”).

⁴²⁴ United Nations Climate Technology Centre & Network, *Biocovers of landfills* (last visited 5 February 2023) (“Landfill top covers, which optimise environmental conditions for methanotrophic bacteria and enhance biotic methane consumption, are often called ‘biocovers’ and function as vast bio-filters. Biocovers are typically spread over an entire landfill area. They are often waste materials, such as diverse composts, mechanically-biologically treated waste, dewatered sewage sludge or yard waste. Methane oxidation in compost materials shows high oxidation capacity. Manipulation of landfill covers to maximise their oxidation capacity provides a promising complementary strategy for controlling methane emissions.”). See also Yazdani R. & Imhoff P. (2010) *BIOCOVERS AT LANDFILLS FOR METHANE EMISSIONS REDUCTION DEMONSTRATION*, CalRecycle, 70 (“Results from laboratory and field tests indicated both fresh and aged green material could oxidize CH₄ at high rates, up to 100-200 g CH₄/m²/day in field tests. These rates are on the high end of oxidation rates reported for composts in the literature. Thus, at least for the duration of the field tests pH, P, and NO₂-N conditions did not significantly affect biocover performance. However, the biocovers were installed in relatively thick layers (~ 90 cm), and after seven months of operation with a high loading of [landfill gas] LFG (500-700 g CH₄/m²/day) thick anaerobic zones developed. The formation of these zones was undoubtedly linked to the high LFG loading and the cooler winter temperatures. In this state both materials

generated significant CH₄ (> 100 g CH₄/m²/day, aged green material) and were ineffective in oxidizing CH₄. However, for the aged green material the performance was improved considerably when the loading rate was decreased to 200–250 g CH₄/m²/day. In this case the green material oxidized 50–70 g CH₄/m²/day. When both biocovers were operated at this smaller loading rate for several months, the aged green material performed reasonably well with measured CH₄ removal rates matching independent model predictions. The same was not true for the fresh green material, though, where it appeared that CH₄ continued to be generated and the biocover performance was always significantly less efficient at removing CH₄ than model predictions.”).

⁴²⁵ Franqueto R., Cabral A., Capanema M. A., & Schirmer W. N. (2019) *Fugitive Methane Emissions From Two Experimental Biocovers Constructed With Tropical Residual Soils: Field Study Using a Large Flux Chamber*, DETRITUS 7: 119–127, 126 (“The methane oxidation capacity was quite high for both subareas (control and enriched). Oxidation efficiencies (at a depth of 0.10 m) averaged 42% for the control subarea and 80% for the enriched area. CH₄ and CO₂ surface fluxes averaged 20 g.m⁻².d⁻¹ and 316 g.m⁻².d⁻¹ in the organic-matter-enriched subarea during the monitoring period, while those measured in the control subarea averaged 34 g.m⁻².d⁻¹ and 251 g.m⁻².d⁻¹, respectively. It is noteworthy that the surface fluxes were obtained using a custom-made 4.5-m² flux chamber, which allows for better representativeness of surface fluxes, because it allows inclusion of cracks and other imperfections that may affect measurements. The lower CH₄ fluxes and higher oxidation efficiency in the enriched subarea can be associated with the greater organic matter content in the enriched subarea, which created more favourable conditions for the development of ubiquitous methanotrophic colonies (Humer and Lechner, 2001). Temperature conditions, which ranged from 20 to 42°C at the surface and within the first 10 cm of the cover, favoured methane oxidation.”).

⁴²⁶ Chavan D. & Kumar S. (2018) *Reduction of methane emission from landfill using biocover as a biomitigation system: A review*, INDIAN J. EXP. BIOL. 56(7): 451–459, 456 (Table 3, “Lee et al.⁵⁴ found that rate of CH₄ oxidation of sandy biocover improved by 60 % with the addition of 100 mg-N NH₄ per kg of soil. Vegetation on biocover might affect the growth and activities of methanotrophic bacteria in different ways. Bohn and Jager⁵⁵ observed that the rate of CH₄ oxidation could be increased by 50% through vegetation growth on landfill biocover. A vegetation root assists the process of transporting O₂ from the atmosphere into deeper soil layers.”).

⁴²⁷ Franqueto R., Cabral A., Capanema M. A., & Schirmer W. N. (2019) *Fugitive Methane Emissions From Two Experimental Biocovers Constructed With Tropical Residual Soils: Field Study Using a Large Flux Chamber* DETRITUS 7: 119–127, 119 (“This study aimed at assessing the response of two experimental passive methane oxidation biocovers (PMOB) installed in a Brazilian landfill located in Guarapuava, State of Paraná. The PMOBs covered an area of 18 m² each, and were 0.70-m-thick. The first PMOB (control subarea) was constructed using the same soil used to cover closed landfill cells, i.e. a typical residual soil. The second PMOB (enriched subarea) was constructed with a mixture of the residual soil and mature compost, with a resulting organic matter content equal to 4.5%. CH₄ and CO₂ surface fluxes were measured in a relatively large (4.5 m²) static chamber. CH₄, CO₂ and O₂ concentrations were also measured at different depths (0.10, 0.20, 0.25 and 0.30 m) within PMOBs. The concentrations from the raw biogas were also measured. Methane oxidation efficiencies (Effox) were estimated based on the CO₂/CH₄ ratio. The average CH₄ and CO₂ concentrations in the raw biogas (42% and 32%, respectively) for the 16 campaigns corroborated those typically found in Brazilian landfills. Lower CH₄ fluxes were obtained within the enriched subarea (average of 20 g.m⁻².d⁻¹), while the fluxes in the control subarea averaged 34 g.m⁻².d⁻¹. Effox values averaged 42% for the control subarea and 80% for the enriched one. The results indicate that there is a great potential to reduce landfill gas (LFG) emissions by using passive methane oxidation bio-systems composed of enriched substrates (with a higher content of organic matter).”).

⁴²⁸ United Nations Climate Technology Centre & Network, *Biocovers of landfills* (last visited 5 February 2023) (“Optimised and well-adapted biocovers are relatively less expensive in terms of operation and installation compared to a conventional gas collection system, whose cost can be high compared to the value of the captured fuel.”).

⁴²⁹ Scheutz C., Olesen A. O. U., Fredenslund A. M., & Kjeldsen P. (2022) *Revisiting the passive biocover system at Klintholm landfill, six years after construction*, WASTE MANAGE. 145: 92–101, 92 (“In spite of an inhomogeneous

distribution of landfill gas load to the methane oxidation layer, the performance of the biocover system had not declined over the 6–7 years since its establishment, even though no maintenance had been carried out in the intervening years.”).

⁴³⁰ United Nations Climate Technology Centre & Network, *Biocovers of landfills* (last visited 5 February 2023) (“These biocovers have low maintenance requirements and they can be maintained by a relatively untrained person. Thus, they are suitable for both high and low income countries.”).

⁴³¹ Duan Z., Kjeldsen P., & Scheutz C. (2022) *Efficiency of gas collection systems at Danish landfills and implications for regulations*, WASTE MANAGE. 139: 269–278, 277 (“This study evaluated gas collection efficiency at 23 Danish landfills with active gas collection systems, based on whole-site methane emission measurements and collection rates obtained from landfill operators. Methane emissions at Danish landfills are generally low (2.6–60.8 kg h⁻¹), which is probably due to the small amount of waste disposed, its low organic content and waste aging with declining gas generation. Gas collection efficiencies at the studied Danish sites ranged from 13 to 86%, and the average efficiency was 50% (assuming no oxidation in landfill covers). Compared to other landfills reported in the literature, gas collection efficiencies at Danish landfills are generally low, which might be attributed to gas leaks from installations, lack of or insufficient gas collection in some waste cells or incomplete coverage of landfill surfaces. Gas collection efficiency can be used as an index for judging the landfill operator’s performance in terms of managing landfill gas. For example, if a minimum efficiency of 80% is set as the methane mitigation goal, any landfill not achieving this figure will need to take remedial actions. In this regard, gas collection system optimisation or the establishment of other mitigation measures (e.g. installing engineered biocover systems) must be initiated, and landfill operators can decide which technology to use by conducting a life cycle cost (LCC) analysis.”).

⁴³² Berkeley (2022) *Fighting Climate Change Through Landfill Biocovers* (“Fighting Climate Change through Landfill Biocovers Project Climate at UC Berkeley’s Center for Law, Energy, and the Environment”).

⁴³³ Tseng E., Hanson-Lugo D., Thompson D., & Lee M. (2020) *When Viewed from Space*, MSW MAGAZINE 30(7): 18–23, 22–23 (“From the above graph, the estimated reduction in methane flux based on the NASA flyovers is approximately 60%. This significant amount of methane flux reduction also directly corresponds to the reduction in odor complaints over the same time and corresponds inversely with the increase in the volume of landfill gas being collected by the landfill. The SCL LEA separately compiled and analyzed the landfill gas collection data. These data show that there is an estimated 55% to 60% increase in the collected volume of landfill gas because of the addition of the major odor mitigation measures implemented compared to the prior period.”).

⁴³⁴ United States Climate Alliance (2018) *FROM SLCP CHALLENGE TO ACTION: A ROADMAP FOR REDUCING SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS TO MEET THE GOALS OF THE PARIS AGREEMENT*, 15 (“Significant opportunities for reducing methane emissions from landfills and capturing value can be seized by reducing food loss and waste, diverting organic waste to beneficial uses, and improving landfill management. These and other actions collectively could reduce methane emissions from waste by an estimated 40-50 percent by 2030 (Appendix A). Such efforts could add value in our states by reducing emissions of volatile organic compounds and toxic air contaminants from landfills, recovering healthy food for human consumption in food insecure communities, supporting healthy soils and agriculture, generating clean energy and displacing fossil fuel consumption, and providing economic opportunities across these diverse sectors. Many of these benefits will accrue in low-income and disadvantaged communities.”).

⁴³⁵ For example, Chile is employing airborne surveys to detect sources of methane emissions in waste management and other infrastructure. See Geospatial World, *Airborne Surveys Launched in Chile to Detect Sources of Methane* (last visited 4 February 2023).

⁴³⁶ Cusworth D. H., Duren R. M., Thorpe A. K., Tseng E., Thompson D., Guha A., Newman S., Foster K. T., & Miller C. E. (2020) *Using remote sensing to detect, validate, and quantify methane emissions from California solid waste operations*, ENVIRON. RES. LETT. 15(5): 1–11, 1 (“Remote sensing is an avenue to quantify process-level emissions

from waste management facilities. The California Methane Survey flew the Next Generation Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS-NG) over 270 landfills and 166 organic waste facilities repeatedly during 2016–2018 to quantify their contribution to the statewide methane budget. We use representative methane retrievals from this campaign to present three specific findings where remote sensing enabled better landfill and composting methane monitoring: (1) Quantification of strong point source emissions from the active face landfills that are difficult to capture by *in situ* monitoring or landfill models, (2) emissions that result from changes in landfill infrastructure (design, construction, and operations), and (3) unexpected large emissions from two organic waste management methods (composting and digesting) that were originally intended to help mitigate solid waste emissions. Our results show that remotely-sensed emission estimates reveal processes that are difficult to capture in biogas generation models. Furthermore, we find that airborne remote sensing provides an effective avenue to study the temporally changing dynamics of landfills.”).

⁴³⁷ Maasackers J. D., Varon D. J., Elfarsdóttir A., McKeever J., Jervis D., Mahapatra G., Pandey S. Lorente A., Borsdorff T., Foothuis L. R., Schuit B. J., Tol P., van Kempen T. A., van Hees R., & Aben I. (2022) *Using satellites to uncover large methane emissions from landfills*, SCI. ADV. 8(32): 1–8, 1 (“We use the global surveying Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) to identify large emission hot spots and then zoom in with high-resolution target-mode observations from the GHGSat instrument suite to identify the responsible facilities and characterize their emissions. Using this approach, we detect and analyze strongly emitting landfills (3 to 29 t hour⁻¹) in Buenos Aires, Delhi, Lahore, and Mumbai. Using TROPOMI data in an inversion, we find that city-level emissions are 1.4 to 2.6 times larger than reported in commonly used emission inventories and that the landfills contribute 6 to 50% of those emissions. Our work demonstrates how complementary satellites enable global detection, identification, and monitoring of methane superemitters at the facility level.”); *discussed in* Dickie G. (11 August 2022) *Landfills around the world release a lot of methane - study*, REUTERS.

⁴³⁸ Clean Air Task Force (16 November 2022) *Clean Air Task Force and partners announce \$3 million in Global Methane Hub funding for work on waste sector methane*, News & Media (“With Global Methane Hub funding, CATF and RMI will launch **The Waste Methane Assessment Platform (Waste MAP)**, an open-source platform for information on waste methane to facilitate sharing of information and best practices for global policymakers, operators, and financiers. The platform will leverage inventory, modeled, and measured data from organizations like Carbon Mapper, UN Habitat, the Climate and Clean Air Coalition, and others, and combine this with in country support to develop improved site-specific information to deliver actionable insights that empower key decision makers and communities to deploy resources to priority intervention areas.”). *See also* Waste Map, *Measure, map, and mitigate global waste methane emissions* (last visited 3 February 2024).

⁴³⁹ Spokas K. A., Bogner J., & Corcoran M. (2021) *Modeling landfill CH₄ emissions: CALMIM international field validation, using CALMIM to simulate management strategies, current and future climate scenarios*, ELEM. SCI. ANTH. 9: 1–20, 1 (“We focus on site-specific field data comparisons to CALMIM-predicted annual and monthly CH₄ emissions both without and without methanotrophic oxidation. Overall, 74% of 168 individual surface CH₄ emission measurements across 34 international sites were consistent with CALMIM-modeled annual predictions with oxidation (+ or – *SD*). Notably, the model overpredicted 30 comparisons and underpredicted 13 comparisons.”); (“In order to realistically address current and future climate scenarios, updated modeling is required to focus more directly on *emissions* inclusive of soil *oxidation*, as opposed to reliance on a CH₄ *generation* model applied to all global landfills. Moreover, considering the high temporal variability of oxidation rates in individual cover soil profiles, use of a single estimated ‘% oxidation’ routinely applied to many sites is not recommended. Also, the routine use of actual CH₄ recovery data should replace the use of a hypothetical ‘% CH₄ collection efficiency.’”).

⁴⁴⁰ DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggstad C., & Ulanov A. (2021) *CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT*, McKinsey Sustainability, 49 (“By 2030, methane emissions from wastewater could be abated by 27 percent, and by 2050, they could be abated by 77 percent (Exhibit 19). The most effective solution would be to increase the volume

of wastewater collected and treated centrally. There is also an opportunity to widen access to modern wastewater infrastructure, which is underdeveloped in many geographies.”).

⁴⁴¹ United States Climate Alliance (2018) *FROM SLCP CHALLENGE TO ACTION: A ROADMAP FOR REDUCING SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS TO MEET THE GOALS OF THE PARIS AGREEMENT*, 16 (“Wastewater treatment: (residential) upgrade to secondary/tertiary anaerobic treatment with biogas recovery and utilization; wastewater treatment plants instead of latrines and disposal; (industrial) upgrade to two-stage treatment, i.e., anaerobic treatment with biogas recovery followed by aerobic treatment.”). See also DeFabrizio S., Glazener W., Hart C., Henderson K., Kar J., Katz J., Pratt M. P., Rogers M., Tryggstad C., & Ulanov A. (2021) *CURBING METHANE EMISSIONS: HOW FIVE INDUSTRIES CAN COUNTER A MAJOR CLIMATE THREAT*, McKinsey Sustainability, 49 (“By 2030, methane emissions from wastewater could be abated by 27 percent, and by 2050, they could be abated by 77 percent (Exhibit 19). The most effective solution would be to increase the volume of wastewater collected and treated centrally. There is also an opportunity to widen access to modern wastewater infrastructure, which is underdeveloped in many geographies.”); and Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., & Schöpp W. (2020) *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model*, ENVIRON. RES. COMM. 2(2): 1–21, 16–17 (“An additional almost 10 percent of baseline emissions in 2050 could be removed at a marginal cost below 20 €/t CO₂eq by implementing proper waste and wastewater handling in China, India and the rest of South-East Asia. This would likely come with considerable co-benefits in the form of reduced air and water pollution.”).

⁴⁴² Saunio M., *et al.* (2020) *The Global Methane Budget 2000-2017*, EARTH SYST. SCI. DATA 12(3): 1561–1623 (“Natural methane sources include vegetated wetland emissions and inland water systems (lakes, small ponds, rivers), land geological sources (gas–oil seeps, mud volcanoes, microseepage, geothermal manifestations, and volcanoes), wild animals, termites, thawing terrestrial and marine permafrost, and oceanic sources (biogenic, geological, and hydrate).”). See also Barba J., Bradford M.A., Brewer P.E., Bruhn D., Covey K., van Haren J., Magonigal J.P., Mikkelsen T.N., Pangala S.R., Pihlatie M., Poulter B., Rivas-Ubach A., Schadt C.W., Terazawa K., Warner D.L., Zhang Z., & Vargas R. (2019) *Methane emissions from tree stems: a new frontier in the global carbon cycle*, NEW PHYTOLOGIST 222: 18–28, 18 (“Tree stems from wetland, floodplain and upland forests can produce and emit methane (CH₄). Tree CH₄ stem emissions have high spatial and temporal variability, but there is no consensus on the biophysical mechanisms that drive stem CH₄ production and emissions. Here, we summarize up to 30 opportunities and challenges for stem CH₄ emissions research, which, when addressed, will improve estimates of the magnitudes, patterns and drivers of CH₄ emissions and trace their potential origin.”); compare Gauci V., Pangala S. R., Shenkin A., Barba J., Bastviken D., Figueiredo V., Gomez C., Enrich-Prast A., Sayer E., Stauffer T., Welch B., Elias D., McNamara N., Allen M., & Malhi Y. (2024) *Global atmospheric methane uptake by upland tree woody surfaces*, NATURE 631(8022): 796–800, 796 (“Stable carbon isotope measurement of methane in woody surface chamber air and process-level investigations on extracted wood cores are consistent with methanotrophy, suggesting a microbially mediated drawdown of methane on and in tree woody surfaces and tissues. By applying terrestrial laser scanning-derived allometry to quantify global forest tree woody surface area, a preliminary first estimate suggests that trees may contribute 24.6–49.9 Tg of atmospheric methane uptake globally. Our findings indicate that the climate benefits of tropical and temperate forest protection and reforestation may be greater than previously assumed.”).

⁴⁴³ United Nations Environment Programme (2021) *EMISSIONS GAP REPORT 2021: THE HEAT IS ON – A WORLD OF CLIMATE PROMISES NOT YET DELIVERED*, 47 (“Over the last two decades, the main cause of increasing atmospheric methane is likely increasing anthropogenic emissions, with hotspot contributions from agriculture and waste in South and South-East Asia, South America and Africa, and from fossil fuels in China, the Russian Federation and the United States of America (Jackson *et al.* 2020). Emissions from natural sources may also be increasing, as wetlands warm, tropical rainfall increases and permafrost thaws.”). See also Lan X., Nisbet E. G., Dlugokencky E. J., & Michel S. E. (2021) *What do we know about the global methane budget? Results from four decades of atmospheric CH₄ observations and the way forward*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 1–14, 11 (“Explaining the renewed and accelerating increase in atmospheric CH₄ burden since 2007 remains challenging, and the exact causes are not yet clear. But, the observations we describe suggest that increased emissions from microbial sources are the strongest

driver, with a relatively smaller contribution from other processes, e.g., fossil fuel exploitation. A more difficult question to answer is the one posed by this special issue: is warming feeding the warming? We cannot say for certain, but we cannot rule out the possibility that climate change is increasing CH₄ emissions. The strong signals from the tropics combined with the isotopic data are consistent with increased emissions from natural wetlands, but large [interannual variability (IAV)] and inter-decadal variability in wetland drivers like precipitation make it difficult to identify small trends. Observations are needed that will help process models capture this variability. The size of the IAV illustrates the potential scope of uncontrollable near-future change and emphasizes the urgency of reducing the global methane burden by mitigating the methane emissions that we can control, from the fossil fuel and agricultural sectors.”).

⁴⁴⁴ Allen G. H. (2022) *Cause of the 2020 surge in atmospheric methane clarified*, NATURE 612(7940): 413–414, 413 (“Its atmospheric concentration has nearly tripled since pre-industrial times, from 700 parts per billion (p.p.b.) to more than 1,900 p.p.b. today³ (see also go.nature.com/3xm1dx4). During 2007–19, the concentration rose at a rate of 7.3 ± 2.4 p.p.b. per year. Then, in 2020, the methane growth rate increased dramatically to 15.1 ± 0.4 p.p.b. per year. ... The concentration of atmospheric methane surged again (see go.nature.com/3xm1dx4) to 18.2 ± 0.5 p.p.b. per year in 2021 — another mysterious acceleration without a clear cause, and the fastest rate of increase ever recorded.”); *citing data from United States Department of Commerce, Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases (last visited 2 February 2023); and Lan X., Thoning K. W., & Dlugokencky E. J., Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements, Version 2023-01 (last visited 2 February 2023).*

⁴⁴⁵ Peng S., Lin X., Thompson R. L., Xi Y., Liu G., Hauglustaine D., Lan X., Poulter B., Ramonet M., Saunio M., Yin Y., Zhang Z., Zheng B., & Ciais P. (2022) *Wetland emission and atmospheric sink changes explain methane growth in 2020*, NATURE 612(7940): 477–482, 479 (“Warmer and wetter wetlands over the Northern Hemisphere in 2020 (Supplementary Table 1) increased emissions by 6.0 ± 2.5 Tg CH₄ yr⁻¹ relative to 2019, dominating the net increase in global wetland emissions (6.0 ± 2.3 Tg CH₄ yr⁻¹) in 2020 (Extended Data Fig. 5).”), 481 (“In summary, our results show that an increase in wetland emissions, owing to warmer and wetter conditions over wetlands, along with decreased OH, contributed to the soaring methane concentration in 2020. The large positive MGR anomaly in 2020, partly due to wetland and other natural emissions, reminds us that the sensitivity of these emissions to interannual variation in climate has had a key role in the renewed growth of methane in the atmosphere since 2006. The wetland methane–climate feedback is poorly understood, and this study shows a high interannual sensitivity that should provide a benchmark for future coupled CH₄ emissions–climate models. We also show that the decrease in atmospheric CH₄ sinks, which resulted from a reduction of tropospheric OH owing to less NO_x emissions during the lockdowns, contributed $53 \pm 10\%$ of the MGR anomaly in 2020 relative to 2019. Therefore, the unprecedentedly high methane growth rate in 2020 was a compound event with both a reduction in the atmospheric CH₄ sink and an increase in Northern Hemisphere natural sources. With emission recovery to pre-pandemic levels in 2021, there could be less reduction in OH. The persistent high MGR anomaly in 2021 hints at mechanisms that differ from those responsible for 2020, and thus awaits an explanation.”).

⁴⁴⁶ Canadell J. G., et al. (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 5–66 (“Methane release from permafrost thaw (including abrupt thaw) under high-warming RCP8.5 scenario has been estimated at 836–2614 Tg CH₄ over the 21st century and 2800–7400 Tg CH₄ from 2100–2300 (Schneider von Deimling et al., 2015), and as 5300 Tg CH₄ over the 21st century and 16000 Tg CH₄ from 2100–2300 (Turetsky et al., 2020). For RCP4.5, these numbers are 538–2356 Tg CH₄ until 2100 and 2000–6100 Tg CH₄ from 2100–2300 (Schneider von Deimling et al., 2015), and 4100 Tg CH₄ until 2100 and 10000 Tg CH₄ from 2100–2300 (Turetsky et al., 2020).”). Where RCP4.5 is generally consistent with current climate commitments. See also Secretariat of the United Nations Framework Convention on Climate Change (25 October 2021) *Nationally determined contributions under the Paris Agreement: Revised synthesis report*, FCCC/PA/CMA/2021/ 8/Rev.1, 29 (Figure 9, “Note: The assessed global emission ranges (including LULUCF) for the IPCC scenarios provided in the SR1.5 (table 2.4) are shown with interquartile ranges.

The illustrative SSP scenarios considered in the contribution of Working Group I to the AR6 are indicated (SSP2-4.5 by a yellow solid line, with an estimated end-of-century temperature of 2.7 (2.1–3.5) °C). The total GHG emission level resulting from implementation of the latest NDCs is compared with the emission levels for three of the scenario groups in the SR1.5 scenario database: a group of scenarios in which global mean temperature rise is kept at all times below 1.5 °C relative to the 1850–1900 (“below 1.5 °C”); a group of scenarios in which warming is kept at around 1.5 °C with a potential limited overshoot and then decrease of global mean temperature rise below 1.5 °C by the end of the century (“1.5 °C with limited overshoot”); and a third group that implies warming of well below 2 °C, that is above 1.5 °C by 2100 but with a likely chance of it being below 2 °C at all times (“lower 2 °C”). The latter group features scenarios with strong emission reductions in the 2020s or only after 2030.”).

⁴⁴⁷ Turetsky M. R., Abbott B. W., Jones M. C., Anthony K. W., Olefeldt D., Schuur E. A. G., Grosse G., Kuhry P., Hugelius G., Koven C., Lawrence D. M., Gibson C., Sannel A. B. K., & McGuire A. D. (2020) *Carbon release through abrupt permafrost thaw*, NAT. GEOSCI. 13(2): 138–143, 138–139 (“The permafrost zone is expected to be a substantial carbon source to the atmosphere, yet large-scale models currently only simulate gradual changes in seasonally thawed soil. Abrupt thaw will probably occur in <20% of the permafrost zone but could affect half of permafrost carbon through collapsing ground, rapid erosion and landslides. Here, we synthesize the best available information and develop inventory models to simulate abrupt thaw impacts on permafrost carbon balance. Emissions across 2.5 million km² of abrupt thaw could provide a similar climate feedback as gradual thaw emissions from the entire 18 million km² permafrost region under the warming projection of Representative Concentration Pathway 8.5. While models forecast that gradual thaw may lead to net ecosystem carbon uptake under projections of Representative Concentration Pathway 4.5, abrupt thaw emissions are likely to offset this potential carbon sink. Active hillslope erosional features will occupy 3% of abrupt thaw terrain by 2300 but emit one-third of abrupt thaw carbon losses. Thaw lakes and wetlands are methane hot spots but their carbon release is partially offset by slowly regrowing vegetation. After considering abrupt thaw stabilization, lake drainage and soil carbon uptake by vegetation regrowth, we conclude that models considering only gradual permafrost thaw are substantially underestimating carbon emissions from thawing permafrost.. Our simulations suggest net cumulative abrupt thaw carbon emissions on the order of 80±19PgC by 2300 (Fig. 2a). For context, a recent modelling study found that gradual vertical thaw could result in permafrost carbon losses of 208PgC by 2300 under RCP8.5 (multimodel mean), although model projections ranged from a net carbon gain of 167PgC to a net loss of 641PgC (ref. 2). Thus, our results suggest that abrupt thaw carbon losses are equivalent to approximately 40% of the mean net emissions attributed to gradual thaw. Most of this carbon release stems from newly formed features that cover <5% of the permafrost region”). See also Schuur E. A. G., *et al.* (2022) *Permafrost and Climate Change: Carbon Cycle Feedbacks from the Warming Arctic*, ANNU. REV. ENVIRON. RESOUR. 47: 343–71, 351 (“Research at the global scale that links these effects across both lowlands and uplands showed that 20% of the northern permafrost region was considered susceptible to past and future abrupt thaw (47). Importantly, this area also stores 50% of the near-surface soil carbon showing the correlation between carbon and ice accumulation that heightens the risk of abrupt thaw to climate change. Since ESMs do not simulate abrupt thaw, dynamics of ecosystem change including carbon cycling have been represented by a different class of regional models that track soil carbon losses as well as carbon gains from plant growth through ecological succession following abrupt thaw. The most comprehensive of these succession models that included the response of abrupt thaw across uplands and lowlands found that an additional 40% more net ecosystem carbon (80 ± 19 Pg C) would be released by 2300 (48) as compared to the ensemble estimate of net ecosystem carbon release from the PCN-MIP (30), which as described previously, only tracked the effect of gradual top-down permafrost thaw as the climate warms. Most of this additional 40% carbon release is attributed to new abrupt thaw features that cover <5% of the permafrost region. Moreover, plant growth in the succession model offset approximately 20% of the permafrost carbon release, a much lower proportion as compared to the estimate from ESMs in the PCN-MIP. Furthermore, the abrupt thaw succession model could track CH₄, in contrast to the PCN-MIP, which did not, and showed that approximately 20% of the net carbon loss from abrupt thaw could be emitted as CH₄, which contributed 50% of the radiative forcing due to its higher global warming potential. These findings are consistent with other abrupt thaw models that considered subsets of the Arctic permafrost landscape such as lake expansion in lowlands (26, 27).”).

⁴⁴⁸ Rehder Z., Kleinen T., Kutzbach L., Stepanenko V., Langer M., & Brovkin V. (2023) *Simulated methane emissions from Arctic ponds are highly sensitive to warming*, *BIOGEOSCI.* 20(14): 2837–2855, 2838 (“Most Arctic ponds emit predominantly contemporary, recently fixed, carbon (Negandhi et al., 2013; Bouchard et al., 2015; Dean et al., 2020). However, newly-formed ice-wedge ponds might emit older carbon than the average Arctic pond. When the permafrost adjacent to the thawing ice wedge degrades, old carbon can leech from the thawed sediments into the pond fueling methanogenesis (Langer et al., 2015; Preskienis et al., 2021) and exerting a positive climatic feedback. Furthermore, the composition of the ponds’ methanogenic communities might change in response to the warming Arctic.”), 2849 (“While ponds are not hotspots of methane emissions in our study area under the current climate, our model simulations indicate that they will become stronger methane sources under further warming. We project an increase of pond methane emissions of $1.33 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ year}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.”). *See also* Kleinen T., Gromov S., Steil B., & Brovkin V. (2021) *Atmospheric methane underestimated in future climate projections*, *ENVIRON. RES. LETT.* 16(9): 1–14, 4 (“In the case of the low radiative forcing scenarios SSP1–1.9 and SSP1–2.6, the concentration maximum occurs at the end of the historical period and does not differ significantly between our experiments and the published scenarios. The concentration decline after that maximum, however, occurs much more slowly in our experiments, leading to higher atmospheric methane concentrations than in the published scenarios. For the moderate to high warming scenarios SSP2–4.5, SSP3–7.0 and SSP5–8.5, however, the evolution of atmospheric methane is much more dramatic. Here, maximum atmospheric concentrations become substantially higher than in the published scenarios and stay at a very high level until the end of the experiments in 3000 CE. For SSP2–4.5, the maximum in CH_4 is 50% higher than published previously, for SSP3–7.0 it is 131% higher and for SSP5–8.5 it is 130% higher.”).

⁴⁴⁹ Canadell J. G., et al. (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 5–66 (“Methane release from permafrost thaw (including abrupt thaw) under high-warming RCP8.5 scenario has been estimated at 836–2614 Tg CH_4 over the 21st century and 2800–7400 Tg CH_4 from 2100–2300 (Schneider von Deimling et al., 2015), and as 5300 Tg CH_4 over the 21st century and 16000 Tg CH_4 from 2100–2300 (Turetsky et al., 2020). For RCP4.5, these numbers are 538–2356 Tg CH_4 until 2100 and 2000–6100 Tg CH_4 from 2100–2300 (Schneider von Deimling et al., 2015), and 4100 Tg CH_4 until 2100 and 10000 Tg CH_4 from 2100–2300 (Turetsky et al., 2020).”). *See also* Permafrost Pathways, *Course of Action: Mitigation Policy* (last visited 5 February 2023) (“Depending on how hot we let it get, carbon emissions from Arctic permafrost thaw are expected to be in the range of 30 to more than 150 billion tons of carbon (110 to more than 550 Gt CO_2) this century, with upper estimates on par with the cumulative emissions from the entire United States at its current rate. To put it another way, permafrost thaw emissions could use up between 25 and 40 percent of the remaining carbon budget that would be necessary to cap warming at the internationally agreed-upon 2 degrees Celsius global temperature threshold established in the Paris Agreement. ... Despite the enormity of this problem, gaps in permafrost carbon monitoring and modeling are resulting in permafrost being left out of global climate policies, rendering our emissions targets fundamentally inaccurate. World leaders are in a race against time to reduce emissions and prevent Earth’s temperature from reaching dangerous levels. The problem is, without including current and projected emissions from permafrost, this race will be impossible to finish.... 82% [o]f IPCC models do not include carbon emissions from permafrost thaw.”); and Froitzheim N., Majka J., & Zastrozhnov D. (2021) *Methane release from carbonate rock formations in the Siberian permafrost area during and after the 2020 heat wave*, *PROC. NAT’L. ACAD. SCI.* 118(32): 1–3, 1 (“In the Taymyr Peninsula and surroundings in North Siberia, the area of the worldwide largest positive surface temperature anomaly for 2020, atmospheric methane concentrations have increased considerably during and after the 2020 heat wave. Two elongated areas of increased atmospheric methane concentration that appeared during summer coincide with two stripes of Paleozoic carbonates exposed at the southern and northern borders of the Yenisey-Khatanga Basin, a hydrocarbon-bearing sedimentary basin between the Siberian Craton to the south and the Taymyr Fold Belt to the north. Over the carbonates, soils are thin to nonexistent and wetlands are scarce. The maxima are thus unlikely to be caused by microbial methane from soils or wetlands. We suggest that gas hydrates in fractures and pockets of the carbonate rocks in the permafrost zone became unstable due to warming from the surface. This process may add unknown quantities of methane to the atmosphere in the near future.”); *discussed in* Carrington D. (2 August 2021) *Climate crisis: Siberian heatwave led to new methane emissions, study says*, *THE GUARDIAN* (“The Siberian heatwave of 2020 led to new methane emissions from the permafrost,

according to research. Emissions of the potent greenhouse gas are currently small, the scientists said, but further research is urgently needed. Analysis of satellite data indicated that fossil methane gas leaked from rock formations known to be large hydrocarbon reservoirs after the heatwave, which peaked at 6C above normal temperatures. Previous observations of leaks have been from permafrost soil or under shallow seas.”), and Mufson S. (3 August 2021) *Scientists expected thawing wetlands in Siberia’s permafrost. What they found is ‘much more dangerous’*, THE WASHINGTON POST.

⁴⁵⁰ Cheng C. & Redfern S. A. T. (2022) *Impact of interannual and multidecadal trends on methane-climate feedbacks and sensitivity*, NAT. COMMUN. 13(3592): 1–11, 1 (“We identify oscillations between positive and negative feedbacks, showing that both contribute to increasing C_{CH_4} . Interannually, increased emissions via positive feedbacks (e.g. wetland emissions and wildfires) with higher land surface air temperature (LSAT) are often followed by increasing C_{CH_4} due to weakened methane sink via atmospheric $\bullet OH$, via negative feedbacks with lowered sea surface temperatures (SST), especially in the tropics. Over decadal time scales, we find alternating rate-limiting factors for methane oxidation: when C_{CH_4} is limiting, positive methane-climate feedback via direct oceanic emissions dominates; when $\bullet OH$ is limiting, negative feedback is favoured. Incorporating the interannually increasing C_{CH_4} via negative feedbacks gives historical methane-climate feedback sensitivity $\approx 0.08 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, much higher than the IPCC AR6 estimate.”).

⁴⁵¹ Feng L., Palmer P. I., Zhu S., Parker R. J., & Liu Y. (2022) *Tropical methane emissions explain large fraction of recent changes in global atmospheric methane growth rate*, NAT. COMMUN. 13(1378): 1–8, 2 (“Our analysis of GOSAT CH_4 column data from 2010 to 2019 shows large-scale changes in tropical CH_4 emissions that explain more than 80% of the observed global atmospheric growth rate. Over this decadal period, we find that tropical Africa plays the largest role in determining the variation of tropical emissions, followed by tropical South America and India. We find that emissions from mainland and maritime (island nations) of Southeast Asia have reduced over our study period, driven by reduced rainfall. Contrary to a previous study we find no evidence of an upward trend in Indian emissions early in the study period, instead our analysis shows large year-to-year variations that peak during the 2014–2016 El Niño and again during 2017 and 2019. We find that we can explain a significant fraction of changes in CH_4 emissions over tropical South America and tropical Africa by large-scale changes in tropical SSTs characterized by indices that describe El Niño and the Indian Ocean Dipole, respectively.”), 5 (“Our analysis over tropical Africa, in particular, represents a first step towards understanding a new positive climate feedback in the Earth system. Previous studies have reported relationships between a warming climate due to rising levels of atmospheric greenhouse gases and increases in the magnitude and variations of the IOD(28), and between the strength of the IOD and rainfall over East Africa(29) and, by extension via this study, wetland emissions of CH_4 . Future changes in the IOD will also impact the large-scale fires over maritime Southeast Asia, where there is a large reservoir of carbon-rich peat, and over Australia. The situation over tropical South America is more complicated with future Atlantic–Pacific SST patterns resulting in regional patterns of anomalous positive and negative rainfall trends over the Amazon basin(30) so that the net regional effect on wetland emissions of CH_4 is uncertain.”). See also Feng L., Palmer P. I., Parker R. J., Lunt M. F., & Bösch H. (2023) *Methane emissions are predominantly responsible for record-breaking atmospheric methane growth rates in 2020 and 2021*, ATMOS. CHEM. PHYS. 23(8): 4863–4880, 4867 (“Particularly, we find statistically significant large-scale positive correlations (typically 0.5–0.6; $p < 0.001$) for all seasons between methane and groundwater anomalies over Eastern Africa, tropical South America, and tropical Asia, but there is no significant correlation between methane and surface temperature anomalies. This is consistent with recent studies that have highlighted the increasing role for microbial sources in the tropical methane budget (Lunt et al. 2019; Fen et al. 2022; Wilson et al. 2020).”); and Qu Z., Jacob D. J., Zhang Y., Shen L., Varon D. J., Lu X., Scarpelli T., Bloom A., Worden J., & Parker R. J. (2022) *Attribution of the 2020 surge in atmospheric methane by inverse analysis of GOSAT observations*, ENVIRON. RES. LETT. 17(9): 1–9, 5 (“Africa shows an increase of 15 Tg a⁻¹ in methane emissions from 2019 to 2020, consistent with the 13 Tg a⁻¹ increase reported in another inverse analysis of GOSAT observations (Feng et al 2022). We attribute most of the increase to wetland emissions in East Africa (30° E–50° E, 15° S–10° N) due to the increases in rainfall by 20% (46 mm) in the first three seasons from 2019 to 2020 according to the tropical applications of meteorology using SATellite and ground based observations (TAMSAT) (www.tamsat.org.uk/index.php/data). Consistent with the increase in rainfall, the water flows of the Congo-Oubangui River, which goes through wetlands in the Congo Basin, were much

higher in 2020 than in previous years (World Meteorological Organization 2021). Flooding in 2020 was widespread, affecting 50% more East Africans than in 2019 (BBC 2020).”).

⁴⁵² Gulev S. K., *et al.* (2021) *Chapter 2: Changing State of the Climate System*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 2-100 (“The role of decadal to multi-decadal variability has recently emerged as an important aspect of the IOD with many indications of the effects of Pacific Ocean processes on IOD variability through atmospheric and oceanic mechanisms (Dong *et al.*, 2016; Jin *et al.*, 2018; Krishnamurthy & Krishnamurthy, 2016; Zhou *et al.*, 2017) ... Positive IOD events may have increased in frequency during the second half of the 20th century (Abram *et al.*, 2020a,b). Earlier observations of apparent changes in the frequency and / or magnitude of the IOD events are considered unreliable, particularly prior to the 1960s (Hernández *et al.*, 2020). ... To summarize, there is *low confidence* in any multi-decadal IOD variability trend in the instrumental period due to data uncertainty especially before the 1960s. ... Neither the IOD nor the IOB have exhibited behaviour outside the range implied by proxy records (*low confidence*).”). *Compare with* Cheng C. & Redfern S. A. T. (2022) *Impact of interannual and multidecadal trends on methane-climate feedbacks and sensitivity*, *NAT. COMMUN.* 13(3592): 1–11, 7 (“The feedback sensitivity, in $\text{ppb } ^\circ\text{C}^{-1}$, before 1994 initially rises under positive feedback dominance, but declines subsequently and appears to stabilize around $200 \text{ ppb } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Fig. 6a, b). This approximates $\sim 0.08 \text{ W m}^{-2} ^\circ\text{C}^{-1}$ (ref. 70) which is about four times greater than the mean net feedback estimate given in IPCC AR6 (~ 0.05 positive feedback including permafrost and -0.03 negative feedback, giving $\sim 0.02 \text{ W m}^{-2} ^\circ\text{C}^{-1}$) but agrees within uncertainty⁷. The difference could be largely due to the positive $\partial C_{\text{CH}_4}(T\&Pr)/\partial t$ from negative feedbacks following the years or decades of positive feedback. In fact, several interannual peaks of sensitivity are due to the positive contributions of lowering GMST (i.e., negative feedbacks). If we breakdown our estimated sensitivity into positive and negative feedbacks, we estimate $0.05 + 0.03 \text{ W m}^{-2} ^\circ\text{C}^{-1}$ rather than $0.05 - 0.03 \text{ W m}^{-2} ^\circ\text{C}^{-1}$. Since the $200 \text{ ppb } ^\circ\text{C}^{-1}$ long-term sensitivity is even larger than the estimated absolute maximal instantaneous sensitivity in Eq. 5 (i.e., the calibration factor α in Eqs. 3–4) at $125 (\text{ppb yr}^{-1})/(\text{ }^\circ\text{C yr}^{-1})$, the positive contributions from negative feedbacks should be viewed as lagged responses from earlier positive feedbacks due to nonlinearity. We note that the sensitivity is strongest in boreal and tropical regions (Fig. 6a) due to the positive feedbacks with wetland emissions.”).

⁴⁵³ Weldeab S., Schneider R. R., Yu J., & Kylander-Clark A. (2022) *Evidence for massive methane hydrate destabilization during the penultimate interglacial warming*, *PROC. NAT'L. ACAD. SCI.* 119(35): 1–9, 7 (“While further studies are needed to determine the extent of methane hydrate destabilization during the weakened AMOC interval of the Eemian, the consequence of broad methane hydrate destabilization is increased atmospheric CH_4 and CO_2 concentrations. Taking age model uncertainties into consideration, during the peak in anomalously low carbon isotopes, the atmospheric CO_2 and CH_4 concentrations rose by 17 to 10 parts per million per volume and 20 parts per billion per volume, respectively (SI Appendix, Fig. S9) (49–51). Although the magnitude of this change varies between ice cores and analytical laboratories, the $\delta^{13}\text{C}$ values of atmospheric CO_2 declined by 0.3 to 0.4‰ coeval with the $\delta^{13}\text{C}$ anomaly recorded in the Gulf of Guinea sediment sequence (SI Appendix, Fig. S9) (50, 52), indicating that a source with a significantly negative $\delta^{13}\text{C}$ signature contributed to the increase of atmospheric CO_2 . Methane release and methane oxidation due to massive methane hydrate destabilization is the likely source.”).

⁴⁵⁴ Whiteman G., Hope C., & Wadhams P. (2013) *Vast costs of Arctic change*, *NATURE* 499(7459): 401–403, 401 (“We calculate that the costs of a melting Arctic will be huge, because the region is pivotal to the functioning of Earth systems such as oceans and the climate. The release of methane from thawing permafrost beneath the East Siberian Sea, off northern Russia, alone comes with an average global price tag of \$60 trillion in the absence of mitigating action — a figure comparable to the size of the world economy in 2012 (about \$70 trillion). The total cost of Arctic change will be much higher. ... The methane pulse will bring forward by 15–35 years the average date at which the global mean temperature rise exceeds 2°C above pre-industrial levels — to 2035 for the business-as-usual scenario and to 2040 for the low-emissions case (see ‘Arctic methane’). This will lead to an extra \$60 trillion (net present value) of mean climate-change impacts for the scenario with no mitigation, or 15% of the mean total predicted cost of climate-change impacts (about \$400 trillion). In the low-emissions case, the mean net present value of global climate-change impacts is \$82 trillion without the methane release; with the pulse, an extra \$37 trillion, or 45% is added. ... These

costs remain the same irrespective of whether the methane emission is delayed by up to 20 years, kicking in at 2035 rather than 2015, or stretched out over two or three decades, rather than one. A pulse of 25 Gt of methane has half the impact of a 50 Gt pulse. The economic consequences will be distributed around the globe, but the modelling shows that about 80% of them will occur in the poorer economies of Africa, Asia and South America. ... The full impacts of a warming Arctic, including, for example, ocean acidification and altered ocean and atmospheric circulation, will be much greater than our cost estimate for methane release alone. To find out the actual cost, better models are needed to incorporate feedbacks that are not included”). See also Wadhams P. (2017) *A FAREWELL TO ICE: A REPORT FROM THE ARCTIC*, Oxford University Press; and Shakohva N., Semiletov I., & Chuvilin E. (2019) *Understanding the Permafrost-Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf*, *GEOSCI.* 9(6): 1–23.

⁴⁵⁵ Wadham J. L., Hawkings J. R., Tarasov L., Gregoire L. J., Spencer R. G. M., Gutjahr M., Ridgwell A., & Kohfeld K. E. (2019) *Ice sheets matter for the global carbon cycle*, *NAT. COMMUN.* 10(1): 3567, 1–17, 8–9 (“There are substantial uncertainties regarding the magnitude of present day sub-ice sheet CH₄ hydrate reserves because of the difficulties of accessing sediments in subglacial sedimentary basins. Global subglacial methane hydrate stocks at the present day are likely to be dominated by those in Antarctic sedimentary basins (estimated at up to 300 Pg C as methane hydrate and free gas). At the LGM, the global sub-ice sheet hydrate reserve could have been much larger (>500 Pg C, 20% of the present day marine hydrate stocks), with hydrate also present beneath former northern hemisphere ice sheets (see Fig. 4 for details and calculation methods). The vulnerability of Antarctic subglacial CH₄ hydrate reserves to destabilization is high because of their predicted location around the continent’s periphery in sedimentary basins where ice thinning in a warming climate is probable.”). See also Dessandier P.-A., Knies J., Plaza-Faverola A., Labrousse C., Renoult M., & Panieri G. (2021) *Ice-sheet melt drove methane emissions in the Arctic during the last two interglacials*, *GEOLOGY* 49(7): 799–803, 799 (“Here, we argue that based on foraminiferal isotope studies on drill holes from offshore Svalbard, methane leakage occurred upon the abrupt Eurasian ice-sheet wastage during terminations of the last (Weichselian) and penultimate (Saalian) glaciations. Progressive increase of methane emissions seems to be first recorded by depleted benthic foraminiferal $\delta^{13}\text{C}$. This is quickly followed by the precipitation of methane-derived authigenic carbonate as overgrowth inside and outside foraminiferal shells, characterized by heavy $\delta^{18}\text{O}$ and depleted $\delta^{13}\text{C}$ of both benthic and planktonic foraminifera. The similarities between the events observed over both terminations advocate a common driver for the episodic release of geological methane stocks. Our favored model is recurrent leakage of shallow gas reservoirs below the gas hydrate stability zone along the margin of western Svalbard that can be re-activated upon initial instability of the grounded, marine-based ice sheets. Analogous to this model, with the current acceleration of the Greenland ice melt, instabilities of existing methane reservoirs below and nearby the ice sheet are likely.”).

⁴⁵⁶ Jackson R. B., *et al.* (2021) *Atmospheric methane removal: a research agenda*, *PHILOS. TRANS. R. SOC. A* 379(2210): 1–17, 1 (“Atmospheric methane removal may be needed to offset continued methane release and limit the global warming contribution of this potent greenhouse gas. Eliminating most anthropogenic methane emissions is unlikely this century, and sudden methane release from the Arctic or elsewhere cannot be excluded, so technologies for negative emissions of methane may be needed. Carbon dioxide removal (CDR) has a well-established research agenda, technological foundation and comparative modelling framework [23–28]. No such framework exists for methane removal. We outline considerations for such an agenda here. We start by presenting the technological Mt CH₄ yr⁻¹ considerations for methane removal: energy requirements (§2a), specific proposed technologies (§2b), and air processing and scaling requirements (§2c). We then outline the climate and air quality impacts and feedbacks of methane removal (§3a) and argue for the creation of a Methane Removal Model Intercomparison Project (§3b), a multi-model framework that would better quantify the expected impacts of methane removal. In §4, we discuss some broader implications of methane removal.”). See also Oeste F. D., de Richter R., Ming T., & Caillol S. (2017) *Climate engineering by mimicking natural dust climate control: the iron salt aerosol method*, *EARTH SYSTEM DYNAMICS* 8: 1–54; Ming T., Richter R. de, Dietrich Oeste F., Tulip R., & Caillol S. (2021) *A nature-based negative emissions technology able to remove atmospheric methane and other greenhouse gases*, *ATMOSPHERIC POLLUTION RESEARCH* 12(5): 101035; and Jackson R. (25 July 2024) *The Best Quick Fix for Climate Change? Curbing Methane*, *THE WASHINGTON POST*.

⁴⁵⁷ Jackson R. B., Solomon E. I., Canadell J. G., Cargnello M., & Field C. B. (2019) *Methane removal and atmospheric restoration*, NAT. SUSTAIN. 2(6): 436–438, 437 (“Sustained efforts in methane removal, even after atmospheric restoration, could provide additional advantages for offsetting CH₄ emissions from agriculture and industry. A recent marginal cost-abatement curve for methane in the oil and gas sector estimated that almost half of methane emissions could be mitigated at no net cost; however, abatement costs rose steeply beyond that point. Sustained methane removal could offset the most expensive emissions effectively permanently, with research needed to determine the extent to which removal efficiency decreases and cost increases as methane concentrations decrease. Similarly in agriculture, some methane emissions from rice and meat production seem inevitable, even after substantial efforts to reduce them. Here, too, methane removal might counterbalance the most intractable emissions.”). See also Brazzola N., Wohland J., & Patt A. (2021) *Offsetting unabated agricultural emissions with CO₂ removal to achieve ambitious climate targets*, PLOS ONE 16(3): 1–19, 1 (“Failing to mitigate agricultural methane and nitrous oxide emissions could contribute to an overshoot of the RCP2.6 warming by about 0.4 °C. We explore using additional CDR to offset alternative agricultural non-CO₂ emission pathways in which emissions either remain constant or rise. We assess the effects on the climate of calculating CDR rates to offset agricultural emission under two different approaches: relying on the 100-year global warming potential conversion metric (GWP100) and maintaining effective radiative forcing levels at exactly those of RCP2.6. Using a reduced-complexity climate model, we find that the conversion metric leads to a systematic underestimation of needed CDR, reaching only around 50% of the temperature mitigation needed to remain on the RCP2.6 track. This is mostly because the metric underestimates, in the near term, forcing from short-lived climate pollutants such as methane.”).

⁴⁵⁸ The atmospheric concentration of CO₂ in 2022 is about 420 parts CO₂ per million parts air (ppm) compared with about 1.9 parts CH₄ per million parts air; $420/1.9 = 221$. On a mass basis, CH₄ (molar mass 16) is 600 times more dilute than CO₂ (molar mass 44); $221 \times 44/16 = 607$. See also Lackner K. S. (2020) *Practical constraints on atmospheric methane removal*, NAT. SUSTAIN. 3(5): 357 (“Methane removal poses two challenges: extreme dilution and competition from natural processes. This raises the question of whether methane is really the best target for removal from the air. First, the dilute concentration of methane in the atmosphere challenges economical removal. On a mass basis, methane is currently 600 times more dilute in Earth’s atmosphere than carbon dioxide; in pre-industrial times it was 1,000 times more dilute.”).

⁴⁵⁹ Jackson R. B., et al. (2021) *Atmospheric methane removal: a research agenda*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 1–17, 4 (“We first compare and contrast aspects of CH₄ and CO₂ removal. In contrast to CO₂, CH₄ can be oxidized catalytically, without the need for capture, in a thermodynamically favourable reaction: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ($\Delta H_r = -803 \text{ kJ mol}^{-1}$), although such a reaction is difficult at typical conditions of atmospheric temperature and pressure [29]. Because of methane’s potency as a greenhouse gas (34 times higher Global Warming Potential (GWP) than CO₂ on a century timescale and 86 times higher on a 20-year timescale), considerably less methane removal is needed to realize the same climate impact.”).

⁴⁶⁰ Abernethy S., O’Connor F. M., Jones C. D., & Jackson R. B. (2021) *Methane removal and the proportional reductions in surface temperature and ozone*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 1–13, 1 (“Methane removal has at least two key benefits: reducing temperature more rapidly than carbon dioxide removal and improving air quality by reducing surface ozone concentration.”).

⁴⁶¹ Abernethy S., O’Connor F. M., Jones C. D., & Jackson R. B. (2021) *Methane removal and the proportional reductions in surface temperature and ozone*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 1–13, 1 (“Methane removal has at least two key benefits: reducing temperature more rapidly than carbon dioxide removal and improving air quality by reducing surface ozone concentration.”).

⁴⁶² Abernethy S., O’Connor F. M., Jones C. D., & Jackson R. B. (2021) *Methane removal and the proportional reductions in surface temperature and ozone*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 1–13, 8 (“One consideration is the potential unintended atmospheric chemistry effects of methane removal. For example, removal technologies that oxidize methane to carbon dioxide may inadvertently oxidize partially to carbon monoxide (CO) or methanol

(CH₃OH) [24]. Furthermore, removal technologies must be compared in terms of costs, energy, land and water usage, and social implications of implementation.”).

⁴⁶³ Abernethy S., O’Connor F. M., Jones C. D., & Jackson R. B. (2021) *Methane removal and the proportional reductions in surface temperature and ozone*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 1–13, 6 (“Due to the temporal nature of effective cumulative removal, comparisons between methane and carbon dioxide depend on the timescale of interest. The equivalent of MCR for carbon dioxide, the TCRE, is $0.00048 \pm 0.0001^\circ\text{C}$ per Pg CO₂ [38], two orders of magnitude smaller than our MCR estimate of $0.21 \pm 0.04^\circ\text{C}$ per effective Pg CH₄ removed (figure 2). Accounting for the time delay for carbon dioxide removal due to the lagged response of the deep ocean, the TCRE for CO₂ removal may be even lower [39]. If 1 year of anthropogenic emissions was removed (0.36 Pg CH₄ [3] and 41.4 Pg CO₂ [40]), the transient temperature impact would be almost four times larger for methane than for CO₂ (0.075°C compared to 0.02°C). Using this example, however, maintaining a steady-state response of 0.36 Pg CH₄ effectively removed would require the ongoing removal of roughly $0.03 \text{ Pg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$, since a removal rate of E/τ is required to maintain an effective cumulative removal of E .”); *discussed in* Jordan R. (26 September 2021) *Stanford-led research reveals potential of an overlooked climate change solution*, STANFORD WOODS INSTITUTE FOR THE ENVIRONMENT (“The analyses, published Sept. 27 in Philosophical Transactions of the Royal Society A, reveal that removing about three years-worth of human caused emissions of the potent greenhouse gas would reduce global surface temperatures by approximately 0.21 degrees Celsius while reducing ozone levels enough to prevent roughly 50,000 premature deaths annually. The findings open the door to direct comparisons with carbon dioxide removal – an approach that has received significantly more research and investment – and could help shape national and international climate policy in the future. ... Under a high emissions scenario, the analysis showed that a 40 percent reduction in global methane emissions by 2050 would lead to a temperature reduction of approximately 0.4 degrees Celsius by 2050. Under a low emissions scenario where temperature peaks during the 21st century, methane removal of the same magnitude could reduce the peak temperature by up to 1 degree Celsius.”).

⁴⁶⁴ For additional information, *see* Spark Climate Solutions *Atmospheric Methane Removal Primer* (last visited 8 March 2024). *See also* Jackson R. B., *et al.* (2021) *Atmospheric methane removal: a research agenda*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 1–17, 4 (“Here, we describe broad classes of technologies for methane removal, including photocatalysts, metal catalysts associated with zeolites and porous polymer networks, biological methane removal, including industrial approaches and approaches for managing soils in agricultural or other ecosystems, and iron-salt aerosol formation (table 2). For each of these technologies, research is needed on its cost, technological efficiency, scaling and energy requirements, social barriers to deployment, co-benefits and potential negative by-products. Research is also needed broadly on methane sorption to concentrate methane from low concentration background air; having better sorbents would make methane removal technologies more efficient generally.”).

⁴⁶⁵ de Richter R., *et al.* (11 September 2019) *Iron Salt Aerosol a natural method to remove methane & other greenhouse gases*, Institution of Mechanical Engineers Presentation, 8 (“Iron Salt Aerosol can enhance both natural sinks: the hydroxyl radical sink and the chlorine sink”). *See also* Van Herpen M. M. J. W., Li Q., Saiz-Lopez A., Liisberg J. B., Röckmann T., Cuevas C. A., Fernandez R. P., Mak J. E., Mahowald N. M., Hess P., Meidan D., Stutt J.-B. W., & Johnson M. S. (2023) *Photocatalytic chlorine atom production on mineral dust–sea spray aerosols over the North Atlantic*, PROC. NATL. ACAD. SCI. U.S.A. 120(31): e2303974120, 1–8, 2 (“Here, we present field and modeling evidence of the mechanism of the production of atomic Cl via the photocatalytic oxidation of chloride in aerosols containing Sahara mineral dust. By this mechanism, Cl₂ and Cl are generated when lofted iron-bearing mineral dust aerosol from North Africa descends into the marine boundary layer (MBL) over the Atlantic and mixes with sea spray aerosol to form Mineral Dust-Sea spray Aerosols (MDSA). We combine data from field with global atmospheric modeling and predict extremely low $\delta^{13}\text{C-CO}$ values that match those seen in CO in air samples from Barbados (25); these results remained unexplained for 20 y. Finally, we discuss the global significance of this mechanism that is not yet included in global models.”); Canadell J. G., *et al.* (2021) *Chapter 5: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 5-34 (“About 90% of the loss of atmospheric CH₄ occurs in the troposphere by reaction

with hydroxyl (OH) radical, 5% by bacterial soil oxidation, and the rest 5% by chemical reactions with OH, excited state oxygen (O¹D), and atomic chlorine (Cl) in the stratosphere (Saunio et al., 2020).”; and Lan X., et al. (2021) *What do we know about the global methane budget? Results from four decades of atmospheric CH₄ observations and the way forward*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 1–14, 8 (“The largest atmospheric loss process in the global CH₄ budget is mostly initiated by reaction with OH, especially in the tropical mid-troposphere, but also by Cl and O(¹D) (stratosphere only). Oxidation by microbes in soils is likely a small sink, but uncertainty in its magnitude and trend remain large [37].”).

⁴⁶⁶ Jackson R. B., et al. (2021) *Atmospheric methane removal: a research agenda*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(2210): 1–17, 7–8 (“Enhanced microbial oxidation of methane in agricultural and other soils or in artificial substrates (e.g., biotrickling filters) is a microbially based approach for methane mitigation or atmospheric removal (e.g., [44,45]). Han et al. [61] showed that amendments of biochar derived from rice straw reduced methane emissions from paddy soils by 40% in microcosm experiments, a case of methane mitigation from a known source (i.e. with elevated methane concentrations in air). The decrease was attributable to both decreased activity of methanogens and increased methane oxidation activity of methanotrophs. Sulfate additions have also been shown to reduce methane emissions from rice paddies [62]. Miller et al. [63] demonstrated that iron and humic acid amendments significantly suppressed in situ net methane fluxes by 26% in Arctic Alaska peatland soils, likely by enhancing alternative electron acceptor availability. This example is more analogous to methane removal from the bulk air because it was not associated with a known methane source.”). See also He L., Groom J. D., Wilson E. H., Fernandez J., Konopka M. C., Beck D. A. C., & Lidstrom M. E. (2023) *A methanotrophic bacterium to enable methane removal for climate mitigation*, PROC. NATL. ACAD. SCI. U.S.A.120(35): e2310046120, 1–8, 1 (“We report here that some existing methanotrophic strains grow well at 500 ppm methane, and one of them, *Methylovium buriatense* 5GB1C, consumes such low methane at enhanced rates compared to previously published values. Analyses of bioreactor-based performance and RNAseq-based transcriptomics suggest that this ability to utilize low methane is based at least in part on extremely low non-growth-associated maintenance energy and on high methane specific affinity. This bacterium is a candidate to develop technology for methane removal at emission sites. If appropriately scaled, such technology has the potential to slow global warming by 2050.”).

⁴⁶⁷ Yoon S., Carey J. N., & Semrau J. D. (2009) *Feasibility of atmospheric methane removal using methanotrophic biotrickling filters*, APPL. MICROBIOL. BIOTECHNOL. 83(5): 949–956, 949 (“Here, we describe the modeling of a biotrickling filtration system composed of methane-consuming bacteria, i.e., methanotrophs, to assess the utility of these systems in removing methane from the atmosphere. Model results indicate that assuming the global average atmospheric concentration of methane, 1.7 ppmv, methane removal is ineffective using these methanotrophic biofilters as the methane concentration is too low to enable cell survival. If the concentration is increased to 500–6,000 ppmv, however, similar to that found above landfills and in concentrated animal feeding operations (factory farms), 4.98–35.7 tons of methane can be removed per biofilter per year assuming biotrickling filters of typical size (3.66 m in diameter and 11.5 m in height)... The use of methanotrophic biofilters for controlling methane emissions is technically feasible and, provided that either the costs of biofilter construction and operation are reduced or the value of CO₂ credits is increased, can also be economically attractive.”). See also Sly L. I., Bryant L. J., Cox J. M., & Anderson J. M. (1993) *Development of a biofilter for the removal of methane from coal mine ventilation atmospheres*, APPL. MICROBIOL. BIOTECHNOL. 39(3): 400–404, 400 (“The experimental biofilter utilizing a biofilm of *M. fodenarium* was shown to reduce methane levels substantially provided the residence times were sufficiently long. In the range 0.25–1.0% methane in air, commonly experienced in coal mine atmospheres, more than 70% of the methane was removed with a residence time of 15 min, with a 90% reduction at 20 min. Even at a residence time of 5 min approximately 20% of the methane in air was removed. Equal quantities of O₂ are consumed during the bacterial oxidation of methane and 1% methane is converted to 0.7% CO₂. Scale-up and alternative biofilter packings are likely to reduce the residence times in the biofilter.”).

⁴⁶⁸ Krogsbøll M., Russell H. S., & Johnson M. S. (2023) *A high efficiency gas phase photoreactor for eradication of methane from low-concentration sources*, ENVIRON. RES. LETT. 19(014017): 1–8 (“A laboratory prototype of the methane eradication photochemical system (MEPS) technology achieves 58% removal efficiency with a flow capacity

of 30 l min⁻¹; a reactor volume of 90 l; UV power input at 368 nm of 110 W; chlorine concentration of 99 ppm; and a methane concentration of 55 ppm; under these conditions the apparent quantum yield (AQY) ranged from 0.48% to 0.56% and the volumetric energy consumption ranged from 36 to 244 kJ m⁻³. The maximum achieved AQY with this system was 0.83%. A series of steps that can be taken to further improve performance are described. These metrics show that MEPS has the potential to be a viable method for eliminating low-concentration methane from waste air.”).

⁴⁶⁹ Brenneis R. J., Johnson E. P., Shi W., & Plata D. L. (2021) *Atmospheric- and Low-Level Methane Abatement via an Earth-Abundant Catalyst*, ACS ENVIRON. AU 2(3): 223–231, 223 (“Here, we describe the use of a biomimetic copper zeolite capable of converting atmospheric- and low-level methane at relatively low temperatures (e.g., 200–300 °C) in simulated air.”); *discussed in* Chandler D. L. (10 January 2022) *A dirt-cheap solution? Common clay materials may help curb methane emissions*, MIT NEWS.

⁴⁷⁰ Alicat Scientific, *Frost Methane mitigates methane gas emissions from Arctic Circle permafrost (last visited 26 January 2023)* (“Frost Methane and collaborators from University of Alaska Fairbanks tested their methane-capture technology for the first time on August 13, 2021. The team deployed their equipment at a lake in the Arctic Circle, about 67.25 degrees north. Laughlin Barker, Frost Methane’s Senior Embedded Systems Engineer, described the lake as, ‘basically a Jacuzzi, there’s so much natural gas.’”). *See also* Yin J., Su S., Yu X., Bae J.-S., Jin Y., Vिलлелла A., Jara M., Ashby M., Cunnington M., & Loney M. (2020) *Site Trials and Demonstration of a Novel Pilot Ventilation Air Methane Mitigator*, ENERGY FUELS 34(8): 9885–9893, 9885–9886 (“Principal uses of [ventilation air methane] involve combustion of the methane in ventilation air as the primary fuel, which offers the greatest mitigation potential. Currently, technologies for principal use of VAM can be grouped into the following categories: • Flow reversal reactors, including the thermal flow reversal reactors (TFRR) and catalytic flow reversal reactors (CFRR). • Flow through reactors, including the catalytic monolith combustor (CMR), porous burner, and rotary recuperative thermal oxidizer (RTO). • Chemical/stone dust looping (SDL) for VAM abatement. • Biologic reactors. • Lean-burn gas turbines, including the catalytic lean-burn gas turbine, and recuperative gas turbine. • Enrichment by adsorbents, solvents (e.g., ion liquids), membrane, metal–organic frameworks (MOFs), hydration, centrifugal separation, and buoyancy separation. • Negative emissions reduction pathway and emerging technologies, such as photocatalytic oxidation of methane in the atmosphere.”); *and* Prabhu Energy Labs, *Oxiperator (last visited 26 January 2023)*.

⁴⁷¹ Shayegan Z., Lee C.-S., & Haghghat F. (2018) *TiO₂ photocatalyst for removal of volatile organic compounds in gas phase – A review*, CHEM. ENG. J. 334: 2408–2439, 2408 (“Heterogeneous photocatalytic oxidation process (PCO) is a promising technology for removing indoor volatile organic compounds (VOCs) contaminants. Titanium dioxide (TiO₂) has been regarded as the most suitable photocatalyst for its cost effectiveness, high stability and great capability to degrade various VOCs.”).

⁴⁷² National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2023) *Atmospheric Methane Removal: Development of a Research Agenda* (“This study will consider the need and viable options for atmospheric methane removal—one category of ‘negative emissions technologies’ currently being explored as part of efforts to achieve net-zero greenhouse gas emissions. The committee will examine opportunities, risks, and co-benefits of different atmospheric methane removal approaches and make recommendations for new research that would improve understanding of these technologies and their implications.”).

⁴⁷³ The UCLA Emmett Institute has published a global survey of existing, and imminent, methane regulations as part of the Advancing Methane Regulation Project to help guide policymakers to develop effective methane regulations: UCLA Law, *Advancing Methane Regulation (last visited 11 April 2024)* (“The UCLA Emmett Institute launched the Advancing Methane Regulation Project to help guide policymakers as they develop regulations to hunt and halt super-polluting methane. In October 2023, the Emmett Institute convened a meeting on the UCLA campus of more than two-dozen experts in science, technology, law, and policy to inform the goals of the project. To inform the project’s launch, we produced a global survey of existing, and imminent, methane regulations.”) *See* UCLA Emmett Institute on Climate Change & the Environment, *The State of Methane Regulation: A Global Survey (last visited 11 April 2024)*.

⁴⁷⁴ Rogelj J. & Lamboll R. D. (2024) *Substantial reductions in non-CO₂ greenhouse gas emissions reductions implied by IPCC estimates of the remaining carbon budget*, COMMUN. EARTH ENVIRON. 5: 1–5, 2 (“RCB estimates in line with limiting warming to 1.5 °C assume 1.5 °C-compatible CH₄ reductions from 2020 to 2050 of 51% (47–60%, range between 25th and 75th quantile regressions at 1.5 °C of global warming across scenarios, see Fig. 1, panel a).”), 4 (“Assuming global CH₄ emissions do not decline but instead are kept constant at 2020 levels would reduce the RCB by 431, 370, and 280 GtCO₂-we for RCBs compatible with 1.5 °C, 1.7 °C, and 2 °C, respectively. In other words, choosing not to reduce CH₄ emissions and correctly adjusting for this decision in RCB estimates would cause 1.5 °C-compatible RCBs to be exhausted as of today (Fig. 1b, Table 1, Supplementary Tables S2, S5), in effect putting the 1.5 °C ambition of the Paris Agreement out of reach. Even a global 40% reduction between 2020 and 2040 would cause a 1.5 °C-compatible RCB reduction of about 60 GtCO₂-we, highlighting the importance of deep reductions in CH₄.”).

⁴⁷⁵ Olczak M., Piebalgs A., & Balcombe P. (2023) *A global review of methane policies reveals that only 13% of emissions are covered with unclear effectiveness*, ONE EARTH 6(5): 519–535, 520 (“Only ~13% (minimum [min.] 10%, maximum [max.] 17%) of global methane emissions are covered by direct methane mitigation policies, while limited policy stringency and reliance on inaccurate emission estimates remain barriers to effective policy. These findings suggest that a consistent approach for accurate identification, quantification, and verification of methane emission sources alongside greater policy coverage and stringency (e.g. measurable objectives and enforcement) must be put into place to realize significant methane emission reduction opportunities”).

⁴⁷⁶ International Energy Agency (2021) *DRIVING DOWN METHANE LEAKS FROM THE OIL AND GAS INDUSTRY: A REGULATORY ROADMAP AND TOOLKIT*.

⁴⁷⁷ Colombia Ministry of Mines and Energy (11 February 2022) *Resolución Número 40066 de 11 Feb 2022*; *discussed in* Miranda-González A. & Banks J. (16 February 2022) *A Methane Champion: Colombia becomes first South American country to regulate methane from oil and gas*, Clean Air Task Force.

⁴⁷⁸ XV BRICS Summit (23 August 2023) *Johannesburg II Declaration*, 19 (“We oppose trade barriers including those under the pretext of tackling climate change imposed by certain developed countries and reiterate our commitment to enhancing coordination on these issues. We underline that measures taken to tackle climate change and biodiversity loss must be WTO-consistent and must not constitute a means of arbitrary or unjustifiable discrimination or a disguised restriction on international trade and should not create unnecessary obstacles to international trade. Any such measure must be guided by the principle of common but differentiated responsibilities and respective capabilities (CBDR-RC), in the light of different national circumstances. We express our concern at any WTO inconsistent discriminatory measure that will distort international trade, risk new trade barriers and shift burden of addressing climate change and biodiversity loss to BRICS members and developing countries.”).

⁴⁷⁹ International Energy Agency, *Methane Tracker Database Australia* (last visited 2 July 2023). For a summary overview of Australian national and subnational methane policies and regulations and proposed pledges, see Government of Australia (2023) *DISCUSSION Paper on Agriculture and Land Emissions*.

⁴⁸⁰ Climate Watch, *Australia Greenhouse Gas Emissions* (last visited 2 July 2023).

⁴⁸¹ See generally Denis-Ryan A. (2023) *Gross under-reporting of fugitive methane emissions has big implications for industry*, Institute for Energy Economics and Financial Analysis. See also (8 August 2023) *Methane camera reveals widespread potent gas leaks*, THE MIRAGE (“The field trip - a joint initiative of the global non-profit Clean Air Task Force and the Australian Conservation Foundation - visited coal mines and gas facilities in June and found: Methane leaking or being deliberately vented from more than 100 individual sources. At least 25 leaks/vents along Jemena's JGN and Darling Downs pipelines. At least 10 leaks/vents from Origin's coal seam gas wells and Shell/QGC gas-gathering pipelines in Queensland. Methane being released from four of the seven Santos' coal seam gas wells

surveyed in the Pilliga/Biblewindi forest in NSW. Multiple cases of continuous venting at the APA-operated compressor station at the Wallumbilla Gas Hub.”).

⁴⁸² Denis-Ryan, A. (2023) *Gross under-reporting of fugitive methane missions has big implications for industry*, Institute for Energy Economics and Financial Analysis, 3 (“Our analysis indicates that fugitive methane emissions from coal mining and oil and gas supply have likely been grossly underestimated to date – by about 80% for coal and 90% for oil and gas. Correcting this under-reporting would have big implications for industrial facilities covered by the Safeguard Mechanism. In order to stay within the newly introduced emissions caps, facilities would have to double their rate of decarbonisation and halve their emissions between 2023 and 2030. This highlights the need for urgent action to improve methane emissions monitoring in Australia and to develop a plan to address domestic methane emissions.”).

⁴⁸³ Australian Government Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water (23 October 2022) *Australia joins Global Methane Pledge*, Press Release (“The Australian Government is prioritising long-term competitiveness and joining the over 120 countries committed to collectively reduce global methane emissions across energy and resources, agriculture and waste sectors.”).

⁴⁸⁴ Climate Change Act 2022 S10 (“Australia’s greenhouse gas emissions reduction targets are as follows: (a) reducing Australia’s net greenhouse gas emissions to 43% below 2005 levels by 2030: (i) implemented as a point target; and (ii) implemented as an emissions budget covering the period 2021-2030; (b) reducing Australia’s net greenhouse gas emissions to zero by 2050.”).

⁴⁸⁵ Denis-Ryan A. (2023) *Gross under-reporting of fugitive methane missions has big implications for industry*, Institute for Energy Economics and Financial Analysis, 5 (“Australia joined the Global Methane Pledge, which aims to reduce global methane emissions by at least 30% below 2020 levels by 2030, but did not specify a domestic methane reduction target or a plan for how it will address them.”).

⁴⁸⁶ Government of Australia (2023) *Safeguard Mechanism (Crediting) Amendment Bill 2023* (“Amends the: National Greenhouse and Energy Reporting Act 2007 to create safeguard mechanism credit units (SMCs) and provide for related registration, transfer and compliance arrangements consistent with the treatment of Australian Carbon Credit Units (ACCUs); Income Tax Assessment Act 1997 to provide that SMCs receive the same tax treatment as other specified units; Australian National Registry of Emissions Units Act 2011 to: provide ownership and transfer arrangements for SMCs; require the publication of information about holdings and cancellations of SMCs; and provide for the making of legislative rules to increase transparency of information on unit holdings or allow for the voluntary surrender of units; Clean Energy (Consequential Amendments) Act 2011, Clean Energy Regulator Act 2011 and National Greenhouse and Energy Reporting Act 2007 to: provide that protected information includes all information held by the Clean Energy Regulator regardless of when it was obtained; and make consequential amendments; and Carbon Credits (Carbon Farming Initiative) Act 2011 to: enable legislative rules to prevent the regulator from entering into carbon abatement contracts that reduce covered emissions of facilities covered by the safeguard mechanism; require the regulator to consider the safeguard mechanism when assessing the regulatory additionality of proposed offsets projects; and make a consequential amendment.”). *See also* Morton A. & Hannam P. (9 January 2023) *Australia’s big polluters must cut emissions by nearly 5% a year, but can use offsets to get there*, THE GUARDIAN (“Starting from 1 July, big polluters would be expected to cut their emissions intensity – how much they emit per unit of production – by 4.9% a year until 2030. That was forecast to cut industrial emissions by at least 30% between 2021 and 2030, from 143m tonnes a year to no more than 100m tonnes.”).

⁴⁸⁷ Government of New South Wales (2023) *Climate Change (Net Zero Future) Bill 2023* (“The targets for reducing net greenhouse gas emissions in New South Wales are—
(a) by 30 June 2030—to reduce net greenhouse gas emissions in New South Wales by at least 50% from the net greenhouse gas emissions in 2005, and

(b) by 30 June 2035—to reduce net greenhouse gas emissions in New South Wales by at least 70% from the net greenhouse gas emissions in 2005, and

(c) by 30 June 2050—to reduce net greenhouse gas emissions in New South Wales to zero.”). *See also* Vorrath S. (30 November 2023) [NSW passes climate bill to write 70 pct by 2035 emissions reduction target into law](#), RENEW ECONOMY. (“NSW parliament has voted unanimously to enshrine the state’s emissions reduction task in law, legislating a new 70 per cent by 2035 target as well as the Paris aligned goal net zero by 2050.”).

⁴⁸⁸ Thompson Reuters Practical Law, [Oil and gas regulation in Australia: overview](#) (last visited 15 November 2023) (“Flaring is typically covered by the relevant petroleum and environmental regulations in each State and Territory. The legislation that regulates flaring differs between each jurisdiction. For example, in Queensland petroleum should be commercially used wherever possible, and flared if not. In addition, venting will only be allowed if it is not technically possible or unsafe to flare.”).

⁴⁸⁹ Queensland Petroleum and Gas (Production and Safety) Act 2004 S 151 (“Flaring the gas is authorised if it is not commercially or technically feasible to use it— (a) commercially under the lease; or (b) for an authorised activity for the lease. (3) Venting the gas is authorised if— (a) it is not safe to use the gas for a purpose mentioned in subsection (2)(a) or (b) or to flare it; or (b) flaring it is not technically practicable.”).

⁴⁹⁰ Northern Territory of Australia Department of Environment and Natural Resources & Department of Primary Industry and Resources (2019) [CODE OF PRACTICE: ONSHORE PETROLEUM ACTIVITIES IN THE NORTHERN TERRITORY](#), 108 (“Venting and flaring of natural gas should be eliminated or minimised where practicable.”).

⁴⁹¹ Government of Western Australia Department of Mines, Industry Regulation and Safety, [A Look at Western Australia](#) (last visited 15 November 2023) (“Western Australia remains the nation’s premier petroleum producer, accounting for 50 per cent of gas production (including natural gas, coal seam methane and LNG feedstock), 61 per cent of crude oil production and 76 per cent of condensate production. In total, Western Australian produced just over half (52 per cent) of the nation’s total petroleum output in energy equivalence terms in 2016.”).

⁴⁹² Government of Western Australia (2016) [SHALE AND TIGHT GAS IN WESTERN AUSTRALIA](#), 19 (“There are several possible sources of emissions into the air from shale or tight gas operations, and these sources change over time as the operation progresses from exploration to decommissioning. The environment plan submitted to DMP must detail the anticipated emissions and how the risk of these emissions will be managed to as low as reasonably practicable and within acceptable standards and monitoring of bulk emissions, such as venting or flaring.”).

⁴⁹³ Australian Government Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water, [Reducing methane from livestock](#) (last visited 15 November 2023) (“The Australian Government is funding the \$6 million Methane Emissions Reduction in Livestock (MERiL) Stage 1 program to support research and development of methane-reducing livestock feed technologies.”).

⁴⁹⁴ Australian Government Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water, [Reducing methane from livestock](#) (last visited 15 November 2023) (“Stage 2 is providing \$5 million in grants to develop and determine the feasibility of delivery technologies.”).

⁴⁹⁵ Australian Government Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water, [Reducing methane from livestock](#) (last visited 15 November 2023) (“Stage 3 will provide \$15 million in grants to undertake trials to validate the delivery technology and demonstrate its emissions reduction and productivity impacts.”).

⁴⁹⁶ Australian Government Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water, [Reducing methane from livestock](#) (last visited 15 November 2023) (“The Government is providing \$8.1 million to support the commercialisation of seaweed as a low emissions feed technology and lower barriers to market entry.”).

⁴⁹⁷ Australian Government Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water, *Reducing methane from livestock* (last visited 15 November 2023) (“A further \$9.3 million is being directed to scale-up production of the red seaweed, *Asparagopsis*, including: a \$3.82 million funding contribution through the Securing Raw Materials Program, which will enable Sea Forest, in collaboration with the University of Tasmania, to develop a commercial-scale, land-based *Asparagopsis* production model. This is in addition to previous funding for Sea Forest including \$1 million through the Entrepreneurs’ Programme and \$675,000 from the Commercialisation Fund. ... a \$3.76 million funding contribution through the Securing Raw Materials Program for CH₄ South Australia’s seaweed production project in regional South Australia.”).

⁴⁹⁸ Australia Department of Agriculture Fisheries and Forestry (2018) [NATIONAL WASTE POLICY](#), 15 (“Reduce organic waste, including garden and food waste, by avoiding their generation and supporting diversion away from landfill into soils and other uses, supported by appropriate infrastructure.”).

⁴⁹⁹ Australia Department of Energy and Climate Change (2021) [NATIONAL WASTE POLICY PROGRESS SUMMARY REPORT](#), 12 (“Australia’s governments have set the goal to halve Australia’s food waste, and halve the amount of organic waste sent to landfill, by 2030. This means redirecting 2.7 million tonnes of organic waste to productive re-use every year instead of sending it to landfill. Reusing our organic waste contributes to a circular economy, in which waste is turned into valuable products like compost, soil conditioners and mulches.”).

⁵⁰⁰ Australia Department of Energy and Climate Change (2021) [NATIONAL WASTE POLICY PROGRESS SUMMARY REPORT](#), 12 (“Governments expanded Garden Organic (GO) and Food Organics and Garden Organics (FOGO) kerbside collection services to households and businesses in Australia. Many jurisdictions have targets in place for these roll-outs. The Australian Government published an interactive map showing where GO and FOGO collection is available.”).

⁵⁰¹ Australia Department of Energy and Climate Change (2021) [NATIONAL WASTE POLICY PROGRESS SUMMARY REPORT](#), 12 (“Stop Food Waste Australia began working to drive industry change and deliver a voluntary commitment program, the Australian Food Pact. It will work with organisations across the food supply chain to develop tailored plans to help them achieve their food waste goal.”).

⁵⁰² Australia Department of Energy and Climate Change (2021) [NATIONAL WASTE POLICY PROGRESS SUMMARY REPORT](#), 12 (“The national Food Waste for Healthy Soils Fund was announced, to support recycling infrastructure that will create consistent, safe and high-quality recycled organic products for use on our soils.”).

⁵⁰³ Australia Department of Energy and Climate Change (2021) [NATIONAL WASTE POLICY PROGRESS SUMMARY REPORT](#), 12 (“NSW ran a pilot ‘Scrap Together’ campaign, drawing on results of bin audits and social research, to improve the rate of food waste recycling in 3 council areas. The pilot campaign increased food waste recycling by an average of 10% and the campaign has since been expanded to other council areas.”).

⁵⁰⁴ Australia Department of Energy and Climate Change (2021) [NATIONAL WASTE POLICY PROGRESS SUMMARY REPORT](#), 12 (“South Australia released a State Food Waste Strategy 2020–2025 to reduce and divert household and business food waste, outlining 38 actions including policy measures, behavioural change actions and continued support for industry across 3 program areas to capture material and return to productive use.”).

⁵⁰⁵ Australia Department of Energy and Climate Change (2021) [NATIONAL WASTE POLICY PROGRESS SUMMARY REPORT](#), 12 (“The SA Government’s Kerbside Performance Plus Food Organics Incentives Program provided financial support for local government to roll out area-wide high performing food waste diversion systems. All 19 metropolitan councils and 14 regional councils, representing over 80% of South Australia’s population, have FOGO systems in place.”).

⁵⁰⁶ International Energy Agency, *Methane Tracker Data Explorer* (last visited 5 February 2023).

⁵⁰⁷ de Oliveira-Junior, M. (4 April 2022) *The Impact of the Global Methane Pledge on the Brazilian Beef Industry*, WEB ADVOCACY (“Due to its large bovine herd (220 million cattle, equivalent to 14% of the bovine global herd), Brazil is the fifth largest methane emitter in the world[3]. In 2020, it emitted almost 402,000 million metric tons of CO₂ equivalent (MMTCO₂E – around 2% of total world emissions). The heaviest methane emitter in Brazil is agriculture, which accounts for 78% of total emissions. Livestock, on its own, is responsible for 75% (300,000 MMTCO₂E) of the country’s methane emissions (primarily from enteric fermentation and manure management). Therefore, to achieve a 30% reduction below the 2020 levels, livestock emissions must fall sharply.”).

⁵⁰⁸ Global Methane Initiative, *Methane Emissions Data* (last visited 5 February 2023).

⁵⁰⁹ Government of Brazil (2022) *DECRETO Nº 11.003, DE 21 DE MARÇO DE 2022*; discussed in Bezerra L. G., Trevizan V. P., Gomes G., Negro R., & Rodrigues V. (28 March 2022) *Brazil Launches Federal Strategy to Incentivize the Sustainable Use of Biogas and Biomethane and Methane Zero Program*, Tauil, Chequer, Mayer, Brown (“On March 21, 2022, the Brazilian government enacted Decree No. 10,003/2022, creating the Federal Strategy to Incentivize the Sustainable Use of Biogas and Biomethane. The strategy is a new package of incentives and programs to reduce methane emissions, promote usage of biogas and biomethane as renewable sources of energy and fuel, and help meet the commitments Brazil made under the United Nations Framework-Convention on Climate Change, the Glasgow Climate Pact and the Global Methane Commitment.”).

⁵¹⁰ Bezerra L. G., Trevizan V. P., Gomes G., Negro R., & Rodrigues V. (28 March 2022) *Brazil Launches Federal Strategy to Incentivize the Sustainable Use of Biogas and Biomethane and Methane Zero Program*, Tauil, Chequer, Mayer, & Brown (“To enable the implementation of the Federal Strategy to Incentivize to the Sustainable Use of Biogas and Biomethane, the decree established comprehensive guidelines to encourage, among other things, the development of carbon markets and sector plans, the use of biomethane as a source of sustainable energy and fuel, and scientific-technological research. It is worth noting that the decree provides a non-exhaustive list of urban and rural waste that shall be considered as sources of biogas and biomethane, including waste disposed of in landfills, generated in sewage treatment plants and derived from the sugar-energy chain. This provision is in line with Federal Law No. 12,305/2010, which created the National Policy on Waste Management and established that incentivizing environmental management systems was one of its objectives, particularly through waste-to-energy initiatives.”).

⁵¹¹ Government of Brazil (2022) *DECRETO Nº 11.003, DE 21 DE MARÇO DE 2022*, Art. 7 (“As principais fontes de biogás e biometano consideradas no âmbito da Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano são os resíduos de origem urbana e rural, incluídos, entre outros: I - os resíduos dispostos em aterros sanitários; II - os resíduos gerados em estações de tratamento de esgoto; III - os resíduos da cadeia sucroenergética; e IV - os resíduos de suinocultura, avicultura e outros.”).

⁵¹² Government of Brazil (2022) *PORTARIA MMA No 71, DE 21 DE MARÇO DE 2022*; discussed in Bezerra L. G., Gomes G., & Costa L. (26 March 2022) *Brazil launches Methane Zero National Program with a package of incentive measures to biogas and biomethane*, Mayer & Brown (“The new package – called Federal Strategy of Incentive to the Sustainable Use of Biogas and Biomethane – includes the Methane Zero National Program. ... One of the main targets of the incentive package – in addition to promoting research and development of new technologies allowing the reduction of methane emissions and the use of biogas and biomethane as sources of sustainable energy and fuel – is to promote the development of carbon markets, particularly introducing the methane credit. Although the package does not provide further details on such methane credits, they are supposed to represent a ton of methane that has not been emitted and are expected to be aligned with existing carbon credits markets, in the sense that the marketing of such methane credits should generate additional income to biogas and biomethane projects.”).

⁵¹³ Bezerra L. G., Gomes G., & Costa L. (26 March 2022) *Brazil launches Methane Zero National Program with a package of incentive measures to biogas and biomethane*, Mayer & Brown (“Considering RenovaBio created a regulated market in which fossil fuel distribution companies have yearly decarbonization targets they must meet by

acquiring decarbonization credits, which in turn are generated by producers of biofuels, such as ethanol, biodiesel and biomethane, it is expected that in fact the newly created methane credit will be a part of the RenovaBio market, not only reinforcing its already significant role, but also further developing such a market.”).

⁵¹⁴ United States Department of Energy Office of International Affairs (22 August 2022) *United States and Brazil Strengthen Bilateral Cooperation on Energy and Launch a New Public Private Cooperation to Promote Clean Energy*, Press Release (“Secretary Granholm and Minister Sachsida endorsed a bilateral cooperation plan for technical, regulatory, and policy cooperation in three areas: Carbon and Methane Management, Civil Nuclear Power, and Renewables, Energy Efficiency, and Grid Modernization: The two governments agreed to exchange expertise in carbon and methane management, and carbon sequestration and storage.”).

⁵¹⁵ Vasconcellos R. B. (4 August 2022) *Energy Is Up on U.S.-Brazil Relations*, United States Chamber of Commerce (“Offshore wind energy is a common priority for these two continental countries, and there is fertile ground for a productive dialogue on this topic. Wind (albeit onshore) already plays an important role as a source of energy in diversifying Brazil’s energy grid, ranking second (13.4%) behind only hydropower (56.7%). Meanwhile, the U.S. contribution will come from the U.S. administration’s vision of wind as a key pillar of the U.S. clean energy agenda and its work towards the deployment of 30 GW of offshore wind by 2030. Collaboration on sustainable fuels is also important for the dialogue. Brazil is known for having vehicles running on ethanol derived from sugarcane since the 1970s. On the other hand, U.S. industry, inspired by the U.S. administration’s ambitious goal to rapidly increase the production of sustainable aviation fuels by 2030, has a lot of knowledge to offer to Brazil and the Latin America region.”).

⁵¹⁶ Climate and Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from the 2023 Global Methane Pledge Ministerial*, (“Brazil announced that its National Council of Energy Policy will establish guidelines on methane reduction in the oil and gas sector by the end of 2024, and the National Agency for Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP) aims to finalize regulations by the end of 2025 based on these guidelines.”).

⁵¹⁷ Government of Canada. (2021) *Canada’s 2021 Nationally Determined Contribution under the Paris Agreement*, 1 (“Through this submission, the Government of Canada is pleased to update its nationally determined contribution (NDC) under the Paris Agreement. Canada’s updated NDC is to reduce emissions by 40-45% below 2005 levels by 2030, a substantial increase of ambition beyond Canada’s original NDC, as previously communicated upon ratifying the Paris Agreement in 2016. Additionally, Canada is committed to reducing its emissions to net-zero by 2050. Canada’s enhanced NDC, and accompanying information for clarity, transparency, and understanding, are further outlined in Annex 1 to this submission. Annex 2 outlines provincial and territorial climate action and Annex 3 outlines Indigenous climate action.”); 26 (“Alberta: Climate Goals: Through regulatory measures, Alberta will reduce methane emissions from upstream oil and gas production by 45%, from 2014 levels, by 2025.”). See also Government of Canada (2017) *Canada’s 2017 Nationally Determined Contribution Submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 3 (“To reduce emissions from industrial sectors, Canada is developing regulations to achieve a reduction of methane emissions from the oil and gas sector, including offshore activities, by 40–45 percent by 2025.”).

⁵¹⁸ Environment and Climate Change Canada (11 October 2021) *Canada confirms its support for the Global Methane Pledge and announces ambitious domestic actions to slash methane emissions*, News Release (“The International Energy Agency has made it clear that curbing methane emissions from oil and gas operations represents one of the best near-term opportunities for limiting the worst impacts of climate change and has called on countries and companies to reduce methane emissions from the sector by 75% below 2012 levels by 2030. At the Meeting, the Minister noted the importance of the 75% goal and called on other oil-producing nations to join Canada in adopting it.”). See generally Environmental Defense Fund (2023) *How to meet Canada’s methane reduction goals*.

⁵¹⁹ Environment and Climate Change Canada (2019) *Regulations Respecting Reduction in the Release of Methane and Certain Volatile Organic Compounds (Upstream Oil and Gas Sector)* (“Companies must register their facilities before

April 30th, 2020, or within 120 days of when the facility begins to be covered by any of the requirements. There are also provisions in the regulations to retain information for record-keeping, inspection purposes, and for on-demand reporting to Environment and Climate Change Canada. Regulatory requirements for fugitive equipment leaks, venting from well completions, and compressors, come into force on January 1, 2020. Regulatory requirements for facility production venting restrictions and venting limits for pneumatic equipment come into force on January 1, 2023.”).

⁵²⁰ Environment and Climate Change Canada (10 November 2022) *Canada and the United States to take further actions to address emissions from North American oil and gas sector*, Press Release (“In Canada, earlier this year, Minister Guilbeault committed to working with the Canadian oil and gas industry to identify pathways to achieving net-zero emissions by 2050 and reaffirmed Canada’s commitment to reduce methane emissions by at least seventy-five percent by 2030. Today, Environment and Climate Change Canada published a [proposed framework](#) outlining the main elements of the new regulations. The draft regulations will be published early next year.”).

⁵²¹ Government of Canada (last updated 20 September 2023) *Proposed regulatory framework for reducing oil and gas methane emissions to achieve 2030 target* (“Hydrocarbon Gas Conservation and Destruction Equipment: ● Destruction equipment would be required to operate at a 99%+ control efficiency; ● Conservation equipment would be required to operate at 98%+ efficiency; and ● Fuel combustion would be required to meet a 95% control efficiency.”).

⁵²² Government of Canada (last updated 20 September 2023) *Proposed regulatory framework for reducing oil and gas methane emissions to achieve 2030 target* (“Flaring: ● Would be prohibited at oil sites; ● Enclosed combustion methods and equipment would be required to have an auto-igniter; and ● Operators would be required to ensure that equipment is working as intended.”).

⁵²³ Government of Canada (last updated 20 September 2023) *Proposed regulatory framework for reducing oil and gas methane emissions to achieve 2030 target* (“Fugitive Emissions ● Would no longer be bound by conditional requirements. All facilities would be required to have a fugitive emission management plan with monthly inspections; single wellhead sites included; ● Once a suspected leak is detected, the operator would be required to confirm and fix the leaking component immediately or if not feasible, within 30 days; and ● An extension repair request in extreme circumstances could be granted by the Minister.”).

⁵²⁴ Helmore K. (26 November 2023) *Ottawa poised to announce new methane regulations, heading into COP28*, THE GLOBE AND MAIL (“The federal government is poised to announce new regulations and funding around methane – a greenhouse gas that’s 85 times more potent than carbon dioxide – heading into COP28 on Thursday. These regulations will be the cornerstone of Canada’s COP28 climate plan. They follow the 2021 Global Methane Pledge, a joint agreement in which more than 100 countries promised to cut methane emissions by at least 30 per cent below 2020 levels by 2030.”).

⁵²⁵ Government of Canada (4 December 2023) *Proposed Amendments to the Federal Methane Regulations for the Oil and Gas Sector - Technical backgrounder* (“The proposed Regulatory amendments are intended to ensure a reduction of methane emissions in the upstream oil and gas sector by at least 75 per cent below 2012 levels by 2030.”). A draft version of the proposed amendments is available here *see* Government of Canada (2023) *Regulations Amending the Regulations Respecting Reduction in the Release of Methane and Certain Volatile Organic Compounds (Upstream Oil and Gas Sector)*.

⁵²⁶ Government of Canada (4 December 2023) *Proposed Amendments to the Federal Methane Regulations for the Oil and Gas Sector - Technical backgrounder* (“The proposed Regulatory amendments are intended to ensure a reduction of methane emissions in the upstream oil and gas sector by at least 75 per cent below 2012 levels by 2030. This would be achieved by expanding the scope of the existing Regulations, introducing a focus on maximizing emission reductions, removing some exclusions, and ensuring all practical actions to lower emissions that are considered both achievable and cost effective are in place by 2030.”).

⁵²⁷ Government of Canada (2020) *Agreement on the equivalency of federal and Alberta regulations respecting the release of methane from the oil and gas sector in Alberta*. See also Government of Canada (2020) *Agreement on the Equivalency of Federal and British Columbia Regulations Respecting the Release of Methane from the Oil and Gas Sector in British Columbia*; and Government of Canada (2020) *Saskatchewan equivalency with federal methane regulations: emissions reduction estimation*.

⁵²⁸ Canada Energy Regulator (last updated 24 January 2024) *Provincial and Territorial Energy Profiles – Canada* (“Canadian production is centered in western Canada, which accounted for about 95% of total production in 2020. The remaining 5% was produced mostly in Newfoundland and Labrador. Alberta, Saskatchewan, and Newfoundland produce 96% of Canada’s oil. These three are also the only provinces that produce heavy oil.... Alberta and B.C. accounted for almost 98% of Canadian production in 2020. Smaller amounts of natural gas are produced in Saskatchewan, New Brunswick, Ontario, and the Northwest Territories (NWT).”).

⁵²⁹ Canada Energy Regulator (last updated 24 January 2024) *Provincial and Territorial Energy Profiles – Canada* (“Alberta’s gas production represented 63% of total Canadian natural gas production in 2020.”); *contrasting* Canada Energy Regulator (last updated 2 February 2024) *Provincial and Territorial Energy Profiles – British Columbia* (“In 2020, natural gas production in B.C. averaged 5.38 billion cubic feet per day (Bcf/d) (Figure 1), accounting for 35% of total Canadian natural gas production.”); and Canada Energy Regulator (last updated 2 February 2024) *Provincial and Territorial Energy Profiles – Saskatchewan* (“Saskatchewan’s gas production represented approximately 2% of total Canadian natural gas production in 2020.”).

⁵³⁰ Government of Alberta, *Reducing methane emissions* (last visited 16 November 2023) (“Alberta was the first regional government in North America to commit to a methane emissions reduction target for the oil and gas sector. Alberta will use a combination of policy tools to achieve the province’s 45% methane reduction target by 2025 including regulatory requirements, market-based programs, and investments in technology and innovation.”). See also Government of Alberta (2023) *Alberta emissions reduction and energy development plan*, 28 (“Alberta Environment and Protected Areas will engage stakeholders, Albertans, and Indigenous organizations to assess potential pathways to achieve a provincial 75 to 80 percent methane emission reduction target from the conventional oil and gas sector by 2030 (from 2014 levels). The pathways will use combination of regulations, market-based incentives and programs, complemented by continuous improvement in measurement and reporting. It will focus on cost-effective, outcome-based approaches.”).

⁵³¹ Government of Alberta (2023) *Alberta emissions reduction and energy development plan*, 27 (“Alberta achieved a 44 percent reduction in methane emissions from the oil and gas sector between 2014 and 2021, and we are on track to meet or surpass our goal for a 45 percent reduction by 2025.”).

⁵³² Government of Alberta (2023) *Alberta emissions reduction and energy development plan*, 27 (“To support the methane emissions policy, Alberta established a working group in 2022 with experts from academia, industry and associations, Indigenous businesses, ENGOs and technology service providers. The working group assessed the effectiveness of the policy to achieve the 2025 target and provided recommendations for government”).

⁵³³ Government of Alberta, *Reducing methane emissions* (last visited 16 November 2023) (“Examples of current and previously implemented programs to support technology and innovation related to methane emissions reductions include: Current programs: Alberta Methane Emissions Program (AMEP): \$17-million to support investigating and testing alternative approaches to detection and quantification of fugitive and vented emissions.”)

⁵³⁴ Government of Alberta (2023) *Alberta emissions reduction and energy development plan*, 27 (“The Methane Technology Implementation Program has supported projects at oil and gas sites that are anticipated to reduce methane emissions by 17 Mt over the lifetime of the technologies. This program is supported by \$25 million from Alberta’s TIER fund”).

⁵³⁵ Government of Alberta, *Reducing methane emissions* (last visited 16 November 2023) (“Using funds from the industry-supported TIER system, the Government of Alberta is to providing continued support for methane technology and innovation approaches across the oil and gas sector.”). See also Alberta Methane Emissions Program (2023) *Supporting innovation to reduce methane emissions*, Government of Alberta.

⁵³⁶ Government of Alberta (2023) *Alberta emissions reduction and energy development plan*, 28 (“Alberta Environment and Protected Areas will engage stakeholders, Albertans, and Indigenous organizations to assess potential pathways to achieve a provincial 75 to 80 percent methane emission reduction target from the conventional oil and gas sector by 2030 (from 2014 levels). The pathways will use combination of regulations, market-based incentives and programs, complemented by continuous improvement in measurement and reporting. It will focus on cost-effective, outcome-based approaches.”). See also Conrad B. M., Tyner D. R., Li H. Z., Xie D., & Johnson M. (2023) *A measurement-based upstream oil and gas methane inventory for Alberta, Canada reveals higher emissions and different sources than official estimates*, COMMUN. EARTH ENVIRON. 4: 416 (“Mitigation actions and regulations to meet critical 2030 methane reduction targets under the Global Methane Pledge are hampered by uncertainty in true levels of emissions and source breakdowns. Here we present a measurement-based, source-resolved, hybrid top-down/bottom-up methane inventory for conventional upstream oil and gas operations in Canada’s largest oil and gas-producing province, Alberta. The derived 2021 inventory of 1337 kt/y is approximately 1.5× the official federal inventory and matches independent top-down aerial mass-balance and satellite estimates within uncertainties. Major sources are starkly different from official estimates, with venting (e.g., uncontrolled tanks, pneumatics, unlit flares) comprising almost two-thirds of emissions implying important mitigation opportunities. Derived methane intensities, while similar to U.S. basins, are approximately 4× those in neighbouring British Columbia and further reveal order-of-magnitude differences among individual anonymized companies at directly comparable facility types. This highlights the importance of independent monitoring, reporting, and verification to ensure collective success in reducing emissions.”).

⁵³⁷ Government of Saskatchewan (2019) *Methane Action Plan*, 2 (“[I]ntroduce new made-in-Saskatchewan results-based regulations to reduce methane-based GHG emissions by 40 to 45 percent of 2015 levels or between 4 and 4.5 million tonnes of carbon dioxide equivalent (CO₂e)[.]”).

⁵³⁸ Government of Saskatchewan (18 May 2022) *Saskatchewan Releases Latest Oil and Gas Emissions Report*, News and Media (“Provincial Oil And Gas Sector Has Reduced Greenhouse Gas Emissions By 60 Per Cent Since 2015 Today, the Ministry of Energy and Resources published its second Oil and Gas Emissions Management Regulations (OGEMR) Annual Emissions Report. In 2021, greenhouse gas (GHG) emissions from vented and flared gas at upstream oil facilities in Saskatchewan totalled 4.4 million tonnes (Mt) of carbon dioxide equivalent (CO₂e). This represents a 6.5 Mt CO₂e, or 60 per cent, reduction from 2015 levels and a 0.8 Mt or 15 per cent reduction from 2020 levels.”).

⁵³⁹ Chan E., Worthy D. E. J., Chan D., Ishizawa M., Moran M. D., Delcloo A., & Vogel F. (2020) *Eight-Year Estimates of Methane Emissions from Oil and Gas Operations in Western Canada Are Nearly Twice Those Reported in Inventories*, ENVIRON. SCI. TECHNOL. 54(23): 14899–14909, 14899 (“Total anthropogenic (oil and gas, agriculture, and waste) emission rates of methane from 2010 to 2017 in Alberta and Saskatchewan were derived using hourly atmospheric methane measurements over a six-month winter period from October to March. Scaling up the winter estimate to annual indicated an anthropogenic emission rate of 3.7 ± 0.7 MtCH₄/year, about 60% greater than that reported in Canada’s National Inventory Report (2.3 MtCH₄). This discrepancy is tied primarily to the oil and gas sector emissions as the reported emissions from livestock operations (0.6 MtCH₄) are well substantiated in both top-down and bottom-up estimates and waste management (0.1 MtCH₄) emissions are small. The resulting estimate of 3.0 MtCH₄ from the oil and gas sector is nearly twice that reported in Canada’s National Inventory (1.6 MtCH₄).”), 14905–14906 (“This result suggests that systematic inconsistencies found using the smaller-scale, shorter-term studies in Lloydminster (20) may indeed affect the overall energy-related methane emissions in Alberta and Saskatchewan. Individual regions in Alberta and Saskatchewan were also previously reported to suffer from unreported venting

emissions in that actual venting emissions were 2.5 ± 0.5 times higher than the values in the inventory. (20) Furthermore, our findings are generally consistent with the results from a larger-scale (hemispheric) methane inversion study that focused on the high northern latitudes (north of 50°N) and which estimated 4.3 ± 1.3 $\text{MtCH}_4/\text{year}$ of anthropogenic emissions for Alberta.”).

⁵⁴⁰ Environment and Climate Change Canada (11 October 2021) *Canada confirms its support for the Global Methane Pledge and announces ambitious domestic actions to slash methane emissions*, News Release (“Globally, agriculture and landfills are among the largest sources of methane emissions. The 2030 objective in the Pledge is expected to help prevent over 20 million tonnes of crop losses a year by 2030 by reducing ground-level ozone pollution, caused in part by methane. The Government of Canada is committed to supporting Canadian farmers and industry partners who are taking action to reduce emissions, sequester carbon and make their operations more sustainable, productive and competitive. This includes through investments in new programs, such as the Agricultural Climate Solutions initiative and the Agricultural Clean Technology Program, which aim to help farmers adopt new, beneficial management practices and clean technologies to boost productivity and lower emissions—including from methane. The Government is also committed to developing an approach to increase the number of landfills that collect and treat methane, and ensure existing systems capture as many methane emissions as possible.”). See also Environment and Climate Change Canada (11 September 2023) *The Government of Canada invests in cleaning up Canada’s landfill emissions*, News Release (“Today, the Honourable Steven Guilbeault, Minister of Environment and Climate Change, announced more than \$575,000 to support a total of five projects. These projects are for pilot-scale implementation of innovative monitoring and automation systems to reduce methane emissions at Canadian landfills. Municipal solid waste landfills are responsible for almost one quarter of Canada’s methane emissions, which are generated when biodegradable waste decomposes.”).

⁵⁴¹ Environment and Climate Change Canada (2019) *Taking Stock: Reducing Food Loss and Waste in Canada*, 24 (“The Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME) has traditionally played a role in promoting a coordinated approach for provincial and territorial authorities on waste issues through the Waste Reduction and Recovery Committee. Organic waste has been one area of focus in recent years.”).

⁵⁴² Environment and Climate Change Canada (2019) *Taking Stock: Reducing Food Loss and Waste in Canada*, 24 (“British Columbia’s Climate Leadership Plan which set a food waste prevention target of 30% by 2050. Guidance prepared to support the development of Municipal Waste Management Plans required under the Environmental Management Act encourages regional districts to plan for food waste reduction as part of their waste management plans.”).

⁵⁴³ Environment and Climate Change Canada (2019) *Taking Stock: Reducing Food Loss and Waste in Canada*, 24 (“Ontario’s Food and Organic Waste Policy Statement includes proposed activities such as: developing awareness and education tools; directing food retailers and businesses to reduce food waste in their own operations; and working with schools to educate children on preventing and reducing food waste. Quebec’s Politique bioalimentaire 2018-2025 commits to reducing waste and food losses, and promoting food donations. Recyc-Quebec included the reduction of food loss and waste in its 2016 action plan on source reduction (with actions targeting both household waste and industry waste) to contribute to the objectives of the Quebec Residual Materials Management Policy. Recyc-Quebec has also partnered with the National Zero Waste Council (NZWC) on the Love Food Hate Waste (LFHW) campaign and works with municipalities to reduce both food and organic waste going to landfill.”).

⁵⁴⁴ Environment and Climate Change Canada (2019) *Taking Stock: Reducing Food Loss and Waste in Canada*, 6 (“Tax credits that support agricultural food donation activities are offered in [British Columbia](#), [Ontario](#), [Quebec](#) and [Nova Scotia](#) to help offset the cost to harvest, package, and store surplus harvest for donation.”).

⁵⁴⁵ Agriculture and Agri-Food Canada, *Agricultural Climate Solutions* (last visited 5 February 2023) (“Agricultural Climate Solutions (ACS) is a multi-stream program that will help to develop and implement farming practices to tackle climate change. Through agricultural practices, such as shelterbelts or cover crops, farmland can store carbon

and reduce greenhouse gas emissions. ACS is a program under the more than \$4 billion [Natural Climate Solutions Fund](#). Agriculture and Agri-Food Canada (AAFC) is partnering with Natural Resources Canada (NRCan) and Environment and Climate Change Canada (ECCC) to develop projects that invest in natural climate solutions, including NRCan's [2 Billion Trees program](#) and ECCC's [Nature Smart Climate Solutions Fund](#). These solutions will contribute to meeting Canada's greenhouse gas reduction targets and provide benefits towards the well-being of all Canadians.”).

⁵⁴⁶ Agriculture and Agri-Food Canada, [Agricultural Clean Technology Program: Adoption Stream: Applicant Guide](#) (last visited 5 February 2023) (“bioeconomy solutions that use agricultural waste and by-products to generate energy or create bio-products, including: • purchase and installation of technologies and equipment to support improved manure management and processing waste into bioenergy products and other useful outputs, including: • Anaerobic digesters for processing agricultural waste into bioenergy • Bio-product boiler systems for heating greenhouses and nurseries”).

⁵⁴⁷ Babu J. (11 December 2023) [Canada to offer incentives to cattle farms to reduce methane emissions](#), REUTERS (“The new draft protocol, Reducing Enteric Methane Emissions from Beef Cattle (REME protocol), will incentivize farmers to implement changes that would cut enteric methane emissions from their beef cattle operations with an opportunity to generate offset credits that they can sell...Each credit represents one tonne of emission reductions and the REME protocol is expected to encourage cattle farms to reduce emissions by improving animal diets, management, and other strategies that support more efficient animal growth. The implementation of project activities will reduce the quantity of greenhouse gases (GHGs) emitted per unit mass of beef produced, by improving animal performance or directly reducing enteric methane emissions.”). See generally Government of Canada (December 2023) [Draft Federal Offset Protocol: Reducing Enteric Methane Emissions from Beef Cattle](#).

⁵⁴⁸ Beef Magazine (5 February 2024) [Canada approves Bovaer to reduce methane emissions from cattle](#) (“Canadian authorities have granted market authorization for Bovaer, a methane reducing feed ingredient for cattle, which enables dairy and beef farmers to substantially lower their carbon footprint. The feed ingredient is an important tool for the nearly 10,000 dairy farmers in Canada and will enable them to make a substantial step forward towards their net zero ambitions. Bovaer reduces methane emissions by 30% on average for dairy cows, and thereby lowers the overall greenhouse gas footprint per liter of milk by 10-15%.”).

⁵⁴⁹ Canada Office of the Prime Minister (23 February 2021) [Roadmap for a Renewed U.S.-Canada Partnership](#) (“The leaders reaffirmed the shared commitment to reducing oil and gas methane emissions to protect public health and the environment, as guided by the best science.”).

⁵⁵⁰ Executive Body Working Group on Strategies and Review (30 September 2020) [Preparations for the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone as amended in 2012](#), ECE/EB.AIR/2020/3 – EBE/EB.AIR/WG.5/2020/3 at ¶ 20, (“As per the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond (paragraph 50), the review should look at appropriate steps towards reducing emissions of black carbon, ozone precursors not yet addressed such as methane, and emissions from shipping with due consideration for International Maritime Organization (IMO) policies and measures... In line with the priorities identified in the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond, the following should specifically be considered in answering the questions in annex I:(b) Hemispheric transport of ozone and particulate matter and their precursors and advancing efforts to address air pollution on a broader scale per paragraphs 63 and 78 of the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond; health and ecosystem impacts from outside the ECE region; (c) Methane and its relationship to the hemispheric transport of ozone and its contribution to ozone in the ECE region[.]”).

⁵⁵¹ China Ministry of Foreign Affairs (22 September 2020) [Statement by H.E. Xi Jinping, President of the People's Republic of China, At the General Debate of the 75th Session of The United Nations General Assembly](#), Speech (“China will scale up its Intended Nationally Determined Contributions by adopting more vigorous policies and measures. We aim to have CO₂ emissions peak before 2030 and achieve carbon neutrality before 2060.”). See

also China Ministry of Foreign Affairs (1 November 2021) *Written Statement by H.E. Xi Jinping, President of the People's Republic of China, Unite for Action, To Protect the Planet, Our Shared Home, At the World Leaders Summit*, 5 (“Recently, China released two directives: Working Guidance for Carbon Dioxide Peaking and Carbon Neutrality in Full and Faithful Implementation of the New Development Philosophy, and the Action Plan for Carbon Dioxide Peaking Before 2030. Specific implementation plans for key areas such as energy, industry, construction and transport, and for key sectors such as coal, electricity, iron and steel, and cement will be rolled out, coupled with supporting measures in terms of science and technology, carbon sink[s], fiscal and taxation [measures], and financial incentives. Taken together, these measures will form a ‘1+N’ policy framework for delivering carbon peak and carbon neutrality, with clearly defined timetable, roadmap and blueprint.”); and Institute for Governance & Sustainable Development (25 October 2021) *Briefing: China Details Plans for Achieving Carbon-Peaking and Carbon-Neutrality Goals* (“On October 22 and 24, 2021, China issued two policy documents detailing its plans for achieving its carbon-peaking and carbon-neutrality goals: (1) the Working Guidance for Carbon Dioxide Peaking and Carbon Neutrality in Full and Faithful Implementation of the New Development Philosophy, and (2) the Action Plan for Achieving Carbon Peaking Before 2030.”).

⁵⁵² *Outline of the 14th Five-Year Plan (2021-2025) for National Economic and Social Development and the Long-Range Objectives Through the Year 2035* [国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要] (China) (2021) (hyperlink to original Chinese).

⁵⁵³ United States Department of State (14 November 2023) *Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis*.

⁵⁵⁴ United States Department of State (10 November 2021) *U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s*.

⁵⁵⁵ China Ministry of Ecology and Environment et al. (7 November 2023) *Methane Emissions Control Action Plan* [甲烷排放控制行动方案] (hyperlink to original Chinese) (IGSD’s annotated, English reference translation of the China Methane Emissions Control Action Plan is available [here](#)).

⁵⁵⁶ China Ministry of Ecology and Environment et al. (7 November 2023) *Methane Emissions Control Action Plan* [甲烷排放控制行动方案] (hyperlink to original Chinese) (IGSD’s annotated, English reference translation of the China Methane Emissions Control Action Plan is available [here](#)). See also, China Ministry of Ecology and Environment (7 July 2023) *Measures for the Administration of Greenhouse Gas Voluntary Emission Reduction Trading (Trial) (Draft for Comment)* [《温室气体自愿减排交易管理办法（试行）》（征求意见稿）] (hyperlink to original Chinese).

⁵⁵⁷ China Ministry of Ecology and Environment et al. (7 November 2023) *Methane Emissions Control Action Plan* [甲烷排放控制行动方案] (hyperlink to original Chinese) (IGSD’s annotated, English reference translation of the China Methane Emissions Control Action Plan is available [here](#)).

⁵⁵⁸ China National Energy Administration (24 November 2016) *13th Five-Year Plan for the Development and Utilization of Coalbed Methane (Coal Mine Gas)* [煤层气（煤矿瓦斯）开发利用“十三五”规划], 12 (hyperlink to original Chinese).

⁵⁵⁹ Institute for Governance & Sustainable Development (28 April 2021) *China Announces Further Steps Toward Reduction of Non-CO₂ Super Climate Pollutant Emissions* (MEE issued the Emissions Standard for Coal-bed Methane / Coal Mine Gas (Trial) in 2008). See also China Ministry of Environmental Protection (now “Ministry of Ecology and Environment”) and the General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine (2 April 2008) *Emission Standard of Coal-bed Methane / Coal Mine Gas (Trial)* [煤层气（煤矿瓦斯）排放标准（暂行）] (hyperlink to original Chinese).

⁵⁶⁰ China National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Emergency Management and National Mine Safety Administration (17 January 2023) *Administrative Measures on Specialized Investment within the Central Government Budget for Coal Mine Safety Retrofit* [煤矿安全改造中央预算内投资专项管理办法] (hyperlink to original Chinese).

⁵⁶¹ Xinhua News Agency (3 October 2023) *Shanxi extracts record amount of coalbed methane* (“China’s coal-rich province of Shanxi extracted 7.16 billion cubic meters of coalbed methane in the first eight months of 2023, a record high for the January-August period, according to the provincial statistics bureau. Shanxi’s coalbed methane output accounted for about 81.8 percent of the country’s total in the first eight months this year.”).

⁵⁶² Central Committee of the Chinese Communist Party and the State Council (22 September 2021) *Working Guidance for Carbon Dioxide Peaking and Carbon Neutrality in Full and Faithful Implementation of the New Development Philosophy* [关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见] (hyperlink to original Chinese).

⁵⁶³ The Central Committee of the Chinese Communist Party and the State Council (2 November 2021) *Opinions on Strengthening the Battle for Pollution Prevention and Control* [关于深入打好污染防治攻坚战的意见] (hyperlink to original Chinese).

⁵⁶⁴ People’s Republic of China (2021) *China’s Achievements, New Goals and New Measures for Nationally Determined Contributions*, submission to the Secretariat of UNFCCC, 2, 40.

⁵⁶⁵ People’s Republic of China (28 October 2021) *China’s Mid-Century, Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy*, submission to the Secretariat of UNFCCC, 8–9 (“By 2060, China will fully establish a clean, low-carbon, safe and efficient energy system, reach energy efficiency at international advanced levels, and improve the proportion of non-fossil fuels in energy consumption up to over 80%.”) (Unofficial translation).

⁵⁶⁶ People’s Republic of China (28 October 2021) *China’s Mid-Century, Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy*, submission to the Secretariat of UNFCCC, 13. *See also* Central Committee of the Chinese Communist Party and China State Council (22 October 2021) *Working Guidance for Carbon Dioxide Peaking and Carbon Neutrality in Full and Faithful Implementation of the New Development Philosophy* [关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见] (hyperlink to original Chinese); *and* Institute for Governance & Sustainable Development (25 October 2021) *Briefing: China Details Plans for Achieving Carbon-Peaking and Carbon-Neutrality Goals* (“On October 22 and 24, 2021, China issued two policy documents detailing its plans for achieving its carbon-peaking and carbon-neutrality goals: (1) the Working Guidance for Carbon Dioxide Peaking and Carbon Neutrality in Full and Faithful Implementation of the New Development Philosophy, and (2) the Action Plan for Achieving Carbon Peaking Before 2030.”).

⁵⁶⁷ (28 October 2021) *China’s Mid-Century, Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy*, submission to the Secretariat of UNFCCC, 9. *See also* China State Council (24 October 2021) *Action Plan for Achieving Carbon Peaking Before 2030* [2030年前碳达峰行动方案] (hyperlink to original Chinese).

⁵⁶⁸ China Ministry of Ecology and Environment et al. (7 November 2023) *Methane Emissions Control Action Plan* [甲烷排放控制行动方案] (hyperlink to original Chinese) (IGSD’s annotated, English reference translation of the China Methane Emissions Control Action Plan is available [here](#)).

⁵⁶⁹ People’s Republic of China (2021) *China’s Achievements, New Goals and New Measures for Nationally Determined Contributions*, submission to the Secretariat of UNFCCC, 52.

⁵⁷⁰ China National Petroleum Corporation (19 May 2021) *China Oil and Gas Methane Alliance was inaugurated* (“It has seven members: CNPC, SINOPEC, CNOOC, PipeChina, Beijing Gas, CR Gas and ENN Energy, with CNPC serving as its first president. At the conference, the founding members jointly announced their pledge to control methane emissions across the entire industry chain and take practical measures to push for the clean and low-carbon transformation of energy. The China Oil and Gas Methane Alliance is committed to building a high-quality and open platform for technical experience sharing and cooperation, improving methane emissions control, and actively engaging in global climate governance. It will join the global efforts to ensure systematic, regular, standardized and international methane monitoring and measurement, promote and adopt leak detection and repair (LDAR) and other effective emissions control measures throughout the industry chain, from oil and gas production, storage and transportation to sales, increase the recovery and utilization of vented gas during exploration and development, actively develop new energy sources, and reduce dependence on fossil fuels during oil and gas production. ... Through the China Oil and Gas Methane Alliance, member companies will incorporate methane emissions control into their carbon emissions reduction plan, comprehensively improve methane emissions control, strive to reduce the average methane intensity in natural gas production to below 0.25% by 2025.”).

⁵⁷¹ China State Council (24 October 2021) *Action Plan for Achieving Carbon Peaking Before 2030* [2030年前碳达峰行动方案] (link to original Chinese).

⁵⁷² The Central Committee of the Chinese Communist Party and the State Council (2 November 2021) *Opinions on Strengthening the Battle for Pollution Prevention and Control* [关于深入打好污染防治攻坚战的意见] (hyperlink to original Chinese).

⁵⁷³ China Ministry of Ecology and Environment et al. (7 November 2023) *Methane Emissions Control Action Plan* [甲烷排放控制行动方案] (hyperlink to original Chinese) (IGSD’s annotated, English reference translation of the China Methane Emissions Control Action Plan is available [here](#)).

⁵⁷⁴ The Central Committee of the Chinese Communist Party and the State Council (2 November 2021) *Opinions on Strengthening the Battle for Pollution Prevention and Control* [关于深入打好污染防治攻坚战的意见] (hyperlink to original Chinese).

⁵⁷⁵ General Office of the Central Committee of the Communist Party of China and General Office of the State Council (2021) *Opinions on Innovative Institutional Mechanisms to Promote the Green Development of Agriculture* [关于创新体制机制推进农业绿色发展的意见] (hyperlink to original Chinese).

⁵⁷⁶ China Ministry of Agriculture and Rural Affairs and National Development and Reform Commission (30 June 2022) *Implementation Plan for Emission Reduction and Carbon Sequestration in Agriculture Sector and Rural Area* [农业农村减排固碳实施方案] (hyperlink to original Chinese).

⁵⁷⁷ General Office of China Ministry of Agriculture and Rural Affairs (9 November 2022) *Guiding Opinions for Promoting the Construction of Ecological Farms* [推进生态农场建设的指导意见] (hyperlink to original Chinese).

⁵⁷⁸ Climate & Clean Air Coalition (1 November 2021) *Methane Mitigation Through Manure Management is Key to Successfully Transforming China’s Agricultural Sector* (“Research developed in partnership with the CCAC on the most effective methane mitigation strategies was presented to the group drafting the work plan and the majority of the suggestions were included. These strategies include improved manure management systems such as carefully controlling the water, fertilizer, antibiotics, and type of feed, which can not only reduce emissions but can also increase agricultural production. A key contribution of the CCAC was developing baseline emissions scenarios and projections of emissions reductions based on different policy implementations, which helped to determine the most effective methane mitigation strategies.”).

⁵⁷⁹ *Outline of the 14th Five-Year Plan (2021-2025) for National Economic and Social Development and the Long-Range Objectives Through the Year 2035* [国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要] (China) (2021) ([hyperlink to original Chinese](#)).

⁵⁸⁰ *Outline of the 14th Five-Year Plan (2021-2025) for National Economic and Social Development and the Long-Range Objectives Through the Year 2035* [国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要] (China) (2021) ([hyperlink to original Chinese](#)).

⁵⁸¹ The Central Committee of the Chinese Communist Party and the State Council (2 November 2021) *Opinions on Strengthening the Battle for Pollution Prevention and Control* [关于深入打好污染防治攻坚战的意见] ([hyperlink to original Chinese](#)).

⁵⁸² China National Development and Reform Commission and Ministry of Housing and Urban-Rural Development (6 June 2021) *14th Five-Year Urban Sewage Treatment and Resource Utilization Development Plan* [“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划] ([hyperlink to original Chinese](#)).

⁵⁸³ China Ministry of Housing and Urban-Rural Development and National Development and Reform Commission (30 June 2022) *Implementation Plan for Carbon Peaking in Urban and Rural Development* [城乡建设领域碳达峰实施方案], 5 ([hyperlink to original Chinese](#)).

⁵⁸⁴ China National Development and Reform Commission and Ministry of Housing and Urban-Rural Development (6 June 2021) *14th Five-Year Urban Sewage Treatment and Resource Utilization Development Plan* [“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划] ([hyperlink to original Chinese](#)).

⁵⁸⁵ China State Council (24 October 2021) *Action Plan for Achieving Carbon Peaking Before 2030* [2030 年前碳达峰行动方案] ([hyperlink to original Chinese](#)).

⁵⁸⁶ China National Development and Reform Commission and Ministry of Housing and Urban-Rural Development (6 May 2021) *14th Five-Year Urban Domestic Waste Classification and Treatment Facility Development Plan* [“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划], 7 ([hyperlink to original Chinese](#)).

⁵⁸⁷ China Ministry of Industry and Information Technology (15 November 2021) *14th Five-Year Plan on Industry Green Development* [“十四五”工业绿色发展规划], 4 ([hyperlink to original Chinese](#)).

⁵⁸⁸ China Ministry of Ecology and Environment, National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Finance, Ministry of Natural Resources, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ministry of Commerce, Ministry of Culture and Tourism, National Health Commission, People’s Bank of China, State Administration of Taxation, State Administration for Market Regulation, National Bureau of Statistics, National Government Offices Administration, China Banking and Insurance Regulatory Commission, State Post Bureau, and the All-China Federation of Supply and Marketing Cooperatives (15 December 2021) *14th Five-Year Work Plan on the Construction of Zero-Waste Cities* [“十四五”时期“无废城市”建设工作方案] ([hyperlink to original Chinese](#)).

⁵⁸⁹ China Ministry of Ecology and Environment, National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Finance, Ministry of Natural Resources, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ministry of Commerce, Ministry of Culture and Tourism, National Health Commission, People’s Bank of China, State Administration of Taxation, State Administration for Market Regulation, National Bureau of Statistics, National Government Offices Administration,

China Banking and Insurance Regulatory Commission, State Post Bureau, and the All-China Federation of Supply and Marketing Cooperatives (15 December 2021) *14th Five-Year Work Plan on the Construction of Zero-Waste Cities* [“十四五”时期“无废城市”建设工作方案] (hyperlink to original Chinese).

⁵⁹⁰ China Ministry of Ecology and Environment et al. (7 November 2023) *Methane Emissions Control Action Plan* [甲烷排放控制行动方案] (hyperlink to original Chinese) (IGSD’s annotated, English reference translation of the China Methane Emissions Control Action Plan is available [here](#).).

⁵⁹¹ China Ministry of Ecology and Environment (2022) *Mid - and Long - term Development Plan for Eco-Satellites (2021-2035)* [生态环境卫星中长期发展规划（2021-2035年）] (hyperlink to original Chinese).

⁵⁹² China Ministry of Ecology and Environment (12 September 2021) *Carbon Monitoring and Assessment Pilot Work Plan* [碳监测评估试点工作方案] (hyperlink to original Chinese).

⁵⁹³ Institute for Governance & Sustainable Development (17 January 2023) *Briefing: China Announces Progress in Methane Monitoring and Evaluation in Preparation for the Release of Its National Action Plan on Methane* (“China’s Ministry of Ecology and Environment (MEE) highlighted progress on carbon dioxide and other greenhouse gas monitoring and evaluation pilot projects aimed at answering critical questions on ‘what to measure,’ ‘where to measure,’ and ‘how to measure.’ This includes pilot projects exploring preliminary technical methodologies for methane leakage detection. In particular, MEE noted that the oil and gas industry pilots have established a methane leakage detection mechanism by implementing an integrated “satellite + unmanned aerial vehicle + cruise” monitoring system for tracking methane leakage in production processes. For the coal mining industry pilots, MEE observed that a collaborative methane emissions monitoring technology has been developed using existing coal mine safety monitoring systems. Last but not least, MEE commented that it has established a preliminary understanding of the concentrations and the spatial and temporal distributions of global methane emissions through analysis of satellite remote sensing data.”).

⁵⁹⁴ See Dreyfus G. & Ferris T. (2023) *Metrics and Measurement of Methane Emissions*, in *INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND CARBON SEQUESTRATION MONITORING*, China Council for International Cooperation on Environment and Development.

⁵⁹⁵ China State Council (21 September 2021) *Full Text of Xi's Statement at the General Debate of the 76th Session of the United Nations General Assembly* (“China will step up support for other developing countries in developing green and low-carbon energy, and will not build new coal-fired power projects abroad.”).

⁵⁹⁶ China Ministry of Ecology and Environment and Ministry of Commerce (5 January 2022) *Guidelines on Ecological and Environmental Protection of Foreign Investment and Construction Projects* [对外投资合作建设项目生态环境保护指南], Art. 3 (hyperlink to original Chinese). See also *Opinions on Promoting the Green Development of the “Belt and Road Initiative”* [关于推进共建“一带一路”绿色发展的意见] (Promulgated by China National Development and Reform Commission, Ministry of Foreign Affairs, Ministry of Ecology and Environment, and Ministry of Commerce, March 16, 2022) (hyperlink to original Chinese).

⁵⁹⁷ *Commission Regulation 2021/1119*, 2021 O.J.L. 243, Art. 4(1) (“In order to reach the climate-neutrality objective set out in Article 2(1), the binding Union 2030 climate target shall be a domestic reduction of net greenhouse gas emissions (emissions after deduction of removals) by at least 55 % compared to 1990 levels by 2030.”).

⁵⁹⁸ European Commission (14 October 2020) *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions on an EU Strategy to Reduce Methane Emissions*, 1 (“Nevertheless, the 2030 climate target plan’s impact assessment 6 found methane will continue to be the EU’s dominant non-CO₂ greenhouse. It concluded that stepping up the level of ambition for

reductions in greenhouse gas emissions to at least 55% by 2030 compared to 1990 would also require an accelerated effort to tackle methane emissions, with projections indicating a step up needed to 35% to 37% methane emission reductions by 2030 compared to 2005.”).

⁵⁹⁹ European Commission (14 October 2020) *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions on an EU Strategy to Reduce Methane Emissions*, 4 (“A priority objective of the strategy is to ensure that companies apply considerably more accurate measurement and reporting methodologies for methane emissions, across sectors, than is currently the case. This will contribute to a better understanding of the problem and better inform subsequent mitigation measures.”).

⁶⁰⁰ European Commission (14 July 2021) *European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions*, Press Release (“Today, the European Commission adopted a package of proposals to make the EU’s climate, energy, land use, transport and taxation policies fit for reducing net greenhouse gas emissions by at least 55% by 2030, compared to 1990 levels. Achieving these emission reductions in the next decade is crucial to Europe becoming the world’s first climate-neutral continent by 2050 and making the [European Green Deal](#) a reality. With today’s proposals, the Commission is presenting the legislative tools to deliver on the targets agreed in the European Climate Law and fundamentally transform our economy and society for a fair, green and prosperous future.”).

⁶⁰¹ European Commission (14 July 2021) *Proposal for amending Regulation (EU) 2018/842 on binding annual greenhouse gas emission reductions by Member States from 2021 to 2030*, 17 (“Regulation (EC) 2018/842 is amended as follows: (1) In Article 1, ‘30%’ is replaced by ‘40%’”).

⁶⁰² European Commission (14 July 2021) *Proposal for amending Regulations (EU) 2018/841 and (EU) 2018/1999*, 10 (“From 2031 onwards, the LULUCF sector will include the non-CO₂ emissions from agriculture sector and the amended Regulation will aim towards the objective to achieve climate neutrality in the Union-wide greenhouse gas emissions and removals in the combined sectors at the latest by 2035; reducing emissions to net zero by that date and generating negative emissions thereafter.”).

⁶⁰³ European Environment Agency, *EEA greenhouse gases – data viewer* (last visited 5 February 2023) (Data through 2020).

⁶⁰⁴ van der Veen R., de Vries M., van de Pol J., van Santen W., Sinke P., de Vries J., Kampman B., & Bergsma G. (2022) *METHANE REDUCTION POTENTIAL IN THE EU BETWEEN 2020 AND 2030*, CE Delft for Changing Markets Foundation, 4 (“Because most of the fossil fuels consumed in the EU are imported from other world regions, the vast majority of emissions related to EU energy use (86%) are not emitted within the EU borders. As a result, the methane emissions share of the energy sector within the EU is limited to 13%.”).

⁶⁰⁵ van der Veen R., de Vries M., van de Pol J., van Santen W., Sinke P., de Vries J., Kampman B., & Bergsma G. (2022) *METHANE REDUCTION POTENTIAL IN THE EU BETWEEN 2020 AND 2030*, CE Delft for Changing Markets Foundation, 6–7 (“Our results show that the EU methane reduction targets between 2020 and 2030 cannot be realised without implementing policies that drive the uptake of behavioural and technical measures in the livestock agriculture sector. The adoption of healthier consumer diets alone could reduce EU methane emissions by 15 to 19%, if new policy initiatives would influence all EU citizens to switch to an advised diet based on national dietary health guidelines with lower meat and dairy consumption. This makes clear that the livestock agriculture sector has an important role to play in the reduction of EU methane emissions.”).

⁶⁰⁶ European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the internal markets for renewable and natural gases and for hydrogen (recast)*, 1 (“Despite their minor contribution to the current EU energy mix, biogas, biomethane, renewable and low carbon hydrogen as well as

synthetic methane (all together renewable and low carbon gases) would represent some 2/3 of the gaseous fuels in the 2050 energy mix, with fossil gas with CCS/U (carbon capture, storage and utilisation) representing the remainder.”). See also European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on common rules for the internal markets in renewable and natural gases and in hydrogen*.

⁶⁰⁷ European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on common rules for the internal markets in renewable and natural gases and in hydrogen*, § 125 (“Long-term contracts are an important part of the gas supply of Member States. However, they should not constitute a barrier to the entry of renewable and low carbon gases, which is why the duration of contracts for the supply of fossil gas will not be able to run beyond 2049. Such contracts shall always be in line with the objective of this Directive and are compatible with the TFEU, including the competition rules. It is necessary to take into account long-term contracts in the planning of supply and transport capacity of undertakings.”).

⁶⁰⁸ European Commission (15 December 2022) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 12 (“1. By ... [182 months from the date of entry into force of this Regulation]), operators shall submit a report to the competent authorities containing **the quantification of** source-level methane emissions estimated using **at least generic but source-specific** emission factors for all sources. **Operators may choose to submit at that stage a report according to the requirements in paragraph 2.** 3. By ... [36 months from the date of entry into force of this Regulation] and by ~~30 March~~ 31 May every year thereafter, operators shall submit a report to the competent authorities containing ~~direct measurements~~ **quantification** of source-level methane emissions for operated assets referred to in paragraph 2, complemented by measurements of site-level methane emissions, thereby ~~allowing~~ **improving the assessment and verification** of the source-level estimates aggregated by site.... 4. By ... [36 months from the date of entry into force of this Regulation] undertakings established in the Union shall submit a report to the competent authorities **of the Member State where the asset is located** containing ~~direct measurements~~ **quantification** of source-level methane emissions for non-operated assets **provided these have not already been reported by an operator in response to the obligation under paragraph 2.** Reporting at such level may involve the use of source-level measurement and sampling as the basis for establishing specific emission factors used for emissions estimation.... 11. The competent authorities shall make the reports set out in this Article available to the public and the Commission, within three months from submission by operators and in accordance with Article 5(4).”) (emphasis in original).

⁶⁰⁹ European Commission (15 December 2022) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 14 (“[O]perators shall submit a leak detection and repair programme to the competent authorities which shall detail the ~~contents of the surveys~~ **contents of the surveys and activities, including specific timelines**, to be carried out in accordance with the requirements in this Article, **Parts 1 and 2 of Annex I and the relevant standards specifications established pursuant to Article 29a(1).** **If any changes to the leak detection and repair programme are made, the operators shall re-submit the programme to the competent authorities as soon as possible.**”), Art. 15 (“Venting shall be prohibited except in the circumstances provided for this Article. Routine flaring shall be prohibited.”) (emphasis in original).

⁶¹⁰ European Commission (15 December 2022) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 6 (“1. The competent authorities shall carry out periodic inspections ~~based on a risk assessment~~ to check the compliance of operators or mine operators with the requirements set out in this Regulation. **Subject to paragraphs 2 and 3, the competent authorities may decide on the scope and frequency of the periodic inspections, based on an assessment of risks associated with each site, such as environmental, human safety and public health risks, as well as any identified breaches of this Regulation.**... 2. Inspections shall include, where relevant, site checks or field audits examination of documentation and records that demonstrate compliance....”), Art. 10 (“~~Provided the interest of the Union is protected,~~ **In performing their obligations and exercising their powers under this Regulation, verifiers, the competent authorities and the Commission shall consider relevant internationally available the**

information made available by the International Methane Emissions Observatory shall be attributed a verification role with respect to methane emissions data....”) (emphasis in original).

⁶¹¹ European Commission (15 December 2022) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 18 (“1. By [12 months from the date of entry into force of this Regulation], Member States shall establish and make publicly available an inventory of all **recorded inactive wells, temporarily plugged wells and permanently plugged and abandoned wells** on their territory or under their jurisdiction, **where information on location exists or where location can be identified with all reasonable efforts....** 2. **Without prejudice to paragraph 3, R reports containing the information on measurements or quantification of methane emissions and, where such monitoring equipment exists on wellheads, pressure monitoring, of methane emissions from all inactive wells, and temporarily plugged wells and wells that do not meet the requirements set out in paragraph 3, referred to in paragraph 2** shall be submitted to the competent authorities.... 6. The competent authorities shall make the reports set out in this Article available to the public and the Commission.... 7. ~~Member States shall be responsible for fulfilling the obligations laid down in paragraphs 2 and 3, except where a responsible party can be identified, in which case that party shall bear responsibility.~~ **Member States shall ensure fulfilling the obligations laid down in paragraphs 2 to 4 by the operators. Where a responsible party provides reliable evidence that it does not have adequate financial assurance to fulfil those obligations or where the responsible party cannot be identified, the Member State shall bear responsibility....** 8. By ... [284 months from the date of entry into force of this Regulation], **Member States or the responsible party, in accordance with paragraph 7, shall develop and implement a mitigation plan to remediate, reclaim and permanently plug inactive wells and temporarily plugged wells located in their territory including at least the elements set out in Part 2 of Annex IV and setting out an implementation period starting no later than 12 months after the first reports referred to in paragraph 2.** Mitigation plans shall use the inventories referred to in paragraph 1 **and the reports referred to in paragraph 2** to determine priority for activities including: (a) remediating, reclaiming and permanently plugging wells; (b) reclaiming related access roads **or the surrounding soil under water, as applicable;** (c) restoring land, water, seabed and habitat impacted by wells and the prior operations; (d) ~~yearly regular~~ **checks to ensure plugged wells temporarily plugged wells and, where deemed applicable, permanently plugged and abandoned wells are not longer a source of methane emissions.**”) (emphasis in original).

⁶¹² European Commission (15 December 2022) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 25 (“1. Member States shall set up and make publicly available an inventory of all closed coal mines and abandoned **underground coal mines** in their territory or under their jurisdiction **where operations have ceased since ... [50 years prior to the date of entry into force of this Regulation]**... 2. From ... [~~18 24 months from the date of entry into force of this Regulation~~], methane emissions shall be measured in all closed and abandoned underground coal mines where operations have ceased since ... [50 years prior to the date of entry into force of this Regulation]. ~~Measurement equipment shall be installed on all elements listed in point (v) of Part 1(v) of Annex VII which were found to emit above 0,5 tonnes of methane per year based on the inventory in Paragraph 1.~~ ~~for closed coal mines and abandoned coal mines where operations have ceased since ... [50 years prior to the date of entry into force of this Regulation].~~ **The equipment shall perform Methane concentration source level direct measurements or quantifications shall be taken in accordance with the specifications established in accordance with Article 29a appropriate scientific publicly available European and international standards** and at least on an hourly basis **and of sufficient quality to allow for a representative estimation of yearly methane emissions** from all elements listed in part 1(vi) of Annex VII which were found to emit methane. **Until such methodologies are established, publicly available European and international standards may be used.** ~~The measurement equipment must shall operate for more than 90% of the period for which it is used to monitor the emissions, excluding downtime taken for re-calibration and repairs~~ **2a. If the observed annual methane release of an element listed in part 1(v) of Annex VII is below 1 tonne of methane for six consecutive years in the case of flooded mines or twelve consecutive years in the case of dry mines, no further monitoring and reporting shall be taken for that specific**

element. 3. Reports containing estimates of yearly source-level methane emissions data shall be submitted to the competent authorities....”) (emphasis in original).

⁶¹³ European Commission (15 December 2022) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 20 (“1. For underground coal mines, mine operators shall perform continuous ~~ventilation air methane emissions~~ **source level direct** measurement ~~or and~~ **and** quantification on all exhaust ventilation shafts ~~used by the mine~~ **Mine operators shall report to the competent authorities methane releases per ventilation shaft per year in kt of methane**.... 2. Drainage stations operators shall perform continuous **source level direct** measurements ~~or and~~ **and** quantifications of ~~volumes total releases~~ vented and flared methane.... 3. As regards surface coal mines, mine operators shall use deposit-specific coal mine methane emission factors to quantify emissions resulting from mining operations.... 5. **Where relevant, mine operators shall estimate coal post-mining emissions using coal postmining emission factors**....”) (emphasis in original).

⁶¹⁴ European Commission (15 December 2022) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 20 (“1. For underground coal mines, mine operators shall perform continuous ~~ventilation air methane emissions~~ **source level direct** measurement ~~or and~~ **and** quantification on all exhaust ventilation shafts ~~used by the mine~~ **Mine operators shall report to the competent authorities methane releases per ventilation shaft per year in kt of methane**.... 2. Drainage stations operators shall perform continuous **source level direct** measurements ~~or and~~ **and** quantifications of ~~volumes total releases~~ vented and flared methane.... 3. As regards surface coal mines, mine operators shall use deposit-specific coal mine methane emission factors to quantify emissions resulting from mining operations.... 5. **Where relevant, mine operators shall estimate coal post-mining emissions using coal postmining emission factors**....”) (emphasis in original).

⁶¹⁵ European Commission (15 December 2022) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 22 (“~~Venting and f~~ Flaring **with a destruction and removal efficiency below 98% and venting** of methane from drainage stations shall be prohibited from {1 January 2025}, except in the case of an emergency, a malfunction or where unavoidable and strictly necessary for maintenance **and venting in accordance with paragraph 2.**”); Art. 23 (“From {1 January 2025}, drainage station operators shall notify the competent authorities of all venting **events** and flaring events **with a destruction and removal efficiency below 98%**: (a) caused by an emergency or a malfunction, (b) occurring unavoidably due to maintenance of the drainage system.”) (emphasis in original).

⁶¹⁶ Assan S. (2 March 2023) *Major loopholes for coal mines in EU methane regulation*, Ember (“The originally proposed regulation covered mitigation at active and abandoned underground mine operations which together represent 76% of EU coal mine methane (CMM) emissions. However recent amendments have increased the venting thresholds for thermal coal, whilst action on coking coal is expected to be delayed for at least five more years. Our analysis shows the latest revisions to the regulation will only cut methane emissions from coal mines by around 47%, well below its stated climate goal of a 58% reduction.”).

⁶¹⁷ European Commission (15 December 2021) *Questions and Answers on reducing methane emissions in the energy sector*, 2 (“The proposal does not contain specific binding target reductions. However, according to the Impact Assessment for the Climate Target Plan 2030, the EU should reduce its methane emissions from energy by 58% by 2030.”).

⁶¹⁸ European Commission (15 December 2021) *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on common rules for the internal markets in renewable and natural gases and in hydrogen*, §§121–122 (“(121) Natural gas is mainly, and increasingly, imported into the Union from third countries. Union law should take account of the characteristics of natural gas, such as certain structural rigidities arising from the concentration of suppliers, the long-term contracts or the lack of downstream liquidity. Therefore, more transparency is needed,

including in regard to the formation of prices. (122) Prior to the adoption by the Commission of Guidelines defining further the record-keeping requirements, ACER and the Committee of European Securities Regulators (the ‘CESR’), established by Commission Decision 2009/77/EC 20, should confer and advise the Commission in regard to their content. ACER and the CESR should also cooperate to investigate further and advise on whether transactions in gas supply contracts and gas derivatives should be subject to pre- and/or post-trade transparency requirements and, if so, what the content of those requirements should be.”).

⁶¹⁹ European Commission (15 December 2022) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 27–29 (“Article 27. Importer Requirements. 1. By ... [9 months from the date of entry into force of the Regulation] and by **30 June**~~December~~ every year thereafter, importers shall provide the information set out in Annex VIII to the competent authorities of the importing Member State. **Where importers fail to provide the information set out in Annex VIII, in whole or in part, they shall demonstrate to the competent authorities of the importing Member State that all reasonable efforts have been undertaken to acquire the information.** 2. By ... [12 months from the date of entry into force of the Regulation] and by **31 December** ~~June~~ every year thereafter, Member States shall submit to the Commission the information provided to them by importers. The Commission shall make the information available in accordance with Article 28. ... Article 28. Methane transparency database. (1) By ... [18 months after the date of entry into force of the Regulation] the Commission shall establish and maintain a methane transparency database containing the information submitted to it pursuant to Article 27 and Articles 12(11), 16(32), 18(46), 20(7), 23(2) and 25(5). ... Article 29. Methane emitters global monitoring tool (1) By ... [two years after the date of entry into force of the Regulation], the Commission shall establish a global methane monitoring tool based on satellite data and input from several certified data providers and services, including the Copernicus component of the EU Space Programme.”) (emphasis in original).

⁶²⁰ European Commission (15 December 2022) *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, ¶ 66a (“In order to fulfil the objectives of this Regulation and to contribute to the goal set out in the Global Methane Pledge to reduce global methane emissions by 30% until 2030, the European Union should consider extending the requirements set out in this Regulation to imports from third countries. By [12 months after the date of entry into force of this Regulation], the European Commission should submit to the European Parliament and the Council a report on the implications of a possible extension of the requirements under this Regulation to the energy supply chain and production of fossil fuels imported into the Union. When preparing the report, the European Commission should put particular focus on the methane mitigation potential, consequences for energy prices, security of energy supply and availability of energy resources on the EU market. Depending on the outcome of that report and as part of the review of this Regulation, the Commission should consider submitting appropriate legislative proposals to extend the scope of this Regulation and its requirements and standards accordingly to importers of the relevant products to the Union.”).

⁶²¹ Council of Europe (15 November 2023) *Climate action: Council and Parliament reach deal on new rules to cut methane emissions in the energy sector* (“The Council and the Parliament agreed on three implementation phases. The first phase will focus on data collection and the creation of a methane emitters global monitoring tool and a super emitter rapid reaction mechanism. In the second and third phases, equivalent monitoring, reporting and verification measures should be applied by exporters to the EU by 1 January 2027, and maximum methane intensity values by 2030. The competent authorities of each member state will have the power to impose administrative penalties if these provisions are not respected.”).

⁶²² Abnett K. (15 November 2023) *EU agrees law to hit fossil fuel imports with methane emissions limit*, Reuters (““Finally, the EU tackles the second most important greenhouse gas with ambitious measures,” said Jutta Paulus, the EU Parliament’s co-lead negotiator, adding that the law “will have repercussions worldwide”. Paulus told reporters importers will face financial penalties if they buy from foreign suppliers that don’t comply with the limit - effectively imposing a fee on non-compliant fuels. The methane standard would be mandatory for supply contracts signed after the law enters into force, likely later this year, after the European Parliament and EU countries give it final approval.”).

⁶²³ European Parliament (9 May 2023) *Amendments adopted by the European Parliament on 9 May 2023 on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942 (COM(2021)0805 – C9-04*, 129 (“[O]nce every two months for all aboveground components using detection devices with the minimum detection limit referred to in paragraph 3, point (a)”).

⁶²⁴ European Parliament (9 May 2023) *Amendments adopted by the European Parliament on 9 May 2023 on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942 (COM(2021)0805 – C9-04*, 9 (“given that upstream exploration and production, oil and fossil gas gathering and processing also yield naphtha and natural gas liquids for use in the petrochemical sector and result in methane emissions. The petrochemical sector should be subject to the measures on monitoring and reporting, leak detection and repair, and limits to venting and flaring similar to those in the energy sector.”).

⁶²⁵ European Parliament (9 May 2023) *Amendments adopted by the European Parliament on 9 May 2023 on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on methane emissions reduction in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942 (COM(2021)0805 – C9-04*, 202 (“As of 1 January 2026, importers of coal, oil and gas, shall demonstrate that exporters of coal, oil and gas into the Union comply with the requirements for the measurement, monitoring, reporting and verification, leak detection and repair, and venting and flaring established in Chapters 3 and 4 of this Regulation or otherwise meet the requirements for derogations set out in paragraph 2b of this Article.”).

⁶²⁶ European Commission (15 November 2023) *Climate action: Council and Parliament reach deal on new rules to cut methane emissions in the energy sector* (“The Council and the Parliament today reached a provisional political agreement on a regulation on tracking and reducing methane emissions in the energy sector.”).

⁶²⁷ European Parliament (11 April 2024) *Methane: Parliament adopts new law to reduce emissions from energy sector* (“Parliament on Wednesday adopted a provisional political agreement with EU countries on a new law to reduce methane emissions from the energy sector, with 530 votes in favour, 63 against and 28 abstentions. ... The law now also has to be adopted by Council, before being published in the EU Official Journal and entering into force 20 days later.”). See also European Parliament (17 May 2025) *Draft Regulation of the European Parliament and of the Council on the reduction of methane emissions in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942 (first reading) – Adoption of the legislative act*, 2 (“On 10 April 2024, the European Parliament adopted its position at first reading of the Commission proposal. The outcome of voting in the European Parliament reflects the compromise agreement reached between the institutions and should, therefore, be acceptable to the Council... If the Council approves the European Parliament's position, the legislative act will be adopted.”); Council of Europe (27-28 May 2024) *Voting Result: Regulation of the European Parliament and of the Council on the reduction of methane emissions in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, 2 (passed).

⁶²⁸ European Parliament and the Council (7 May 2024), *Regulation of the European Parliament and of the Council on the reduction of methane emissions in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942*, Art. 28(1) (“From 1 January 2027, importers shall demonstrate, and report in accordance with Article 27(1), to the competent authorities of the Member State in which they are established that the contracts concluded or renewed on or after [June 2025] for the supply of crude oil, natural gas or coal produced outside the Union cover only crude oil, natural gas or coal that is subject to monitoring, reporting and verification measures applied at the level of the producer that are equivalent to those set out in this Regulation”); Art. 29(2) (“By [June 2030] and every year thereafter, Union producers and importers placing crude oil, natural gas and coal on the Union market under supply contracts concluded or renewed after [June 2030] shall demonstrate to the competent authorities of the Member State in which they are established that the methane intensity of the production of crude oil, natural gas and coal placed by them on the Union market, calculated in accordance with the methodology set out pursuant to paragraph 4, is below the maximum methane

intensity values established in accordance with paragraph 6 to promote the global methane emissions reductions for those products”).

⁶²⁹ European Commission (14 October 2020) *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions on an EU Strategy to Reduce Methane Emissions*, 11 (“The Commission will deliver legislative proposals in 2021 on: • Compulsory measurement, reporting, and verification (MRV) for all energy related methane emissions, building on the Oil and Gas Methane Partnership (OGMP 2.0) methodology. • Obligation to improve leak detection and repair (LDAR) of leaks on all fossil gas infrastructure, as well as any other infrastructure that produces, transports or uses fossil gas, including as a feedstock. (7) The Commission will consider legislation on eliminating routine venting and flaring in the energy sector covering the full supply chain, up to the point of production. (8) The Commission will work to extend the OGMP framework to more companies in the gas and oil upstream, midstream and downstream as well as to the coal sector and closed as well as abandoned sites. (9) The Commission will promote remedial work under the initiative for Coal Regions in Transition. Best-practice recommendations and/or enabling legislation will be brought forward if necessary.”).

⁶³⁰ European Commission (14 October 2020) *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions on an EU Strategy to Reduce Methane Emissions*, 3–4 (“In the waste sector, the main identified sources of methane are uncontrolled emissions of landfill gas in landfill sites, the treatment of sewage sludge and leaks from biogas plants due to poor design or maintenance. Emissions from the landfilling of waste fell by 47% between 1990 and 2017 (24), following better compliance with EU waste legislation on emissions from landfill. This was achieved primarily by diverting biodegradable waste to other waste treatment options higher in the waste hierarchy (25) such as composting and anaerobic digestion, as well as ensuring the stabilisation of biodegradable waste before disposal. However, more stringent compliance practices are needed to further reduce methane emissions from waste. ... A priority objective of the strategy is to ensure that companies apply considerably more accurate measurement and reporting methodologies for methane emissions, across sectors, than is currently the case. This will contribute to a better understanding of the problem and better inform subsequent mitigation measures (26).”).

⁶³¹ European Commission, *The new common agricultural policy: 2023-27* (last visited 1 February 2023) (“40% of the CAP budget will have to be climate-relevant and strongly support the general commitment to dedicate 10% of the EU budget to biodiversity objectives by the end of the EU's multiannual financial framework (MFF) period.”).

⁶³² European Commission (23 November 2023) [REPORT FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL Summary of CAP Strategic Plans for 2023-2027: joint effort and collective ambition](#), 6 (“CSPs’ support for extensive livestock systems helps to maintain not only carbon stocks but also traditional landscapes, while improving feed autonomy and economic activities on marginal land. Many CSPs recognise explicitly the need to reduce livestock-related emissions (notably methane from ruminants). In particular, CSPs include support for investments in: improving manure storage and management; equipment for low-emission slurry spreading; and anaerobic digesters. This will be supplemented by support for genetic improvements. Less than half of the CSPs include other relevant support (e.g. for outdoor grazing, improvement of feeding plans and feed additives) and set (widely differing) targets (2.4% of EU livestock units) to reduce methane or ammonia emissions. Maximum livestock densities feature in several land-based interventions, including also for coupled support in some environmental hotspots.”). *See also* European Commission (23 November 2023) [REPORT FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL: SUMMARY OF CAP STRATEGIC PLANS FOR 2023-2027](#), 11 (“Some CSPs give attention to reducing food waste, at times combined with efforts at preserving the value of resources - through investments, sectoral programmes and cooperation. Some plans also identify needs related to consumers’ awareness regarding sustainable, healthy, and balanced diets. However, these issues are mainly considered as to be tackled outside the Plans.”).

⁶³³ European Parliament (13 December 2022) *Deal reached on new carbon leakage instrument to raise global climate ambition*, Press Release (“According to the deal reached, an EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) will be set up to equalise the price of carbon paid for EU products operating under the EU Emissions Trading System (ETS) and the one for imported goods. This will be achieved by obliging companies that import into the EU to purchase so-called CBAM certificates to pay the difference between the carbon price paid in the country of production and the price of carbon allowances in the EU ETS. The law will incentivise non-EU countries to increase their climate ambition and ensure that EU and global climate efforts are not undermined by production being relocated from the EU to countries with less ambitious policies.”).

⁶³⁴ Smirnov A. (6 September 2021) *Coal mine methane: a missed opportunity for EU’s CBAM*, EURACTIV (“One of the many included proposals is the carbon border adjustment mechanism (CBAM), which seeks to prevent greenhouse gas emissions ‘leaking’ over the border by taxing carbon-intensive imports from regions with less stringent emissions policies. However, the CBAM applies mostly to carbon dioxide (CO₂) emissions, excluding other climate-warming gases such as methane — a missed opportunity in the fight to address climate change.”).

⁶³⁵ European Commission (29 September 2023) *Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) starts to apply in its transitional phase* (“This Sunday, 1 October, the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) will enter into application in its transitional phase. CBAM is the EU’s landmark tool to fight carbon leakage and one of the central pillars of the EU’s ambitious Fit for 55 Agenda. It will equalise the price of carbon between domestic products and imports. This will ensure that the EU’s climate policies are not undermined by production relocating to countries with less ambitious green standards or by the replacement of EU products by more carbon-intensive imports. CBAM is a WTO-compatible measure that encourages global industry to embrace greener and more sustainable technologies. In its transitional phase, CBAM will only apply to imports of **cement, iron and steel, aluminium, fertilisers, electricity and hydrogen. EU importers of these goods** will have to report on the volume of their imports and the greenhouse gas (GHG) emissions embedded during their production, but without paying any financial adjustment at this stage.”) (emphasis in original). See also Sholli S. (2 October 2023) *EU carbon border tax enters transitional phase*, International Tax Review, KPMG.

⁶³⁶ XV BRICS Summit (23 August 2023) *Johannesburg II Declaration*, 19 (“We oppose trade barriers including those under the pretext of tackling climate change imposed by certain developed countries and reiterate our commitment to enhancing coordination on these issues. We underline that measures taken to tackle climate change and biodiversity loss must be WTO-consistent and must not constitute a means of arbitrary or unjustifiable discrimination or a disguised restriction on international trade and should not create unnecessary obstacles to international trade. Any such measure must be guided by the principle of common but differentiated responsibilities and respective capabilities (CBDR-RC), in the light of different national circumstances. We express our concern at any WTO inconsistent discriminatory measure that will distort international trade, risk new trade barriers and shift burden of addressing climate change and biodiversity loss to BRICS members and developing countries.”). See also Overland I. (2022) *Know your opponent: Which countries might fight the European carbon border adjustment mechanism?*, SCIENCE DIRECT (“The analysis indicates that the following countries are most likely to mount opposition to CBAM: Iran, Ukraine, the USA, the United Arab Emirates, Egypt, China, India, Kazakhstan, Russia, and Belarus. How the EU handles opposition from these countries will be decisive for the fate of CBAM. The index can serve as a tool for policymakers inside and outside the EU who need to negotiate over CBAM and want to anticipate the stances of other countries and understand their drivers.”).

⁶³⁷ See generally Clausing K., Garicano L., & Wolfram C (2023) *HOW AN INTERNATIONAL AGREEMENT ON METHANE EMISSIONS CAN PAVE THE WAY FOR ENHANCED GLOBAL COOPERATION ON CLIMATE CHANGE*, Peterson Institute for International Economics. See also Salata Institute for Climate and Sustainability (2023) *METHANE AND TRADE: PAVING THE WAY FOR ENHANCED GLOBAL COOPERATION ON CLIMATE CHANGE*, Research Brief, 3 (“As a first step, the United States, the European Union, and partner countries can work to coordinate their methane reduction policies, with an eye toward the eventual imposition of border adjustments on imports from countries that fail to raise their standards. The Biden administration could work with Congress on next steps for implementing a US methane border

adjustment, while simultaneously leading efforts with the European Union, the G7, and other potential coalition members to develop a framework for a multilateral agreement. Ideally, a proposed framework could be presented at the 28th Conference of the Parties to the UN Framework Convention on Climate Change (COP28) in Dubai in late 2023.”).

⁶³⁸ International Energy Agency (3 March 2022) *A 10-Point Plan to Reduce the European Union’s Reliance on Russian Natural Gas*, 4 (“Europe’s reliance on imported natural gas from Russia has again been thrown into sharp relief by Russia’s invasion of Ukraine on 24 February. In 2021, the European Union imported an average of over 380 million cubic metres (mcm) per day of gas by pipeline from Russia, or around 140 billion cubic metres (bcm) for the year as a whole. As well as that, around 15 bcm was delivered in the form of liquefied natural gas (LNG). The total 155 bcm imported from Russia accounted for around 45% of the EU’s gas imports in 2021 and almost 40% of its total gas consumption.”).

⁶³⁹ Yanatma S. (24 February 2023) *Europe’s ‘energy war’ in data: How have EU imports changed since Russia’s invasion of Ukraine?*, EURONEWS GREEN (“The most striking change in EU energy imports since the Russia-Ukraine war began has been seen in ‘natural’ (fossil) gas. In 2021, the EU imported 83 per cent of its natural gas. Before the war, EU natural gas imports from Russia made up almost 50 per cent of the total. This fell significantly in 2022, down to 12 per cent in October.”).

⁶⁴⁰ In 2020, the EU established “criteria for determining whether an economic activity qualifies as environmentally sustainable” for the purposes of establishing the sustainability of investments. See European Commission (22 June 2020) *Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment, and amending Regulation (EU) 2019/2088*, 2020 O.J. (L 198) 13, Art. 1 (“This Regulation establishes the criteria for determining whether an economic activity qualifies as environmentally sustainable for the purposes of establishing the degree to which an investment is environmentally sustainable.”). See also European Commission (2022) *Delegated regulation (EU) 2022/1214 of 9 March 2022 amending Delegated Regulation (EU) 2021/2139 as regards economic activities in certain energy sectors and Delegated Regulation (EU) 2021/2178 as regards specific public disclosures for those economic activities (Text with EEA relevance)*, Annex I, § 4.29 (“Construction or operation of electricity generation facilities that produce electricity using fossil gaseous fuels. This activity does not include electricity generation from the exclusive use of renewable non-fossil gaseous and liquid fuels as referred to in Section 4.7 of this Annex and biogas and bio-liquid fuels as referred to in Section 4.8 of this Annex.... An economic activity in this category is a transitional activity as referred to in Article 10(2) of Regulation (EU) 2020/852 where it complies with the technical screening criteria set out in this Section..”); discussed in Alderman L. & Pronczuk M. (2 January 2022) *Europe Plans to Say Nuclear Power and Natural Gas Are Green Investments*, THE NEW YORK TIMES (“France led a coalition this year that included nations in Eastern Europe—the continent’s most coal-dependent region—to get nuclear energy and natural gas classified as sustainable investments. Poland, Hungary, Bulgaria and Romania are among the countries that want to attract more investment for nuclear power as they move away from fossil fuels. Germany, on the other side, along with Austria, Luxembourg, Portugal and Denmark have expressed concerns about a buildup of nuclear power plants and the radioactive waste they produce.... Tsvetelina Kuzmanova, an expert on sustainable finance and a policy adviser at E3G, a Brussels think tank, said including nuclear and natural gas in the taxonomy amounted to ‘calling something that isn’t green, green.’”).

⁶⁴¹ European Commission (8 March 2022) *REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy*, 1 (“The EU needs to be ready for any scenario. It can reach independence from Russian gas well before the end of the decade. The sooner and more decisively we diversify our supply, accelerate the roll out of green energy technologies and reduce our demand of energy, the earlier we can substitute Russian gas. This communication sets out new actions to ramp up the production of green energy, diversify supplies and reduce demand, focusing primarily on gas, which significantly influences the electricity market and where the global market is less liquid. The focus can be extended to phasing out dependence on Russian oil and coal, for which the EU has a broader diversity of potential suppliers. Accelerating the green transition will reduce emissions, reduce dependency on imported fossil

fuels, and protect against price hikes.”). See also Ravikumar A., et al. (2023) *Measurement-based differentiation of low-emission global natural gas supply chains*, NAT. ENERGY 8: 1174–1176, 1174 (“Energy and commodities markets globally have been transformed as a result of the Russian invasion of Ukraine. Europe’s sudden shift away from Russian natural gas supplies has resulted in a race for alternative sources and increased demand for liquefied natural gas (LNG). Concerns over security and affordability have led to a rapid buildup of infrastructure in Europe and Asia that can receive LNG.”).

⁶⁴² European Commission (23 March 2022) *Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Regulation (EU) 2017/1938 of the European Parliament and of the Council concerning measures to safeguard the security of gas supply and Regulation (EC) n°715/2009 of the European Parliament and of the Council on conditions for access to natural gas transmission networks*, Art. 6a (“(2) For 2022, the filling target shall be set at 80% of the capacity of all storage facilities on the territory of the respective Member States. Unless the Commission decides otherwise pursuant to paragraph 4, the filling target shall be set at 90% for the following years.”).

⁶⁴³ European Commission (23 March 2022) *Security of supply and affordable energy prices: Options for immediate measures and preparing for next winter*, Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions, 4–5 (“The Commission stands ready to create a Task Force on common gas purchases at EU level. By pooling demand, the Task Force would facilitate and strengthen EU’s international outreach to suppliers of LNG and of gas, with the view to secure well-priced LNG and gas imports ahead of next winter. The EU can better ensure LNG, gas and hydrogen at affordable prices from third countries in the short term, if it engages with those countries on the long term, setting up long-term renewable gas partnerships which would also lay the basis for future hydrogen imports. Thus, the Task Force will prepare the ground for energy partnerships with key suppliers of LNG, gas and hydrogen.”).

⁶⁴⁴ White House (25 March 2022) *Joint Statement between the United States and the European Commission on European Energy Security*, Statements and Releases (“The United States and European Commission will undertake efforts to reduce the greenhouse gas intensity of all new LNG infrastructure and associated pipelines, including through the use of clean energy to power onsite operations, the reduction of methane leakage, and the construction of clean and renewable hydrogen ready infrastructure. The United States commits to maintaining an enabling regulatory environment with procedures to review and expeditiously act upon applications to permit any additional export LNG capacities that would be needed to meet this emergency energy security objective and support the RePowerEU goals, affirming the joint resolve to terminate EU dependence on Russian fossil fuels by 2027. The European Commission will work with the governments of EU Member States to accelerate their regulatory procedures to review and determine approvals for LNG import infrastructure, to include onshore facilities and related pipelines to support imports using floating storage regasification unit vessels, and fixed LNG import terminals.”).

⁶⁴⁵ White House (8 May 2022) *G7 Leaders’ Statement*, Statements and Releases (“First, we commit to phase out our dependency on Russian energy, including by phasing out or banning the import of Russian oil. We will ensure that we do so in a timely and orderly fashion, and in ways that provide time for the world to secure alternative supplies. As we do so, we will work together and with our partners to ensure stable and sustainable global energy supplies and affordable prices for consumers, including by accelerating reduction of our overall reliance on fossil fuels and our transition to clean energy in accordance with our climate objectives.”).

⁶⁴⁶ Executive Body Working Group on Strategies and Review (30 September 2020) *Preparations for the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2020/3 – EBE/EB.AIR/WG.5/2020/3 at ¶ 20, (“As per the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond (paragraph 50), the review should look at appropriate steps towards reducing emissions of black carbon, ozone precursors not yet addressed such as methane, and emissions from shipping with due consideration for International Maritime Organization (IMO) policies and measures. ... In line with the priorities identified in the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond, the following should specifically be considered in answering the questions in annex I:(b) Hemispheric transport of ozone and particulate matter and their precursors and advancing

efforts to address air pollution on a broader scale per paragraphs 63 and 78 of the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond; health and ecosystem impacts from outside the ECE region; (c) Methane and its relationship to the hemispheric transport of ozone and its contribution to ozone in the ECE region[.]”).

⁶⁴⁷ European Commission (18 May 2022) *Joint Communication to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions in EU external energy engagement in a changing world*, 3 (“Before this summer, the EU aims to conclude a trilateral agreement with Egypt and Israel on supplying Europe with LNG. Japan and Korea have already redirected a number of LNG cargoes to Europe and work continues to use this option in the future. Qatar stands ready to facilitate swaps with Asian countries. In terms of pipeline gas, Norway has already increased its deliveries to Europe and both Algeria and Azerbaijan have expressed their willingness to do so as well. The EU will aim to restart the energy dialogue with Algeria and will intensify cooperation with Azerbaijan in the light of the strategic importance of the Southern Gas Corridor. Scaling up the Trans Adriatic Pipeline (TAP) capacity would increase the gas supply to the EU and the Western Balkan countries.”).

⁶⁴⁸ European Commission (18 May 2022) *Joint Communication to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions in EU external energy engagement in a changing world*, 4 (“The EU will aim to ensure that additional gas supplies from existing and new gas suppliers are coupled with targeted actions to tackle methane leaks and to address venting and flaring, creating additional liquidity on global markets, while ensuring significant climate benefits. To that end, the EU will cooperate with its fossil fuel supply partners to reduce methane emissions. At least 46 bcm of natural gas is lost⁴ a year to venting and flaring in the countries that could be supplying this to the EU. The technology exists to capture most of this methane (the main component of natural gas) in a sustainable and economical way. The EU stands ready to provide technical assistance to partners to set up such mutually beneficial “You collect/we buy” schemes. The EU will also convene partners such as the European Investment Bank (EIB), the European Bank for Reconstruction and Development (EBRD) and the World Bank to create incentives for the rapid collection of wasted fossil gases, including methane, bundling those losses into meaningful products that can be sold to international buyers.”).

⁶⁴⁹ European Commission (15 June 2022) *Memorandum of Understanding on Cooperation Related to Trade, Transport, and Export of Natural Gas to the European Union*, 2 (“The Sides [European Union, Arab Republic of Egypt, and the State of Israel] will endeavour to work collectively towards enabling a stable delivery of natural gas to the EU that is consistent with long-term decarbonisation objectives and is based on the principle of market-oriented pricing, to the extent that it coincides with each Side’s domestic laws, regulations, policies and procedures.”). See also European Commission (18 July 2022) *EU and Azerbaijan enhance bilateral relations, including energy cooperation*, Press Release (“The new Memorandum of Understanding on a Strategic Partnership in the Field of Energy signed by the two Presidents today includes a commitment to double the capacity of the Southern Gas Corridor to deliver at least 20 billion cubic metres to the EU annually by 2027. This will contribute to the diversification objectives in the REPowerEU Plan and help Europe to end its dependency on Russian gas. Based on the strengthened energy cooperation, Azerbaijan is already now increasing deliveries of natural gas to the EU, from 8.1 billion cubic metres in 2021 to an expected 12 bcm in 2022.”).

⁶⁵⁰ European Commission (18 May 2022) *Joint Communication to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions in EU external energy engagement in a changing world*, 5 (“In order to facilitate imports of 10 million tonnes of hydrogen into the EU, the European Commission aims to conclude hydrogen partnerships with reliable partner countries to ensure open and undistorted trade and investment relations for renewable and low carbon fuels.”).

⁶⁵¹ European Commission (18 May 2022) *Joint Communication to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions in EU external energy engagement in a changing world*, 8 (“As the EU moves away from Russian energy supply, it will prioritise energy savings and efficiency, aiming to achieve a 5% reduction in oil and gas demand in the short term. This will decrease the price and demand pressure on the global markets. The EU will also work with international partners to make energy savings

and efficiency a global priority. Together with other developed economies, the EU will in particular focus on reducing energy consumption, among other things building on the IEA Playing My Part campaign.”).

⁶⁵² European Commission (15 June 2022) 2 (“The Sides will endeavour to promote the reduction of methane leakages, and in particular examine new technologies for reducing venting and flaring and explore possibilities for the utilisation of captured methane throughout the entire supply chain.”).

⁶⁵³ European Commission (4 April 2023) *Joint Statement by the EU and the US following the 10th EU-US Energy Council*, Press Release (“The Council intends to continue advancing the reduction of global methane emissions in line with the Global Methane Pledge and the Joint Declaration from Energy Importers and Exporters on Reducing Greenhouse Gas Emissions from Fossil Fuels. The Council intends to promote domestic and international measures for reinforced monitoring, reporting, and verification, as well as transparency, for methane emissions data in the fossil energy sector, such as through the Oil and Gas Methane Partnership 2.0 (OGMP 2.0) standard and the development of a common tool for life cycle analysis (LCA) of methane emissions for hydrocarbon suppliers and purchasers. Building upon the Joint Declaration, the Council intends to work with Joint Declaration members and other countries to develop an internationally aligned approach for transparent measurement, monitoring, reporting, and verification for methane and carbon dioxide emissions across the fossil energy value chain to improve the accuracy, availability, and transparency of emissions data at cargo, portfolio, operator, jurisdiction and basin-level. The Council recognised the International Methane Emissions Observatory as a key independent methane emissions data collector and verifier, and the Council recognised the need to develop effective global schemes to limit leakage, venting, and flaring, such as the mutually beneficial You Collect We Buy. The Council acknowledged the joint progress made on developing international standards for leak detection and quantification of methane emissions. In this respect, the Council welcomes the agreement for cooperation between the two first-of-a-kind centres of excellence, the TotalEnergies Anomaly Detection Initiatives (TADI) of the Pôle d'Etudes et de Recherche de Lacq and the Colorado State University Methane Emission Technology Evaluation Center (METEC). The Council noted its support of other centres of expertise that may wish to join TADI and METEC in their initiative.”).

⁶⁵⁴ European Commission (4 April 2023) *Joint Statement by the EU and the US following the 10th EU-US Energy Council*, Press Release (“The Council intends to continue advancing the reduction of global methane emissions in line with the Global Methane Pledge and the Joint Declaration from Energy Importers and Exporters on Reducing Greenhouse Gas Emissions from Fossil Fuels. The Council intends to promote domestic and international measures for reinforced monitoring, reporting, and verification, as well as transparency, for methane emissions data in the fossil energy sector, such as through the Oil and Gas Methane Partnership 2.0 (OGMP 2.0) standard and the development of a common tool for life cycle analysis (LCA) of methane emissions for hydrocarbon suppliers and purchasers. Building upon the Joint Declaration, the Council intends to work with Joint Declaration members and other countries to develop an internationally aligned approach for transparent measurement, monitoring, reporting, and verification for methane and carbon dioxide emissions across the fossil energy value chain to improve the accuracy, availability, and transparency of emissions data at cargo, portfolio, operator, jurisdiction and basin-level. The Council recognised the International Methane Emissions Observatory as a key independent methane emissions data collector and verifier, and the Council recognised the need to develop effective global schemes to limit leakage, venting, and flaring, such as the mutually beneficial You Collect We Buy. The Council acknowledged the joint progress made on developing international standards for leak detection and quantification of methane emissions. In this respect, the Council welcomes the agreement for cooperation between the two first-of-a-kind centres of excellence, the TotalEnergies Anomaly Detection Initiatives (TADI) of the Pôle d'Etudes et de Recherche de Lacq and the Colorado State University Methane Emission Technology Evaluation Center (METEC). The Council noted its support of other centres of expertise that may wish to join TADI and METEC in their initiative.”).

⁶⁵⁵ Bertagni M. B., Pacala S. W., Paulot F., & Porporato A. (2022) *Risk of the hydrogen economy for atmospheric methane*, NAT. COMMUN. 13(7706): 1–10, 1 (“We find that CH₄ concentration may increase or decrease depending on the amount of hydrogen lost to the atmosphere and the methane emissions associated with hydrogen production. Green H₂ can mitigate atmospheric methane if hydrogen losses throughout the value chain are below $9 \pm 3\%$. Blue H₂

can reduce methane emissions only if methane losses are below 1%.”), 4 (“The [critical Hydrogen Emission Intensity (HEI_{cr})] is much lower for blue H_2 than for green H_2 because of the methane emissions associated with blue H_2 production. For the current tropospheric conditions, we find that HEI_{cr} is around 9% for green H_2 , around 7% for blue H_2 with 0.2% methane leak rates, and 4.5% for blue H_2 with 0.5% methane leak rates. Blue H_2 with 1% methane leak rate has a HEI_{cr} that is close to zero, as displacement of fossil fuel with this hydrogen does not reduce methane emissions (Fig. 3b). For even higher methane leak rates, the methane burden would increase regardless of the H_2 emissions, so that the HEI_{cr} is negative.”). See also Howarth R. W. & Jacobson M. Z. (2021) *How green is blue hydrogen?*, ENERGY SCI. ENG. 9(10): 1676–1687, 1676 (“For our default assumptions (3.5% emission rate of methane from natural gas and a 20-year global warming potential), total carbon dioxide equivalent emissions for blue hydrogen are only 9%-12% less than for gray hydrogen. While carbon dioxide emissions are lower, fugitive methane emissions for blue hydrogen are higher than for gray hydrogen because of an increased use of natural gas to power the carbon capture. Perhaps surprisingly, the greenhouse gas footprint of blue hydrogen is more than 20% greater than burning natural gas or coal for heat and some 60% greater than burning diesel oil for heat, again with our default assumptions. In a sensitivity analysis in which the methane emission rate from natural gas is reduced to a low value of 1.54%, greenhouse gas emissions from blue hydrogen are still greater than from simply burning natural gas, and are only 18%-25% less than for gray hydrogen. Our analysis assumes that captured carbon dioxide can be stored indefinitely, an optimistic and unproven assumption. Even if true though, the use of blue hydrogen appears difficult to justify on climate grounds.”).

⁶⁵⁶ Sun T., Shrestha E., Hamburg S. P., Kupers R., & Ocko I. B. (2024) *Climate Impacts of Hydrogen and Methane Emissions Can Considerably Reduce the Climate Benefits across Key Hydrogen Use Cases and Time Scales*, ENVIRON. SCI. TECHNOL.: 1–11, 1 (“This study reanalyzes a previously published lifecycle assessment as an illustrative example to show how the climate impacts of hydrogen deployment can be far greater than expected when including the warming effects of hydrogen emissions, observed methane emission intensities, and near-term time scales; this reduces the perceived climate benefits upon replacement of fossil fuel technologies. For example, for blue (natural gas with carbon capture) hydrogen pathways, the inclusion of upper-end hydrogen and methane emissions can yield an increase in warming in the near term by up to 50%, whereas lower-end emissions decrease warming impacts by at least 70%. For green (renewable-based electrolysis) hydrogen pathways, upper-end hydrogen emissions can reduce climate benefits in the near term by up to 25%. We also consider renewable electricity availability for green hydrogen and show that if it is not additional to what is needed to decarbonize the electric grid, there may be more warming than that seen with fossil fuel alternatives over all time scales.”), 1 (“Hydrogen’s indirect warming effects have been documented over the past several decades,^{14–23} with a consensus emerging that hydrogen’s global warming potential (GWP) is approximately 12 over a 100-year period and approximately 35–40 over a 20-year period.^{10–13} The largest uncertainties in hydrogen’s GWP are associated with the removal of atmospheric hydrogen by soil and potential future changes in the atmospheric concentrations of other GHGs such as methane.^{10–13}”). See also Sand M., Skeie R. B., Sandstad M., Krishnan S., Myhre G., Bryant H., Derwent R., Hauglustaine D., Paulot F., Prather M., & Stevenson D. (2023) *A multi-model assessment of the Global Warming Potential of hydrogen*, COMMUN. EARTH ENVIRON. 4: 1–12, 1 (“Hydrogen is not directly a greenhouse gas, but its chemical reactions change the abundances of the greenhouse gases methane, ozone, and stratospheric water vapor, as well as aerosols. Here, we use a model ensemble of five global atmospheric chemistry models to estimate the 100-year time-horizon Global Warming Potential (GWP100) of hydrogen. We estimate a hydrogen GWP100 of 11.6 ± 2.8 (one standard deviation).”).

⁶⁵⁷ Proponents of e-methane are making investments despite “green” e-methane having been shown to be uneconomical compared with electrification and no studies to our knowledge on the net climate benefits when accounting for methane and hydrogen leakage and additional renewable power demand. See generally Ueckerdt F., Bauer C., Dirnhaichner A., Everall J., Sacchi R., & Luderer G. (2021) *Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation*, NAT. CLIM. CHANG. 11(5): 384–93; and Weber M. (30 November 2023) *Japan’s embrace of e-methane*, Gas Pathways.

⁶⁵⁸ Ocko I. B. & Hamburg S. P. (2022) *Climate consequences of hydrogen leakage*, ATMOS. CHEM. PHYS. 22(14): 9349–9368, 9362 (“We found that hydrogen’s warming potency strongly depends on the time horizon and (similar to

methane) can be at least 3 times more potent in the near term than in the long term relative to carbon dioxide when using the traditional GWP framework with pulses of equal emissions. If a constant emission rate is used in the calculations instead, hydrogen's warming potency may be 50 % higher for time horizons of several decades or longer. When assessing the relative climate impacts of replacing fossil fuel technologies with their hydrogen alternatives (based on a unit of clean H₂ deployed relative to the avoided CO₂ emissions for a generic case), we found that there are vastly different climate outcomes depending on emission rates, time horizons, and production method. For example, blue hydrogen with high hydrogen and methane emissions (a 10 % and 3 % emission rate, respectively) can be worse for the climate for decades compared with fossil fuel technologies, but green hydrogen with low hydrogen emissions (1 %) can nearly eliminate climate impacts from its fossil fuel counterparts over all timescales. On the other hand, the best-case blue hydrogen alternative (1 % for both hydrogen and methane) can show roughly the same climate benefits as the worst-case green hydrogen alternative (10 % emissions) – far from climate neutral but still halving the impacts of its fossil fuel counterparts within a decade. However, the perceived benefits of clean hydrogen alternatives compared with fossil fuel technologies will depend on how much carbon dioxide and methane are avoided, which needs to be assessed on a case-by-case basis with reliable emission data. Finally, we found that a level of hydrogen demand around 800 Tg or above (which could account for around a quarter of the final energy demand in 2050) could contribute at least 0.1 °C of warming with high hydrogen leakage (10 %) and upper-bound uncertainties in hydrogen's radiative properties.”); 9367 (“If hydrogen applications supply around half of final energy demand globally in 2050 (an upper estimate by BloombergNEF (2020)), hydrogen applications could cause at least a tenth of a degree (C) of warming for 10% leakage. For context, this amount of warming could offset the avoided warming in 2050 from deploying all cost-effective options to mitigate methane emissions globally over the next decade – which otherwise could have slowed down global-mean warming rates by up to 15% (Ocko et al., 2021), or the avoided warming anticipated from the phasing out of hydrofluorocarbons (HFCs) (Xu et al., 2013). This amount of warming (~0.1 °C) is also equal to the amount of warming projected in 2100 from carbon dioxide emissions from international shipping and aviation combined in the absence of climate action (Ivanovich et al., 2019). However, if leakage does not exceed 1% the temperature response could be an order of magnitude smaller.”). *See also* Hamburg S. & Ocko I. (7 March 2022) *For hydrogen to be a climate solution, leaks must be tackled*, ENVIRONMENTAL DEFENSE FUND.

⁶⁵⁹ Warwick N., Griffiths P., Archibald A., & Pyle J. (2022) *Atmospheric implications of increased hydrogen use*, United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero & Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 9 (“When only hydrogen increases in our model experiments, we calculate an effective radiative forcing of 0.148 W m⁻² for an increase in hydrogen of 1.5 ppm; when the methane lower boundary is increased by 340 ppb, consistent with the decrease in hydroxyl radicals, the radiative forcing approaches 0.5 W m⁻² (a warming tendency). In contrast, if there is no leakage of hydrogen into the atmosphere, and methane and other co-emissions are reduced, the change in radiative forcing is -0.29 W m⁻² (a cooling tendency). Assuming an equilibrium climate sensitivity of 0.86 K W⁻¹ m², this level of radiative forcing if sustained would lead to global-mean temperature changes of 0.12, 0.43 and -0.26 °C (without accounting for the reduced emissions of carbon dioxide that would result).”).

⁶⁶⁰ Government of India Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2021) *INDIA: THIRD BIENNIAL UPDATE REPORT TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE*, 11 (“In 2016 India's total GHG emissions, excluding Land Use Land-Use Change and Forestry (LULUCF) were 2,838.89 million tonnes CO₂e and 2,531.07 million tonnes CO₂e with the inclusion of LULUCF. Carbon dioxide emissions accounted for 2,231 million tonnes (78.59 per cent), methane emissions for 409 million tonnes CO₂e (14.43 per cent) and nitrous oxide emissions for 145 million tonnes CO₂e (5.12 per cent)”). *Note* for reporting purposes, India uses a GWP₁₀₀ for CH₄ of 21, per Table 2.2 (“All calculations in the present report use the Global Warming Potential (GWP) of GHGs for 100 years, IPCC AR2 (IPCC, 1995).”).

⁶⁶¹ Government of India Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2021) *INDIA: THIRD BIENNIAL UPDATE REPORT TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE*, 147 (Table 2.4: Sector-wise National GHG emission in Gg for 2016.).

⁶⁶² Government of India Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2021) [INDIA: THIRD BIENNIAL UPDATE REPORT TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE](#), 247 (“SRI is a promising and resource-saving method of rice cultivation. Studies have shown a significant increase in rice yield, with substantial savings of seeds (80-90 per cent), water (25-50 per cent), and cost (10-20 per cent) compared to conventional methods (Uphoff, 2011), and reduction in CH₄ emissions. As part of the National Food Security Mission (NFSM), SRI is being implemented in 193 districts of 24 States.”).

⁶⁶³ Government of India Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2021) [INDIA: THIRD BIENNIAL UPDATE REPORT TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE](#), 279 (“Area covered under DSR in 2017-18 and 2018-19 is 99,964 ha. It has led to reduction of 0.099 MtCO₂e in 2017- 18 and 2018-19.”).

⁶⁶⁴ Government of India Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2021) [INDIA: THIRD BIENNIAL UPDATE REPORT TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE](#), 247 (“Given the high water requirement of paddy crop and consequent decline in groundwater and high energy requirement in the traditional green revolution states such as Punjab, Haryana, and Uttar Pradesh, diversification from paddy to other crops was envisaged. The main objectives of the programme are to demonstrate and promote the improved production technologies of alternate crops and to restore soil fertility through the cultivation of leguminous crops. Due to the stagnancy in crop yields, the decline in soil quality, the incidence of pests and diseases due to continuous paddy cultivation in the three States, Punjab, Haryana, and Uttar Pradesh, diversion of paddy cultivation to other crops has become essential. This enables the reduction of the CH₄ emissions associated with paddy production. The budgetary allocation for this programme during 2018-19 was INR 1.328 million. A total area of 81,816 ha has been diversified from paddy to other crops in 2017-18 and 2018-19 (DAC&FW, 2020).”).

⁶⁶⁵ Government of India Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2021) [INDIA: THIRD BIENNIAL UPDATE REPORT TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE](#), 250–251 (“The horticulture sector consists of a wide range of crops such as fruits, vegetables, flowers, spices, and nuts of which the fruit crops produce relatively higher biomass and are retained in the field for a relatively long period. This helps in sequestering carbon both above and below the ground. The area brought under the mission from 2016-17 to 2018-19 has been reported in Table 3.25. The quantum of carbon sequestered is estimated to be 108.96 MtCO₂ from 2017-18 to 2018-19. ... The main objective of the Ration Balancing Programme (RBP) is to educate milk producers on feeding balanced ration to their animals so that the nutrients required by their milch animals are fulfilled in an optimum manner, thereby improving milk production efficiency and the economic return. The achievement under the scheme in 2018-19 has been reported in Table 3.26. The emission reduction as a result of the RBP initiatives was 0.061 MtCO₂ from 2017-18 to 2018-19”); (“In India, crop residues that form the bulk of feed resources are of inferior quality with more degradable protein which results in lower production and higher GHG emissions. High yielding milch animals like crossbreds and graded buffaloes specially require more undegradable protein in the form of bypass protein for enhancing milk production potential of the animal. As such protein supplements are more expensive and optimizing the use of protein supplements within the ruminant system can improve milk productivity, income to the farmers, and lower greenhouse gas emissions. Commercial bypass protein technology was available with different seed meals and these bypass proteins reduce the degradability in the rumen. The main purpose of the establishment of the bypass protein units is to improve the availability of the protein and essential amino acids from feed to cattle. ... The mitigation envisaged due to various initiatives of the GoI [Government of India] as well as the private initiatives are presented below in Table 3.27.”).

⁶⁶⁶ Government of India Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2021) [INDIA: THIRD BIENNIAL UPDATE REPORT TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE](#), 289–292 (Table 3.44, listing policies and programs that reduce methane emissions).

⁶⁶⁷ United States Department of Energy (7 October 2022) [U.S.-India Strategic Clean Energy Partnership Ministerial Joint Statement](#), Statements & Releases (“The Ministers welcomed collaboration between Indian and U.S. companies through a Memorandum of Understanding to deploy methane abatement technologies in India’s city gas distribution

sector under the Low Emissions Gas Task Force to help reduce emissions in the oil and gas sector. Agencies from across the U.S. and Indian governments demonstrated a number of accomplishments across the five technical pillars of cooperation on: 1) *Power & Energy Efficiency*, 2) *Renewable Energy*, 3) *Responsible Oil & Gas*, 4) *Sustainable Growth*, and 5) *Emerging Fuels and Technologies*. The Ministers welcomed expanded efforts under the U.S.-India Strategic Clean Energy Partnership to support a just energy transition to meet today’s unprecedented energy security and climate and energy challenges.”).

⁶⁶⁸ United States Department of Energy (2023) *International Cooperation: Office of Fossil Energy and Carbon Management* (“The U.S.-India Low Emission Gas Task Force (LEGTF) is an industry-focused forum which identifies innovative policy reforms to support India’s ambitions to reduce consumption of high-polluting fuels by increasing the use of natural gas for transportation, industrial, and residential purposes. The LEGTF’s focus on India’s natural gas policy, technology, and addressing regulatory barriers promotes efficient and market-driven solutions aimed at meeting India’s growing energy demand and emissions reduction targets. The LEGTF is a component of the *Responsible Oil and Gas Pillar of the U.S.-India Strategic Clean Energy Partnership (SCEP)*. The Office of Resource Sustainability and India’s Ministry of Petroleum and Natural Gas are the government leads for the LEGTF, and the U.S. Energy Association and India’s Gas Authority of India Ltd. serve as the LEGTF co-secretariats. The LEGTF has three subcommittees of volunteer industry and regulatory experts which identify challenges to and opportunities for natural gas development in India: Markets and Regulation, Gas Grid Strengthening, and Cleaner Transport Fuels.”).

⁶⁶⁹ Government of India Ministry of Petroleum & Natural Gas (17 April 2023) *Government has set target to increase share of gas in energy mix up to 15 per cent by 2030 : Union Minister of Petroleum & Natural Gas and Housing & Urban Affairs Shri Hardeep Singh Puri*, Press Release (“The Minister said that the production of CBG [compressed biogas] would have multiple benefits viz. reduction of natural gas imports, reduction of GHG emission, reduction in burning of agriculture residues, providing remunerative income to farmers, employment generation, effective waste management etc adding, “Government of India has set a target to increase the share of gas in the energy mix up to 15% in 2030 to make India a Gas-based economy. Presently we are importing around 50% of our requirement of Natural gas. Speedy expansion of CBG will help in meeting our additional requirement from domestic resources.”).

⁶⁷⁰ Government of India Ministry of New and Renewable Energy, Government of India, *New National Biogas and Organic Manure Programme (NNBOMP)* (last visited 5 February 2023) (“The Ministry of New and Renewable Energy promotes installation of biogas plants by implementing Central Sector Schemes under Off-Grid/distributed and decentralized Renewable Power. The two on going schemes are: New National Biogas and Organic Manure Programme (NNBOMP), for Biogas Plant size ranging from 1 cu.m. to 25 cu.m. per day. Biogas Power Generation (Off-grid) and Thermal energy application Programme (BPGTP), for setting up biogas plants in the size range of 30 m³ to 2500 m³ per day, for corresponding power generation capacity range of 3 kW to 250 kW from biogas or raw biogas for thermal energy / cooling applications.”); See also Government of India Ministry of Drinking Water & Sanitation (30 April 2018) *Swachh Bharat Mission launches GOBAR-DHAN to promote wealth and energy from waste*, Press Release (“Union Minister for Drinking Water and Sanitation, Sushri Uma Bharti, today launched the GOBAR (Galvanizing Organic Bio-Agro Resources - DHAN scheme at the National Dairy Research Institute (NDRI) Auditorium, Karnal in the presence of the Chief Minister of Haryana, Shri Manohar Lal Khattar. The scheme aims to positively impact village cleanliness and generate wealth and energy from cattle and organic waste. The scheme also aims at creating new rural livelihood opportunities and enhancing income for farmers and other rural people.”).

⁶⁷¹ Ahtasham (10 September 2023) *Global Biofuels Alliance Announced by PM Modi at G20 Summit: 10 Facts*, NDTV.

⁶⁷² Ginni G., Kavitha S., Yukesh Kannah R., Shashi Kant B., Adish Kumar S., Rajkumar M., Gopalakrishnan K., Arivalagan P., Nguyen Thuy L., & Rajesh Banu J. (2021) *Valorization of agricultural residues: Different biorefinery routes*, J. ENVIRON. CHEM. ENG. 9(4): 1–18, 13 (“Anaerobic digestion being the most extensive technology among the various processes provides an integrated path to transform various agricultural wastes into biogas and fertilizer for energetic valorization [141].”); (“There should be establishment of policies, regulations, subsidies and benefits for not

burning agri-wastes, improved supply and leasing of agriculture implements such as tools, machineries and equipments; technology development, upgrading and demonstration programs and promotion of agri-waste for biogas generation and utilization. The New National Biogas and Organic Manure Programme of the Ministry of New and Renewable Energy in India, permits the utilization of biogas as a hygienic cooking fuel for households, power requirements for farmers, and the usage of slurry produced from biogas plant as bio fertilizer substituting chemical fertilizers Kapoor et al. [29]. In order to promote the valorization of biomass, the farmers are provided with support and motivation for the efficient use of resources, the Common Agricultural Policy (CAP) has been improved for the adoption of bioeconomy Duque-Acevedo et al. [7].”).

⁶⁷³ Government of India Ministry of Petroleum and Natural Gas, *Unconventional Hydrocarbons* (last visited 5 February 2023) (“The estimated CBM resources are of the order of 2,600 Billion Cubic Metres (BCM) or 91.8 Trillion Cubic Feet (TCF) spread over in 11 States in the country.”).

⁶⁷⁴ Government of India Ministry of Petroleum and Natural Gas (2021) *ANNUAL REPORT 2020–21*.

⁶⁷⁵ Government of India National Data Repository, Directorate General of Hydrocarbons, Ministry of Petroleum and Natural Gas, *Coal Bed Methane* (last visited 5 February 2023) (“In order to harness CBM potential in the country, the Government of India formulated CBM policy in July 1997 wherein CBM being Natural Gas is explored and exploited under the provisions of Oil Fields (Regulation & Development) Act 1948 (ORD Act 1948) and Petroleum & Natural Gas Rules 1959 (P&NG Rules 1959) administered by Ministry of Petroleum & Natural Gas (MOP&NG).”).

⁶⁷⁶ National Data Repository, Directorate General of Hydrocarbons, Ministry of Petroleum and Natural Gas, Government of India, *Coal Bed Methane* (last visited 5 February 2023) (“Awarded CBM blocks.”).

⁶⁷⁷ Government of India Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2021) *INDIA: THIRD BIENNIAL UPDATE REPORT TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE*, 22 (“The total fugitive emissions in the year 2016 were 37,179 Gg CO₂e, of which 46 per cent was from coal mining and post mining operations, and 54 per cent from oil and natural gas production and handling systems.”).

⁶⁷⁸ See United States Environmental Protection Agency, *Non-CO₂ Greenhouse Gas Data Tool* (last visited 16 November 2023). The US EPA estimates that total methane emissions in 2020 from coal mining in India are 22 MtCO₂e, representing 3.7% of the country’s methane emissions, and will reach 48 MtCO₂e by 2050, representing 6.5% of the country’s overall methane emissions. These estimates are derived from data compiled in EPA Non-CO₂ Greenhouse Emission Projections & Mitigation Potential Reports (2019 & 2020).

⁶⁷⁹ Government of India Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2021) *INDIA: THIRD BIENNIAL UPDATE REPORT TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE*, 22 (“Fugitive methane emissions have registered a decrease of 2 per cent between 2014 and 2016, mainly due to a relative reduction in underground mining activities.”).

⁶⁸⁰ Government of India Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2021) *INDIA: THIRD BIENNIAL UPDATE REPORT TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE*, 157 (“Emissions from surface mining increased by 7 per cent and underground mining decreased by 3 per cent over the period 2014 – 2016... these emissions factors (EFs) from coal mining and handling activities have been incorporated in the IPCC Emission Factor Database after due vetting of the Editorial Board with designated EF IDs 122973 – 122975 for underground mining and 124920 – 124921 for surface mining (IPCC, 2020).”).

⁶⁸¹ Government of India Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2021) *INDIA: THIRD BIENNIAL UPDATE REPORT TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE*, 214 (“The upcoming projects of Coal Bed Methane (CBM) extraction will also reduce the liberation of CH₄ into the atmosphere during coal mining, which will be taken up in the future (MoC, 2020).”).

⁶⁸² Coal India Limited (2021) [COAL INDIA REPORT: FY 2020 - 2021](#), 12 (“Our ESG Commitments: 1) Low-Carbon Coal... Adopting clean coal technologies such as: coal gasification; coal-to liquid; coal mine methane; coal bed methane; and coal washeries[.]”).

⁶⁸³ *See generally* [India Coal Mine Methane / Coal Bed Methane Clearinghouse](#).

⁶⁸⁴ Global Methane Initiative (2020) *India, in COAL MINE METHANE COUNTRY PROFILES*, 16-5 (“A pre-drainage project for CMM at BCCL’s Moonidih underground mine with an envisaged project life of 10 years is currently under development. The Moonidih Mine is a highly gassy mine and the project has been planned to keep coal miners safe from methane outbursts, enhance coal production, and lower the cost of coking coal production. It will also reduce greenhouse gas (GHG) emissions. This will represent the first CMM production and utilization project in India.”).

⁶⁸⁵ Global Methane Initiative (2020) *India, in COAL MINE METHANE COUNTRY PROFILES*, 16-5 (“The Global Environment Facility, the United Nations Development Programme, and the Government of India funded a demonstration project on CBM recovery and its commercial utilization was successfully completed in 2008, proving the efficacy of the technology in Indian geo-mining conditions (Singh, 2010) ... Under the auspices of the Global Methane Initiative (GMI), the U.S. Environmental Protection Agency conducted three pre-feasibility studies for the Chinakuri, Sawang, and Pootkee-Bullinary Collieries in the Damodar Valley coalfields. Through these studies, US EPA evaluated site-specific conditions for an initial assessment of potential technical and economic viability for coal mine methane project recovery and use (US EPA 2015, US EPA 2016, US EPA 2019c).”).

⁶⁸⁶ India Ministry of Coal (4 August 2021) *Domestic Coal Production*, Press Release (“Auction of commercial mining on revenue sharing mechanism from 5 coal bearing states (Jharkhand, Madhya Pradesh, Maharashtra, Odisha, and Chhattisgarh) was launched on 18.06.2020. During this round of auction, 20 coal mines with aggregate peak capacity of 59 MTPA were successfully auctioned. Second Tranche of auction for commercial mining was launched by Ministry of Coal on 25.03.2021. In the second Tranche, a total of 67 coal mine blocks were offered.”). *See also* (25 March 2021) *Government offers 67 blocks in second tranche of commercial coal mine auction*, THE HINDU (“The government on Thursday offered 67 coal mines for sale, launching the second tranche of commercial coal mining auction and termed it a step towards ‘Aatmanirbhar Bharat’. This is the highest number of mines on offer in a particular tranche after commencement of the auction regime in 2014.”).

⁶⁸⁷ India Ministry of Coal (15 December 2021) *Commercial Mining of Coal*, Press Release (“The auction process for 67 coal mines was launched on March 25, 2021 and is currently under progress. This is the largest tranche of mines ever being put up for auction by the Government of India. Total resources of about 36 billion tonnes of coal are on offer in this tranche.”).

⁶⁸⁸ Government of India Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2008) [NATIONAL ACTION PLAN ON CLIMATE CHANGE](#).

⁶⁸⁹ Government of India Ministry of Housing and Urban Affairs (2017) [SWACHH BHARAT MISSION – URBAN](#).

⁶⁹⁰ Government of India Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2016) [SOLID WASTE MANAGEMENT RULES, 2016](#).

⁶⁹¹ Government of India Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2019) [NATIONAL CLEAN AIR PROGRAMME](#).

⁶⁹² Press Bureau of India (29 April 2022), *Swachh Bharat Mission-Urban 2.0 launches National Behavior Change Communication Framework for Garbage Free Cities*, Press Release (“Swachh Bharat Mission-Urban 2.0, under the aegis of the Ministry of Housing and Urban Affairs, has launched the ‘**National Behaviour Change Communication**

Framework for Garbage Free Cities’ to strengthen the ongoing jan andolan for ‘Garbage Free Cities.’”) (emphasis in original).

⁶⁹³ Press Bureau of India (2016) *Solid Waste Management Rules, 2016 – major changes and likely implications*, 1 (“The SWM rules, 2016 emphasises source segregation of waste, a basic need for channelizing the waste to wealth by recovery, reuse and recycle.”).

⁶⁹⁴ Government of India Ministry of Environment, Forest and Climate Change (2019) *NCAP: NATIONAL CLEAN AIR PROGRAMME*, 42 (“An integrated solid waste management strategy, including targeting waste prevention, recycling, composting, energy recovery, treatment, and disposal, can have a significant impact on reducing greenhouse gas emissions. For instance, landfill gas, which is composed of about 50% methane and 50% carbon dioxide, can be captured and used as a source of clean energy and a substitute for fossil fuel. Methane not only contributes to warming the atmosphere, it has also been linked to the concentration of surface ozone, which is known to cause air quality and public health issues.”).

⁶⁹⁵ Centre for Science and Environment, (2023) *METHANE EMISSIONS FROM OPEN DUMPSITES IN INDIA: ESTIMATION AND MITIGATION STRATEGIES*, 54 (“At the same time, Swachh Bharat Mission 2.0 has been instrumental in promoting scientific treatment of all the fractions of municipal solid waste and remediation of existing dumpsites.”).

⁶⁹⁶ Centre for Science and Environment, (2023) *METHANE EMISSIONS FROM OPEN DUMPSITES IN INDIA: ESTIMATION AND MITIGATION STRATEGIES*, 39 (“More than 87 million tonnes of waste has been remediated all over the country, reclaiming 3,440 acres of land.”).

⁶⁹⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Summary for Policymakers, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), SPM-36 (“Strong, rapid and sustained reductions in CH₄ emissions would also limit the warming effect resulting from declining aerosol pollution and would improve air quality.”). *See also* Szopa S., Naik V., Adhikary B., Artaxo P., Berntsen T., Collins W. D., Fuzzi S., Gallardo L., Kiendler-Scharr A., Klimont Z., Liao H., Unger N., & Zanis P. (2021) *Chapter 6: Short-lived climate forcers, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., *et al.* (eds.), 6-7 (“Sustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near- and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*). {6.6.3, 6.7.3, 4.4.4}”).

⁶⁹⁸ Fernandes S. (2 May 2022) *Three ministries to form consortium for climate-related policies*, THE HINDUSTAN TIMES (“On Monday, M Ravichandran, secretary, MoES, said that the idea of the inter-ministerial consortium is to avoid duplication of climate-related policy formulation and research, and work cohesively towards climate action and towards realising India’s Nationally Determined Contributions (NDC) under the Paris Agreement.”).

⁶⁹⁹ Government of India (2022) *THE CONSTITUTION OF INDIA*, 2 (“Name and territory of the Union.—(1) India, that is Bharat, shall be a Union of States. 1 [(2) The States and the territories thereof shall be as specified in the First Schedule.] (3) The territory of India shall comprise— (a) the territories of the States; 2 [(b) the Union territories specified in the First Schedule; and] (c) such other territories as may be acquired.”).

⁷⁰⁰ Centre for Policy Research, *State Action Plans on Climate Change in India* (last visited 24 October 2023) (“In 2009 the Government of India directed all state governments and union territories to prepare State Action Plans on Climate Change (SAPCC), consistent with the strategy outlined in the National Action Plan on Climate Change (NAPCC). Twenty two states in India have since initiated the process of drafting SAPCCs, putting in motion a dynamic process involving tie-ups with multiple stakeholders, formation of new committees, cross sectoral

deliberations, workshops, and significantly, the marriage of new research and plans with existing policy programmes.”).

⁷⁰¹ The International Maize and Wheat Improvement Center & Climate Change, Agriculture and Food Security (2014) [CLIMATE-SMART VILLAGES IN HARYANA, INDIA](#), 5 (“In alternate wetting and drying, rice fields are alternately flooded and drained. The use of a monitoring instrument like a tensiometer can help farmers decide when to irrigate their fields. Alternate wet and drying reduces methane emissions by an average of 48 percent compared to continuous flooding. Combining this with precision fertilizer tools can further reduce greenhouse gas emissions.”).

⁷⁰² Goa State Climate Change Cell (2023) [STATE ACTION PLAN FOR CLIMATE CHANGE FOR THE STATE OF GOA](#), 21 (“Agriculture and allied sectors contribute to GHG emissions due to the use of machinery, water, fertilizers, etc. Inadequate, utilization of resources increases emissions. Methane is one of the main GHG’s emitted in agriculture and cattle rearing activities. Some of the mitigation measures ongoing and proposed are as under: 1. Focus initiatives to increase vermicomposting at the community level Water Sector 3. Sensitize farmers on optimal utilization of water to reduce pump usage and reduce water wastage 8. Promoting Biomass residue from agriculture to be used for power generation where it does not have an alternate use[.]”).

⁷⁰³ Government of Odisha Forest and Environment Department, (2015) [PROGRESS REPORT ON IMPLEMENTATION OF ODISHA CLIMATE CHANGE ACTION PLAN](#), 48 (“There are many ways in which methane management from livestock is possible (a) either using the cow dung etc. in bio-gas plants (b) recovering methane in modern abattoirs from carcasses. There is also possibility of composting and digestion of methane. But the last one is from a whole range of wastes and the off sets have been estimated in Urban Development Context. The bio-gas related emission off set is estimated to be 4,04,681 units of tCO₂ eqv.”)

⁷⁰⁴ Government of Jammu & Kashmir Department of Ecology, Environment & Remote Sensing (2014) [STATE ACTION PLAN ON CLIMATE CHANGE: JAMMU & KASHMIR](#), xxv (“Application of methane capture technology and preparation of fertilizer from weeds generated in Dal lake”), 110 (“Thus state government is planning to implement several sewage treatment plants which would treat the sewage wastes produced from the city and hotels situated near Dal lake before discharging it into the water body. This would reduce the pollution load as well as methane generation resulting from anaerobic degradation of the high organic load of the city sewage. Also the potent GHG emission would be reduced along with restoration of the Dal lake.”), 113 (“However the weeds harvested from the lake can be utilized for the extraction of methane through controlled anaerobic digestion system which can be utilized for power generation or any other energy sources. The digested sludge will be rich in nutrients and can be utilized as organic manure. Thus the process would restore the oxygenation characteristics of the Dal Lake, promoting healthy aquatic habitat while reducing undesirable weed growth, snails and blood suckers like leech etc along with the associated scum and algae population.”).

⁷⁰⁵ Government of Kerala Department of Environment and Climate Change (2022) [KERALA STATE ACTION PLAN ON CLIMATE CHANGE 2023-2030](#), 119 (“With a high probability of occurrence of hazards such as heat stress, floods, and drought, high exposure of livestock in the districts of Kerala to these hazards, coupled with high to moderate vulnerability of the livestock sectors in the majority of the districts, the sector needs to be prioritized for adaptation and be climate proofed. Adaptation strategies that are aimed at improving livestock productivity through improved feed could also provide mitigation co-benefits by helping to lower methane emissions from enteric fermentation.”), 141 (“The project, titled ‘Climate Resilient Livestock Production’ has components that can co-benefit in mitigating methane emissions from enteric fermentation with dietary changes, as well as sequester carbon in fodder trees planted by livestock far.”), 140 (“Strategies to sustainably improve the productivity of milch animals include providing extra concentrate minerals supplementation and feed additives; making changes to micro-climate in cattle shed/ stall by the installation of shade, sprinklers, or evaporative cooling systems; plantation of fodder tree lines around animal shed/house to lower heat stress; ensuring livestock are both stall-fed and grazed in pastures; change feeding schedules to late afternoon and early morning; reducing livestock numbers in some cases, or changing herd composition; and

improving water resources (availability, access, and use). Strategies that are focused on improving animal feed also have the added benefit of mitigating methane emissions from enteric fermentation.”).

⁷⁰⁶ Government of Karnataka Environmental Management and Policy Research Institute (2021) [KARNATAKA STATE ACTION PLAN ON CLIMATE CHANGE](#), 178 (“Projections of climate change at the district level are available now. But agriculture planning may require block level projections. The same has also been prepared by Indian Institute of Science. This however will have to be incorporated into programmes and policies. Also, the information on spread of pests in agro climatic zones is to be gathered to protect crops. Protecting indigenous climate change resistant varieties by finding suitable market mechanisms are also to be researched. Dry land farming and agroforestry are under research and implementation using biotechnology. Department of Agriculture, Department of Horticulture and Agriculture universities are the agencies that will have to continue implementing and monitoring the programmes.”); 207 (“In the agriculture sector, the three key levers for emission mitigation are increased adoption of energy-efficient (EE) pumps and solar pumps; and a solar-powered dedicated feeder connected to EE pumps. The total number of irrigation pump sets are assumed to be growing at a CAGR of 5.2% annually, resulting in nearly 50 lakh irrigation pumps by 2030. The total number is the same in all three cases. So both in BAU and Policy scenarios, the rate of uptake of solar pumps determines the number of EE pumps. We assume that a small fraction (0.4%) of the total pumps will continue to be diesel powered in 2030, to factor in possible remote areas with no electricity.”) (internal citations omitted).

⁷⁰⁷ Climate Studies IIT Bombay & Government of Rajasthan Department of Environment and Climate Change (2022) [RAJASTHAN STATE ACTION PLAN ON CLIMATE CHANGE 2022](#), 253 (“Methane is one the major GHG released from waste, particularly from landfills. Reduction in methane emission can be achieved in two ways: i. Landfill gas recovery systems. The technology is already in place, and many cities in various countries have already adopted the technology. ii. Reduction in the quantity of biodegradable waste to be landfilled.”).

⁷⁰⁸ Government of Punjab Institute for Development and Communication (2023) [PUNJAB VISION DOCUMENT 2047](#), 305 (“Climate change presents two challenges that shall be addressed simultaneously. The first is to stabilize the climate. Secondly, to slow the rate of warming to reduce the risk of climate extremes. This dual approach that tackles emissions of CO₂ in the longer term and nonCO₂ super pollutants in the near term is necessary to limit and reduce the impacts of climate change (Gabrielle Dreyfus et al, 2022). Cutting short-lived super climate pollutants, including black carbon, methane, tropospheric ozone, and hydrofluorocarbons can avoid four times more warming by 2050 than CO₂ cuts alone. Such strategy should be adopted in Punjab to effectively reduce the impacts of climate change on Punjab and build a climate-resilient economy through an integrated multi-sectoral and multi-governance approach. Such an approach will ensure long-term food security, agricultural yields and income security for the marginalized.”).

⁷⁰⁹ United Nations Environment Programme (28 February 2022) [In face of climate crisis, Iraq takes on methane pollution](#) (“The International Energy Agency estimated that in 2019 Iraq contributed 9 per cent of all global methane emissions originating from the oil and gas sector.”).

⁷¹⁰ Global Gas Flaring Reduction Partnership (2023) [2023 GLOBAL GAS FLARING TRACKER REPORT](#), 6 (“Consistent with previous years, flaring during 2022 was dominated by a relatively small number of countries, with the top nine flaring countries responsible for 74% of flare volumes and 45% of global oil production. These are, in order, Russia, Iraq, Iran, Algeria, Venezuela, the United States, Mexico, Libya, and Nigeria.”).

⁷¹¹ United Nations (30 September 2022) [Iraq mulls tackling its methane problem and reaping major benefits along the way](#), Press Release (“Following a high-level virtual seminar co-hosted by the Iraq Ministry of Health and Environment and the United Nations Environment Programme (UNEP), Iraq’s Deputy Environment Minister, Dr. Jassim Humadi, announced that the Ministries of Health and Environment and Oil have agreed to establish an inter-ministerial technical task force to better understand the nature and scale of methane emissions from the country’s oil and gas sector.”).

⁷¹² Republic of Iraq (2021) *Nationally Determined Contributions of Iraq*, submission to the Secretariat of UNFCCC, 11-13, 15 (“استثماره”) إضافة الى انه يحقق خفضا كبيرا في انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. وتقدر وكالة الطاقة الدولية أن تسربات غاز الميثان (المكون الأساسي للغاز الطبيعي) في العراق يمكن خفضها بنسبة تزيد عن 80٪ باستخدام التكنولوجيا الموجودة حاليا. وتقدر القيمة المالية لإنبعاثات الميثان في العراق بأكثر من مليون دولار والتي تمثل خسارة اقتصادية كبيرة. بالإضافة إلى الفوائد الاقتصادية التي ستجلبها للعراق عملية استثمار هذا الغاز فإن تقليل انبعاثات 600 الميثان يحمي صحة الإنسان من خلال تحسين جودة الهواء على المستوى المحلي. ... - قطاع الطاقة (النفط والغاز والكهرباء والنقل): ... - الإستثمار في الصناعات البترولية وتطويرها لتقليل إستنزاف الموارد وخفض الانبعاثات في أن واحد، وبالأخص تحسين تكنولوجيا حرق الغاز المصاحب ومراقبتها عن طريق التصميم الجيد، بما في ذلك عن طريق إسترجاع الغاز وإعادة تدويره. - إجراء برامج (venting) لتقليل انبعاثات الميثان وتجنب “تنفيس” الغاز بالتعاون مع الشركاء الدوليين (التحالف العالمي (LDAR) للكشف الدوري لتسربات غاز الميثان في منشآت النفط والغاز لغرض القيام بإصلاحها وشركات النفط والغاز العاملة في العراق. - استخدام الدورات المركبة في زيادة إنتاج الطاقة الكهربائية -تغيير نوع الوقود السائل الى (-GMA للميثان الوقود الغازي في محطات إنتاج الطاقة الكهربائية (الغازية) وتحسين نوعية الوقود المستخدم بما يساهم في خفض الانبعاثات الكربونية. -تقليل الانبعاثات باعتماد البيات تحسين كفاءة الطاقة وترشيد استهلاكها. -تحويل محطات الطاقة الكهربائية التي تعمل بالوقود الثقيل إلى استخدام وقود الغاز البترولي المسال والغاز الجاف والذي بالإمكان توفيرهما عن طريق اصطياد الغاز المصاحب وتخفيف انبعاثات غاز الميثان... السيطرة على زراعة المحاصيل LPGال التي تنتج كمية كبيرة من غاز الميثان مثل زراعة الرز وكذلك الحد من إستهلاكه كمية كبيرة من المياه و محاربة إنجراف التربة وإعادة تأهيل أراضيها المتدهورة... قطاع النفايات : إستثمار الميثان الناجم عن مواقع طمر النفايات في إنتاج الطاقة الكهربائية... الرصد والإبلاغ والتحقق: تحفيز شركات (- OGMP) النفط والغاز العاملة في العراق على الإبلاغ عن انبعاثات غاز الميثان ضمن أطر شفافة معروفة، مثل إطار شراكة النفط والغاز والميثان التعاون في حملات للقياس المباشر لكميات الميثان المنبعثة من منشآت النفط والغاز وإستخدام بيانات الأقمار الصناعية لتحديد خط أساس مرجعي للانبعاثات (“International support and technology transfer are of exceptional importance in preventing the waste of associated gas, which is an important economic wealth if invested, in addition to achieving a significant reduction in greenhouse gas emissions. The International Energy Agency estimates that leaks of methane (the main component of natural gas) in Iraq could be reduced by more than 80% using existing technology. The financial value of methane emissions in Iraq is estimated at more than 600 million dollars, which represents a great economic loss. In addition to the economic benefits that the investment of this gas will bring to Iraq, reducing methane emissions protects human health by improving air quality at the local level. ... *Energy Sector (oil, gas, electricity, and transport):* ... - Investing in using methane from landfill sites in the production of electric power to reduce resource depletion and reduce emissions at the same time, in particular improving and monitoring associated gas flaring technology to reduce methane emissions and avoiding gas “venting” by using good designs, including through gas recovery and recycling. - Conducting periodic detection programs for methane gas leaks in oil and gas facilities for the purpose of repair (LDAR) in cooperation with international partners (Global Methane Alliance-GMA) and oil and gas companies operating in Iraq. - Converting heavy fuel power plants to using LPG and dry gas fuels, which can be provided by catching associated gas and reducing methane emissions. ... *Agriculture sector:* - Controlling the cultivation of crops that produce a large amount of methane gas, such as rice cultivation, as well as reducing its consumption of a large amount of water as well as combating soil erosion and rehabilitating its degraded lands. *Waste sector:* - Investing methane from landfill sites in the production of electric power.” “*Monitoring, reporting and verification:* - Incentivizing oil and gas companies operating in Iraq to report methane emissions within well-known transparent frameworks, such as the Oil, Gas and Methane Partnership Framework (OGMP). - Collaborate on campaigns to directly measure methane from oil and gas facilities and use satellite data to establish a baseline for emissions.”) (in Arabic). See also Climate & Clean Air Coalition (10 January 2022) *Iraq Includes Methane in its Nationally Determined Contributions, Citing Health and Development Benefits*, News and Announcements (“Iraq aims to leverage international support to reduce its greenhouse gas emissions by 15 per cent by 2030, including by reducing methane emissions from its oil and gas, agriculture, and waste sectors. Iraq demonstrated its commitment for action by signing the *Global Methane Pledge*, a global effort to reduce methane emissions by at least 30 per cent from 2020 levels by 2030. ... In 2020, Iraq developed a *National Adaptation Plan (NAP)* in partnership with the United Nations Environment Programme (UNEP) to help build the country’s resilience to climate change, and did work under the CCAC’s *Oil & Gas Methane Partnership*. It also established the *Permanent National Committee on Climate Change* and establishing the *National Climate Change Center*.”).

⁷¹³ Ghaith B. (11 June 2022) *Iraq announces roadmap to eliminate gas flaring by 2030*, THE JORDAN TIMES (“Iraq has developed a roadmap to reduce gas flaring for the upcoming years, with the target of zero flaring by 2030, the minister told The Jordan Times, noting that it is the first time Iraq has made action plan for gas flaring.... Iraq is working with

the World Bank through its Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR), which is a public-private initiative to achieve zero flaring by 2030, Hammadi said.”).

⁷¹⁴ (21 October 2022) *Iraq prepares law to support waste-to-energy projects*, MIDDLE EAST MONITOR (“The government of Iraq has introduced a new law to support the use of solid waste for the production of electricity and methane gas, *Iraq News Agency* (INA) reports. According to the report, the law will aim to create simple rules for investors, encouraging investments in the production of electricity and methane gas from solid waste.”).

⁷¹⁵ (18 February 2023) *US, Canada ready to work with Iraq to tackle gas flare, say top diplomats*, KURDISTAN 24 (“To tackle its environmentally-polluting gas flare, the United States and Canada are willing to help Iraq by investing in gas capture technology in order to boost power production and reduce the adverse health implications of the emissions, the two countries’ ambassadors said on Saturday.”).

⁷¹⁶ (18 February 2023) *US, Canada ready to work with Iraq to tackle gas flare, say top diplomats*, KURDISTAN 24 (“To tackle its environmentally-polluting gas flare, the United States and Canada are willing to help Iraq by investing in gas capture technology in order to boost power production and reduce the adverse health implications of the emissions, the two countries’ ambassadors said on Saturday.”).

⁷¹⁷ Carpenter C (11 December 2023) *COP28: Iraq rejects fossil fuels phasedown, phaseout*, S & P GLOBAL (“Iraq is focused on eliminating gas flaring by 2028 and reducing methane output by 30% by 2030 to achieve its decarbonization goals, Alsulait said. It is "impossible" for Iraq to eliminate methane output by 2030 as other oil and gas companies pledged early in the COP28 negotiations, he said. "We are talking about methane abatement, as you know it's very important especially for this COP" as methane accounts for 30% of emissions in the world, he said. "It's a very important factor to abate methane. "We agree to phaseout emissions, phasedown emissions, not the fuel," Abdulbaqi Alsulait, energy adviser to the Iraq Ministry of Oil, said. When Iraq agreed to the Paris Agreement in 2015, it signed up for a 2% reduction in emissions from 2020 to 2030 and is already down 4%, he said. ").

⁷¹⁸ Carpenter C. (11 December 2023) *COP28: Iraq rejects fossil fuels phasedown, phaseout*, S & P GLOBAL (“Iraq, OPEC's second-biggest oil producer, will not agree to a phasedown or phaseout of fossil fuels, while it has already begun with steps to reduce emissions, the adviser to Iraq's oil ministry told S&P Global Commodity Insights at the UN Climate Change Conference in Dubai on Dec. 11, one day before talks are supposed to end. Iraq is focused on eliminating gas flaring by 2028 and reducing methane output by 30% by 2030 to achieve its decarbonization goals, Alsulait said. It is "impossible" for Iraq to eliminate methane output by 2030 as other oil and gas companies pledged early in the COP28 negotiations, he said.”).

⁷¹⁹ Government of Mexico, Agency for Safety, Energy and Environment (6 November 2018) *DISPOSICIONES Administrativas de carácter general que establecen los Lineamientos para la prevención y el control integral de las emisiones de metano del Sector Hidrocarburos* (“Que la información disponible a nivel internacional y nacional ha demostrado que, implementando mejoras operativas y tecnológicas disponibles, es factible reducir las emisiones de metano en el Sector Hidrocarburos. En ese sentido, la Agencia Internacional de Energía en la publicación Perspectiva Mundial de la Energía 2017, concretamente en lo relativo al caso ambiental del gas natural, reconoce que, aplicando las mejores prácticas internacionales, tales como las que este instrumento regulatorio integra, es factible y posible que a nivel mundial el sector reduzca las emisiones de metano hasta en un 75%.”); *discussed in* Clean Air Task Force (13 November 2018) *Mexico Takes a Giant Leap Forward in Regulating Methane Emissions*, Press Release; and Del Rio D., Evangelista R., & Arrieta Maza M. (21 November 2018) *Mexico: Program For The Prevention And Comprehensive Management Of Methane Emissions Within The Hydrocarbon Sector* (“PPCIEM”), MONDAQ.

⁷²⁰ United States Department of State (17 November 2022) *U.S.-EU Joint Press Release on the Global Methane Pledge Energy Pathway*, Press Release (“Mexico and PEMEX will advance, with an investment of close to \$2 billion of its own resources and international credits at special rates, a comprehensive assessment and implementation of projects and actions translating into a reduction of between 86 percent and 100 percent of methane gas emissions in gas

exploration, production and processing processes by 2024. Mexico joins the United States and the rest of the countries adhering to the proposals for energy implementation of the Global Methane Pledge Energy Pathway to eradicate flaring and methane emissions in the oil and gas sector.”).

⁷²¹ White House (12 July 2022) *President Biden and President Lopez Obrador Joint Statement*, Statements and Releases (“In support of the Global Methane Pledge and Global Methane Pledge Energy Pathway, Mexico and Pemex, in cooperation with the U.S., will develop an implementation plan to eliminate routine flaring and venting across onshore and offshore oil and gas operations and identify priority projects for investment.”).

⁷²² Eschenbacher S. (25 January 2023) *Mexican energy companies lag methane emission rules, investigators say*, REUTERS (“Mexican oil and gas companies, including state giant Pemex, are lagging behind on their obligations to identify, report and mitigate methane emissions from their installations, an investigation by a group of non-profits found.”).

⁷²³ Government of Mexico (2022) *Contribución Determinada a Nivel Nacional Actualización 2022*, 14–15 (“Así, se tienen previstas medidas para fomentar las prácticas agroecológicas y la agricultura de conservación- entre ellas la sustitución de fertilizantes, la aplicación de bioinsumos, y disminución de quemas agrícolas – e impulsar sistemas agrosilvopastoriles, así como medidas para la captura y manejo del biogás de residuos pecuarios, tales como sistemas de composta, de biodigestión y de tratamiento diario para evitar la generación de gas metano... Las medidas en este sector consideran la mejora en la gestión integral de los residuos sólidos municipales, así como el tratamiento de aguas residuales tanto municipales como industriales, y otras actividades relacionadas a su disposición final, reaprovechamiento, reciclaje, compostaje y biodigestión. Se considera también avanzar en la captura y aprovechamiento del biogás, tanto de los rellenos sanitarios como de las plantas de tratamiento de aguas residuales.”) (“Measures are planned to promote agroecological practices and conservation agriculture - including the substitution of fertilizers, the application of bio-inputs, and a reduction in agricultural burning - and to promote agrosilvopastoral systems, as well as measures for capturing and managing biogas from livestock waste, such as compost, biodigestion, and daily treatment systems to avoid the generation of methane gas... The measures in [the waste] sector consider improving integral management of municipal solid waste, as well as treating both municipal and industrial wastewater, and other activities related to its final disposal, reuse, recycling, composting and biodigestion. Programs are also being considered in the capture and use of biogas, both from sanitary landfills and from wastewater treatment plants.”) (in Spanish).

⁷²⁴ Government of Mexico (2022) *Contribución Determinada a Nivel Nacional Actualización 2022*, 14 (“El sector petróleo y gas tiene una meta de 14% de reducción de emisiones y contempla medidas para su cumplimiento que se agrupan en tres ejes de actuación: a) el incremento de la cogeneración, tanto en centros procesadores de gas como en la refinación del petróleo; b) reducción de las emisiones fugitivas del subsector gas y del subsector petróleo, y c) el Programa de Eficiencia Energética en Petróleos Mexicanos y sus empresas productivas. Petróleos Mexicanos ha establecido una meta de aprovechamiento de gas metano del 98%, considerando la producción de campos existentes y nuevos, para lo cual se desarrollará una Estrategia de aprovechamiento de gas en pozos existentes, y se realizarán obras prioritarias en los nuevos desarrollos, con inversiones estimadas en más de 2000 mil millones de dólares. ... The oil and gas sector has a goal of 14% emissions reduction and contemplates measures to fulfill it that are grouped into three axes of action: a) increased cogeneration, both in gas processing centers and in oil refining; b) reducing fugitive emissions from the gas subsector and the oil subsector, and c) an Energy Efficiency Program for Petróleos Mexicanos and its productive companies. Petróleos Mexicanos has established a methane gas utilization goal of 98%, considering the production of existing and new fields, for which a Gas Exploitation Strategy will be developed in existing wells, and priority works will be carried out in new developments, with investments estimated at more than 2000 billion dollars.”) (in Spanish).

⁷²⁵ Government of Mexico (2022) *Contribución Determinada a Nivel Nacional Actualización 2022*, 9 (“Componente de mitigación Nuestra Contribución Determinada a Nivel Nacional en materia de mitigación con un mayor nivel de ambición establece las siguientes metas: México aumenta su meta de reducción de gases de efecto invernadero de

22% a 35% en 2030, con respecto a su línea base, con recursos nacionales que aportarán al menos un 30% y 5% con cooperación y financiamiento internacional previsto para energías limpias. De forma condicionada, México puede aumentar su meta al 2030 hasta 40%, con respecto a su línea base en 2030, si se escala el financiamiento internacional, la innovación y transferencia tecnológica, y si otros países, principalmente los mayores emisores, realizan esfuerzos commensurados a los objetivos más ambiciosos del Acuerdo de París. Finalmente, se ratifica la meta de reducción de las emisiones de carbono negro de 51% de forma no condicionada en 2030, y 70% de forma condicionada.”) (“Our Nationally Determined Contribution for mitigation with an increased level of ambition establishes the following goals: Mexico increases its goal of reducing greenhouse gases from 22% to 35% in 2030, with respect to its baseline, with national resources that will contribute at least 30% and 5% with cooperation and international financing planned for clean energy. Conditionally, Mexico can increase its goal for 2030 up to 40%, with respect to its baseline in 2030, if international financing, innovation and technology transfer are scaled up, and if other countries, mainly the largest emitters, make commensurate efforts toward the most ambitious objectives of the Paris Agreement. Finally, the goal of reducing black carbon emissions by 51% unconditionally by 2030, and 70% conditionally, is ratified.”) (in Spanish).

⁷²⁶ Shen L., Zavala-Araiza D., Gautam R., Omara M., Scarpelli T., Sheng J., Sulprizio M. P., Zhuang J., Zhang Y., Qu Z., Lu X., Hamburg S. P., & Jacob D. J. (2021) *Unravelling a large methane emission discrepancy in Mexico using satellite observations*, REMOTE SENS. ENVIRON. 260: 1–9, 1 (“Using TROPOMI measurements from May 2018 to December 2019, our methane emission estimates for eastern Mexico are $5.0 \pm 0.2 \text{ Tg a}^{-1}$ for anthropogenic sources and $1.5 \pm 0.1 \text{ Tg a}^{-1}$ for natural sources, representing 45% and 34% higher annual methane fluxes respectively compared to the most recent estimates based on the Mexican national greenhouse gas inventory. Our results show that Mexico’s oil and gas sector has the largest discrepancy, with oil and gas emissions ($1.3 \pm 0.2 \text{ Tg a}^{-1}$) higher by a factor of two relative to bottom-up estimates—accounting for a quarter of total anthropogenic emissions.”).

⁷²⁷ Zavala-Araiza D., *et al.* (2021) *A tale of two regions: methane emissions from oil and gas production in offshore/onshore Mexico*, ENVIRON. RES. LETT. 16(2): 1–11, 1 (“We use atmospheric observations to quantify methane (CH₄) emissions from Mexico’s most important onshore and offshore oil and gas production regions which account for 95% of oil production and 78% of gas production. We use aircraft-based top-down measurements at the regional and facility-levels to determine emissions. Satellite data (TROPOMI CH₄ data and VIIRS night-time flare data) provide independent estimates of emissions over 2 years. Our airborne estimate of the offshore region’s emissions is $2800 \text{ kg CH}_4 \text{ h}^{-1}$ (95% confidence interval (CI): $1700\text{--}3900 \text{ kg CH}_4 \text{ h}^{-1}$), more than an order of magnitude lower than the Mexican national greenhouse gas inventory estimate. In contrast, emissions from the onshore study region are $29\,000 \text{ kg CH}_4 \text{ h}^{-1}$ (95% CI: $19\,000\text{--}39\,000 \text{ kg CH}_4 \text{ h}^{-1}$), more than an order of magnitude higher than the inventory. One single facility—a gas processing complex that receives offshore associated gas—emits $5700 \text{ kg CH}_4 \text{ h}^{-1}$ (CI: $3500\text{--}7900 \text{ kg CH}_4 \text{ h}^{-1}$), with the majority of those emissions related to inefficient flaring and representing as much as half of Mexico’s residential gas consumption. This facility was responsible for greater emissions than the entirety of the largest offshore production region, suggesting that offshore-produced associated gas is being transported onshore where it is burned and in the process some released to the atmosphere. The satellite-based data suggest even higher emissions for the onshore region than did the temporally constrained aircraft data (>20 times higher than the inventory). If the onshore production region examined is representative of Mexican production generally, then total CH₄ emissions from Mexico’s oil and gas production would be similar to, or higher than, the official inventory, despite the large overestimate of offshore emissions.”); *discussed in* Glover A. (25 January 2021) *Climate Scientists Record Extremely High Methane Emissions Across the Gulf states of Mexico*, Environmental Defense Fund.

⁷²⁸ United States Embassy & Consulates in Mexico (9 February 2022) *Special Presidential Envoy for Climate John Kerry Visits Mexico City*, Press Release (“The two sides agreed that they would expeditiously implement high-level dialogue on the implementation of these goals through the formation of a U.S.-Mexico Climate and Clean Energy Working Group, including key agencies on both sides. The policy focus areas will include, as listed in the October Joint Statement, accelerating renewable energy development including solar supply chains, tackling methane emissions from oil and gas, waste, and agriculture, reducing transportation emissions through electrification and other

strategies, eliminating deforestation and supporting nature-based solutions, and Nationally Determined Contributions.”).

⁷²⁹ Madry K. & Graham D. (18 June 2022) *Pemex to cut methane emissions*, REUTERS (“Mexican President Andres Manuel Lopez Obrador said on Friday that state oil and gas company Petroleos Mexicanos (Pemex) would spend some \$2 billion to lower its methane emissions by up to 98%. Speaking at the Major Economies Forum, a virtual event hosted by U.S. President Joe Biden, Lopez Obrador said the investment would apply to the company's exploration and production unit and would come from Pemex's own funds as well as international credit lines.”).

⁷³⁰ White House (12 July 2022) *President Biden and President Lopez Obrador Joint Statement*, Statements and Releases (“We commit to tackle methane emissions from oil and gas and other sectors, accelerate the transition to zero-emission vehicles, and deepen our efforts to seek nature-based solutions, enabling our two countries to become global leaders in clean energies and actions to combat climate change. In support of the Global Methane Pledge and Global Methane Pledge Energy Pathway, Mexico and Pemex, in cooperation with the U.S., will develop an implementation plan to eliminate routine flaring and venting across onshore and offshore oil and gas operations and identify priority projects for investment.”).

⁷³¹ Irakulis-Loitxate I., Gorroño J., Zavala-Araiza D., & Guanter L. (2022) *Satellites Detect a Methane Ultra-emission Event from an Offshore Platform in the Gulf of Mexico*, ENVIRON. SCI. TECHNOL. LETT. 9(6): 520–25, 520 (“The study site is an offshore oil and gas production platform in the Gulf of Mexico, near the coast of Campeche, in one of Mexico’s major oil producing fields. Our data suggest that the platform vented high volumes of methane during a 17-day ultra-emission event, amounting to 0.04 ± 0.01 Tg of methane (equivalent to 3.36 million tons of carbon dioxide) released to the atmosphere if integrated over time.”). Additional emissions from the same platform were detected in August. See Eschenbacher S. (2 September 2022) *Exclusive-Scientists detect second ‘vast’ methane leak at Pemex oil field in Mexico*, REUTERS.

⁷³² Durodola A. & Idunnu A. (10 November 2022) *Nigeria’s cities are at severe risk from climate change. Time to build resilience, and fast*, UNFCCC Race to Resilience Campaign (“Vulnerability to extreme climatic change in Nigeria is becoming more intense as accelerated urbanization continues to push more people into the capital cities in different regions of the country. In many of the states in the country, urbanization pressure across different urban areas is gradually expanding towns and cities to flood plains and coastal strips where they are exposed to more coastal flood risks. It is therefore important to curb further occurrences and build resilience to climate change by promoting planned human settlements and intensive urban infrastructural development. More importantly, the government must ensure that properties and lives in susceptible areas are protected through policy interventions and increased funding of climate-related projects.”).

⁷³³ Federal Ministry of Agriculture and Food Security, *National Livestock Transformation Plan Summit* (last visited 14 February 2024).

⁷³⁴ Climate & Clean Air Coalition (12 January 2023) *Nigeria Cements Methane Guidelines, and its Role as an African Climate and Clean Air Leader*, News and Announcements (“Nigeria is the first country in Africa to regulate methane emissions in the energy sector.”).

⁷³⁵ Gbonegun V. (29 January 2024) *Nigeria, 18 others responsible for 80 per cent of methane emissions*, THE GUARDIAN NIGERIA (“According to the report, 19 African countries are responsible for 80 per cent of the continent’s methane emissions, with Nigeria, Sudan, the Democratic Republic of Congo, and Egypt contributing half of the total. The report reveals that methane emissions in Africa have risen at a yearly rate of two per cent from 1990 to 2022, contributing a staggering 14 per cent to the total global methane emissions. These emissions predominantly emanate from the agricultural sector (51per cent), energy production (35per cent), and waste management (14per cent).”).

⁷³⁶ Government of the Federal Republic of Nigeria (2021) [Climate Change Act, 2021](#), 5–7 (“PART II – ESTABLISHMENT OF THE NATIONAL COUNCIL ON CLIMATE CHANGE: 3.(1) There is established the National Council on Climate Change (in this Act referred to as “the Council”), which shall be vested with powers to make policies and decisions on all matters concerning climate change in Nigeria... 5.(1) The Council shall consist of – (a) the President of the Federal Republic of Nigeria, who shall Head the Council, as Chairman; (b) the Vice-President of the Federal Republic of Nigeria, who shall be the Vice Chairman[.]”). For a discussion of the Act, see Tawfiq Ladan M. (28 March 2022) *A Review of Nigeria's 2021 Climate Change Act: Potential for Increased Climate Litigation*, International Union for Conservation of Nature.

⁷³⁷ Government of the Federal Republic of Nigeria (2021) [Climate Change Act, 2021](#), 4 (“This Act provides a framework for achieving low greenhouse gas emission (GHG), inclusive green growth and sustainable economic development by [among other actions,] setting a target for year 2050-2070 for the attainment of a net-zero GHG emission, in line with Nigeria’s international climate change obligations[.]”); 25–26 (“In this Act - ... “greenhouse gases” or “GHG” means the constituents of the atmosphere that contribute to the Greenhouse effect and includes – (a) carbon dioxide; (b) methane; (c) nitrous oxide; (d) hydro fluorocarbons; (e) per fluorocarbons; (f) sulphur hexafluoride; and (g) indirect greenhouse gases[.]”).

⁷³⁸ Government of the Federal Republic of Nigeria, Federal Ministry of Petroleum Resources (2017) [NATIONAL GAS POLICY: NIGERIAN GOVERNMENT POLICY AND ACTIONS](#), 13 (“The Policy articulates the vision of the Federal Government of Nigeria, sets goals, strategies and an implementation plan for the introduction of an appropriate institutional, legal, regulatory and commercial framework for the gas sector. It is intended to remove the barriers affecting investment and development of the sector. The policy will be reviewed and updated periodically to ensure consistency in Government policy objectives at all times.”).

⁷³⁹ Government of the Federal Republic of Nigeria (2018) [NATIONAL ACTION PLAN TO REDUCE SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS \(SLCPS\)](#), i (“The Plan consolidates all sectoral efforts on SLCP emission reductions (specifically, Black Carbon, Methane and hydrofluorocarbons (HFC)) in the country, and we are committed to ensuring that the measures and their implementation are comprehensively mainstreamed into the various sectoral policies of government.”).

⁷⁴⁰ Government of the Federal Republic of Nigeria, Federal Ministry of Environment, Department of Climate Change (2021) [NATIONAL CLIMATE CHANGE POLICY FOR NIGERIA 2021-2030](#), 7 (“Thus, the purpose of this National Policy on Climate Change is to define a new holistic framework to guide the country’s response to the development challenge of climate change. As a framework document, it prescribes sectoral and cross-sectoral strategic policy statements and actions for the management of climate change within the country’s pursuit for climate resilient sustainable development.”).

⁷⁴¹ Government of the Federal Republic of Nigeria, Federal Ministry of Environment, Department of Climate Change (2021) [2050 LONG-TERM VISION FOR NIGERIA \(LTV-2050\): TOWARDS THE DEVELOPMENT OF NIGERIA’S LONG-TERM LOW EMISSIONS DEVELOPMENT STRATEGY](#), ii (“This Long-Term Vision, intended as a first contribution towards the invitation in Article 4.19 of the Paris Agreement to communicate long-term low greenhouse gas emissions development strategies (LT-LEDS), was elaborated in 2020-2021, to collect a broad set of views and prepare for the construction of a full long-term strategy to explore how Nigeria can achieve its new climate ambition.”).

⁷⁴² Formerly No.99 of 1979. Now Cap A25 Laws of the Federation of Nigeria 2004 See Government of the Federal Republic of Nigeria (2004) *“Associated Gas Re-injection Act 2004” (AGRA)*.

⁷⁴³ Government of the Federal Republic of Nigeria (2016) *Nigerian Gas Flare Commercialisation Programme (NGFCP)*. (“The Nigerian Gas Flare Commercialisation Programme (NGFCP) is an opportunity for Government, industry, State Government, ethnic nationalities, and local communities to work together to resolve an oil field unacceptable practice.”).

⁷⁴⁴ The 2018 Flare Gas regulations have been revoked by the *Gas Flaring, Venting and Methane Emissions (Prevention of Waste and Pollution) Regulations 2023* recently issued by the Nigerian Upstream Petroleum Regulatory Commission (NUPRC). *See also* Nigerian Upstream Petroleum Regulatory Commission (2023) *Gas Flaring, Venting and Methane Emissions (Prevention of Waste and Pollution) Regulations 2023*.

⁷⁴⁵ Nigerian Midstream and Downstream Petroleum Regulatory Authority (2023) *Midstream Gas Flare Regulations 2023*.

⁷⁴⁶ Government of the Federal Republic of Nigeria (17 August 2021) *Petroleum Industry Act, 2021*. Cap 10 Laws of the Federation of Nigeria (LFN) 2004. The PIA which was enacted in 2021, essentially repeals the Petroleum Act. It was enacted to provide governance, regulatory and fiscal framework for the Nigerian Petroleum industry and the development of host communities.

⁷⁴⁷ Government of the Federal Republic of Nigeria (2020) *Draft Gas Flaring (Prohibition and Punishment) Bill, 2020*.

⁷⁴⁸ Government of the Federal Republic of Nigeria, Upstream Petroleum Regulatory Commission (2022) *Guidelines for Management of Fugitive Methane and Greenhouse Gases Emissions in the Upstream Oil and Gas Operations in Nigeria*.

⁷⁴⁹ Global Gas Flaring Reduction Partnership (2022) *2022 GLOBAL GAS FLARING TRACKER REPORT*, 6–7 (“Seven of the top 10 flaring countries have held this position consistently for the last 10 years: Russia, Iraq, Iran, the United States, Venezuela, Algeria, and Nigeria. The remaining three: Mexico, Libya, and China, have shown significant flaring increases in recent years.”).

⁷⁵⁰ Global Gas Flaring Reduction Partnership (2022) *2022 GLOBAL GAS FLARING TRACKER REPORT*, 11 (“Promising Reductions. ... Nigeria: 2021 Flare volume rank 7th; 2012 – 2021 31% reduction in flaring.”).

⁷⁵¹ Climate & Clean Air Coalition, *Nigeria* (last visited 25 January 2023) (“Nigeria has been a Climate and Clean Air Coalition (CCAC) partner since 2012. As a country with an agriculturally-based economy, widespread food insecurity, and where the effects of climate change are already evident, reaping the multiple benefits of short-lived climate pollutant (SLCPs) mitigation is critical.”).

⁷⁵² United States Department of State (17 November 2022) *Global Methane Pledge: From Moment to Momentum*, Press Release. *See also* Nilsen E. & Dewan A. (11 October 2021) *More than 30 countries have joined pledge to slash climate-warming methane emissions by 30%*, CNN (“Canada, Nigeria, Japan and Pakistan are among 31 parties to join a global pledge, led by the US and EU, to slash planet-warming methane emissions by the end of the decade, US climate [envoy] John Kerry announced Monday.”).

⁷⁵³ Government of the Federal Republic of Nigeria (2018) *NATIONAL ACTION PLAN TO REDUCE SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS (SLCPs)*, 87 (“The National flare-out target is set for 2020 ... Fig.4.8: “Implementation Pathway for Gas Flare-Out Abatement Measure” noting that this target is driven by the Paris Climate Agreement, the World Bank Global Gas Flaring Partnership and economic growth stimulation objectives). For a demonstration of this prior commitment, *see* World Bank (10 March 2017) *Nigeria’s Flaring Reduction Target: 2020* (“Dr. Emmanuel Ibe Kachikwu, Nigeria’s State Minister for Petroleum Resources, presented his country’s high-level roadmap to end routine gas flaring by 2020, which is a full decade ahead of the target in the “Zero Routine Flaring by 2030” Initiative, a global effort to end routine flaring that Nigeria endorsed in 2016.”).

⁷⁵⁴ Government of the Federal Republic of Nigeria (2018) *NATIONAL ACTION PLAN TO REDUCE SHORT-LIVED CLIMATE POLLUTANTS (SLCPs)* (Table S.1: “SLCP abatement measures adopted in the National SLCP Plan” provides a summary of key targets, including: 100% reduction in oil and gas sector flaring by 2020; 50% methane reduction by

2030 for fugitive emissions/leakages control; and methane leakage reduction in the oil and gas sector). *See also* Climate & Clean Air Coalition (12 January 2023) *Nigeria Cements Methane Guidelines, and its Role as an African Climate and Clean Air Leader*, News and Announcements (“The CCAC was pivotal to the development of the guidelines as they provided the support right at the drafting of the National Action Plan on SLCPs which was the first policy document that focused on methane abatement,” said Muhammad.”). *See also* World Bank (10 March 2017) *Nigeria’s Flaring Reduction Target: 2020* (“Dr. Emmanuel Ibe Kachikwu, Nigeria’s State Minister for Petroleum Resources, presented his country’s high-level roadmap to end routine gas flaring by 2020, which is a full decade ahead of the target in the “Zero Routine Flaring by 2030” Initiative, a global effort to end routine flaring that Nigeria endorsed in 2016.”).

⁷⁵⁵ World Bank (2021) *GLOBAL GAS FLARING TRACKER*, 9 (“Another bright spot can be found in Nigeria, the seventh-largest flaring country in 2020. Although the country has remained in the top seven flaring countries, it has nonetheless steadily reduced its flaring by some 70 percent over the past 15 years. Flaring has declined from over 25 bcm in 2000 to close to 7 bcm in 2020, while oil production has remained essentially flat at around 2 million barrels a day.”).

⁷⁵⁶ Government of the Federal Republic of Nigeria, *Nigeria Energy Transition Plan* (last visited 15 November 2023) (“At COP26, H.E. President Muhammadu Buhari announced Nigeria’s commitment to carbon neutrality by 2060. Nigeria’s Energy Transition Plan (ETP) was unveiled shortly after—highlighting the scale of effort required to achieve the 2060 net zero target whilst also meeting the nation’s energy needs. Since the announcement, the Climate Change Act 2021 has been passed, the ETP has been fully approved by the Federal Government and an Energy Transition Implementation working group (ETWG) chaired by H.E Vice President Yemi Osinbajo (SAN), comprising of several key ministers and supported by an Energy Transition Office (ETO) has been established.”).

⁷⁵⁷ Government of the Federal Republic of Nigeria, *Nigeria Energy Transition Plan* (last visited 15 November 2023) (“The Nigeria ETP sets out a timeline and framework for the attainment of emissions’ reduction across 5 key sectors; Power, Cooking, Oil and Gas, Transport and Industry. Within the scope of the ETP, about 65% of Nigeria’s emissions are affected.”).

⁷⁵⁸ Government of the Federal Republic of Nigeria, *Nigeria Energy Transition Plan Oil and Gas Milestones* (last visited 15 November 2023) (Milestones by 2030: “100% reduction of flaring emissions.”).

⁷⁵⁹ Government of the Federal Republic of Nigeria, Upstream Petroleum Regulatory Commission (2022) *Guidelines for Management of Fugitive Methane and Greenhouse Gases Emissions in the Upstream Oil and Gas Operations in Nigeria*, 16 (“To achieve Nigeria’s emission mitigation and reduction targets of the NDCs in the Oil and Gas, the key abatement measures and their targets are; elimination of routine gas flaring (100% of gas flaring eliminated by 2030) and fugitive emissions/leakages control (60% Methane Reduction by 2030). This notwithstanding, the exemption provisions of the sections 104 and 107 of the Petroleum Industry Act (PIA) 2021 shall apply.”). *See also* Clean Air Task Force (11 November 2022) *Nigeria announces rule to reduce methane emissions from the oil and gas sector*, News & Media (“Nigeria has shown great leadership on methane at COP27, giving the world a concrete example of the kinds of action necessary to slash methane emissions and bend the curve on climate change,” said Jonathan Banks, Global Director of CATF’s Methane Pollution Prevention program. “Nigeria is turning ambition into action on methane. We sincerely hope that other nations will step up and follow its lead.”).

⁷⁶⁰ Afinotan U. (2022) *How serious is Nigeria about climate change mitigation through gas flaring regulation in the Niger Delta?*, ENVIRON. LAW REV. 24(4): 288–304, 291 (“In the meantime, the deadline for the cessation of gas flaring has been shifted several times—2004, 2008, 2012 and 2020, with no end yet in sight.”). *See also* Koop F. (3 October 2023) Nigeria: *Shell’s Controversial Data Raises Questions About Efforts to Control Methane Emissions in Nigeria*, *Others*, PREMIUM TIMES (“According to statistics provided by Nigeria’s National Oil Spill Detection and Response Agency (NOSDRA) and the Gas Flaring Tracker satellite of the World Bank, oil companies throughout the nation, including Shell, have flared about \$3.9 billion worth of gas in the last four years. However, Shell’s Sustainability Report 2022, scope 1 emissions for upstream flaring in Nigeria witnessed 2 million metric tons of emissions reduction,

with a figure of 3 million metric tonnes in 2022 compared to 5 million metric tonnes in 2021. Their data also shows that between 2018 and 2019, the metric tonnes emissions were pegged at 4 million, respectively. For 2020 it increased to 5 million metric tonnes of emissions. "They have to explain their data," said Segun Omidele, President of the Polaseo Group, a Nigerian oil and gas service company and former Shell employee. Given all the many crude thefts throughout the Niger Delta, leading many operators to reduce, shut down or abandon production, "it is difficult to accept there's been an emissions reduction," he said.⁷⁶¹

⁷⁶¹ Afinotan U. (2022) *How serious is Nigeria about climate change mitigation through gas flaring regulation in the Niger Delta?*, ENVIRON. LAW REV. 24(4): 288–304, 304 ("Currently, as part of its new set of climate change commitments under the Glasgow Climate Pact at COP26, Nigeria has unequivocally pledged to phase out GHG emissions (i.e gas flaring) by 2060. Cynics might regard it as another shifting of the goal post. Nevertheless, if its new commitments are to be realistically and effectively achieved, Nigeria has more than a few legislative, regulatory and judicial measures to put in place to achieve the actualization of these international commitments on combating and mitigating climate change.⁷⁶²

⁷⁶² Government of the Federal Republic of Nigeria (2021) *Nigeria's First Nationally Determined Contribution - 2021 update*, 22 (Table 1: Mitigation measures in the energy sector (conditional)).

⁷⁶³ Government of the Federal Republic of Nigeria (2021) *Nigeria's First Nationally Determined Contribution - 2021 update*, 27 ("In 2019, the Federal Executive Council endorsed Nigeria's National Action Plan to reduce SLCPs. This National Action Plan includes 22 specific actions that would substantially reduce SLCPs. As part of this NDC update, many of these actions have been integrated into the sectoral mitigation measures highlighted in Sections 5.5.1-5.5.4, and the reductions in SLCP (and air pollutant) emissions from achieving the NDC targets have been evaluated. In terms of SLCP reductions, the full achievement of Nigeria's NDC is estimated to reduce black carbon, methane and hydrofluorocarbon emissions by 42%, 28%, and 2% respectively, in 2030 compared to a baseline scenario. Other health-damaging air pollutants, such as particulate matter (PM_{2.5}) and nitrous oxides (NO_x) would also be reduced by 35% and 65%, respectively.⁷⁶⁴

⁷⁶⁴ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* ("At COP28, Nigeria showcased major steps taken this year under the Nigeria Gas Flare Commercialization Program (NGFCP), including advancing projects it estimates will capture over half of all gas flaring volumes in Nigeria."). See also Isiah N. J. (2 December 2023) *In UAE, Tinubu Commits Nigeria To Ending Gas Flaring To Cut Methane Emissions*, LEADERSHIP TIMES ("President Bola Tinubu has expressed the commitment of his administration to ending gas-flaring in the country in line with the global push to halt methane emission. He made the declaration on Saturday in the ongoing United Nations Climate Conference (COP28) Summit on methane and other non-greenhouse gases in Dubai, United Arab Emirates (UAE).").

⁷⁶⁵ Nigerian Upstream Regulatory Petroleum Commission (11 January 2024) *A Landmark Collaboration Between Nigerian Upstream Petroleum Regulatory Commission and Climate Clean Air Coalition for Methane Mitigation from Nigeria's Oil and Gas Sector* ("Nigeria is poised to receive substantial support in its endeavor to mitigate methane emissions originating from the oil and gas sector, through a collaboration between the Nigerian Upstream Petroleum Regulatory Commission and the Climate and Clean Air Coalition. This collaborative effort signifies a significant step towards addressing environmental challenges associated with the energy industry.⁷⁶⁶

⁷⁶⁶ Nigerian Upstream Regulatory Petroleum Commission (11 January 2024) *A Landmark Collaboration Between Nigerian Upstream Petroleum Regulatory Commission and Climate Clean Air Coalition for Methane Mitigation from Nigeria's Oil and Gas Sector* ("As a prime regulator in Nigeria's Oil and Gas sector, the Nigerian Upstream Petroleum Regulatory Commission, is set to leverage the expertise and resources of Climate and Clean Air Coalition. This collaboration that encompasses a multifaceted approach, including knowledge sharing, technological support, and joint research efforts, is aimed at devising effective methane mitigation strategies.⁷⁶⁷

⁷⁶⁷ United Kingdom Department for Business, Energy & Industrial Strategy (2023) [2021 UK GREENHOUSE GAS EMISSIONS, FINAL FIGURES](#), 7 (“Weighted by global warming potential, methane accounted for about 13% and nitrous oxide for about 4% of UK emissions in 2021.”).

⁷⁶⁸ Climate Watch, *United Kingdom Greenhouse Gas Emissions* (last visited 1 July 2023).

⁷⁶⁹ United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero & Department for Business, Energy & Industrial Strategy (2022) [UNITED KINGDOM METHANE MEMORANDUM](#), 7 (“The UK signed up to the Global Methane Pledge at COP26, which aims to collectively reduce global anthropogenic methane emissions by at least 30 percent below 2020 levels by 2030. Under the Pledge, the UK has also committed to moving towards using the highest tier IPCC good practice inventory methodologies, as well as working to continuously improve the accuracy, transparency, consistency, comparability, and completeness of national greenhouse gas inventory reporting under the UNFCCC and Paris Agreement, and to provide greater transparency in key sectors.”).

⁷⁷⁰ United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero & Department for Business, Energy & Industrial Strategy (2022) [UNITED KINGDOM METHANE MEMORANDUM](#), 7 (“The UK is also a state partner of the Climate and Clean Air Coalition, a core implementing partner of the Pledge, and a member of the Oil and Gas Methane Partnership Steering Group.”).

⁷⁷¹ United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero & Department for Business, Energy & Industrial Strategy (2020) [POWERING OUR NET ZERO FUTURE](#), 138 (“We will commit the UK to the World Bank’s ‘Zero Routine Flaring by 2030’ initiative and will work with regulators towards eliminating this practice as soon as possible in advance of this date.”).

⁷⁷² United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero & Department for Business, Energy & Industrial Strategy (2022) [UNITED KINGDOM METHANE MEMORANDUM](#), 7 (“The UK signed up to the Global Methane Pledge at COP26, which aims to collectively reduce global anthropogenic methane emissions by at least 30 percent below 2020 levels by 2030. Under the Pledge, the UK has also committed to moving towards using the highest tier IPCC good practice inventory methodologies, as well as working to continuously improve the accuracy, transparency, consistency, comparability, and completeness of national greenhouse gas inventory reporting under the UNFCCC and Paris Agreement, and to provide greater transparency in key sectors.”).

⁷⁷³ United Kingdom Climate Change Committee (2023) [2023 PROGRESS REPORT TO PARLIAMENT](#), 85 (“In the six years from 2015 to 2021, methane emissions have fallen by an average of 0.9 MtCO₂e (1.5%) per year.”).

⁷⁷⁴ United Kingdom Climate Change Committee (2023) [2023 PROGRESS REPORT TO PARLIAMENT](#), 85 (“In the six years from 2015 to 2021, methane emissions have fallen by an average of 0.9 MtCO₂e (1.5%) per year. This will need to accelerate to 2.0 MtCO₂e (4%) per year if the UK is to achieve a 30% reduction by 2030.”).

⁷⁷⁵ Riddick S. & Mauzerall D. (2023) *Likely substantial underestimation of reported methane emissions from United Kingdom upstream oil and gas activities*, ENERGY ENVIRON. SCI. 16: 295–304, 300. (“The 2019 NAEI estimated total emissions from upstream O&G operations (venting, flaring, process emissions, fuel combustion, offshore oil loading, transfer by pipeline and onshore oil/gas terminals) at 52 Gg CH₄. Our integrated approach, which uses direct measurements and top-down studies and published data, estimates 2019 CH₄ emissions at 289 Gg CH₄, five times the current NAEI estimate. This may be a lower bound estimate as (i) venting in the North Sea is reported to have increased from 5 Gg CH₄ year¹ in 2016 to 136 Gg CH₄ year¹ in 2020 (reported as 112 Gg CH₄ year¹ in 2019) despite little change in oil or gas production¹⁵ (ii) although we assume flares operate at optimal efficiency it is likely they are not optimized^{46,48,49} and (iii) we assume that CH₄ combustion slip from compressors, VRUs and condensate tanks are routed to the flare which is unlikely to occur.”).

⁷⁷⁶ Riddick S. & Mauzerall D. (2023) *Likely substantial underestimation of reported methane emissions from United Kingdom upstream oil and gas activities*, ENERGY ENVIRON. SCI. 16: 295–304, 300 (“The 2019 NAEI estimated total emissions from upstream O&G operations (venting, flaring, process emissions, fuel combustion, offshore oil loading, transfer by pipeline and onshore oil/gas terminals) at 52 Gg CH₄. Our integrated approach, which uses direct measurements and top-down studies and published data, estimates 2019 CH₄ emissions at 289 Gg CH₄, five times the current NAEI estimate. This may be a lower bound estimate as (i) venting in the North Sea is reported to have increased from 5 Gg CH₄ year⁻¹ in 2016 to 136 Gg CH₄ year⁻¹ in 2020 (reported as 112 Gg CH₄ year⁻¹ in 2019) despite little change in oil or gas production¹⁵ (ii) although we assume flares operate at optimal efficiency it is likely they are not optimized^{46,48,49} and (iii) we assume that CH₄ combustion slip from compressors, VRUs and condensate tanks are routed to the flare which is unlikely to occur.”).

⁷⁷⁷ See generally United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero & Department for Business, Energy & Industrial Strategy (2022) [UNITED KINGDOM METHANE MEMORANDUM](#).

⁷⁷⁸ See generally United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero (2023) [CARBON BUDGET DELIVERY PLAN](#).

⁷⁷⁹ United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero (2023) [CARBON BUDGET DELIVERY PLAN](#), 64 (“This is an Ofgem and Health and Safety Executive (HSE) policy to reduce methane leakage from the Gas Distribution Networks through the replacement of old iron mains pipes with new plastic pipes, through the Ofgem/HSE Iron Mains Risk Reduction Programme (IMRRP). Ofgem funds this work through the RIIO-2 price control (as set out in the price control framework). Leakage rates for plastic pipes are around 99% lower than for metallic pipes.”).

⁷⁸⁰ United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero & Department for Business, Energy & Industrial Strategy (2022) [UNITED KINGDOM METHANE MEMORANDUM](#), 5 (“The Iron Mains Risk Reduction Programme (IMRRP) is a key driver to upgrade the gas network from iron pipes to plastic pipes. This improves the safety and resilience of the local gas network and reduces leakages of methane where the pipes have been changed. The IMRRP was introduced in 2002 to address ‘societal concern’ regarding the potential for failure of cast iron gas mains and the consequent risk of injuries, fatalities and damage to buildings. It has been designed to secure public safety whilst efficiency, environmental, strategic and customer service factors have also driven forward the programme.”).

⁷⁸¹ See generally United Kingdom North Sea Transition Authority (2021) [Flaring and venting guidance](#).

⁷⁸² United Kingdom North Sea Transition Authority (2021) [Flaring and venting guidance](#), 5 (“All operator should have, or work towards, credible plans to achieve zero routine flaring and venting by 2030 or sooner. Operators should develop a Flaring and Venting Management Plan that demonstrates a credible pathway to achieving that goal, to be included as part of their Greenhouse Gas Emissions Reduction Actions Plans.”).

⁷⁸³ United Kingdom North Sea Transition Authority (2021) [Flaring and venting guidance](#), 5 (“All new developments should be planned and developed on the basis of zero category A (routine) flaring and venting.”).

⁷⁸⁴ United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero (2023) [POWERING UP BRITAIN: THE NET ZERO GROWTH PLAN](#), 39 (“We will not accelerate the end to routine flaring from 2030 to 2025 as the 2030 target is already challenging due to the basin’s maturity, noting that retrofitting facilities is expensive and technically challenging. The sector committed to accelerate compliance with the World Bank’s ‘Zero Routine Flaring by 2030’ initiative ahead of 2030, and its Methane Action Plan committed to an ambitious 50% reduction in methane emissions by 2030. The government is working with regulators and industry to continue to drive down flaring and venting gas ahead of the 2030 target.”).

⁷⁸⁵ United Kingdom Landfill Tax Regulations 1996 (“These Regulations make provision for the administration and assurance of landfill tax.”).

⁷⁸⁶ United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero (2023) [CARBON BUDGET DELIVERY PLAN](#), 103 (“Near elimination of biodegradable municipal waste from landfill - additional policies towards near elimination of this waste to landfill from 2028.”).

⁷⁸⁷ United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero (2023) [CARBON BUDGET DELIVERY PLAN](#), 149 (“R&D to refine emissions estimates and explore further methane gas capture from landfill. Landfill gas is collected and is used to generate electricity, oxidised through flaring or natural processes. Whilst current practices capture some landfill gas, there is room for improvement. Previous research has indicated that most methane is lost at operational sites through uncapped waste and around infrastructure, such as gas wells. Industry practise could reduce this leakage. There are also other smaller opportunities for improvements at closed but permitted sites.”).

⁷⁸⁸ United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero (2023) [CARBON BUDGET DELIVERY PLAN](#), 102–103. (“Collection and packaging reforms will support the reduction of biodegradable municipal waste going to landfill.”).

⁷⁸⁹ United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero (2023) [CARBON BUDGET DELIVERY PLAN](#), 147 (“Increase the use of robust Monitoring, Reporting and Verification of GHG emissions (MRV). We will explore policies to increase the use of MRV across farm businesses as a mechanism to support improved understanding and behaviour change for decarbonisation. This will build on the recent UK ETS consultation call for evidence chapter which explored the use and application of MRV for the agriculture sector and ongoing research projects to examine opportunities to better harmonise and improve the robustness of emission reporting across farm, food, and drink businesses. We will develop a harmonised approach for measuring carbon emissions from farms and by 2024 will set out how farmers will be supported to understand their emission sources through carbon audits and take further actions to decarbonise their businesses.”).

⁷⁹⁰ United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero (2023) [CARBON BUDGET DELIVERY PLAN](#), 137 (“Additional mitigation intervention whereby the methane generated during storage of liquid manure is collected and burnt, converting it to carbon dioxide, a less potent GHG. There may also be potential to utilise heat or energy produced on combustion within the farm business.”).

⁷⁹¹ United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero (2023) [CARBON BUDGET DELIVERY PLAN](#), 138 (“Feeding insect protein to animals has the potential to reduce overall global emissions from feed production (in comparison to conventional protein production e.g. soya grown overseas) and support a circular economy (e.g. if insects are raised on waste). There is ongoing research to determine the potential of these measures and the sector is at an early stage of development. This measure is unlikely to have significant UK GHG or land use impacts. It could, however, reduce supply chain emissions from feed supply occurring outside the scope of UK carbon budgets.”).

⁷⁹² United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero (2023) [CARBON BUDGET DELIVERY PLAN](#), 93 (“Regulations to mandate retrofitting slurry tanks with a permeable cover will reduce both methane and ammonia emissions, subject to consultation. In the short term, focus is on improving compliance and supporting take up through e.g., Countryside Stewardship slurry grants. NB. This measure provides carbon savings starting before the start date. While government action or support to deliver implementation at pace may not yet be in place, there is existing, market led, uptake across sectors to deliver emission reductions. Additionally due to the significant lead in time for the projected savings to start, and the modelling system used, there may be minor emissions savings before the anticipated start year, e.g., due to proactive and engaged farmers and land managers taking steps themselves, ahead of policy. Regulations to mandate retrofitting slurry tanks with an impermeable cover to reduce both methane and ammonia emissions.”).

⁷⁹³ United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero (2023) [CARBON BUDGET DELIVERY PLAN](#), 92 (“The measure involves improving breeding, using genetic testing (genomic tools), to ensure that breeding goals involve some low carbon traits. The measure involves farmers collecting performance information on the individual animals and genetic testing and feeding back this information to help with breeding goal development (the goals include lower methane emissions). Competitions in Defra’s Farming Innovation Programme (FIP) are developing this measure ahead of further refinement of policy measures. NB. This measure shows carbon savings starting before the start date. While government action or support to deliver implementation at pace may not yet be in place, there is existing, market led, uptake across sectors to deliver emission reductions.”).

⁷⁹⁴ United Kingdom Department for Energy Security and Net Zero (2023) [CARBON BUDGET DELIVERY PLAN](#), 90 (“Methane-suppressing feed products (for example 3NOP, nitrate additives) within feed rations to reduce the amount of methane produced by ruminant livestock (e.g. cattle). Food Standard Agency (FSA) and Food Standards Scotland (FSS) are responsible for the authorisation process of feed additives in Great Britain. We will continue to work with the FSA and FSS, industry and the sector to explore suitable policy options to encourage rapid and extensive uptake of methane suppressing feed products with proven safety and efficacy, including exploring mandating methane suppressing feed products in compound feed for cattle in England. We have already published research on these products and recently ran a call for evidence on methane suppressing feed products to better understand the opportunities and challenges associated with their use. This will inform our next steps to encourage the extensive update of methane suppressing feed products.”).

⁷⁹⁵ United Kingdom Climate Change Committee (2023) [2023 PROGRESS REPORT TO PARLIAMENT](#), 52 (“International pledges launched at COPs must begin to deliver real-world action to accelerate emissions reduction this decade. While the UK has had a role in advancing progress on initiatives on forests and ZEVs, its contribution to the Global Methane Pledge remains weak.”).

⁷⁹⁶ United Kingdom Climate Change Committee (2023) [2023 PROGRESS REPORT TO PARLIAMENT](#), 66 (“The UK’s action on methane is insufficient. The Government has not set out a UK-specific 30% reduction on 2020 levels by 2030 commitment to support the Global Methane Pledge and the Methane Memorandum brought forward high-level intentions rather than detailed plans for sectoral reduction”).

⁷⁹⁷ United Kingdom Climate Change Committee (2023) [2023 PROGRESS REPORT TO PARLIAMENT](#), 85 (“In our Balanced Pathway,* methane emissions fall by around 30% compared to actual emissions in 2020 by 2030. This is driven by reductions in waste, agriculture and fuel supply. The Government’s ambition in all these sectors is less than in our Balanced Pathway, and Government plans all have significant delivery risks. This is particularly the case in agriculture where some plans are completely insufficient with a heavy reliance on voluntary uptake of measures (Chapter 9). It is therefore unlikely that the UK would achieve a 30% reduction in emissions by 2030 with current plans.”).

⁷⁹⁸ United Kingdom Climate Change Committee (2023) [2023 PROGRESS REPORT TO PARLIAMENT](#), 394 (“Set out plans for reducing domestic methane emissions in line with the collective aims of the Global Methane Pledge (a reduction in UK methane emissions of at least 30% from 2020 levels by 2030) and announce an intention to set a longer-term pathway for these emissions in 2023.”)

⁷⁹⁹ United Kingdom Climate Change Committee (2023) [2023 PROGRESS REPORT TO PARLIAMENT](#), 402 (“targets for methane flaring and venting should be strengthened and brought forward. For all facilities that will remain in operation post 2030, flaring and venting should only be permitted beyond 2025 when necessary for safety reasons.”)

⁸⁰⁰ United Kingdom Climate Change Committee (2023) [2023 PROGRESS REPORT TO PARLIAMENT](#), 411 (“As part of strengthening the regulatory baseline, introduce regulations under the Clean Air Strategy to reduce enteric methane emissions, specifically under environmental permitting to the dairy and intensive beef sectors.”)

⁸⁰¹ United Kingdom Climate Change Committee (2023) *2023 PROGRESS REPORT TO PARLIAMENT*, 416 (“Set out how methane capture and oxidisation rates at landfill sites will be improved. We will assess whether this is included in either the forthcoming final Waste Prevention Programme or the Resources and Waste Strategy addendum.”).

⁸⁰² United Kingdom Government (19 December 2023) *New UK levy to level carbon pricing* (“Goods imported into the UK from countries with a lower or no carbon price will have to pay a levy by 2027, ensuring products from overseas face a comparable carbon price to those produced in the UK.”).

⁸⁰³ United Kingdom Government (19 December 2023) *New UK levy to level carbon pricing* (“Goods imported into the UK from countries with a lower or no carbon price will have to pay a levy by 2027, ensuring products from overseas face a comparable carbon price to those produced in the UK.”).

⁸⁰⁴ United Kingdom Government (19 December 2023) *New UK levy to level carbon pricing* (“Goods imported into the UK from countries with a lower or no carbon price will have to pay a levy by 2027, ensuring products from overseas face a comparable carbon price to those produced in the UK.”).

⁸⁰⁵ White House (22 April 2021) *FACT SHEET: President Biden Sets 2030 Greenhouse Gas Pollution Reduction Target Aimed at Creating Good-Paying Union Jobs and Securing U.S. Leadership on Clean Energy Technologies*, Statements and Releases (“Today, President Biden will announce a new target for the United States to achieve a 50-52 percent reduction from 2005 levels in economy-wide net greenhouse gas pollution in 2030 – building on progress to-date and by positioning American workers and industry to tackle the climate crisis. ... The target is consistent with the President’s goal of achieving net-zero greenhouse gas emissions by no later than 2050 and of limiting global warming to 1.5 degrees Celsius, as the science demands.”).

⁸⁰⁶ White House Office of Domestic Climate Policy (2021) *U.S. Methane Emissions Reduction Action Plan*. See also White House (2 November 2021) *FACT SHEET: President Biden Tackles Methane Emissions, Spurs Innovations, and Supports Sustainable Agriculture to Build a Clean Energy Economy and Create Jobs*, Statements and Releases.

⁸⁰⁷ White House (31 January 2022) *FACT SHEET: Biden Administration Tackles Super-Polluting Methane Emissions*, Statements and Releases (“Today, the Biden Administration is announcing new actions in line with the Methane Emissions Reduction Action Plan to tackle methane emissions and support a clean energy economy, including: • The Department of the Interior announcing \$1.15 billion for states to clean up orphaned oil and gas wells, a significant source of methane emissions. • The Department of Energy announcing the launch of a Methane Reduction Infrastructure Initiative to provide technical assistance to the orphaned well clean-up efforts of Federal agencies, states and tribes. • The Department of Transportation announcing new enforcement of the PIPES Act to requires pipeline operators to minimize methane leaks. • The Department of Agriculture highlighting ongoing research efforts and investments to reduce methane emissions from beef and dairy systems. • The White House announcing the formation of a new interagency working group to coordinate the measurement, monitoring, reporting and verification of greenhouse gas emissions and removals. • The President’s Interagency Work Group on Coal and Power Plant Communities and Economic Revitalization announcing a national workshop for energy communities on repurposing fossil fuel infrastructure, including orphan oil and gas wells, for use in new industries.”).

⁸⁰⁸ United States Department of Energy (30 March 2022) *Repurposing Fossil Energy Assets Workshop*.

⁸⁰⁹ Harris K., Johnson R., Orozco J., Kendrick J., & Gordon S. (2023) *Plugging the Leaks 2.0*, BlueGreen Alliance, 12 (“Updating industry practices and equipment to meet these proposed standards will not just make workers and communities around the facilities safer and healthier, but will also generate and support quality, family-sustaining jobs—over 136,000 direct and indirect jobs over 13 years. This is a two-fold increase in jobs compared to our analysis of the 2016 rule”).

⁸¹⁰ White House (26 July 2023) *FACT SHEET: Biden-Harris Administration Hosts White House Methane Summit to Tackle Dangerous Climate Pollution, while Creating Good-Paying Jobs and Protecting Community Health*, Statements and Releases.

⁸¹¹ White House (26 July 2023) *FACT SHEET: Biden-Harris Administration Hosts White House Methane Summit to Tackle Dangerous Climate Pollution, while Creating Good-Paying Jobs and Protecting Community Health*, Statements and Releases (“Establishing a New Cabinet-level Methane Task Force: The Biden-Harris Administration is announcing a new Cabinet-level Methane Task Force, which will advance a whole-of-government approach to proactive methane leak detection and data transparency, and support state and local efforts to mitigate and enforce methane emissions regulations. The Task Force will accelerate execution of the U.S. Methane Emissions Reduction Action Plan, building on over 80 Administration actions taken to date under the Plan”).

⁸¹² White House (26 July 2023) *FACT SHEET: Biden-Harris Administration Hosts White House Methane Summit to Tackle Dangerous Climate Pollution, while Creating Good-Paying Jobs and Protecting Community Health*, Statements and Releases (“The Task Force will accelerate execution of the U.S. Methane Emissions Reduction Action Plan, building on over 80 Administration actions taken to date under the Plan”).

⁸¹³ White House (26 July 2023) *FACT SHEET: Biden-Harris Administration Hosts White House Methane Summit to Tackle Dangerous Climate Pollution, while Creating Good-Paying Jobs and Protecting Community Health*, Statements and Releases (“The Biden-Harris Administration is leveraging domestic action to raise global ambition and coordinating international efforts to mitigate methane emissions.”).

⁸¹⁴ *Inflation Reduction Act of 2022*, Pub. L. No. 117-169 (2022) § 60113 (“(a) INCENTIVES FOR METHANE MITIGATION AND MONITORING.—In addition to amounts otherwise available, there is appropriated to the Administrator for fiscal year 2022, out of any money in the Treasury not otherwise appropriated, \$850,000,000, to remain available until September 30, 2028. ... In addition to amounts otherwise available, there is appropriated to the Administrator for fiscal year 2022, out of any money in the Treasury not otherwise appropriated, \$700,000,000, to remain available until September 30, 2028, for activities described 21 in paragraphs (1) through (4) of subsection (a) at marginal conventional wells.”). For broader support of monitoring provisions for methane under IRA *see* Senator Whitehouse., Senator Carpenter., & Congressman Pallone. (30 November 2023) *Letter to EPA*, (“We write to express our strong support for the Environmental Protection Agency’s (EPA) proposal to amend requirements for oil and natural gas systems to report emissions under EPA’s Greenhouse Gas Reporting Program (GHGRP). We also urge EPA to strengthen the final rule in several specific ways to meet Congress’ directive in the Inflation Reduction Act (IRA) to ensure that oil and gas operators more accurately report their methane emissions. More accurate emissions reports are critical to support the deep, near-term reductions in methane emissions necessary to avoid the worst consequences of climate change.”),

⁸¹⁵ *Inflation Reduction Act of 2022*, Pub. L. No. 117-169 (2022) § 60112 (“(e) Charge Amount.—The amount of a charge under subsection (c) for an applicable facility shall be equal to the product obtained by multiplying—“(1) the number of metric tons of methane emissions reported pursuant to subpart W of part 98 of title 40, Code of Federal Regulations, for the applicable facility that exceed the applicable annual waste emissions threshold listed in subsection (f) during the previous reporting period; and “(2)(A) \$900 for emissions reported for calendar year 2024; “(B) \$1,200 for emissions reported for calendar year 2025; or “(C) \$1,500 for emissions reported for calendar year 2026 and each year thereafter.”). *See also* United States Senate (28 July 2022) *Summary of the Energy Security and Climate Change Investments in the Inflation Reduction Act of 2022*; *discussed in* Friedman L. & Plumer B. (28 July 2022) *Surprise Deal Would Be Most Ambitious Climate Action Undertaken by U.S.*, THE NEW YORK TIMES (“The bill would also crack down on leaks of methane, a powerful greenhouse gas, from oil and gas wells, pipelines and other infrastructure. By 2026, polluters would face a penalty of \$1,500 per ton of methane that escaped into the atmosphere in excess of federal limits. The methane fee will raise \$6.3 billion from the oil and gas industry over a decade, much of which will be reinvested in measures to help prevent methane leaks.”).

⁸¹⁶ [Inflation Reduction Act of 2022](#), Pub. L. No. 117-169 (2022) §§ 50261–50263 (“For all leases issued after the date of enactment of this Act, except as provided in subsection (b), royalties paid for gas produced from Federal land and on the outer Continental Shelf shall be assessed on all gas produced, including all gas that is consumed or lost by venting, flaring, or negligent releases through any equipment during upstream operations.”).

⁸¹⁷ [Inflation Reduction Act of 2022](#), Pub. L. No. 117-169 (2022) § 21001(a)(1)–(4) (“(a) Appropriations . . . (1) to carry out, using the facilities and authorities of the Commodity Credit Corporation, the environmental quality incentives program under subchapter A of chapter 4 of subtitle D of title XII of the Food Security Act of 1985 (16 U.S.C. 3839aa through 3839aa-8)—(A)(i) \$250,000,000 for fiscal year 2023; (ii) \$1,750,000,000 for fiscal year 2024; (iii) \$3,000,000,000 for fiscal year 2025; and (iv) \$3,450,000,000 for fiscal year 2026 . . . (II) with the Secretary prioritizing proposals that utilize diet and feed management to reduce enteric methane emissions from ruminants; and (iii) the funds shall be available for 1 or more agricultural conservation practices or enhancements that the Secretary determines directly improve soil carbon, reduce nitrogen losses, or reduce, capture, avoid, or sequester carbon dioxide, methane, or nitrous oxide emissions, associated with agricultural production; (2) to carry out, using the facilities and authorities of the Commodity Credit Corporation, the conservation stewardship program under subchapter B of that chapter (16 U.S.C. 3839aa-21 through 3839aa-25)—(A)(i) \$250,000,000 for fiscal year 2023; (ii) \$500,000,000 for fiscal year 2024; (iii) \$1,000,000,000 for fiscal year 2025; and (iv) \$1,500,000,000 for fiscal year 2026; and (B) subject to the condition on the use of the funds that the funds shall only be available for 1 or more agricultural conservation practices, enhancements, or bundles that the Secretary determines directly improve soil carbon, reduce nitrogen losses, or reduce, capture, avoid, or sequester carbon dioxide, methane, or nitrous oxide emissions, associated with agricultural production; (3) to carry out, using the facilities and authorities of the Commodity Credit Corporation, the agricultural conservation easement program under subtitle H of title XII of that Act (16 U.S.C. 3865 through 3865d) for easements or interests in land that will most reduce, capture, avoid, or sequester carbon dioxide, methane, or nitrous oxide emissions associated with land eligible for the program—(A) \$100,000,000 for fiscal year 2023; (B) \$200,000,000 for fiscal year 2024; (C) \$500,000,000 for fiscal year 2025; and (D) \$600,000,000 for fiscal year 2026; and (4) to carry out, using the facilities and authorities of the Commodity Credit Corporation, the regional conservation partnership program under subtitle I of title XII of that Act (16 U.S.C. 3871 through 3871f)—(A)(i) \$250,000,000 for fiscal year 2023; (ii) \$800,000,000 for fiscal year 2024; (iii) \$1,500,000,000 for fiscal year 2025; and (iv) \$2,400,000,000 for fiscal year 2026; and (B) subject to the conditions on the use of the funds that—(i) section 1271C(d)(2)(B) of the Food Security Act of 1985 (16 U.S.C. 3871c(d)(2)(B)) shall not apply; and (ii) the Secretary shall prioritize partnership agreements under section 1271C(d) of the Food Security Act of 1985 (16 U.S.C. 3871c(d)) that support the implementation of conservation projects that assist agricultural producers and nonindustrial private forestland owners in directly improving soil carbon, reducing nitrogen losses, or reducing, capturing, avoiding, or sequestering carbon dioxide, methane, or nitrous oxide emissions, associated with agricultural production.”).

⁸¹⁸ Analyses by Princeton’s REPEAT Project, Energy Innovation, and the Rhodium Group confirm the 40% GHG reductions capability of the 2022 Inflation Reduction Act. See Jenkins J. D., Mayfield E. N., Farbes J., Jones R., Patankar N., Xu Q., & Schivley G. (2022) *Preliminary Report: The Climate and Energy Impacts of the Inflation Reduction Act of 2022*, REPEAT Project, Princeton University ZERO Lab, 6 (Table. Historical and Modeled Net U.S. Greenhouse Gas Emissions (Including Land Sinks); Mahajan M., Ashmoore O., Rissman J., Orvis R., & Gopal A. (2022) *Modeling the Inflation Reduction Act Using the Energy Policy Simulator*, Energy Innovation, 1 (“We find that the IRA is the most significant federal climate and clean energy legislation in U.S. history, and its provisions could cut greenhouse gas (GHG) emissions 37-41 percent below 2005 levels. If the IRA passes, additional executive and state actions can realistically achieve the U.S. nationally determined commitments (NDCs) under the Paris Agreement.”); and Larsen J., King B., Kolus H., Dasari N., Hiltbrand G., & Herndon W. (12 August 2022) *A Turning Point for US Climate Progress: Assessing the Climate and Clean Energy Provisions in the Inflation Reduction Act*, The Rhodium Group (“The IRA is a game changer for US decarbonization. We find that the package as a whole drives US net GHG emissions down to 32-42% below 2005 levels in 2030, compared to 24-35% without it. The long-term, robust incentives and programs provide a decade of policy certainty for the clean energy industry to scale up across all corners of the US energy system to levels that the US has never seen before. The IRA also targets incentives toward emerging clean technologies that have seen little support to date. These incentives help reduce the green premium on

clean fuels, clean hydrogen, carbon capture, direct air capture, and other technologies, potentially creating the market conditions to expand these nascent industries to the level needed to maintain momentum on decarbonization into the 2030s and beyond.”); *discussed in* Hirji Z. (4 August 2022) *How the Senate’s Big Climate Bill Eliminates 4 Billion Tons of Emissions*, BLOOMBERG.

⁸¹⁹ *Infrastructure Investment and Jobs Act*, Pub. L. No. 117-58 (2021) § 40601 (“Orphaned Well Site Plugging, Remediation, and Restoration. ... (h) Authorization of Appropriations.--There are authorized to be appropriated for fiscal year 2022, to remain available until September 30, 2030: ``(1) to the Secretary-- ``(A) \$250,000,000 to carry out the program under subsection (b); ``(B) \$775,000,000 to provide grants under subsection (c)(3); ``(C) \$2,000,000,000 to provide grants under subsection (c)(4); ``(D) \$1,500,000,000 to provide grants under subsection (c)(5); and (E) \$150,000,000 to carry out the program under subsection (d).”).

⁸²⁰ United States Environmental Protection Agency (2 November 2021) *EPA Proposes New Source Performance Standards Updates, Emissions Guidelines to Reduce Methane and Other Harmful Pollution from the Oil and Natural Gas Industry* (“EPA is taking a significant step in fighting the climate crisis and protecting public health through a proposed rule that would sharply reduce methane and other harmful air pollution from both new and existing sources in the oil and natural gas industry. The proposal would expand and strengthen emissions reduction requirements that are currently on the books for new, modified and reconstructed oil and natural gas sources, and would require states to reduce methane emissions from hundreds of thousands of existing sources nationwide for the first time.”). For comprehensive data on the pollution and health effects of oil and gas sources *See* Oil and Gas Threat Map, *About Oil and Gas Threat Map* (last visited 18 December 2023) (“The Oil & Gas Threat Map plots the location of all active oil & gas production facilities in the United States, draws a ½ mile health threat radius around all of those facilities counts the residents, and enrolled students and schools they attend, within that health threat radius.”).

⁸²¹ United States Environmental Protection Agency (11 November 2022) *EPA Issues Supplemental Proposal to Reduce Methane and Other Harmful Pollution from Oil and Natural Gas Operations* (“EPA is taking a significant step in fighting the climate crisis and protecting public health through a proposed rule that would sharply reduce methane and other harmful air pollution from both new and existing sources in the oil and natural gas industry. The proposal would expand and strengthen emissions reduction requirements that are currently on the books for new, modified and reconstructed oil and natural gas sources, and would require states to reduce methane emissions from hundreds of thousands of existing sources nationwide for the first time.”).

⁸²² United States Environmental Protection Agency (2022) *EPA’s Supplemental Proposal to Reduce Pollution from the Oil and Natural Gas Industry to Fight the Climate Crisis and Protect Public Health: Overview*, 1 (“By improving standards in the 2021 proposal and adding proposed requirements for sources that proposal did not cover, the supplemental proposal signed November 8, 2022, would achieve more comprehensive emissions reductions from oil and natural gas facilities. In 2030 alone, the supplemental proposal would reduce methane emissions from the sources it covers by 87 percent below 2005 levels. It would increase recovery of natural gas that otherwise would go to waste – saving enough gas from 2023 to 2035 to heat an estimated 3.5 million homes for the winter.”).

⁸²³ environmental Protection Agency (2023) *Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review*. *See also* Tankersly J & Friedman L. (2 December 2023) *Biden Administration Announces Rule to Cut Millions of Tons of Methane Emissions*, NEW YORK TIMES (“The methane rule, which was first announced at COP28 by Michael S. Regan, the administrator of the Environmental Protection Agency, came with more certainty: It is an administrative action that does not require the approval of Congress and is scheduled to take effect next year.”). *See generally* Jenks C., Dobie H., & Leahy R. (2023) *EPA’s Final Methane Rule—Incorporating Advanced Technologies and Emissions Data to Reduce Methane Emissions from the Oil and Natural Gas Sector*, Harvard Environmental Law and Energy Program.

⁸²⁴ Environmental Protection Agency (23 May 2023) *New Source Performance Standards for Greenhouse Gas Emissions From New, Modified, and Reconstructed Fossil Fuel-Fired Electric Generating Units; Emission Guidelines*

for Greenhouse Gas Emissions From Existing Fossil Fuel-Fired Electric Generating Units; and Repeal of the Affordable Clean Energy Rule, FED. REG. 88: 33240–33420, 33420 (“In this document, the Environmental Protection Agency (EPA) is proposing five separate actions under section 111 of the Clean Air Act (CAA) addressing greenhouse gas (GHG) emissions from fossil fuel-fired electric generating units (EGUs). The EPA is proposing revised new source performance standards (NSPS), first for GHG emissions from new fossil fuel-fired stationary combustion turbine EGUs and second for GHG emissions from fossil fuel-fired steam generating units that undertake a large modification, based upon the 8-year review required by the CAA. Third, the EPA is proposing emission guidelines for GHG emissions from existing fossil fuel-fired steam generating EGUs, which include both coal-fired and oil/gas-fired steam generating EGUs. Fourth, the EPA is proposing emission guidelines for GHG emissions from the largest, most frequently operated existing stationary combustion turbines and is soliciting comment on approaches for emission guidelines for GHG emissions for the remainder of the existing combustion turbine category. Finally, the EPA is proposing to repeal the Affordable Clean Energy (ACE) Rule.”)

⁸²⁵ Environmental Protection Agency (1 February 2024) *Methane Emissions Reduction Program* (“The Inflation Reduction Act provides new authorities under Section 136 of the Clean Air Act to reduce methane emissions from the petroleum and natural gas sector through the creation of the Methane Emissions Reduction Program. This program will help reduce emissions of methane and other greenhouse gas (GHGs) from the oil and gas sector and will have the co-benefit of reducing non-GHG emissions such as volatile organic compounds and hazardous air pollutants. In keeping with the Administration’s Justice40 Initiative, the program will also reduce emissions from oil and natural gas infrastructure in or near overburdened communities where people live, work, and go to school. The Methane Emissions Reduction Program will provide more than \$1 billion in financial and technical assistance through multiple funding opportunities, establishes a Waste Emissions Charge (WEC) for methane, and requires EPA to revise the Greenhouse Gas Reporting Program (GHGRP) Subpart W regulations for the oil and gas sector.”).

⁸²⁶ Environmental Protection Agency (6 July 2023) *EPA Proposes Updates to Greenhouse Gas Emissions Reporting Requirements for the Oil and Gas Sector* (“Today, the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) issued a proposal to amend reporting requirements for petroleum and natural gas systems under EPA’s Greenhouse Gas Reporting Program. The proposed revisions would improve the accuracy of reported emissions of greenhouse gases (GHG), including methane, one of the primary drivers of the climate crisis, from applicable petroleum and natural gas facilities, consistent with the Methane Emissions Reduction Program under the Inflation Reduction Act.”); and Environmental Protection Agency (1 August 2023) *Greenhouse Gas Reporting Rule: Revisions and Confidentiality Determinations for Petroleum and Natural Gas Systems*, FED. REG. 88: 50282–50441, 50282 (“The Environmental Protection Agency (EPA) is proposing to amend requirements that apply to the petroleum and natural gas systems source category of the Greenhouse Gas Reporting Rule to ensure that reporting is based on empirical data, accurately reflects total methane emissions and waste emissions from applicable facilities, and allows owners and operators of applicable facilities to submit empirical emissions data that appropriately demonstrate the extent to which a charge is owed. The EPA is also proposing changes to requirements that apply to the general provisions, general stationary fuel combustion, and petroleum and natural gas systems source categories of the Greenhouse Gas Reporting Rule to improve calculation, monitoring, and reporting of greenhouse gas data for petroleum and natural gas systems facilities. This action also proposes to establish and amend confidentiality determinations for the reporting of certain data elements to be added or substantially revised in these proposed amendments.”).

⁸²⁷ Environmental Protection Agency (26 January 2024) *Waste Emissions Charge for Petroleum and Natural Gas Systems*, FED. REG. 89: 5318–5381, 5318 (“The Environmental Protection Agency (EPA) is proposing a regulation to implement the requirements of the Clean Air Act (CAA) as specified in the Methane Emissions Reduction Program of the Inflation Reduction Act. This program requires the EPA to impose and collect an annual charge on methane emissions that exceed specified waste emissions thresholds from an owner or operator of an applicable facility that reports more than 25,000 metric tons of carbon dioxide equivalent of greenhouse gases emitted per year pursuant to the petroleum and natural gas systems source category requirements of the Greenhouse Gas Reporting Rule. The proposal would implement calculation procedures, flexibilities, and exemptions related to the waste emissions charge

and proposes to establish confidentiality determinations for data elements included in waste emissions charge filings.”).

⁸²⁸ Environmental Protection Agency (26 January 2024) *Waste Emissions Charge for Petroleum and Natural Gas Systems*, FED. REG. 89: 5318–5381, 5320 (“The waste emissions charge, or WEC, is specified in CAA section 136 to begin for emissions occurring in 2024 at \$900 per metric ton of methane exceeding the threshold, increasing to \$1,200 per metric ton of methane in 2025, and to \$1,500 per metric ton of methane in 2026 and years after. The WEC only applies to the subset of a facility’s emissions that are above the waste emissions threshold.”). *See also* Chennick J. (12 January 2024) *EPA proposes methane emission fees*, E&E NEWS (“And EPA’s draft rule settles some questions about how excess emissions would be calculated — though the climate law itself established leak ratios for different segments of the oil and gas supply chain from production and processing to storage and pipelines. EPA is set to finalize the reporting rules and fee later this year, and the new reporting standards would be the basis for the fee starting in 2025. The fee could initially cover some of the same sources regulated under EPA’s newly final methane rule. That’s because states have two years to write plans for existing sources. Those must be approved by EPA, and the rule provides up to three years for controls for existing oil and gas infrastructure to phase in, meaning some onshore operations that might eventually receive exemptions from the fee may be required to pay it in the near term.”); *and* Danish K. W. (23 January 2024) *EPA Proposes Rules to Implement IRA Methane Fee Provisions*, VAN NESS FELDMAN (“Among other things, the proposed rule outlines the EPA’s interpretation of how the WEC should interact with the agency’s recently finalized methane emission standards for the oil and gas sector under section 111 of the Clean Air Act (the “Section 111” regulations). Under the agency’s proposed interpretation, the WEC could be in effect for multiple years until it is supplanted by the Section 111 regulations.”).

⁸²⁹ United States Environmental Protection Agency (17 August 2023) *FY 2024 – 2027 National Enforcement and Compliance Initiatives*, 2 (“The Mitigating Climate Change NECI will use OECA’s criminal and civil enforcement authorities to address three separate and significant contributors to climate change: (1) methane emissions from oil and gas facilities; (2) methane emissions from landfills; and (3) the use, importation, and production of hydrofluorocarbons (HFCs). Oil and gas systems and landfills are the second and third largest sources of methane emissions in the United States. Methane is a climate super-pollutant that is more than 25 times as potent as carbon dioxide at trapping heat in the atmosphere.”).

⁸³⁰ United States Environmental Protection Agency (17 August 2023) *FY 2024 – 2027 National Enforcement and Compliance Initiatives*, 2–3 (“By focusing on enforcement of long- standing air pollution requirements, such as New Source Performance Standards at oil and gas facilities and landfills, OECA can achieve the ancillary benefit of reducing methane emissions. If EPA promulgates new rules to reduce methane emissions in the future, enforcement of those requirements could be included in this initiative as well.”).

⁸³¹ United States Environmental Protection Agency (17 August 2023) *FY 2024 – 2027 National Enforcement and Compliance Initiatives*, 2–3 (“By focusing on enforcement of long- standing air pollution requirements, such as New Source Performance Standards at oil and gas facilities and landfills, OECA can achieve the ancillary benefit of reducing methane emissions. If EPA promulgates new rules to reduce methane emissions in the future, enforcement of those requirements could be included in this initiative as well.”).

⁸³² United States Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement (July 2022) *Guidance on the Bipartisan Infrastructure Law Abandoned Mine Land Grant Implementation*, 1 (“The BIL authorized and appropriated \$11.293 billion for deposit into the Abandoned Mine Reclamation Fund administered by the Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement (OSMRE). Of the \$11.293 billion appropriated OSMRE will distribute approximately \$10.873 billion¹ in BIL Abandoned Mine Land (AML) grants to eligible States and Tribes on an equal annual basis—approximately \$725 million a year—over a 15-year period.”).

⁸³³ United States Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement (July 2022) *Guidance on the Bipartisan Infrastructure Law Abandoned Mine Land Grant Implementation*, 4 (“States with unreclaimed mines on the list of

EPA's Methane Coal Mine Opportunities Database (<https://www.epa.gov/cmop/coal-mine-methane-abandoned-underground-mines>) are encouraged to prioritize the reclamation of such sites where eligible for BIL AML funding in a manner that eliminates methane emissions to the greatest extent possible.”).

⁸³⁴ United States Department of Energy (5 August 2022) *DOE Announces \$32 Million to Reduce Methane Emissions from Oil and Gas Sector* (“The U.S. Department of Energy (DOE) today announced up to \$32 million in funding toward the research and development of new monitoring, measurement, and mitigation technologies to help detect, quantify, and reduce methane emissions across oil and natural gas producing regions of the United States.”).

⁸³⁵ United States Department of Energy & United States Environmental Protection Agency (21 July 2023) *Notice of Intent to issue Administrative and Legal Requirements Document Announcement (ALRD), titled “IRA: Mitigating Emissions from Marginal Conventional Wells”*, DE-FOA-0003108 (“The U.S. Department of Energy (DOE) National Energy Technology Laboratory (NETL) intends to issue an Administrative and Legal Requirements Document (ALRD) on behalf of the DOE Office of Fossil Energy and Carbon Management (FECM) and in collaboration with U.S. Environmental Protection Agency (EPA), entitled ‘IRA: Mitigating Emissions from Marginal Conventional Wells. NETL anticipates issuing the ALRD in August 2023 with an application availability period of 30 days. The ALRD will be funded by the Clean Air Act (CAA), as amended by the Inflation Reduction Act (IRA). DOE is partnering with EPA to make funds available to States for the purpose of working with operators to voluntarily and permanently plug marginal conventional wells on non-Federal lands, supporting environmental restoration of the well pad, and enhancing industry’s and States’ capacities to monitor methane and other air pollutants from wells. If released, this ALRD is expected to make available up to \$350 million for financial assistance in the form of grants to States via a formula.”).

⁸³⁶ Volcovici V (January 5 2024) *US approves \$189 million loan for real-time methane oil and monitoring*, REUTERS (“The Department of Energy’s loan office on Friday conditionally approved a \$189 million loan to support the build-out of a methane monitoring network in key oil-producing basins that would provide real-time data for tens of thousands of oil and gas sites, which it estimates could prevent the equivalent of at least 6 millions tons of carbon dioxide per year.”).

⁸³⁷ United States Department of Agriculture (2022) *Request for Applications: Bioproduct Pilot Program*, Fiscal Year 2023, 6 (“The Bioproduct Pilot Program, under assistance listing 10.236, will advance development of cost-competitive bioproducts with environmental benefits compared to incumbent products. The program seeks projects that will study the benefits of using materials derived from covered agricultural commodities for production of construction and consumer products (IMPORTANT: see Definitions in Appendix III). Applications must address all the following priorities: (1) Bioproduct development and production scale-up. (2) Cost savings relative to other commonly used materials; (3) Greenhouse gas emission reductions and other environmental and climate benefits relative to other commonly used materials; (4) Landfill quantity and waste management cost reductions, including life-cycle and longevity-extending or longevity-reducing characteristics relative to other commonly used materials...”).

⁸³⁸ United States Department of Agriculture (28 June 2022) *Vilsack Announces Bioproduct Pilot Program Funded by Bipartisan Infrastructure Law*, Press Release (“Today, Agriculture Secretary Tom Vilsack announced the U.S. Department of Agriculture is accepting applications for a new pilot program created under President Biden’s historic Bipartisan Infrastructure Law to support the development of biobased products that have lower carbon footprints and increase the use of renewable agricultural materials, creating new revenue streams for farmers. This \$10 million investment is part of the Biden-Harris Administration’s ongoing work to rebuild our infrastructure and create good-paying jobs and economic opportunity in our rural communities.”).

⁸³⁹ United States Bureau of Land Management (18 November 2016) *Waste Prevention, Production Subject to Royalties, and Resource Conservation*, FED. REG. 87: 73588–73620, 73589, 73596 (“The proposed rule would establish the general rule that “operators must use all reasonable precautions to prevent the waste of oil or gas

developed from the lease.” It notes that the BLM may specify reasonable measures to prevent waste as conditions of approval of an Application for Permit to Drill and, after an Application for Permit to Drill is approved, the BLM may order an operator to implement, within a reasonable time, additional reasonable measures to prevent waste at ongoing exploration and production operations. Reasonable measures to prevent waste may reflect factors including, but not limited to, relevant advances in technology and changes in industry practice. ... The proposed rule would require operators to submit a waste minimization plan with all applications for permits to drill oil wells. ... The Act [IRA] authorizes, among other things, massive and unprecedented investments to enhance energy security and combat the climate crisis. Of particular relevance here, the IRA contains a suite of provisions addressing onshore and offshore oil and gas development under Federal leases. For example, Section 50265 requires, inter alia, the Department to maintain a certain level of onshore oil and gas leasing activity as a prerequisite to approving renewable energy rights-of-way on Federal lands. Importantly, that provision of the IRA is accompanied by other provisions that serve to ensure that lessees pay fair and appropriate compensation to the Federal Government in exchange for the opportunity to conduct their industrial activities under Federal leases. The BLM has for decades assessed royalties on upstream production and has exempted from royalties gas lost in emergency situations, “beneficial use” gas, and “unavoidably lost” gas. IRA Section 50263 is consistent with the BLM’s prior agency practice regarding emergency situations and the unavoidable loss of gas, and it provides additional support for the approach set forth in this proposed rule. Importantly, IRA Section 50263 confirms that the concepts of “avoidable” and “unavoidable” loss are appropriate for assessing royalties.”).

⁸⁴⁰ United States Bureau of Land Management (18 November 2016) *Waste Prevention, Production Subject to Royalties, and Resource Conservation*, FED. REG. 87: 73588–73620, 73589 (“As detailed in the Regulatory Impact Analysis (RIA) prepared for this proposed rule, the BLM estimates that this rule would have the following economic impacts: Costs to industry of around \$122 million per year (annualized at 7 percent); Benefits to industry in recovered gas of \$55 million per year (annualized at 7 percent); Increases in royalty revenues from recovered and flared gas of \$39 million per year; and Benefits to society of \$427 million per year from reduced greenhouse gas emissions.”).

⁸⁴¹ White House Office of Domestic Climate Policy (2021) *U.S. Methane Emissions Reduction Action Plan*, 7 (“As part of implementing the bipartisan PIPES Act, PHMSA is advancing a commonsense regulatory agenda that has the potential to provide annual methane reductions of as much as 20 MMT of CO₂e in methane emissions per year—a spur for new jobs for pipeline workers, welders, electricians, and other trades. The reductions will be achieved by reducing leaks throughout the gas pipeline system and by reducing the frequency and scope of ruptures. In addition to being a major safety hazard, ruptures are a particularly large source of pipeline methane emissions. More than 1,000 metric tons of methane are lost, on average, with each pipeline rupture. A single rupture from a large, high-pressure gas pipeline can release more than 1,300 metric tons of methane emissions.”).

⁸⁴² Environmental Protection Agency (18 May 2023) *Pipeline Safety: Gas Pipeline Leak Detection and Repair*, FED. REG. 88: 31890–31979, 31890 (“PHMSA proposes regulatory amendments that implement congressional mandates in the Protecting our Infrastructure of Pipelines and Enhancing Safety Act of 2020 to reduce methane emissions from new and existing gas transmission pipelines, distribution pipelines, regulated (Types A, B, C and offshore) gas gathering pipelines, underground natural gas storage facilities, and liquefied natural gas facilities. Among the proposed amendments for part 192- regulated gas pipelines are strengthened leakage survey and patrolling requirements; performance standards for advanced leak detection programs; leak grading and repair criteria with mandatory repair timelines; requirements for mitigation of emissions from blowdowns; pressure relief device design, configuration, and maintenance requirements; and clarified requirements for investigating failures. Finally, PHMSA proposes expanded reporting requirements for operators of all gas pipeline facilities within DOT’s jurisdiction, including underground natural gas storage facilities and liquefied natural gas facilities.”).

⁸⁴³ Department of Transport (18 May 2023) *Pipeline Safety: Gas Pipeline Leak Detection and Repair*, FED. REG. 88: 31890–31979, 31890 (“PHMSA estimates that emission reductions under the proposed rule correspond to approximately 72 percent of unintentional emissions from regulated gathering pipelines, 17 percent of unintentional emissions from transmission pipelines, and 44 to 62 percent of unintentional emissions from distribution pipelines.”).

These shares are relative to modeled baseline emissions projected over the period of analysis based on the pipeline mileage, empirical emission factors, and existing survey and repair practices. Further, PHMSA estimates that the total avoided blowdown emissions under the proposed rule correspond to approximately 43 percent of baseline blowdown emissions. PHMSA estimates that the proposed rule would result in monetized net benefits between \$341 to \$1,440 million per year using a 3 percent discount rate. PHMSA also anticipates additional unquantified benefits to public safety and the environment, each discussed throughout this NPRM and its supporting documents (including the Preliminary Regulatory Impact Analysis (RIA) and draft Environmental Assessment (EA), each available in the docket for this NPRM.”).

⁸⁴⁴ United States Environmental Protection Agency, *Map of US Coal Mine Methane Current Projects and Potential Opportunities* (last visited 24 July 2023) (See mapping tool on U.S. Coal Mine Methane).

⁸⁴⁵ United States Environmental Protection Agency (2019) *Coal Mine Methane Recovery at Active and Abandoned U.S. Coal Mines: Current Projects and Potential Opportunities* (Total, tables of underground and abandoned mines).

⁸⁴⁶ United States Energy Information Administration, *U.S. Coalbed Methane Production* (last visited 30 June 2023) (See graph on U.S. Natural Gas Gross Withdrawals from Coalbed Wells. 2008: 2,022,228 million cubic feet. 2020: 821,141 million cubic feet. A conversion from million cubic feet to billion cubic meter (bcm) makes the 2008 total 57.263 bcm and the 2020 total 23.252 bcm.).

⁸⁴⁷ Zibel A. (6 December 2021) *Biden’s Oil Letdown*, PUBLIC CITIZEN (“Public Citizen’s analysis¹ of federal public lands drilling permit data found: • The Bureau of Land Management has approved an average of about 336 drilling permits per month in 2021 (Figure 1) through November 30. • Excluding January, when former President Donald Trump was in office for most of the month, the agency approved 333 drilling permits per month in 2021. That average was up by more than 40% from when Trump took office in 2017, but still down by more than 25% from 2020. • Under Biden, monthly public lands permit approvals peaked at 652 in April 2021 (Figure 2) but have been below 2020 levels since summer after falling under 300 in July.”); *discussed in* Joselow M. (6 December 2021) *Biden is approving more oil and gas drilling permits on public lands than Trump, analysis finds*, *The Climate 202*, THE WASHINGTON POST (“During Biden’s first year in office so far, BLM has approved an average of 333 drilling permits per month. That figure is more than 35% higher than Trump’s first year in office, when BLM approved an average of 245 drilling permits per month.”). See also Brown M. (12 July 2021) *US drilling approvals increase despite Biden climate pledge*, AP NEWS (“Approvals for companies to drill for oil and gas on U.S. public lands are on pace this year to reach their highest level since George W. Bush was president, underscoring President Joe Biden’s reluctance to more forcefully curb petroleum production in the face of industry and Republican resistance. The Interior Department approved about 2,500 permits to drill on public and tribal lands in the first six months of the year, according to an Associated Press analysis of government data. That includes more than 2,100 drilling approvals since Biden took office January 20.”).

⁸⁴⁸ White House (26 January 2024) *FACT SHEET: Biden-Harris Administration Announces Temporary Pause on Pending Approvals of Liquefied Natural Gas Exports* (“Today, the Biden-Harris Administration is announcing a temporary pause on pending decisions on exports of Liquefied Natural Gas (LNG) to non-FTA countries until the Department of Energy can update the underlying analyses for authorizations. The current economic and environmental analyses DOE uses to underpin its LNG export authorizations are roughly five years old and no longer adequately account for considerations like potential energy cost increases for American consumers and manufacturers beyond current authorizations or the latest assessment of the impact of greenhouse gas emissions. Today, we have an evolving understanding of the market need for LNG, the long-term supply of LNG, and the perilous impacts of methane on our planet. We also must adequately guard against risks to the health of our communities, especially frontline communities in the United States who disproportionately shoulder the burden of pollution from new export facilities. The pause, which is subject to exception for unanticipated and immediate national security emergencies, will provide the time to integrate these critical considerations.”).

⁸⁴⁹ White House (26 January 2024) *FACT SHEET: Biden-Harris Administration Announces Temporary Pause on Pending Approvals of Liquefied Natural Gas Exports* (“Today, the Biden-Harris Administration is announcing a temporary pause on pending decisions on exports of Liquefied Natural Gas (LNG) to non-FTA countries until the Department of Energy can update the underlying analyses for authorizations. The current economic and environmental analyses DOE uses to underpin its LNG export authorizations are roughly five years old and no longer adequately account for considerations like potential energy cost increases for American consumers and manufacturers beyond current authorizations or the latest assessment of the impact of greenhouse gas emissions. Today, we have an evolving understanding of the market need for LNG, the long-term supply of LNG, and the perilous impacts of methane on our planet. We also must adequately guard against risks to the health of our communities, especially frontline communities in the United States who disproportionately shoulder the burden of pollution from new export facilities. The pause, which is subject to exception for unanticipated and immediate national security emergencies, will provide the time to integrate these critical considerations.”). *See also* Davenport C. (24 January 2024) *White House Said to Delay Decision on Enormous Natural Gas Export Terminal* (“The White House is directing the Energy Department to expand its evaluation of the project to consider its impact on climate change, as well as the economy and national security, said these people, who spoke on condition of anonymity because they were not authorized to publicly discuss internal deliberations. The Energy Department has never rejected a proposed natural gas project because of its expected environmental impact.”).

⁸⁵⁰ United States Advanced Research Projects Agency-Energy (2 December 2021) *U.S. Department of Energy Awards \$35 Million for Technologies to Reduce Methane Emissions*, Press Release (“The following teams selected for the REMEDY program will work to directly address the more than 50,000 engines, 300,000 flares, and 250 mine shafts that are producing methane emissions. Natural Gas Engines: MAHLE Powertrain (Plymouth, MI) will develop a catalytic system to oxidize methane in the exhaust gas of lean-burn natural gas fired engines, (selection amount: \$3,257,089); Colorado State University (Fort Collins, CO) will develop hardware to redirect methane emissions to the engine’s turbocharger, reducing emissions and improving fuel efficiency, (selection amount: \$1,500,000); Marquette University (Milwaukee, WI) will demonstrate their Mixed Controlled Combustion (MCC) system which can be retrofitted into lean-burn engines, (selection amount: \$3,975,058); INNIO’s Waukesha Gas Engines (Waukesha, WI) will develop a new line of pistons fabricated with friction welding that reduce the space for methane to “slip” past the combustion zone in the engine and can be installed as part of normal engine maintenance programs, (selection amount: \$2,230,693); Texas A&M University (College Station, TX) will use plasma and advanced engine controls to reduce methane slip; the technology targets the large two-stroke engines used by gas pipeline companies, (selection amount: \$2,824,814); Flares: Advanced Cooling Technologies, Inc. (Lancaster, PA) will adapt their combustor design to ensure 99.5% methane destruction efficiency for the highly variable gas sent to flares; the combustors will be made of silicon carbide, which can withstand more than 2500 degrees Fahrenheit, using a new 3D printing process, (selection amount: \$3,300,000); Cimarron Energy, Inc. (Houston, TX) proposes a hybrid flare design coupled with advanced controls to ensure 99.5% destruction efficiency for flares that handle both high- and low-pressure gas streams, (selection amount: \$1,000,000); University of Michigan (Ann Arbor, MI) will use additive manufacturing and machine learning to scale up their advanced burner which will be incorporated into a new flare system design that is robust to cross winds and low load conditions which can lead to poor methane destruction efficiency, (selection amount: \$2,881,762); University of Minnesota (Minneapolis, MN) will use plasma-assisted combustion to enhance flare methane destruction efficiency, (selection amount: \$2,141,876); and Methane from Coal Mine Shafts: Johnson Matthey, Inc. (Wayne, PA) is developing new technology, which uses a noble metal catalyst to combust the dilute methane in coal mine ventilation systems, (selection amount: \$4,346,015); Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, MA) is developing a low-cost copper-based catalyst for reducing methane emissions, (selection amount: \$2,020,903); and Precision Combustion, Inc. (North Haven, CT) proposes an innovative modular system that promotes methane reaction and manages thermal loads in a novel reactor design, (selection amount: \$3,720,317).”).

⁸⁵¹ United States Advanced Research Projects Agency-Energy (8 April 2021) *Reducing Emissions of Methane Every Day of the Year*, ARPA-E Programs (“Program Description: REMEDY (Reducing Emissions of Methane Every Day of the Year) is a three-year, \$35 million research program to reduce methane emissions from three sources in the oil, gas, and coal value chains: 1) Exhaust from 50,000 natural gas-fired lean-burn engines. These engines are used to

drive compressors, generate electricity, and increasingly repower ships. 2) The estimated 300,000 flares required for safe operation of oil and gas facilities. 3) Coal mine ventilation air methane (VAM) exhausted from 250 operating underground mines. These sources are responsible for at least 10% of U.S. anthropogenic methane emissions. Reducing emissions of methane, which has a high greenhouse gas warming potential, will ameliorate climate change.”).

⁸⁵² United States Advanced Research Projects Agency-Energy (30 September 2020) *Prevention and Abatement of Methane Emissions* (“We’re open to all options – but specifically are looking for solutions that: Prevent methane emissions from anthropogenic activities. In other words, solutions which intervene before anthropogenic emissions escape to the atmosphere. Abate methane emissions at their source. Sources include vents, leaks, and exhaust stacks. Remove methane from the air. As mentioned above, methane only lasts about 9 years in the atmosphere. Nature is very good at getting rid of methane using reactions in the atmosphere and methanotrophs in the soil. Maybe we can learn from Nature, and help her out.”). See also Lewnard J. (16 November 2020) *REMEDY – Reducing Emissions of Methane Every Day of the Year*, ARPA-E Presentation, Slide 7 (“Example Potential Approaches, Not Intended to Limit or Direct ... “Geo-engineering”: Accelerate tropospheric reactions; Accelerate soil/methanotroph reactions”).

⁸⁵³ See *CHIPS and Science Act*, Pub. L. No. 117-167 § 10771 (2022); United States Senate (2022) *CHIPS and Science Act of 2022: Section-by-Section Summary*; and White House (9 August 2022) *FACT SHEET: CHIPS and Science Act Will Lower Costs, Create Jobs, Strengthen Supply Chains, and Counter China*, Briefing Room; discussed in Meyer R. (10 August 2022) *Congress Just Passed a Big Climate Bill. No, Not That One.*, THE ATLANTIC (“The bill could direct about \$12 billion in new research, development, and demonstration funding to the Department of Energy, according to RMI’s estimate. That includes doubling the budget for ARPA-E, the department’s advanced-energy-projects skunk works.”); and Ovide S. (10 August 2022) *Taxpayers for U.S. Chips*, THE NEW YORK TIMES.

⁸⁵⁴ *CHIPS and Science Act of 2022*, Pub. L. No. 117-167 (2022) § 10221 (“The Director, in collaboration with the Administrator of the National Oceanic and Atmospheric Administration, the Administrator of the Environmental Protection Agency, and the heads of other Federal agencies, as appropriate, shall establish a Center for Greenhouse Gas Measurements, Standards, and Information...”); discussed in Meyer R. (10 August 2022) *Congress Just Passed a Big Climate Bill. No, Not That One.*, ATLANTIC (“The CHIPS Act is not a comprehensive climate bill in the same way that the Inflation Reduction Act, or IRA, is. Unlike the IRA, the CHIPS bill isn’t supposed to drive immediate reductions in carbon pollution or subsidize the replacement of fossil fuels with cleaner alternatives. It probably won’t help the United States get closer to achieving its 2030 target under the Paris Agreement. Instead, the bill’s programs focus on the bleeding edge of the decarbonization problem, investing money in technology that should lower emissions in the 2030s and beyond. That’s an important role in its own right. The International Energy Association has estimated that almost half of global emissions reductions by 2050 will come from technologies that exist only as prototypes or demonstration projects today.”).

⁸⁵⁵ Natural Resources Defense Council (2022) *REGENERATIVE AGRICULTURE: FARM POLICY FOR THE 21ST CENTURY*, 7 (“Currently, federal agricultural policy disproportionately serves industrial agriculture over regenerative agriculture. To learn more about how we can change policy to advance regenerative agriculture, we interviewed 113 farmers and ranchers across the country. Our interviewees told us what regenerative agriculture means to them, the opportunities to bring more acres under regenerative management, and the barriers standing in the way. They stressed that the larger food system needs reform to enable more regenerative agriculture and to support existing regenerative growers.”); 19 (“On the former point, federal farm subsidies, including crop insurance and direct payment programs, cost more than \$68.1 billion annually.⁵⁶ These subsidies disproportionately support a few commodity crops (e.g., corn, soybeans, wheat, cotton, and sugar), which encourages and provides a safety net for large, monoculture farms. These same commodity subsidies benefit the livestock industry by providing a cheap source of feed that flows to industrial feedlots.⁵⁷ Regenerative farmers, however, try to grow a diversity of crops and vegetables that do not receive the same level of support from these federal subsidies.⁵⁸ Moreover, government subsidies artificially lower the price of some crops, making it harder for regenerative producers to compete in the market.”). See also Laborde D., Mamun A., Martin W., Piñeiro V., & Vos R. (2021) *Agricultural subsidies and global greenhouse gas emissions*, NAT. COMMUN.

12(2601): 1–9; Ding H., Markandya A., Feltran-Barbieri R., Calmon M., Cervera M., Duraisami M., Singh R., Warman J., & Anderson W. (2021) *Repurposing Agricultural Subsidies to Restore Degraded Farmland and Grow Rural Prosperity*, World Resources Institute; and Food and Agriculture Organization, United Nations Development Programme, & United Nations Environment Programme (2021) *A MULTI-BILLION-DOLLAR OPPORTUNITY – REPURPOSING AGRICULTURAL SUPPORT TO TRANSFORM FOOD SYSTEMS*.

⁸⁵⁶ United States White House (2023) *ACCELERATING PROGRESS: DELIVERING ON THE U.S. METHANE EMISSIONS REDUCTION ACTION PLAN*, 3 (“Meanwhile, USDA has invested more than \$500 million to help farmers cut methane emissions under the Partnerships for Climate- Smart Commodities program, extended more than \$150 million to support biogas projects under the Rural Energy for America Program, and offered local governments \$9 million to reduce food waste under Composting and Food Waste Reduction cooperative agreements.”).

⁸⁵⁷ United States White House (2023) *ACCELERATING PROGRESS: DELIVERING ON THE U.S. METHANE EMISSIONS REDUCTION ACTION PLAN*, 7 (“Meanwhile, USDA’s Agricultural Research Service is investing over \$8 million annually in multi-year methane research projects focused on manure management processes, anaerobic digesters, feed additives and diet formulation, methane measurement, and rice breeding and management practices. USDA’s National Institute of Food and Agriculture similarly funded two \$5 million research and extension projects in 2023 to reduce enteric methane emissions from beef and dairy production systems.”).

⁸⁵⁸ Gustin G. (22 December 2023) *Reducing Methane From Livestock Is Critical for Stabilizing the Climate, but Congress Continues to Block Farms From Reporting Emissions Anyway*, INSIDE CLIMATE NEWS (“Written into a must-pass spending bill the House approved in November, the provision prevents the government from funding a law that requires big livestock farms to report how much methane their operations emit. Every spending bill Congress has passed in the last 14 years has contained similar disabling language. In effect, while Congress has said it wants big farms to report some of their methane emissions, it has also said it won’t give regulators money to do that.”).

⁸⁵⁹ White House Office of Domestic Climate Policy (2021) *U.S. Methane Emissions Reduction Action Plan*, 10–11 (“As a complement to EPA’s updated landfill regulations, EPA’s voluntary Landfill Methane Outreach Program (LMOP) supports development of landfill gas energy projects by providing technical support at regulated landfills and helping smaller, unregulated landfills collect and direct methane gas into the renewable gas energy marketplace. This support includes connecting landfill owners and operators with LMOP Partners experienced in project development, providing technical tools and resources to facilitate project development. ... Under the Biden-Harris Administration, USDA, EPA, and the U.S. Food and Drug Administration (FDA) are working more closely than ever to make the goal of 50% reduced food loss and waste by 2030 a reality. The Administration’s vision for reducing food loss and waste seeks to improve food security and nutrition, increase farmer income and rural prosperity, reduce pressure on natural resources, and meet greenhouse gas emissions reduction targets. ... The USDA is leveraging its authority under a variety of existing programs to encourage farmers and ranchers to install or upgrade equipment and/or adopt new practices that improve manure management and can substantially reduce methane emissions, in a way that also advances environmental justice. The Natural Resources Conservation Service (NRCS), for example, will provide incentives and technical assistance through Farm Bill programs such as the Environmental Quality Incentives Program (EQIP) and the Conservation Stewardship Program (CSP) to upgrade existing anaerobic lagoons by installing covers and collecting methane for use or destruction; installing anaerobic methane digesters that collect methane for use or destruction; install solid separators that reduce methane-producing slurries; providing conservation assistance for transitions to alternative manure management systems, such as deep pits, composting, transitions to pasture, or other practices that have a lower greenhouse gas profile; and supporting rice management that reduces methane emissions, such as alternate wetting and drying.”).

⁸⁶⁰ United States Environmental Protection Agency (29 August 2016) *Emission Guidelines and Compliance Times for Municipal Solid Waste Landfills*, FED. REG. 81(167): 59276–59330, 59276, 59305 (codified at 40 C.F.R. Part 60) (“The EPA estimates that the final rule will achieve nearly an additional 3 percent reduction in NMOC from existing landfills, or 1,810 Mg/yr, when compared to the baseline, as shown in Table 2 of this preamble. The final rule would

also achieve 0.285 million Mg of methane reductions (7.1 million mtCO₂e) in 2025. These reductions are achieved by reducing the NMOC threshold from 50 Mg/yr to 34 Mg/yr open landfills.”). *See also* United States Environmental Protection Agency (29 August 2016) *Standards of Performance for Municipal Solid Waste Landfills*, FED. REG. 81(167): 59332–59384, 59332, 59362 (codified at 40 C.F.R. Part 60) (“The EPA estimates that the final rule will achieve nearly an additional 3 percent reduction in NMOC from new, reconstructed, or modified landfills, or 281 Mg/yr, when compared to the baseline, as shown in Table 2 of this preamble. The final rule would also achieve 44,300 Mg/yr of methane reductions (1.1 million mtCO₂e/yr). These reductions are achieved by reducing the NMOC threshold from 50 Mg/yr to 34 Mg/yr.”); *and* United States Environmental Protection Agency (2023) *Wasted Food Scale* (“The Wasted Food Scale prioritizes actions that prevent and divert wasted food from disposal. Tiers of the scale highlight different pathways for preventing or managing wasted food, arranged in order from most preferred on the top left to least preferred on the top right. Within a given tier, pathways are ranked equally. The most preferred pathways – prevent wasted food, donate and upcycle food – offer the most benefits to the environment and to a circular economy. These “top” pathways prioritize using food for its intended purpose: to nourish people. The least preferred pathways – landfilling, incineration, and sending food down the drain – have the largest environmental impacts and have limited potential for circularity. Learn more about the wasted food pathways on the scale.”).

⁸⁶¹ Wallace J. (1 February 2024) *Senate hearing puts landfill methane reduction strategies in the spotlight*, WASTE DIVE (“The hearing included discussion of actions EPA could take, including updating emissions standards for landfills and contracting with satellite emissions tracking firms. ... Witnesses at a Senate Committee on Environment & Public Works hearing on Wednesday called on the federal government to ramp up its support for landfill emissions monitoring and mitigation efforts, noting regulators are facing a series of deadlines to reduce methane. Committee Chair Tom Carper, D-Del., said the waste sector needs to deploy “innovative methods” to address methane, a greenhouse gas about 80 times more potent than carbon dioxide within a 20-year time frame.”) *See also* United States Senate Committee on Environment and Public Works (31 January 2024) *Avoiding, Detecting, and Capturing Methane Emissions from Landfills*.

⁸⁶² *See* United States Environmental Protection Agency (last updated 13 August 2023) *Livestock Anaerobic Digester Database* (Tracking anaerobic digester projects in the U.S.); *and* United States Environmental Protection Agency (last updated 3 August 2023) *LMOP Landfill and Project Database* (Tracking U.S. landfills, including candidates for landfill gas energy projects.).

⁸⁶³ Environmental Protection Agency (2023) *QUANTIFYING METHANE EMISSIONS FROM LANDFILLED FOOD WASTE*. *See also* Environmental Protection Agency (2023) *Wasted Food Scale* (“The Wasted Food Scale prioritizes actions that prevent and divert wasted food from disposal. Tiers of the scale highlight different pathways for preventing or managing wasted food, arranged in order from most preferred on the top left to least preferred on the top right. Within a given tier, pathways are ranked equally. The most preferred pathways – prevent wasted food, donate and upcycle food – offer the most benefits to the environment and to a circular economy. These “top” pathways prioritize using food for its intended purpose: to nourish people. The least preferred pathways – landfilling, incineration, and sending food down the drain – have the largest environmental impacts and have limited potential for circularity. Learn more about the wasted food pathways on the scale.”); *and* McCarthy G. (11 October 2023) *Methane from landfills is another climate emergency. Here’s how to fix it*, THE HILL (“We have solutions. It starts with waste prevention, food donation and organics recycling. They all help avoid landfill methane generation and ensure materials are put to higher, better use, as outlined in the Environmental Protection Agency’s recently updated wasted food scale.”).

⁸⁶⁴ United States Environmental Protection Agency (2023) *QUANTIFYING METHANE EMISSIONS FROM LANDFILLED FOOD WASTE*, iii (“Most estimates of methane emissions from landfills are calculated based on the biodegradation of municipal solid waste (MSW) as a whole. National estimates of methane emissions from particular components of the organic fraction of MSW, such as food waste, have not been previously quantified by EPA. In the United States, a significant fraction of food waste generated is sent to landfills (U.S. EPA, 2020a). In this analysis, EPA has quantified the methane emissions released into the atmosphere from degrading food waste in MSW landfills in the United States

from 1990 to 2020. There is no other peer-reviewed national reference point for the amount of methane emissions attributable to food waste in U.S. MSW landfills.”).

⁸⁶⁵ United States Environmental Protection Agency (2023) [QUANTIFYING METHANE EMISSIONS FROM LANDFILLED FOOD WASTE](#), 10 (“While total emissions from MSW landfills are decreasing, methane emissions from landfilled food waste are increasing. As shown in Figure 3, total methane emissions from MSW landfills decreased by 43 percent from 1990 to 2020 as federal and state regulations for gas collection requirements expanded. This has led to improvements in national gas collection efficiencies as more landfills have controlled their emissions, particularly at later points of the landfill lifetime (where gas generation is dominated by paper products and other non-food waste components). During this same time period, methane emissions from landfilled food waste increased steadily by 295 percent. This is due to annual increases in the amount of food and all other MSW components being landfilled. Food waste emissions occur earlier and landfill operators are collecting more gas later in the landfill lifetime. Thus, for materials like biodegradable textiles, paper products, and wood, which degrade more slowly, more of the landfill gas is collected.”).

⁸⁶⁶ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) [Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial](#) (“The United States announced new steps on waste methane. The Environmental Protection Agency (EPA) is planning a rule-making to review and, if appropriate, revise its Clean Air Act emission standards for new and existing municipal solid waste landfills, considering new monitoring technology, incentivization of organics waste diversion, and emissions controls at landfills not currently covered by current regulations. In 2024, EPA will release updates on emissions estimates for MSW landfills. In addition, the United States released for public comment a draft national strategy for Reducing Food Loss and Waste and Recycling Organics in line with its 2030 50% food loss and waste reduction goal.”).

⁸⁶⁷ Clean Air Act of 1970, 42 U.S.C. §7411(b). *See also* Environmental Integrity Project, *et al.* (22 June 2023) [Petition for Rulemaking to Revise the New Source Performance Standards and Emission Guidelines for Municipal Solid Waste Landfills](#), 2 (“In August of 2024, EPA is legally required under the Clean Air Act to reassess whether its standards require the best systems of emission reduction for landfills. However, EPA should not wait until it is compelled to act. The Agency can and should immediately commence a rulemaking to revise and strengthen its nationwide Clean Air Act standards for landfills.”).

⁸⁶⁸ *See generally* Environmental Integrity Project (2023) [TRASHING THE CLIMATE: METHANE FROM MUNICIPAL LANDFILLS](#).

⁸⁶⁹ Oregon Department of Environmental Quality (*effective* 4 October 2021) [Landfill Gas Emissions 2021](#); and California Air Resources Board (2022) [2022 ANNUAL REPORT TO THE JOINT LEGISLATIVE BUDGET COMMITTEE ON ASSEMBLY BILL 32, 33](#) (“U.S. EPA promulgated updates to the Emission Guidelines and Compliance Times for Municipal Solid Waste Landfills, 40 CFR, Part 60, Subpart Cf (Emission Guidelines), which became effective on October 28, 2016. CARB submitted its State Plan to U.S. EPA in 2017 to demonstrate that CARB’s Landfill Methane Regulation is equivalent to, or more stringent than, the Emission Guidelines.”). *See also* Environmental Integrity Project, *et al.* (22 June 2023) [Petition for Rulemaking to Revise the New Source Performance Standards and Emission Guidelines for Municipal Solid Waste Landfills](#), 32–33 (“California, Oregon, and Maryland have surface emissions monitoring requirements that are more protective than EPA’s and demonstrate the importance and feasibility of stronger EPA requirements in four ways. First, the states require a walking pattern with no more than 25-foot intervals. When compared with EPA’s 30-meter (approximately 100 foot) intervals, these states require that more of the landfill’s surface is actually traversed and measured by the person conducting the monitoring. Second, landfill operators must show that surface methane levels averaged across measurements taken within 50,000 square foot gridded sections of the landfill do not exceed 25 ppm (referred to as integrated monitoring) in addition to showing that levels at individual locations do not exceed 500 ppm (instantaneous monitoring). If either the instantaneous or integrated measurements exceed the specified limits, corrective action must be taken and the site re-monitored. California is currently considering reducing its instantaneous threshold to 200 ppm. Third, the states require better

reporting of surface methane levels. Maryland and Oregon require submission of a report within 30 days following sampling. California and Oregon require reporting of all instantaneous measurements above 200 ppm, and Oregon requires reporting of instantaneous measurements over 100 ppm. Maryland requires reporting of “all results of surface emissions monitoring” with levels above 100 ppm clearly identified. Fourth, California limits the meteorological conditions under which monitoring can occur: average wind speeds must be less than 5 mph and instantaneous speeds less than 10 mph; and there must have been no measurable precipitation within the preceding 72 hours.”).

⁸⁷⁰ State of Washington Department of Ecology, *Chapter 173-408 WAC Landfill Methane Emissions* (last visited 1 December 2023) (“Ecology proposes a new rule: Chapter 173-408 WAC, Landfill Methane Emissions. The purpose of this rulemaking is to implement Chapter 70A.540 RCW, Landfills – Methane Emissions.”).

⁸⁷¹ The U.S. EPA promulgated a New Source Performance Standard (NSPS) for municipal solid waste landfills in 2016, but the EPA delayed implementation during the Trump administration. In 2021, the EPA issued a new final rule creating a federal implementation plan for states that have not submitted implementation plans and issuing new regulations for states to submit state implementation plans. See United States Environmental Protection Agency (published 21 May 2021, effective 21 June 2021) *Federal Plan Requirements for Municipal Solid Waste Landfills That Commenced Construction On or Before July 17, 2014, and Have Not Been Modified or Reconstructed Since July 17, 2014*, FED. REG. 86: 27756–27790, 27756 (“In this action, the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) is promulgating a Federal plan to implement the Emission Guidelines (EG) and Compliance Times for Municipal Solid Waste (MSW) Landfills (2016 MSW Landfills EG) for existing MSW landfills located in states and Indian country where state plans or tribal plans are not in effect. This MSW Landfills Federal Plan includes the same elements as required for a state plan: Identification of legal authority and mechanisms for implementation; inventory of designated facilities; emissions inventory; emission limits; compliance schedules; a process for the EPA or state review of design plans for site-specific gas collection and control systems (GCCS); testing, monitoring, reporting and record keeping requirements; and public hearing requirements. Additionally, this action summarizes implementation and delegation of authority of the MSW Landfills Federal Plan.”). See also Congressional Research Service (20 September 2022) *The Legal Framework for Federal Methane Regulation* (“Under the CAA Landfills account for approximately 17% of methane emissions in the United States. EPA promulgated a new NSPS for municipal solid waste landfills in 2016. 81 Fed. Reg. 59,276. The 2016 rule amended an earlier NSPS issued in 1996. The 2016 rule applies to landfills built, modified, or reconstructed after July 17, 2014, with a design capacity of at least 2.5 million metric tons. The rule reduced the threshold for when a landfill has to capture landfill gases from 50 metric tons per year of nonmethane organic compounds to 34 metric tons. The rule also altered monitoring requirements and expanded approved uses for landfill gas. Emissions guidelines for existing municipal solid waste facilities largely tracks the limitations in the NSPS for new landfills with the notable exception that the guidelines kept the threshold for capturing landfill gasses at 50 metric tons for closed landfills. During the Trump Administration, EPA delayed the implementation of the emissions guidelines, which delayed the submission and approval of SIPs. Forty-two states have yet to submit a SIP. On May 21, 2021, EPA issued a new final rule creating a federal implementation plan for states that have yet to submit a SIP and issuing new regulations for states to submit SIPs after the federal plan is in place. 86 Fed. Reg. 27,756.”).

⁸⁷² United States Environmental Protection Agency (last updated 4 April 2023) *United States 2030 Food Loss and Waste Reduction Goal* (“On September 16, 2015, the U.S. Department of Agriculture (USDA) and EPA announced the U.S. 2030 Food Loss and Waste Reduction goal, the first-ever domestic goal to reduce food loss and waste. The goal seeks to cut food loss and waste in half by the year 2030. By acting on this goal, the U.S. can reduce climate and environmental impacts associated with food loss and waste while improving food security and saving money for families and businesses. Led by EPA, USDA, and the Food and Drug Administration (FDA), the federal government is seeking to work with communities, organizations and businesses along with our partners in state, tribal and local government to achieve this goal.”).

⁸⁷³ United States Environmental Protection Agency (last updated 3 August 2023) *About the Landfill Methane Outreach Program* (“LMOP is a voluntary program that works cooperatively with industry stakeholders and waste officials to reduce or avoid methane emissions from landfills. LMOP encourages the recovery and beneficial use of

biogas generated from organic municipal solid waste (MSW). Landfill gas (LFG) and other biogas generated from MSW (collectively referred to as biogas) contain methane, a potent greenhouse gas that can be captured and used as a renewable fuel for many end uses including electricity generation, industrial heat applications and vehicle fuel. Capturing and using biogas reduces local air pollution, creates health benefits, generates revenue and jobs in the community and may also offset the use of non-renewable resources.”).

⁸⁷⁴ United States Environmental Protection Agency (last updated 4 August 2023) *Coal Mine Methane – What EPA is Doing* (“Since 1994, EPA’s Coalbed Methane Outreach Program (CMOP) has worked cooperatively with the coal mining industry in the United States – and other major coal-producing countries – to reduce CMM emissions. By helping to identify and implement methods to recover and use CMM instead of emitting it to the atmosphere, CMOP has played a key role in the United States’ efforts to reduce GHG emissions and address global climate change.”).

⁸⁷⁵ United States Environmental Protection Agency (last updated 11 December 2023) *What EPA is Doing: AgSTAR* (“AgSTAR promotes the use of biogas recovery systems to reduce methane emissions from livestock waste. Biogas recovery also helps achieve other social, environmental, agricultural and economic benefits. AgSTAR assists those who enable, purchase or implement anaerobic digesters by identifying project benefits, risks, options and opportunities. AgSTAR provides information and participates in events to create a supporting environment for anaerobic digester implementation.”).

⁸⁷⁶ United States Department of Agriculture, *Partnerships for Climate-Smart Commodities* (last visited 29 June 2023) (“USDA is investing more than \$3.1 billion for 141 projects through this effort and all the projects require meaningful involvement of small and underserved producers.”). See also United States Department of Agriculture (7 February 2022) *USDA to Invest \$1 Billion in Climate Smart Commodities, Expanding Markets, Strengthening Rural America*, Press Release (“Agriculture Secretary Tom Vilsack announced today at Lincoln University that the U.S. Department of Agriculture is delivering on its promise to expand markets by investing \$1 billion in partnerships to support America’s climate-smart farmers, ranchers and forest landowners. The new *Partnerships for Climate-Smart Commodities* opportunity will finance pilot projects that create market opportunities for U.S. agricultural and forestry products that use climate-smart practices and include innovative, cost-effective ways to measure and verify greenhouse gas benefits.”); and United States Department of Agriculture, *Partnerships for Climate-Smart Commodities* (last visited 5 February 2023) (“Highly competitive projects will include agricultural and forestry practices or combinations of practices, and/or practice enhancements that provide GHG benefits and/or carbon sequestration, including but not limited to: ... Manure management; Feed management to reduce enteric emissions Alternate wetting and drying on rice fields.”).

⁸⁷⁷ (19 November 2022) *COP27: ‘Global Methane Pledge’ Announces Pathway to Reduce Agriculture Emissions*, ASHARQ-AL-AWSAT (“IFAD and United States a partnership to advance climate resilience and methane mitigation with smallholder farmers including by prioritizing methane mitigation in IFAD’s pipeline of country and regional projects with combined investment of over \$500 million dollars in methane-emitting sectors. Washington announced \$5 million for the African Development Bank to advance agriculture and waste methane work within the Africa Climate Change Fund.”).

⁸⁷⁸ United States Department of Commerce (2023) *METHANE ABATEMENT FOR OIL AND GAS - A HANDBOOK FOR POLICYMAKERS*, 9 (“This handbook introduces government officials to a range of options for methane abatement in the oil and gas sector and guides the design and implementation of regulations. It builds on lessons learned from regulatory schemes in various countries. Government officials involved in all oil and gas sector aspects can benefit from this handbook.”). IGSD experts Gabrielle Dreyfus and Richard (“Tad”) Ferris were involved in commenting and proposing content for this Handbook.

⁸⁷⁹ United States Securities and Exchange Commission (2022) *The Enhancement and Standardization of Climate-Related Disclosures for Investors*, FED. REG. 87: 21334–21473, 21335, 21374 (“The proposed rules would require information about a registrant’s climate-related risks that are reasonably likely to have a material impact on its

business, results of operations, or financial condition. The required information about climate-related risks would also include disclosure of a registrant’s greenhouse gas emissions, which have become a commonly used metric to assess a registrant’s exposure to such risks. In addition, under the proposed rules, certain climate-related financial metrics would be required in a registrant’s audited financial statements. ... The proposed rules would define “greenhouse gases” as carbon dioxide (“CO₂”); methane (“CH₄”); nitrous oxide (“N₂O”); nitrogen trifluoride (“NF₃”); hydrofluorocarbons (“HFCs”); perfluorocarbons (“PFCs”); and sulfur hexafluoride (“SF₆”).”).

⁸⁸⁰ The Environmental Partnership, *Taking Action* (last visited 5 February 2023) (“The Environmental Partnership has developed six separate Environmental Performance Programs for participating companies to implement and phase into their operations [a pneumatic controller program, a manual liquids unloading program, a leak detection/repair program, a compressor program, a pipeline blowdown program, and a flare management program]. These programs were designed to further reduce emissions using proven, cost-effective technologies.”). See also The Environmental Partnership, *Participants* (last visited 26 January 2023).

⁸⁸¹ ONE Future Coalition, *About Us* (last visited 5 February 2023) (“The ONE Future Coalition is a group of more than 50 natural gas companies working together to voluntarily reduce methane emissions across the natural gas value chain to 1% (or less) by 2025 and is comprised of some of the largest natural gas production, gathering & boosting, processing, transmission & storage and distribution companies in the U.S. and represents more than 20% of the U.S. natural gas value chain.”).

⁸⁸² Natural Gas Sustainability Initiative (2021) *NGSI Methane Emissions Intensity Protocol Version 1.0* (“Version 1.0 of the Natural Gas Sustainability Initiative (NGSI) protocol details a methodology for companies to consistently calculate and report methane emissions intensity. The protocol is intended to support voluntary reporting by companies operating within the natural gas supply chain in the United States from onshore production through distribution. NGSI is a voluntary, industry-led initiative to advance innovative efforts to address environmental, social and governance (ESG) issues throughout the natural gas supply chain. Launched by a CEO task force on natural gas issues convened by the Edison Electric Institute (EEI) and the American Gas Association (AGA), NGSI is working to advance a voluntary, industry-wide approach for companies to report methane emissions intensity by the segments of the natural gas supply chain in which they operate.”).

⁸⁸³ See S.1863, PROVE IT Act of 2023. See also Office of Senator Chris Coons (9 August 2023) *Senators Coons, Cramer introduce legislation to study global emissions intensity and hold countries with dirty production accountable*, Press Release (“U.S. Senators Chris Coons (D-Del.) and Kevin Cramer (R-N.D.) today introduced the bipartisan Providing Reliable, Objective, Verifiable Emissions Intensity and Transparency (PROVE IT) Act that would direct the Department of Energy to conduct a comprehensive study comparing the emissions intensity of certain goods produced in the United States to the emissions of those same goods produced in the other countries. U.S. Senators Angus King (I-Maine), Lisa Murkowski (R-Alaska), Martin Heinrich (D-N.M.), Lindsey Graham (R-S.C.), Sheldon Whitehouse (D-R.I.), Bill Cassidy (R-La.), and John Hickenlooper (D-Colo.) are also co-sponsors.”).

⁸⁸⁴ U.S. Senate Committee on Environment & Public Works (18 January 2024) *Committee Business Meeting*; Hoening D., (30 January 2024) *The PROVE IT Act Explained* (“The Providing Reliable, Objective, Verifiable Emissions Intensity Act, or PROVE IT Act, directs the Department of Energy (DOE) to study and report the average emissions intensity of nearly two dozen products made in the United States and other major economies. It recently passed out of the Senate Environment and Public Works Committee (EPW) with a decisive and bipartisan vote. PROVE IT is led in the Senate by Sens. Chris Coons (D-DE) and Kevin Cramer (R-ND) with 11 additional co-sponsors: Sens. Angus King (I-ME), Lisa Murkowski (R-AK), Martin Heinrich (D-NM), Lindsey Graham (R-SC), Sheldon Whitehouse (D-RI), Bill Cassidy (R-LA), John Hickenlooper (D-CO), Dick Durbin (D-IL), John Boozman (R-AR), Alex Padilla (D-CA), and Mark Kelly (D-AZ). A companion PROVE IT bill in the House is anticipated, led by Reps. John Curtis (R-UT-3) and Scott Peters (D-CA-50).”).

⁸⁸⁵ Dumain E. (7 December 2023) *Popular Senate carbon tariff bill gains House champions*, E&E NEWS (“Sen. Sheldon Whitehouse has reintroduced his legislation to slap a tariff on carbon-intensive goods — this time in tandem with partners in the House. A House companion bill to the Rhode Island Democrat’s “Clean Competition Act,” to be championed by Rep. Suzan DelBene (D-Wash.), signals a new phase in the debate over how to tie climate policy to trade policy.”).

⁸⁸⁶ See generally House of Representatives (2023) *Clean Competition Act*.

⁸⁸⁷ S.B. 1383, 2016 Leg. (Cal. 2016) (“The California Global Warming Solutions Act of 2006 designates the State Air Resources Board as the state agency charged with monitoring and regulating sources of emissions of greenhouse gases. The state board is required to approve a statewide greenhouse gas emissions limit equivalent to the statewide greenhouse gas emissions level in 1990 to be achieved by 2020. The state board is also required to complete a comprehensive strategy to reduce emissions of short-lived climate pollutants, as defined, in the state. This bill would require the state board, no later than January 1, 2018, to approve and begin implementing that comprehensive strategy to reduce emissions of short-lived climate pollutants to achieve a reduction in methane by 40%, hydrofluorocarbon gases by 40%, and anthropogenic black carbon by 50% below 2013 levels by 2030, as specified. The bill also would establish specified targets for reducing organic waste in landfills.”). For further examples of methane action California is seeking to take See also S.B 781 2023 Leg (Cal. 2023) (“This bill would require the state board to annually request and incorporate, as part of this quantification for annual publication, information from utilities and other large gas users regarding any contract for and use of natural gas certified to have a methane emissions intensity of less than 0.2% across the natural gas supply chain, as data are available, or the use of other best practices to minimize emissions of methane and greenhouse gases from natural gas supplying California. The bill would also require the state board to quantify and publish annually, commencing January 1, 2025, an estimate of potential greenhouse gas emissions reductions associated with the use of natural gas certified to have a methane emissions intensity of less than 0.2% across the natural gas supply chain, as data are available, or the use of other best practices applied to natural gas supplies to California.”)

⁸⁸⁸ *Venting or Flaring Natural Gas*, 2 COLO. CODE REGS. § 404–1-903 (2022) (“Venting and Flaring of natural gas represent waste of an important energy resource and pose safety and environmental risks. Venting and Flaring, except as specifically allowed in this Rule 903, are prohibited.”).

⁸⁸⁹ Office of Governor Gavin Newsom (8 June 2022) *At Summit of the Americas, Governor Newsom Outlines California’s World-Leading Efforts to Cut Methane Pollution* (“The Governor’s California Climate Commitment, a historic \$47.1 billion proposal, includes \$200 million for remediating idle oil wells and \$100 million for the methane-detecting satellites. These satellites will be critical for California regulators to hold polluters accountable, and the rest of the world will benefit as well from transparent and timely access to data on leaks when they occur. The \$200 million would allow the State to quickly get to work plugging idle oil wells, especially orphaned idle wells, in anticipation of additional Federal support. The funding would also give the State the ability to expeditiously remediate wells owned by delinquent operators while regulators pursue reimbursement.”).

⁸⁹⁰ *Control of Ozone via Ozone Precursors and Control of Hydrocarbons via Oil and Gas Emissions (Emissions of Volatile Organic Compounds and Nitrogen Oxides)*, 5 COLO. CODE REGS. § 1001–1009 (2022) (“Natural Gas-Actuated Pneumatic Controllers Associated with Oil and Gas Operations”).

⁸⁹¹ Ozimek T. (13 October 2023) *New York’s Ban on Gas Stoves Hit With Lawsuit by Industry Groups*, NTD (“Several industry groups have filed a lawsuit to block New York’s controversial state ban on gas stoves and furnaces that came as dozens of Democrat-controlled cities and local governments took similar measures to fight the supposed dangers of climate change. The complaint, filed on Oct. 12 by the National Association of Home Builders, the National Propane Gas Association, and others, accuses New York State of violating federal law by banning gas stoves and other appliances in new buildings.”).

⁸⁹² State of California (24 October 2023) *Memorandum of Understanding to Enhance Cooperation on Green Development Between the Government of Guangdong Province and the Government of the State of California* (Section II of the MOU identifies areas of cooperation, including: “(i) Air Pollution Prevention and Control; (ii) Zero Emission Vehicles / New Energy Vehicles; (iii) Climate Change Mitigation, Carbon Neutrality, and Deep Decarbonization; (iv) Climate Change Adaptation; (v) Nature-Based Solutions and Biodiversity Protection; (vi) Carbon Capture, Storage and Utilization; (vii) Carbon Emissions Trading; (viii) Climate Investment and Financing; (ix) Other areas of mutual consent.”).

⁸⁹³ State of California (24 October 2023) *Memorandum of Understanding to Enhance Cooperation on Green Development Between the Government of Guangdong Province and the Government of the State of California* (Section IV outlines specific activities for the MOU, including “a) Providing mutual advice on emissions reductions and air pollution control programs and policies, including strategies for legal compliance and enforcement; b) Sharing information and experiences regarding policies, programs, and incentives to strengthen low carbon development, reduce air pollution and accelerate ZEV/NEV deployment across economic sectors and regions; c) Co-organizing policy seminars and informational exchanges on best practices, new technologies and business models for the decarbonization of transport, energy and industry; d) Organizing annual meetings focused on carbon neutrality planning, climate change mitigation and adaptation; e) Activities that advance exchange and mutual visits among concerned personnel, businesses, universities and academic institutions of the Participants, including but not limited to field visits, meetings and webinars; f) Organizing symposia, seminars, workshops, informational exchanges, exhibitions, trainings, and other mutually agreed engagements, as appropriate.”).

⁸⁹⁴ State of California (24 October 2023) *Memorandum of Understanding to Enhance Cooperation on Green Development Between the Government of Guangdong Province and the Government of the State of California* (Paragraph II sets out the areas of cooperation for this MOU, including: “1. Energy Efficiency; 2. Carbon Peaking and Carbon Neutrality; 3. Air Quality; 4. Climate Adaptation and Mitigation; 5. Clean Transportation; 6. Clean Energy and Low Carbon Development; 7. Nature-Based Climate Solutions; 8. Circular Economy.”).

⁸⁹⁵ State of California (24 October 2023) *Memorandum of Understanding to Enhance Cooperation on Green Development Between the Government of Guangdong Province and the Government of the State of California* (Article II lists areas for cooperation under the MOU, including: “• Environmental management legislation, policy and regulation; • Climate mitigation actions; • Climate adaptation actions; • Air quality management; Informational exchange and capacity building (technical training, lectures, workshops, etc.); • Public education on environmental protection; • Implementation of a pilot project of mutual interest and benefit to the Parties; and • Water quality management, solid waste management, biodiversity protection and other environmental affairs; • Cooperation may also be undertaken in other areas as agreed by the Parties.”).

⁸⁹⁶ State of California (28 October 2023) *Memorandum of Understanding on Enhancing Cooperation on Climate and the Environment Between Shanghai Municipal Bureau of Ecology and Environment of the People’s Republic of China and California Air Resources Board of the United States of America* (Section II identifies areas of cooperation under the MOU, including: “1. Air Quality; 2. Greenhouse Gas Emissions; 3. Clean Transportation, including Clean Ports and Green Shipping; 4. Clean Energy; 5. Climate Adaptation and Resilience; 6. Nature-Based Climate Solutions.”).

⁸⁹⁷ California Air Resources Board (3 December 2023) *California launches methane-cutting effort with subnational governments at COP28* (“California officially kicked off a new international climate initiative that creates a partnership of subnational governments that are committed to reducing methane today at the United Nations Climate Change Conference (COP28) hosted in Dubai. The effort, which was initially announced in September during Climate Week, has expanded to 15 signatories, which include additions from Brazil, Canada, South Korea, Bolivia, Germany, Spain, and the United States. The Subnational Methane Action Coalition creates collaboration with jurisdictions that oversee and regulate key sources of methane such as agriculture, energy and landfills to share goals and best practices in reducing the short-lived climate pollutant that accounts for almost 30% of current global warming and is 80 times more potent than carbon dioxide over a 20-year period.”).

⁸⁹⁸ See for example Climate & Clean Air Coalition, *Platform for Subnational Action to Reduce Short-Lived Climate Pollutants* (last visited 29 January 2024) (“The Climate and Clean Air Coalition's platform for subnational action drives comprehensive, integrated and region-wide climate actions to reduce short-lived climate pollutants (SLCPs) that can maximize air quality, human health and climate co-benefits. Many SLCP measures identified by UN Environment, the World Meteorological Organisation and the Coalition require the full engagement of subnational governments. Currently, more than 100 subnational governments are engaged in Coalition activities. Subnational governments that engage in the Coalition work together to: Empower and facilitate actions to reduce SLCPs, with a focus on integrating climate and clean air policies that reduce SLCPs. Showcase actions and share experience on integrating climate and clean air policies in cooperation with Coalition partners and initiatives. Access tools, including the Solution Centre and scientific updates from the Coalition's Scientific Advisory Panel. Enhance progress towards achieving the goals of the Paris Agreement in the context of the implementation of the Sustainable Development Goals.”).

⁸⁹⁹ International Energy Agency, *Global Methane Pledge* (last visited 24 January 2024) (“The Global Methane Pledge was launched at COP26 in November 2021 to catalyse action to reduce methane emissions. Led by the United States and the European Union, the Pledge now has 111 country participants who together are responsible for 45% of global human-caused methane emissions.”).

⁹⁰⁰ United States Department of State (2 December 2023) *Accelerating Fast Mitigation: Summit on Methane and Non-CO2 Greenhouse Gases* (“The United States, People’s Republic of China, and United Arab Emirates today convened a Summit to accelerate actions to cut methane and other non-CO2 greenhouse gases as the fastest way to reduce near-term warming and keep a goal of limiting global average temperature increase to 1.5 degrees Celsius within reach.”).

⁹⁰¹ Executive Body Working Group on Strategies and Review (30 September 2020) *Preparations for the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2020/3 – EBE/EB.AIR/WG.5/2020/3 at ¶ 20, (“As per the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond (paragraph 50), the review should look at appropriate steps towards reducing emissions of black carbon, ozone precursors not yet addressed such as methane, and emissions from shipping with due consideration for International Maritime Organization (IMO) policies and measures... In line with the priorities identified in the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond, the following should specifically be considered in answering the questions in annex I: (b) Hemispheric transport of ozone and particulate matter and their precursors and advancing efforts to address air pollution on a broader scale per paragraphs 63 and 78 of the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond; health and ecosystem impacts from outside the ECE region; I Methane and its relationship to the hemispheric transport of ozone and its contribution to ozone in the ECE region ...”).

⁹⁰² White House (29 June 2016) *Leaders’ Statement on a North American Climate, Clean Energy, and Environment Partnership*, Statements and Releases (“Today, Mexico will join Canada and the United States in committing to reduce their methane emissions from the oil and gas sector – the world’s largest industrial methane source – 40% to 45% by 2025, towards achieving the greenhouse gas targets in our nationally determined contributions. To achieve this goal, the three countries commit to develop and implement federal regulations to reduce emissions from existing and new sources in the oil and gas sector as soon as possible. We also commit to develop and implement national methane reduction strategies for key sectors such as oil and gas, agriculture, and waste management, including food waste.”). See also White House (29 June 2016) *North American Climate, Clean Energy, and Environment Partnership Action Plan*, Statements and Releases (“Reduce methane emissions from the oil and gas sector, the world’s largest industrial methane source, 40-45% by 2025 towards achieving the greenhouse gas targets in our nationally determined contributions, and explore additional opportunities for methane reductions. The three countries commit to develop and implement federal regulations for both existing and new sources as soon as possible to achieve the target. We intend to invite other countries to join this ambitious target or develop their own methane reduction goal.”).

⁹⁰³ United States White House (29 June 2016) *Leaders' Statement on a North American Climate, Clean Energy, and Environment Partnership*, Statements and Releases (“Today, Mexico will join Canada and the United States in committing to reduce their methane emissions from the oil and gas sector – the world’s largest industrial methane source – 40% to 45% by 2025, towards achieving the greenhouse gas targets in our nationally determined contributions. To achieve this goal, the three countries commit to develop and implement federal regulations to reduce emissions from existing and new sources in the oil and gas sector as soon as possible. We also commit to develop and implement national methane reduction strategies for key sectors such as oil and gas, agriculture, and waste management, including food waste.”). *See also* United States White House (29 June 2016) *North American Climate, Clean Energy, and Environment Partnership Action Plan* (“Reduce methane emissions from the oil and gas sector, the world’s largest industrial methane source, 40-45% by 2025 towards achieving the greenhouse gas targets in our nationally determined contributions, and explore additional opportunities for methane reductions. The three countries commit to develop and implement federal regulations for both existing and new sources as soon as possible to achieve the target. We intend to invite other countries to join this ambitious target or develop their own methane reduction goal.”).

⁹⁰⁴ United States White House (12 July 2022) *President Biden and President Lopez Obrador Joint Statement*, Statements and Releases (“We commit to tackle methane emissions from oil and gas and other sectors, accelerate the transition to zero-emission vehicles, and deepen our efforts to seek nature-based solutions, enabling our two countries to become global leaders in clean energies and actions to combat climate change. In support of the Global Methane Pledge and Global Methane Pledge Energy Pathway, Mexico and Pemex, in cooperation with the U.S., will develop an implementation plan to eliminate routine flaring and venting across onshore and offshore oil and gas operations and identify priority projects for investment.”).

⁹⁰⁵ United States White House (25 March 2022) *Joint Statement between the United States and the European Commission on European Energy Security*, Statements and Releases (“The United States will strive to ensure, including working with international partners, additional liquefied natural gas (LNG) volumes for the EU market of at least 15 bcm in 2022 with expected increases going forward. The United States and European Commission will undertake efforts to reduce the greenhouse gas intensity of all new LNG infrastructure and associated pipelines, including through the use of clean energy to power onsite operations, the reduction of methane leakage, and the construction of clean and renewable hydrogen ready infrastructure. The United States commits to maintaining an enabling regulatory environment with procedures to review and expeditiously act upon applications to permit any additional export LNG capacities that would be needed to meet this emergency energy security objective and support the RePowerEU goals, affirming the joint resolve to terminate EU dependence on Russian fossil fuels by 2027.”).

⁹⁰⁶ United States Federal Energy Regulatory Commission (24 March 2022) *FERC Seeks Comment on Draft Policy Statements on Pipeline Certification*, News Releases (“FERC today voted to seek comments on two policy statements it issued last month that provide guidance regarding the certification of interstate natural gas pipelines and consideration of greenhouse gas (GHG) emissions in natural gas project reviews. In February, the Commission issued an update to its 1999 Certificate Policy Statement and also issued an interim policy statement focused on the Commission’s assessment of the impact of a project’s GHG emissions. After further consideration, the Commission today designated both documents as draft policy statements on which the Commission is seeking further public comment. The two draft policy statements will not apply to pending project applications or filed applications before the Commission issues any final guidance in these dockets.”); *discussed in* Willson M. (23 March 2022) *FERC retreats on gas policies as chair pursues clarity*, ENERGYWIRE (“The Federal Energy Regulatory Commission has rolled back sweeping new policies for large natural gas projects, including a framework for assessing how pipelines and other facilities contribute to climate change, weeks after prominent lawmakers panned the changes. In a decision issued unanimously at the commission’s monthly meeting yesterday, FERC will revert back to its long-standing method for reviewing natural gas pipeline applications — while opening changes announced in February to feedback rather than applying them immediately. While the policy changes issued in February were intended to update and improve the agency’s approach for siting new gas projects, the commission has concluded that the new guidelines ‘could benefit from further clarification,’ said FERC Chair Richard Glick. ‘I’m all for providing further clarity, not only for industry

but all stakeholders in our proceedings, including landowners and affected communities,’ said Glick, a Democrat who supported the initial changes.”).

⁹⁰⁷ McKibben B. (October 31 2023) *A Smoking Gun for Biden’s Big Climate Decision?*, NEW YORKER (“The Biden Administration faces one of its most profound climate choices this autumn: Should it continue to allow the expansion of liquefied-natural-gas exports, or should it halt the rapid buildout of this industry at least until it can come up with new guidelines? The stakes are enormous—the buildout of L.N.G. infrastructure in the United States is by far the largest example of fossil-fuel expansion currently proposed anywhere in the world. But there’s some new data that may make the Administration’s choice easier—or certainly starker. The data are from an analysis by Robert Warren Howarth, a professor of ecology and environmental biology at Cornell who is one of the world’s premier methane scientists. The analysis attempts to establish the greenhouse-gas footprint of L.N.G. exported to Europe and Asia, and the numbers presented are astonishing. Coal-fired power has long been the standard for measuring climate damage: when burned, coal releases carbon dioxide into the air in large quantities. In recent years, Howarth has demonstrated that, domestically, natural gas is no better for the climate than coal, largely owing to the methane leaks associated with it; now, though, it appears that exporting L.N.G., because of the extra leakage of the supercooled gas during transit, could allow even larger amounts of methane to escape into the atmosphere and, hence, could do much more damage to the climate than coal does.”).

⁹⁰⁸ Thompson R. L. & Peters G. (25 April 2022) *How achievable is the Methane Pledge?*, CICERO (“Although world leaders are rightfully concerned about the war in Ukraine, it is important that they do not forget the Methane Pledge. Tackling methane emissions now is a must in order to have a chance of limiting global warming to 1.5°C. It is technically feasible to make significant reductions by 2030 - about 24% relative to 2020 levels given the projected production increases. Achieving the Methane Pledge of 30% will be very challenging but not impossible if increases in production could be curbed as well. The deciding factor is how quickly governments, businesses and local authorities will act.”).

⁹⁰⁹ United States White House (12 May 2022) *FACT SHEET: U.S.-ASEAN Special Summit in Washington, DC*, Statements and Releases (“Reducing Methane Emissions: The United States is committed to working with the nations of Southeast Asia to reduce the region’s methane emissions. The United States welcomed Indonesia, Vietnam, Malaysia, the Philippines, and Singapore joining the Global Methane Pledge at COP-26, and we are accelerating technical assistance, financial resources, and project pipeline development for methane mitigation in Global Methane Pledge countries, including through the EPA, USTDA, DFC, and EXIM, as well as the newly-created Global Methane Hub, a philanthropic fund that can support methane mitigation priorities in the region.”).

⁹¹⁰ United States Department of Energy Office of International Affairs (22 August 2022) *United States and Brazil Strengthen Bilateral Cooperation on Energy and Launch a New Public Private Cooperation to Promote Clean Energy*, Press Release (“The United States of America and the Federative Republic of Brazil reaffirmed today their commitment to joint energy cooperation at the second U.S.-Brazil Energy Forum (USBEP) Ministerial in Washington, D.C. Secretary of Energy Jennifer Granholm hosted the meeting with Brazil’s Minister of Mines and Energy Adolfo Sachsida. The USBEP was established as a mechanism to collaborate on technical, regulatory, and policy issues of mutual interest, as well as address critical barriers to bilateral energy trade and investment. Secretary Granholm and Minister Sachsida endorsed a bilateral cooperation plan for technical, regulatory, and policy cooperation in three areas: Carbon and Methane Management, Civil Nuclear Power, and Renewables, Energy Efficiency, and Grid Modernization: • The two governments agreed to exchange expertise in carbon and methane management, and carbon sequestration and storage. • There was also agreement to continue and expand cooperation on civil nuclear power and launch new efforts on civil nuclear regulation and new nuclear power generation. • The Ministers emphasized their interest in increasing the cooperation on renewable energy and energy efficiency, particularly on strategic sectors such as clean hydrogen, offshore wind, sustainable fuels, grid modernization and storage, and industrial energy efficiency.”).

⁹¹¹ Vasconcellos R. B. (4 August 2022) *Energy Is Up on U.S.-Brazil Relations*, United States Chamber of Commerce (“Offshore wind energy is a common priority for these two continental countries, and there is fertile ground for a productive dialogue on this topic. Wind (albeit onshore) already plays an important role as a source of energy in diversifying Brazil’s energy grid, ranking second (13.4%) behind only hydropower (56.7%). Meanwhile, the U.S. contribution will come from the U.S. administration’s vision of wind as a key pillar of the U.S. clean energy agenda and its work towards the deployment of 30 GW of offshore wind by 2030. Collaboration on sustainable fuels is also important for the dialogue. Brazil is known for having vehicles running on ethanol derived from sugarcane since the 1970s. On the other hand, U.S. industry, inspired by the U.S. administration’s ambitious goal to rapidly increase the production of sustainable aviation fuels by 2030, has a lot of knowledge to offer to Brazil and the Latin America region.”).

⁹¹² United States Department of State (3 May 2023) *Joint Statement on the United States-Turkmenistan Annual Bilateral Consultations*, Press Release (“The United States and Turkmenistan emphasized the importance of fighting climate change, particularly by reducing methane emissions. The United States and Turkmenistan stated their intentions to cooperate on deploying leak detection and repair solutions as well as develop a methane reduction investment plan in 2023 to control methane emissions in the oil and gas sector. To advance this work, the United States and Turkmenistan will form a working group on methane mitigation and will endeavor to feature methane mitigation outcomes by COP28.”).

⁹¹³ United States Department of State (3 May 2023) *Joint Statement on the United States-Turkmenistan Annual Bilateral Consultations*, Press Release (“The United States and Turkmenistan emphasized the importance of fighting climate change, particularly by reducing methane emissions. The United States and Turkmenistan stated their intentions to cooperate on deploying leak detection and repair solutions as well as develop a methane reduction investment plan in 2023 to control methane emissions in the oil and gas sector. To advance this work, the United States and Turkmenistan will form a working group on methane mitigation and will endeavor to feature methane mitigation outcomes by COP28.”). See also Clarke, A. (2 December 2023) *US-Turkmenistan Methane Deal Progresses With Engineers on Ground*, BLOOMBERG (“Foreign petroleum engineers are in the reclusive state of Turkmenistan laying the groundwork for a plan to curb the nation’s giant methane emissions with potential help from the US government.”).

⁹¹⁴ The White House (20 April 2023) *FACT SHEET: President Biden to Catalyze Global Climate Action through the Major Economies Forum on Energy and Climate*, Statements and Releases (“The President will be joined by other leaders in new efforts aimed at accelerating progress in four key areas necessary for keeping a 1.5°C limit on warming within reach, specifically. . . Tackling potent, non-CO2 climate pollutants: Launching a Methane Finance Sprint to cut methane emissions and accelerating hydrofluorocarbon (HFC) phasedown under the Kigali Amendment.”).

⁹¹⁵ The White House (20 April 2023) *FACT SHEET: President Biden to Catalyze Global Climate Action through the Major Economies Forum on Energy and Climate*, Statements and Releases (“At today’s meeting, the President will highlight new steps the United States is taking to meet its ambitious 1.5°C-aligned goal of reducing emissions 50-52 percent in 2030. The President will also announce significant new steps the United States is taking to support developing countries in taking stronger climate action – including providing \$1 billion to the Green Climate Fund and requesting \$500 million for the Amazon Fund and related activities – and invite other countries to join the United States and others in fully leveraging the multilateral development banks to better address global challenges, like climate change.”).

⁹¹⁶ Volcovici V. & Stanway D. (17 July 2023) *China-US climate progress could hinge on curbing of methane*, REUTERS (“Methane is particularly important for our cooperation,” Kerry told a congressional hearing on Thursday in Washington. “China agreed to have a methane action plan out of our prior talks in Glasgow (in 2021), and again in Sharm el-Sheikh” in November.”).

⁹¹⁷ United States Department of State (14 November 2023) *Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis* (“The two countries will implement their respective national methane action plans and intend to elaborate further measures, as appropriate. The two countries will immediately initiate technical working group cooperation on policy dialogue, technical solutions exchanges, and capacity building, building on their respective national methane action plans to develop their respective methane reduction actions/targets for inclusion in their 2035 NDCs and support each country’s methane reduction/control progress. The two countries intend to cooperate on respective measures to manage nitrous oxide emissions. The two countries intend to work together under the Kigali Amendment to phase down HFCs and commit to ensure application of ambitious minimum efficiency standards for all cooling equipment manufactured.”).

⁹¹⁸ United States Agency for International Development (11 November 2022) *USAID Reaffirms Commitments to Investments in Climate Smart Food Systems: Agriculture Innovation Mission for Climate, Investment Impacts, Innovation Sprints, and Methane Accelerator*, Press Release (“Additionally, USAID is partnering with the State Department to launch a new USAID Methane Accelerator program that will mainstream and scale up methane mitigation programming across the Agency. Methane emissions, including emissions from the agricultural sector, are supercharging global warming. Subject to Congressional Notification, USAID and the Department of State will dedicate \$12 million to this program, with the goal of leveraging substantial additional resources. Administrator Power also announced two new AIM for Climate Innovation Sprints and USAID partnerships that will increase private sector investments in climate smart food systems:

- **Bayer Crop Science and the International Rice Research Institute:** USAID is partnering with Bayer Crop Science and the International Rice Research Institute on an Innovation Sprint to improve the quality of life of smallholder rice farmers through the introduction, on-farm testing, and scaling of improved, climate-smart rice varieties that are sown directly in the field as opposed to the labor-intensive process of transplanting seedlings by hand. Bayer has committed up to \$4 million of in-kind support.
- **Olam Food Ingredients (ofi) and partners:** USAID, ofi, Nestlé, Mars Wrigley, Costco Wholesale, Mondelēz International, and Blommer Chocolate Company have launched RESTORE: “Resilient Ecosystems and Sustainable Transformation of Rural Economies”, that will help smallholder cocoa farmers use more climate-smart agricultural practices. Through this Innovation Sprint, Ofi and partners are investing \$7 million towards this effort to support 15,000 cocoa farmers by 2027, of which at least 25% will be women.”).

⁹¹⁹ See Gordon D., Guccione L., & Conway T. (2024) *Mission Critical Methane: Aligning Policies and Markets to Cut Oil and Gas Emissions*, Rocky Mountain Institute, 22 (“US export policy priorities must support global gas markets with methane leakage below 0.2%. This necessarily involves DOE MMRV priorities that intend to establish a global framework for estimating and accounting for methane emissions across the global oil and gas value chain. ... The aim is to incentivize rapid emissions reductions by buyers, sellers, traders, and investors in the global market. This requires alignment with major LNG buyers, such as Japan and South Korea, as well as top global LNG suppliers, from Australia to Qatar. Suppliers in greatest need of support to achieve this goal are in the Global South. ... Leaky gas is costly, wasteful, and harmful to the climate and to people. Bringing systemwide gas intensity to below 0.2% leakage can serve as a force multiplier to reduce global methane on the order of 60 million tons by 2030, which equates to a five gigatons CO₂e emissions reduction in the short term when methane’s warming is most potent. This reduction would put the world well on its way to meeting the Global Methane Pledge.” (Citations omitted.)). For an example of a digital resource to support oil and gas companies in identifying and adopting methane emissions reduction technologies, see Chubb, *Chubb Methane Resource Hub* (last visited 2 December 2023).

⁹²⁰ AIM For Climate, *Innovation Sprints* (last visited 26 January 2023) (Innovation sprints with the closest link to agricultural methane include “Climate Resilience Through Crop Protection Innovation,” “Greener Cattle Initiative: Addressing Enteric Methane Emissions,” and “Satellite monitoring of quantity and quality of available biomass in pastoral livestock systems”).

⁹²¹ AIM For Climate, *Partners* (last visited 26 January 2023).

⁹²² See Alliance of Champions, *About ACF: Building an Alliance of Champions* (last visited 19 December 2023) (“The Alliance of Champions for Food Systems Transformation (ACF) is a strategic coalition of ambitious countries determined to act urgently, together. Brazil BR | Cambodia KH | Norway NO | Rwanda RW | Sierra Leone SL | Signatories to the Alliance are committing to driving systemic change, taking a ‘whole of government’ approach and inspiring others to go further, faster to deliver better outcomes for people, nature and climate.”); and Alliance of Champions (10 December 2023) *Alliance of Champions launched at COP28 to supercharge global food systems transformation efforts*, Press Release (“Brazil, Cambodia, Norway, Sierra Leone and Rwanda are united in their commitment to ‘whole of government’ approaches to transforming food systems so that they deliver better outcomes across five key themes: food and nutrition security; adaptation and resilience; equity and livelihoods; nature and biodiversity; and climate mitigation.”).

⁹²³ Alliance of Champions, *Ten Priority Intervention Areas* (last visited 19 December 2023) (“Rationale: Food systems, including their energy consumption, account for ~30% of global emissions. Reducing these emissions by 83% is essential to mitigating climate change and meeting existing global agreements and targets (e.g., SDGs, Paris Agreement, Global Methane Pledge). The agrifood system has the potential to contribute actively to the energy transition, in coordination with better use of renewables. Priority activities • Reduce methane emissions from agriculture (e.g., rice cultivation, livestock management including enteric fermentation, manure management and herd reduction where necessary.”).

⁹²⁴ Alliance of Champions (10 December 2023) *Alliance of Champions launched at COP28 to supercharge global food systems transformation efforts*, Press Release (“Each country is pledging to: 1. Strengthen national visions and food systems transformation pathways, inclusive of ten priority action areas and consistent with science-based targets. 2. Update Nationally Determined Contributions (NDCs), National Adaptation Plans (NAPs), Long-Term Low Emission Development Strategies (LT-LEDS), and National Biodiversity Strategies and Action Plans (NBSAPs) in line with these updated National Food System Transformation Pathways and/or Implementation Plans, by 2025 at the latest. 3. Report annually on targets and priority intervention areas.”).

⁹²⁵ PETRONAS (27 June 2023) *PETRONAS Collaborates with Partners to Accelerate Methane Emissions Reduction*. See also Eco Business (11 August 2023) *Cutting methane emissions is key to slowing down climate change: EDF president Fred Krupp* (“When I was in Kuala Lumpur [to attend the Energy Asia conference], the Asean Methane Leadership Programme was announced in Malaysia. This 18-month initiative, in which EDF is a key stakeholder, will focus on capacity building to help strengthen Asean companies’ plans, targets and financing options in reducing methane emissions.”).

⁹²⁶ Chew N. (11 July 2023) *PETRONAS collaborates with partners to accelerate methane emissions reduction*, ASIAN DOWNSTREAM INSIGHTS (“PETRONAS, in collaboration with ASEAN energy operators, governmental agencies, and international organisations, has launched the ASEAN Energy Sector Methane Leadership Program (MLP), and announced methane abatement flagship projects in collaboration with Japan Organization for Metals and Energy Security (JOGMEC).”).

⁹²⁷ United Nations Environment Programme (6 December 2023) *The Buildings Breakthrough: Global push for near-zero emission and resilient buildings by 2030 unveiled at COP28* (“The Governments of France and Morocco, together with the UN Environment Programme (UNEP), launched the Buildings Breakthrough today at COP28, which will see countries joining forces to accelerate the transformation of the sector – which accounts for 21 per cent of global greenhouse gas emissions – with a view to making near-zero emissions and climate resilient buildings the new normal by 2030. Twenty-seven countries have so far pledged their commitment to the Buildings Breakthrough.”). See also Global Cement and Concrete Association (6 December 2023) *Canada launches the Cement & Concrete Breakthrough initiative at COP28* (“Today, the Honourable François-Philippe Champagne, Minister of Innovation, Science and

Industry, and His Excellency Omar Ahmed Suwaina Al Suwaidi, Undersecretary of the Ministry of Industry and Advanced Technology in the United Arab Emirates (UAE), announced the launch of the Cement & Concrete Breakthrough initiative at COP28 in Dubai. This initiative reaffirms Canada’s commitment to working with countries, businesses and international partner organizations to accelerate investments in the technologies, tools and policies that the cement and concrete industry needs to realize net-zero solutions by 2050.”).

⁹²⁸ International Energy Agency, International Renewable Energy Agency, & United Nations Climate Change High Level Champions (2023) *THE BREAKTHROUGH AGENDA REPORT 2023*, 3 (“The Breakthrough Agenda was launched by 45 world leaders at COP 26 and is a commitment to work together this decade to accelerate innovation and deployment of clean technologies, making them accessible and affordable for all this decade. To kick-start this Agenda, countries endorsed Breakthrough goals to make clean technologies and sustainable practices more affordable, accessible and attractive than their alternatives by 2030 in the power, road transport, steel, hydrogen and agriculture sectors. This report also covers the buildings and cement sectors, where new breakthroughs are being considered. The Breakthrough Agenda establishes an annual cycle to track developments towards these goals, identify where further co-ordinated international action is urgently needed to accelerate progress and then galvanise public and private international action behind these specific priorities in order to make these transitions quicker, cheaper and easier for all.”).

⁹²⁹ Climate Champions (14 September 2023) *Breakthrough Agenda Report 2023: Stronger international cooperation in high emissions sectors crucial to get on track for 1.5C climate goal*, Race to Resilience (“The second annual report assesses progress made since 2022 in priority areas for international collaboration, and sets out a series of recommendations for countries to work together in each sector to help reduce emissions over the next decade and stave off the worst effects of climate change ... The report’s recommendations span financial assistance, research and development, demand-creation, infrastructure, standards and trade, to accelerate the transition in each sector. Coordinated actions in each of the seven sectors will help mobilise investment, and can create the economies of scale required to bring down the price of crucial technologies and sustainable agriculture solutions. The report found that in the past year, only modest progress has been made in strengthening international collaboration in the areas where it is most needed. Progress has been made in expanding financial assistance to developing countries in some sectors, and in joint research and development initiatives.”).

⁹³⁰ Climate & Clean Air Coalition, *Our Partners* (last visited 5 February 2023) (“The Coalition is a voluntary partnership led by states and regional integration organisations. These partners have committed to accelerate action to reduce short-lived climate pollutants through their participation in the Coalition's activities and local action.”).

⁹³¹ Climate & Clean Air Coalition, *Global Methane Pledge* (last visited 12 December 2023) (“As of September 2023, the Climate and Clean Air Coalition (CCAC) provides secretariat services to the Global Methane Pledge (GMP). This function reinforces the CCAC’s core mandate to address methane as part of its broader goal to reduce short-lived climate pollutants while responding to GMP countries' need for support to deliver on their commitment. As the GMP secretariat, CCAC will work with GMP countries and supporters to strengthen engagement and coordination, track progress, monitor policy actions and project successes, maintain and update resources, provide direct support through one-on-one advice, engage participants and supporters through CCAC hubs, meetings, and the Scientific Advisory Panel, and ministerial engagements.”).

⁹³² Climate & Clean Air Coalition, *National policy and planning support* (last visited 5 February 2023) (“Since 2013, the CCAC has helped 16 countries develop national plans that integrate climate and clean air objectives through actions to reduce short-lived climate pollutants (SLCPs). Eight of these plans have received national endorsement and are moving towards implementation.”). See also Climate & Clean Air Coalition, *Increasing Ambition of NDCs* (last visited 5 February 2023) (“As countries update their Nationally Determined Contributions (NDCs) and enhance ambition to achieve the Paris Agreement temperature goals, the Climate and Clean Air Coalition is encouraging and supporting them to include short-lived climate pollutant (SLCP) and air pollution actions into their climate commitments.”).

⁹³³ United Nations Environment Programme (2021) *September 2021 Report of the Technology and Economic Assessment Panel, Volume 6: Assessment of the Funding Requirement for the Replenishment of the Multilateral Fund for the Period 2021-2023*, 59 (“The funding approved for IS support has played a paramount role in establishing and maintaining the capacity of national ozone units and is recognized as a major factor in the success of A5 parties achieving compliance with the Montreal Protocol’s control measures.120”), citing Executive Committee of the Multilateral Fund for the Implementation of the Montreal Protocol (17 April 2015) *Review of Funding of Institutional Strengthening Projects (Decision 61/43(b))*, UNEP/OzL.Pro/ExCom/74/51, ¶¶ 11–13.

⁹³⁴ Climate & Clean Air Coalition, *Technology and Economic Assessment Panel (last visited 15 December 2023)* (“In 2023, the CCAC established its Technology and Economic Assessment Panel (CCAC-TEAP) to develop and share knowledge with countries about promising, innovative and underfinanced short-lived climate pollutant (SLCP) mitigation measures which can improve both climate and air quality outcomes.”).

⁹³⁵ Climate & Clean Air Coalition (15 November 2022) *Sharm el-Sheikh Communiqué* (“We will seek to expand our work with the private sector and state-owned enterprises. We welcome exploring the formation of a Technology and Economic Assessment Panel on Methane, or similar, as suggested by Senegal, to better understand and advise CCAC Partners on the landscape of innovative methane mitigation technologies, including methane removal and sector-specific methane reduction technologies.”).

⁹³⁶ Climate & Clean Air Coalition (9 November 2021) *Climate and Clean Air Coalition Ministers approve strategy to significantly cut short-lived climate pollutants this decade*, Press Release (“Ministers approved the implementation of a Methane Flagship, which, starting in 2022, will foster and strengthen high level commitments to reduce methane, amplify and raise awareness, support planning and delivery of strategies and plans, provide analysis and tools to support action, and scale up financing. There was strong and broad support for the recently launched Global Methane Pledge and ministers welcomed the CCAC having a leadership role in supporting its implementation.”).

⁹³⁷ See generally Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT*; and Climate & Clean Air Coalition (2022) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: 2030*.

⁹³⁸ Explore mitigation amounts and impacts at: <http://shindellgroup.rc.duke.edu/apps/methane/>.

⁹³⁹ Economic Commission for Europe (8 September 2015) *UNECE joins Climate and Clean Air Coalition*, Press Release (“At a Working Group meeting in Paris (8–9 September), CCAC welcomed UNECE to the Coalition. By joining the Coalition, UNECE gains access to a broad network of experts and partners. Drawing on its long-standing expertise, UNECE will contribute through exchanges of experiences, knowledge and best practices, particularly as they relate to the work under the *Committee on Sustainable Energy* and the *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution*, including its amended *Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone (Gothenburg Protocol)*.”).

⁹⁴⁰ See *Global Methane, Climate and Clean Air Forum (last visited 5 February 2023)* (“The Global Methane, Climate and Clean Air Forum is a joint event sponsored by the *Global Methane Initiative (GMI)* and the *Climate & Clean Air Coalition (CCAC)*. The Forum is a premier global event that brings together policymakers, industry leaders, technical experts, and researchers from around the world to discuss opportunities to protect the climate and improve air quality with a special focus on methane.”).

⁹⁴¹ Climate & Clean Air Coalition Secretariat (7 October 2022) *At The Global Methane, Climate and Clean Air Forum, Experts Stress the Need for #FastClimateAction* (“**Martina Otto, Head of Secretariat, CCAC**, stated that joint efforts and methane action must be taken ‘right’ now given the narrow window to achieve the goals of the Paris Agreement on climate change. She also reminded participants of several initiatives funded by the CCAC Trust Fund, especially on methane source sectors.”).

⁹⁴² Climate & Clean Air Coalition (15 November 2022) *Ministerial Communiqué*, 1 (“In a year in which the devastating and horrendous impacts of climate change have become ever-more apparent around the globe, and when the UN General Assembly recognized the right to a clean, healthy and sustainable environment (Res. 76/300), we the Ministers and Leaders of the Climate and Clean Air Coalition (CCAC) have met today to: ... Reaffirm and renew our commitment to reduce emissions of methane and other short-lived climate pollutants (SLCPs) quickly and decisively – as a complement to scaled-up action on carbon dioxide (CO₂) – noting that reducing SLCP emissions is the most effective pathway to avoid 0.6 °C of predicted global warming in the near termⁱ and slow sea-level rise by 20% by mid-century,ⁱⁱ slowing the rate of Arctic warming by up to two-thirdsⁱⁱⁱ and the rate of global warming by half; ... Launch new collaborative actions to further drive emissions reductions, as a concrete and practical affirmation of our commitment, noting the importance of mobilizing financing to deliver results.”).

⁹⁴³ Climate & Clean Air Coalition (15 November 2022) *Ministerial Communiqué*, 3 (“We welcome exploring the formation of a Technology and Economic Assessment Panel on Methane, or similar, as suggested by Senegal, to better understand and advise CCAC Partners on the landscape of innovative methane mitigation technologies, including methane removal and sector-specific methane reduction technologies.”).

⁹⁴⁴ Climate & Clean Air Coalition (15 November 2022) *Ministerial Communiqué*, 4 (“And, we request the CCAC Scientific Advisory Panel to put forward a proposal on how we can highlight and better calculate the near-term climate benefits of our methane commitments, for instance through the use of GWP20 or temperature change over time in our NDCs.^{viii}”).

⁹⁴⁵ Climate & Clean Air Coalition, *Technology and Economic Assessment Panel (last visited 15 December 2023)* (“In 2023, the CCAC established its Technology and Economic Assessment Panel (CCAC-TEAP) to develop and share knowledge with countries about promising, innovative and underfinanced short-lived climate pollutant (SLCP) mitigation measures which can improve both climate and air quality outcomes.”).

⁹⁴⁶ Climate & Clean Air Coalition (13 June 2023) *At the Climate and Clean Air Conference 2023, Nations Call for Action*, News and Announcements (“A pilot CCAC Technology and Economic Assessment Panel (TEAP), which will provide guidance and support to countries on which best available technologies exist for implementation of SLCP reductions in different contexts – focusing initially on methane.”).

⁹⁴⁷ See generally Climate & Clean Air Association (undated) *Science Policy*.

⁹⁴⁸ See generally Climate & Clean Air Coalition & International Energy Agency (2023) [THE IMPERATIVE OF CUTTING METHANE FROM FOSSIL FUELS](#).

⁹⁴⁹ Climate & Clean Air Coalition, *CCAC at COP28 (last visited 30 January 2024)* (“The Climate and Clean Air Coalition is participating in and co-organizing events during COP28. Our governance meeting, the Climate and Clean Air Ministerial, will also meet on the margins of the Conference, and we will be co-hosting the Global Methane Pledge (GMP) Ministerial.”).

⁹⁵⁰ Clean Air Task Force (8 December 2023) *Turning pledges into action: COP28 Global Methane Pledge Ministerial*, (“This year, Global Methane Partners announced: Over \$1 billion in new grant funding for methane action mobilized since COP27, more than triple current levels, which will mobilize billions in investment to reduce methane. New national commitments and legislation from top oil and gas methane emitters alongside decisive action on waste, food, and agriculture – including strong methane emissions standards for oil and gas from the U.S. and new methane regulations from Canada. Transformational data tools including the full launch of the Methane Alert and Response System, a new Data for Methane Action Campaign, and a new platform to better track waste methane emissions in cities around the world. New members and expanded leadership. Canada, Federated States of Micronesia, Germany, Japan, and Nigeria joined the United States and European Union as Global Methane Pledge Champions. Turkmenistan,

Kazakhstan, Kenya, Kosovo, Romania, and Angola joined the Global Methane Pledge, bringing total participation to 156 governments.”).

⁹⁵¹ Climate & Clean Air Coalition (9 December 2023) *Ministers Unite for Immediate Action on Climate and Clean Air, Urging Bold Financing and Swift Measures on Non-CO2 Super Pollutant Greenhouse Gases* (“Over one hundred ministers, heads of agencies and non-state partners came together in the Climate and Clean Air Ministerial to unveil groundbreaking initiatives, commitments and a call to action during the 28th Conference of Parties of the UNFCCC (COP28). The 2023 Ministerial was focused on financing for short-lived climate pollutants (SLCPs). State partners showed up, making new commitments to climate and clean air and calling for further action and support.”).

⁹⁵² Climate & Clean Air Coalition (9 December 2023) *Ministers Unite for Immediate Action on Climate and Clean Air, Urging Bold Financing and Swift Measures on Non-CO2 Super Pollutant Greenhouse Gases* (“The Coalition also announced the initiation of a landmark assessment on nitrous oxide (N2O) to be delivered in advance of COP29, which will expose impacts of the often-overlooked greenhouse gas. This proactive approach aims to ensure that no opportunities are missed in the pursuit of a 1.5 degrees Celsius future. A global assessment on the cost of inaction on short-lived climate pollutants and an assessment on the integrated agriculture and food systems will be prepared in advance of COP30.”).

⁹⁵³ Climate & Clean Air Coalition (9 December 2023) *Ministers Unite for Immediate Action on Climate and Clean Air, Urging Bold Financing and Swift Measures on Non-CO2 Super Pollutant Greenhouse Gases* (“Ministers also called for increased efforts to support highly vulnerable Small-Island Developing States (SIDS), especially in the context of rapid mitigation of methane and black carbon to slow sea level rise and increasing frequency and intensity of climate-exacerbated weather events.”).

⁹⁵⁴ International Institute for Sustainable Development (2023) *Climate and Clean Air Coalition’s Ministerial Meeting: Immediate Action on Climate and Clean Air, Bold Financing and Swift Measures on Non-CO2 Super Pollutant Greenhouse Gases* (“Germany pledged EUR 20 million for the GMP, EUR 8 million of which will go to the CCAC’s budget... Ireland announced EUR 2 million in support of the CCAC... Monaco reported a contribution of EUR 500,000 for 2024.. Sweden announced a pledge of USD 180,000 to support the CCAC.”). For a full outline of all funding provided to the CCAC, *see* Climate & Clean Air Coalition, *CCAC Trust Fund* (last visited 14 February 2024).

⁹⁵⁵ Climate & Clean Air Coalition Secretariat (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The Launch of the Lowering Organic Waste Methane (LOW-Methane) initiative. The ambition of LOW-Methane is to deliver at least 1 million metric tons of annual waste sector methane reductions well before 2030 with 40 subnational jurisdictions and their national government counterparts, including by working to unlock over \$10 billion in public and private investment. The consortium effort will be supported by a coordination group housed within the UNEP-convened CCAC.”). *See also* United States Department of State (4 December 2023) *Lowering Organic Waste Methane Initiative (LOW-Methane)* (“The inaugural cohort of national governments intending to participate in the LOW-Methane initiative includes Chile, Dominican Republic, Nigeria, and Indonesia. Initial LOW-Methane jurisdictions intending to participate include Lagos, Rio de Janeiro, and Santiago. Proposed subnational participants will work toward a clear and ambitious waste methane reduction target, coordinating as appropriate with national government counterparts and the LOW-Methane consortium in their efforts to achieve that target. This work will be supported by a consortium of LOW-Methane stakeholders. Over 20 governments and organizations intend to participate, including Bloomberg Philanthropies, C40 Cities, Canada, Carbon Mapper, Catalytic Finance Foundation, Center for Global Sustainability at the University of Maryland, Clean Air Task Force, the European Union, GAIA, GHGSat, the Global Covenant of Mayors for Climate and Energy (GCoM), the Global Methane Hub, the Global Methane Initiative, Google, the Inter-American Development Bank, the International Solid Waste Association, Pacific Northwest National Laboratory, RMI, SRON, the Under2 Coalition, UNEP-convened Climate and Clean Air Coalition (CCAC), UNEP’s International Methane Emissions Observatory, the United States, the World Bank, and the World Resources Institute. The consortium will provide support for jurisdiction priorities related to data, technical capacity, policy, and finance.”).

⁹⁵⁶ Climate & Clean Air Coalition (2023) *Clean Air Flagship* (“At the Climate and Clean Air Ministerial 2022, CCAC Partners requested a new effort to achieve clean air across the world. At the Climate and Clean Air Ministerial 2023, the CCAC launched the “Clean Air Flagship” to mobilise the partnership and ‘move the needle’ on this important topic. It is aimed at: Saving lives: Supporting governments to achieve cleaner air as quickly as possible, consistent with improved WHO air quality interim targets. Slowing climate change: Taking full advantage of win-win opportunities to reduce the emissions of short-lived climate pollutants simultaneously with other harmful pollutants. Maximizing co-benefits: Improving agricultural productivity, economic development and the overall quality of life.”).

⁹⁵⁷ Climate & Clean Air Coalition (2023) *Clean Air Flagship 2024-2026*, 6 (“Support science cooperation and information-sharing initiatives within the regional frameworks, especially with respect to tropospheric ozone, black carbon, and methane (See Annex 1).”).

⁹⁵⁸ Climate & Clean Air Coalition (2023) *Clean Air Flagship 2024-2026*, 4 (“Strengthen and support regional and sub-regional cooperation and the implementation of political commitments to achieve the WHO Air Quality Guidelines and Global Methane Pledge.”).

⁹⁵⁹ Arab Republic of Egypt (2022) *Global Waste Initiative 50 by 2050: From Egypt to Africa, for a global impact* (“Key Facts • Waste in Africa 20% Contribution of waste on global methane emissions”).

⁹⁶⁰ Scarlat N., Motola V., Dallemand J.F., Mofnorti-Ferrario F., & Mofor L. (2015) *Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African urban areas, Renewable & Sustainable Energy Reviews* 50:1269–1286, 1279 (“It is also worth noticing that the future set up of landfills in Africa is expected to induce a significant increase of methane emissions, in comparison with the current methane emissions from landfills in Africa (as mentioned above, estimated at of about 1.3 Mt CH₄ for 2010) [17]. If deposited in managed landfills, waste can release significant amounts of CH₄ into the atmosphere that could be avoided by installing proper LFG recovery systems.”).

⁹⁶¹ Arab Republic of Egypt (2022) *Global Waste Initiative 50 by 2050: From Egypt to Africa, for a global impact* (“The holistic Initiative will be implemented over all waste types and for the next 28 years, from 2022 to 2050, with an initial 5-year initiation phase until 2027, which will launch the five key missions: 1. Develop a platform for partnerships and projects to address both mitigation and adaptation effects; 2. Create transparency and align key initiatives; 3. Facilitate trade of recyclables between African nations; 4. Support knowledge and innovation transfer to Africa on recycling and infrastructure for all waste types; 5. Ensure implementation and track performance of the Initiative in the WM sector in Africa, impacting the globe”).

⁹⁶² COP27 (17 November 2022) *Solutions Day*. See also Samir S. (17 August 2022) *Egypt launches national campaign to raise awareness of climate change impact*, EGYPT TODAY (“‘Green Africa’ is one of the essential topics that would be tackled during the COP 27 Conference, where a session will convene to discuss climate change impacts on Africa, putting forward two initiatives for the continent: one aims at reducing waste in Africa by 50 percent by 2050, while the other focuses on climate adaptation in Africa.”); and Africa NDC Hub (14 November 2022) *Doubling Down on Delivering Africa’s Climate Action Priorities – Policy recommendations from the Africa NDC Hub* (“The UNFCCC COP27, also dubbed “The African COP,” aims to amplify the African voice at COP. The overall objective of the joint NDC Hub publication is to assess progress on the delivery of the adaptation and mitigation targets in the NDCs and provide policy recommendations on hastening scale and reach.”).

⁹⁶³ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The International Fund for Agriculture Development’s Reducing Agricultural Methane Program (RAMP) announced that it will, with funding from the U.S. State Department and Global Methane Hub, support 15 governments to incorporate agricultural methane into their nationally determined contributions and 10 governments to build investment pipelines in low-methane agricultural development.”).

⁹⁶⁴ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The United States, the European Commission, and twelve other natural gas importing and exporting countries formed an international working group to advance comparable and reliable information about methane and CO2 emissions across the natural gas supply chain to drive global emissions reductions.”).

⁹⁶⁵ COP28, *COP28 UAE Declaration on Sustainable Agriculture, Resilient Food Systems, and Climate Action* (last visited 19 December 2023) (“We affirm that agriculture and food systems must urgently adapt and transform in order to respond to the imperatives of climate change.”).

⁹⁶⁶ COP28, *COP28 UAE Declaration on Sustainable Agriculture, Resilient Food Systems, and Climate Action* (last visited 19 December 2023) (“In fulfilling this commitment, by 2025 we intend to strengthen our respective and shared efforts to ... 3. Continue to scale-up and enhance access to all forms of finance from the public, philanthropic and private sectors – including through blended instruments, public-private partnerships and other aligned efforts – to adapt and transform agriculture and food systems to respond to climate change. ... To maintain momentum, we intend to benefit from relevant regional and global convenings in order to share experiences and to accelerate national and collaborative action. We will review our collective progress next year at COP29 with a view to considering next steps in 2025 and beyond.”).

⁹⁶⁷ United States Department of Energy (9 March 2022) *U.S. Secretary of Energy Jennifer M. Granholm Hosts The First Net-Zero Producers Forum Ministerial in Houston* (“U.S. Secretary of Energy Jennifer M. Granholm, together with Energy Ministers from Canada, Norway, Qatar, and Saudi Arabia, today formally launched the Net-Zero Producers Forum (NPF) through an inaugural ministerial meeting. During the meeting, Ministers endorsed the initiative’s Terms of Reference, which codifies the objectives and framework of the NPF.”).

⁹⁶⁸ United States Department of Energy (23 April 2021) *Joint Statement on Establishing a Net-Zero Producers Forum between the Energy Ministries of Canada, Norway, Qatar, Saudi Arabia, and the United States*, Press Release (“Canada, Norway, Qatar, Saudi Arabia, and the United States, collectively representing 40 percent of global oil and gas production, will come together to form a cooperative forum that will develop pragmatic net-zero emission strategies, including methane abatement, advancing the circular carbon economy approach, development and deployment of clean-energy and carbon capture and storage technologies, diversification from reliance on hydrocarbon revenues, and other measures in line with each country’s national circumstances.”).

⁹⁶⁹ United States Department of Energy (13 May 2022) *The United Arab Emirates Joins as Sixth Member of the Net-Zero Producers Forum* (“The United States, Canada, Norway, Qatar, and Saudi Arabia welcome the United Arab Emirates as the sixth member of the Net-Zero Producers Forum (NPF). Collectively representing 45 percent of global oil production and 40 percent of natural gas production, the NPF is focusing on accelerating the scale and speed of reaching net-zero emissions.”).

⁹⁷⁰ Climate & Clean Air Coalition (5 December 2023) *Net-Zero Producers Forum and Reducing Methane Emissions* (“The Net-Zero Producers Forum (NPF) was established to bring together key oil and gas producers to demonstrate that we collectively are taking ambitious steps towards net zero by around mid-century. This panel will bring together the member countries’ heads of delegation to highlight members’ progress towards net zero and work to implement key decarbonisation and methane mitigation initiatives, to discuss plans for future activities, and to launch the Methane Abatement Toolbox.”).

⁹⁷¹ United States Office of International Affairs (4 December 2023) *Net-Zero Producers Forum - Launch of the Upstream Abatement Toolkit* (“The “Upstream Methane Abatement Toolkit” is a resource developed by Net-Zero Producers Forum (NPF) member countries highlighting measures to date and lessons learned regarding the implementation of methane abatement technologies. NPF members will update the toolkit, adding new resources and revisiting the description of existing programs on an annual basis to show increasing action. This toolkit intends to highlight existing and planned methane abatement policies, resources, and initiatives across the member countries for

the benefit of the group and for others who are interested in learning from our experiences with methane abatement, which is critical to ensuring we begin to slow and eventually reverse the impacts of climate change.”).

⁹⁷² World Bank (5 December 2023) *GGFR to evolve to the Global Flaring & Methane Reduction Partnership* (“Today the World Bank launched the Global Flaring and Methane Reduction (GFMR) Partnership, a new multi-donor trust fund focused on helping developing countries cut carbon dioxide and methane emissions generated by the oil and gas industry. GFMR will provide more than \$250 million and mobilize billions from the private sector to support those countries with the least capacity and resources to address these emissions. The partnership will focus on providing grant funding, technical assistance, policy and regulatory reform advisory services, institutional strengthening, and mobilizing financing to support action by governments and operators.”).

⁹⁷³ World Bank, *Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR), About the Partnership* (last visited 5 February 2023)

(“GGFR helps identify solutions to the array of technical and regulatory barriers to flaring reduction. To achieve this, we develop country-specific flaring reduction programs, conduct research, share best practices, raise awareness, secure global commitments to end routine flaring, and advance flare measurements and reporting.”). See also World Bank (5 December 2023) *GGFR to evolve to the Global Flaring & Methane Reduction Partnership* (“GFMR will establish eligibility criteria so that support drives long term emissions reduction projects and initiatives. For example, access to project development and financing support through GFMR will be subject to a commitment to measure and report emissions through the Oil and Gas Methane Partnership 2.0 framework, achieve near-zero absolute methane emissions by 2030 by reducing methane intensity to below 0.2%, and achieve zero routine flaring by 2030.”).

⁹⁷⁴ World Bank (5 December 2023) *GGFR to evolve to the Global Flaring & Methane Reduction Partnership* (“GFMR will establish eligibility criteria so that support drives long term emissions reduction projects and initiatives. For example, access to project development and financing support through GFMR will be subject to a commitment to: measure and report emissions through the Oil and Gas Methane Partnership 2.0 framework, achieve near-zero absolute methane emissions by 2030 by reducing methane intensity to below 0.2%, and achieve zero routine flaring by 2030.”).

⁹⁷⁵ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The World Bank launched its Global Flaring and Methane Reduction Partnership (GFMR) with \$255 million in new grant funding to catalyze oil and gas methane and flaring reduction in developing countries. The GFMR is supported by financial contributions from the United Arab Emirates, United States, Norway, BP, ENI, Equinor, Occidental, Shell, and TotalEnergies.”).

⁹⁷⁶ World Bank, *Zero Routine Flaring By 2030 (ZRF) Initiative* (last visited 5 February 2023) (“Launched in 2015, the ZRF Initiative commits governments and oil companies, to end routine flaring no later than 2030.”).

⁹⁷⁷ World Bank, *Zero Routine Flaring by 2030, Initiative Endorsers* (last visited 5 February 2023) (List of endorsers).

⁹⁷⁸ Global Gas Flaring Reduction Partnership (2022) *2022 GLOBAL GAS FLARING TRACKER REPORT*, World Bank, 6 (“In 2021, the top 10 flaring countries (on an absolute volume basis) accounted for 75 percent of all gas flaring and 50 percent of global oil production. Seven of the top 10 flaring countries have held this position consistently for the last 10 years: Russia, Iraq, Iran, the United States, Venezuela, Algeria, and Nigeria. The remaining three; Mexico, Libya, and China, have shown significant flaring increases in recent years.”).

⁹⁷⁹ Climate & Clean Air Coalition Secretariat (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The World Bank launched the Global Methane Reduction Platform for Development (CH4D) to support low- and mid-income countries to realize the ‘methane triple-wins’ of abating emissions, enhancing resilience, and empowering livelihoods. Through partnerships, including with the CCAC Methane Roadmap Action Programme (M-RAP), CH4D will mobilize expertise, affordable technologies, and catalytic finance for methane abatement in the agriculture and waste sectors.”).

⁹⁸⁰ American Petroleum Institute (2023) *Methane Action Plan*, 1 (“6 actions industry is taking to tackle methane emissions through The Environmental Partnership’s programs:

1. Reducing Flaring through facility design, takeaway capacity planning and alternative beneficial use. In 2022, there was a 14% reduction in total flare volumes and a 2.4% reduction in flare intensity from the previous year.
2. Replacing, Removing or Retrofitting High-bleed Pneumatic Controllers with low- or zero-emitting devices. Since the program started in 2017, more than 14,100 zero-emissions controllers have been installed and more than 114,000 gas-driven controllers have been replaced.
3. Monitoring Manual Liquids Unloading to minimize emissions by ensuring all wellhead vents are closed to atmosphere. In 2022, participants monitored more than 23,100 liquid unloading events.
4. Minimizing Compressor Emissions by implementing design and operation changes. In 2022, participants facilitated rod packing changes on more than 10,000 reciprocating compressors.
5. Detecting and Repairing Leaks through regular component inspections. In 2022, companies implemented detection and monitoring plans that resulted in a 0.07% leak occurrence rate (or less) across more than 202 million components at 157,000 sites.
6. Minimizing Pipeline Blowdown Emissions through operational changes prioritizing alternative beneficial use of gas that would otherwise be vented. In 2022, emission reduction practices were implemented during 3,600 pipeline blowdowns.”).

⁹⁸¹ American Petroleum Institute (21 September 2023) *API Releases Methane Action Plan Highlighting Industry Actions, Key Policy Priorities for Effectively Reducing Methane Emissions*, Press Release (“Through The Environmental Partnership’s focus on facility design, innovative technology, and operational practices, Partnership members are: Reducing flaring through facility design, takeaway capacity planning and alternative beneficial use. Replacing, removing or retrofitting high-bleed pneumatic controllers with low- or zero-emitting devices. Monitoring manual liquids unloading to minimize emissions by ensuring all wellhead vents are closed to atmosphere. Minimizing compressor emissions by implementing design and operation changes. Detecting and repairing leaks through regular component inspections. Minimizing pipeline blowdown emissions through operational changes prioritizing alternative beneficial use of gas that would otherwise be vented.”).

⁹⁸² Inagaki K. (17 July 2023) *Big LNG buyers and producers to tighten methane monitoring*, FINANCIAL TIMES (“Japan, the US, the EU, Australia and South Korea have agreed the creation of a mechanism for monitoring methane emissions that will bring together some of the world’s largest buyers and producers of liquefied natural gas to combat global warming. People directly involved in the discussions said the public-private initiative would involve setting up a database of real-time methane pollution data on individual LNG projects, a move backers hope will accelerate the reduction of emissions of the potent global warming gas.”).

⁹⁸³ Inagaki K. (17 July 2023) *Big LNG buyers and producers to tighten methane monitoring*, FINANCIAL TIMES (“Japan, the US, the EU, Australia and South Korea have agreed the creation of a mechanism for monitoring methane emissions that will bring together some of the world’s largest buyers and producers of liquefied natural gas to combat global warming. People directly involved in the discussions said the public-private initiative would involve setting up a database of real-time methane pollution data on individual LNG projects, a move backers hope will accelerate the reduction of emissions of the potent global warming gas.”).

⁹⁸⁴ Japan Ministry of Economy, Trade, and Industry (19 July 2023) *Joint Statement on Accelerating Methane Mitigation from the LNG Value Chain*, Press Release (“To support the Coalition, Japan and the European Commission expressed their vision to create a globally aligned methane emission assessment of LNG projects and to incentivize methane mitigation by LNG producers by facilitating the information collection process of methane leakage counter measures and methane reduction targets announced by LNG producers, moving toward collection of methane emissions and emissions intensity data at the cargo, portfolio, and operator level”). See also *JERA* (18 July 2023) *Launch of the methane emission reduction initiative (CLEAN) by KOGAS and JERA* (“Korea Gas Corporation

(“KOGAS”) and JERA Co., Inc. (“JERA”) today launched an initiative of the “Coalition for LNG Emission Abatement toward Net-zero (“CLEAN”)”. CLEAN is an initiative taken by LNG buyers, together with LNG producers, to reduce methane emissions in the LNG value chain. In accordance with the Memorandum of Understanding regarding cooperation in the LNG Business concluded in April 2023, KOGAS and JERA as the world's largest LNG buyers, have confirmed that they will strengthen their strategic relationship and work to ensure a stable supply of energy for both Korea and Japan.”).

⁹⁸⁵ Japan Ministry of Economy, Trade, and Industry (19 July 2023) *Joint Statement on Accelerating Methane Mitigation from the LNG Value Chain*, Press Release (“Within Japan, JOGMEC will provide support mechanisms for LNG producers and consumers by creating an initiative that collects methane measures and best practices, complementing the work of other existing platforms such as the OGMP 2.0. Japan also resolved to provide support for accelerated methane measurement and mitigation by LNG producers, especially in Asian countries, by leveraging its expertise from ongoing support on emission assessment and reduction in gas and LNG projects.”).

⁹⁸⁶ Environmental Defense Fund (5 December 2023) *Leadership in Action: Global Food Corporations and Environmental Defense Fund Unite to Tackle Dairy Methane Emissions* (“Today, a historic group of global food companies, led by the Bel Group, Danone, General Mills, Kraft Heinz, Lactalis USA (a U.S. affiliate of Lactalis Group), and Nestlé was convened by Environmental Defense Fund to launch the Dairy Methane Action Alliance (DMAA). The Alliance was announced on stage at a COP Presidency event with company representatives and EDF president Fred Krupp. These leading food companies together represent more than \$200 billion in revenue.”).

⁹⁸⁷ Douglas L. (5 December 2023) *COP28 summit: Global dairy companies join alliance to cut methane*, REUTERS (“The six members of the Dairy Methane Action Alliance - Danone (DANO.PA), Bel Group, General Mills (GIS.N), Lactalis USA, Kraft Heinz (KHC.O) and Nestle (NESN.S) - will begin reporting their methane emissions by mid-2024 and will write methane action plans by the end of that year.”).

⁹⁸⁸ Global Methane Initiative, *About the Global Methane Initiative (last visited 5 February 2023)* (“Launched in 2004, the GMI is an international public-private initiative that advances cost-effective, near-term methane abatement and recovery and use of methane as a clean energy source in three sectors: biogas (including agriculture, municipal solid waste, and wastewater), coal mines, and oil and gas systems. Focusing collective efforts on methane emission sources is a cost-effective approach to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and increase energy security, enhance economic growth, improve air quality and improve worker safety.”).

⁹⁸⁹ Global Methane Initiative, *Partner Countries (last visited 5 February 2023)* (“GMI Partner Countries account for approximately 70 percent of global manmade methane emissions. These countries offer special expertise and interest in developing solutions for mitigating methane emissions and using methane as a renewable energy source. As members of the GMI, Partner Countries are encouraged to develop and submit to the Secretariat action planning documents that outline key country activities and priorities, and provide a mechanism to advance cooperation among Partners.”).

⁹⁹⁰ Global Methane Initiative, *GMI Fact Sheet (last visited 26 January 2023)* (“GMI Partner Countries account for approximately 70 percent of global manmade methane emissions. These countries offer special expertise and interest in developing solutions for mitigating methane emissions and using methane as a renewable energy source. As members of the GMI, Partner Countries are encouraged to develop and submit to the Secretariat action planning documents that outline key country activities and priorities, and provide a mechanism to advance cooperation among Partners.”).

⁹⁹¹ Safety4Sea (17 March 2022) *Seven companies join the Methane Abatement in Maritime Innovation Initiative* (“The Methane Abatement in Maritime (MAM) Innovation Initiative, launched on September 6th, 2022 by a coalition of shipping leaders, aims to reduce the environmental impact of liquefied natural gas (LNG) in shipping while assisting the transition to future fuel solutions. MAMII’s current members include Maran Gas Maritime, Mediterranean

Shipping Company, Carnival Corporation & Plc, Seaspan Corporation, Shell, Lloyd's Register and Knutsen Group. New members of the MAMII include CoolCo, United Overseas Management, Capital Gas, Celsius Tankers, Global Meridian Holdings, Mitsui O.S.K. Lines, and TMS Cardiff Gas. Led by Safetytech Accelerator, MAMII was formed to identify, accelerate and advocate technology solutions for the maritime industry to measure and manage methane emissions activity. In doing so, it aims to minimize the environmental impact of liquefied natural gas (LNG) in shipping, whilst aiding the transition to future fuel solutions.”).

⁹⁹² Manifold Times (28 February 2024) *Chevron, TotalEnergies, Seapeak join maritime methane reducing initiative* (“The three companies join the now more than 20 members of MAMII, emphasising its pivotal role in addressing methane abatement within the maritime sector. Chevron, a global energy company, Seapeak, an owner-operator of liquefied gas vessels, and TotalEnergies, the world’s third largest LNG player, will bring their valuable insights and commitment to MAMII’s mission: tackling the critical challenge of ‘methane slip’. The initiative also announced that it has selected four providers to produce feasibility studies on the technologies which will reduce methane emissions from ships, with further details to be released soon.”).

⁹⁹³ Methane Guiding Principles, *The Methane Guiding Principles* (last visited 15 November 2023) (“1. Continually reduce methane emissions. ... 2. Advance strong performance across the gas supply chain. ... 3. Improve accuracy of methane emissions data. ... 4. Advocate sound policy and regulations on methane emissions. ... 5. Increase transparency.”). Shell Corporation initiated the Methane Guiding Principles in 2017: see Shell (2019) *Shell Sustainability Report 2019* (“We encourage industry-wide action on methane emissions reduction by participating in a number of voluntary initiatives, including: the Methane Guiding Principles coalition, which we initiated in 2017.”); and Methane Guiding Principles (30 November 2023) *The Methane Guiding Principles launches initiative supporting 20 countries on methane emissions reduction* (“The Methane Guiding Established in 2017, the MGP is a senior-executive-led methane coalition counting 50 members today. It focuses on five key areas of action to drive down methane emissions”).

⁹⁹⁴ Methane Guiding Principles, *Oil and Gas Sector Toolkit for the Global Methane Pledge* (last visited 3 February 2024) (“In line with the fourth Methane Guiding Principle, this Oil and Gas Sector Toolkit supports policy makers as they develop sound policy and regulation to drive down oil and gas methane emissions. Fulfilling the Global Methane Pledge will require widespread implementation efforts, including policies aimed at reducing flaring, venting and fugitive emissions. This toolkit connects policy makers and regulators to key resources and institutions supporting these policy efforts.”).

⁹⁹⁵ Methane Guiding Principles (4 December 2023) *Leading technical experts team up to help oil and gas companies meet OGDC methane emissions and flaring goals | Methane Guiding Principles* (“The International Association of Oil and Gas Producers (IOGP), Methane Guiding Principles (MGP), Oil and Gas Climate Initiative (OGCI) and Environmental Defense Fund (EDF) today announced their intention to build a framework to share expertise to help companies reduce methane emissions and flaring in line with the Oil & Gas Decarbonization Charter (OGDC) ambitions.”).

⁹⁹⁶ Methane Guiding Principles (30 November 2023) *The Methane Guiding Principles launches initiative supporting 20 countries on methane emissions reductions* (“The Methane Guiding Principles (MGP) launched the Advancing Global Methane Reduction (AGMR) initiative which aims to instigate and accelerate country-level methane emissions reductions. Under the AGMR, MGP members are currently working with governments and industry in 20 countries representing more than 25% of global oil and gas production, informing methane policies and regulations and disseminating best practice. The AGMR follows on the Oil and Gas sector toolkit for the Global Methane Pledge developed under the MGP in 2022. The toolkit connects policymakers and regulators with resources and institutions to support methane policy and regulation development in countries that joined the Global Methane Pledge.”).

⁹⁹⁷ Oil and Gas Climate Initiative, *About Us* (last visited 5 February 2023) (“OGCI member companies commit to: **Methane Intensity** -> By 2025, reduce the collective average methane intensity of aggregated upstream oil and gas

operations to well below 0.20%, from a 2017 baseline of 0.30%. **Carbon Intensity** -> Reduce member companies' aggregate upstream carbon intensity from 23 kg of greenhouse gases per barrel of oil or gas in 2017 to 17 kg by 2025. **CCUS Kickstarter** -> By 2030, help to decarbonize multiple industrial hubs and kickstart a commercial **CCUS** industry that can have a significant impact on greenhouse gas emissions. **OGCI Climate Investments** -> Invest OGCI's \$1B+ fund over a ten-year period to deliver a tangible impact on greenhouse gas emissions through accelerated innovation across the energy and industrial sectors. **Zero Routine Flaring** -> Support explicitly the aims of Zero Routine Flaring by 2030.”).

⁹⁹⁸ Oil and Gas Climate Initiative, *What OGCI is doing* (last visited 25 January 2023) (“OGCI launched the Aiming for Zero Methane Emissions Initiative in 2022 to encourage the whole industry to eliminate its methane footprint by 2030. Adopting a near zero methane emissions mindset has helped OGCI member companies to accelerate the pace of reduction using existing and emerging technologies. We met our initial 2025 upstream methane intensity target in 2020 and reached 0.17% in 2021. Absolute upstream methane emissions have fallen by 40% from 2017 to 2021.”).

⁹⁹⁹ Aiming for Zero Methane Emissions Initiative, *About Us* (last visited 25 January 2023) (“The Aiming for Zero Methane Emissions Initiative aims to eliminate the oil and gas industry’s methane footprint by 2030. It calls for an all-in approach that treats methane emissions as seriously as the oil and gas industry already treats safety: aiming for zero and striving to do what is needed to get there. Aiming for Zero acts as a complement for key initiatives such as the Methane Guiding Principles, the Oil and Gas Methane Partnership 2.0 and the Global Methane Alliance.”).

¹⁰⁰⁰ Craft L. (9 June 2023) *OGCI Shifts Methane Focus from Location to Elimination*, Energy Intelligence (“Tackling methane emissions — and actually slashing them all the way down to zero — is the best opportunity for the industry to advance on its decarbonization goals, Oil and Gas Climate Initiative Chairman Bjorn Otto Sverdrup said Thursday.”).

¹⁰⁰¹ Oil and Gas Climate Initiative (2023) [RECOMMENDED PRACTICES FOR METHANE EMISSIONS DETECTION AND QUANTIFICATION TECHNOLOGIES – UPSTREAM, 7](#) (“This document and an accompanying set of technology data sheets² provide oil and gas operators with guidelines for selecting and deploying methane emissions detection and quantification technologies tailored to the situation at their sites, with the aim of improving upstream methane management and emissions reporting.”).

¹⁰⁰² Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The Oil and Gas Climate Initiative (OGCI) is expanding its Satellite Monitoring Campaign to provide actionable data to reduce emissions from large-magnitude methane plumes and flares, supported by in-kind contributions from OGCI companies. ExxonMobil also intends to provide up to \$25 million in in-kind assistance to address capability shortcomings to reduce methane emissions.”).

¹⁰⁰³ COP28 (2 December 2023) *Oil & Gas Decarbonization Charter launched to accelerate climate action* (“To date, 50 companies, representing more than 40 percent of global oil production have signed on to the OGDC, with National Oil Companies representing over 60 percent of signatories - the largest-ever number of NOCs to commit to a decarbonization initiative. COP28 President Dr. Sultan Al Jaber said, “The launch of the OGDC is a great first step - and whilst many national oil companies have adopted net-zero 2050 targets for the first time, I know that they and others, can and need to do more. We need the entire industry to keep 1.5C within reach and set even stronger ambitions for decarbonization.” Signatories have committed to net-zero operations by 2050 at the latest, and ending routine flaring by 2030, and near-zero upstream methane emissions.”). See also Puko T. (2 December 2023) *Oil companies' unexpected plan to tackle climate change*, WASHINGTON POST (“The unexpected pledge, which could be one of the most consequential results from the United Nations Climate Change Conference, or COP28, underscores the fossil fuel industry’s profound influence at this year’s talks in Dubai. Sultan Al Jaber — the Emirati oil executive leading COP28 — had pushed for the international pact as a way to demonstrate how petrostates and oil and gas companies can speed the transition to cleaner energy. The plan commits state-owned giants such as Saudi Aramco, along with corporate supermajors including ExxonMobil, to limit emissions of the climate superpollutant from their drilling and

production work. It also includes international monitoring efforts intended to hold companies to their promises, and came out on the same day that U.S. officials announced new rules they say would limit methane emissions from the oil and gas industry by nearly 80 percent over the next 15 years.”).

¹⁰⁰⁴ COP28 (2 December 2023) *Oil & Gas Decarbonization Charter launched to accelerate climate action* (“To date, 50 companies, representing more than 40 percent of global oil production have signed on to the OGDC, with National Oil Companies representing over 60 percent of signatories - the largest-ever number of NOCs to commit to a decarbonization initiative. COP28 President Dr. Sultan Al Jaber said, “The launch of the OGDC is a great first step - and whilst many national oil companies have adopted net-zero 2050 targets for the first time, I know that they and others, can and need to do more. We need the entire industry to keep 1.5C within reach and set even stronger ambitions for decarbonization.” Signatories have committed to net-zero operations by 2050 at the latest, and ending routine flaring by 2030, and near-zero upstream methane emissions.”). See also Gupte E. (2 December 2023) *COP28: Fifty oil and gas companies sign net zero, methane pledges*, S&P (“Some 50 oil and natural gas producers, including Saudi Aramco and 29 other national oil companies, have signed an agreement to reduce their carbon emissions to net zero by 2050 and curb methane emissions to near-zero by 2030, the COP presidency of the UN Climate Change Conference in Dubai said Dec. 2.”). See generally (7 December 2023) *Big oil agrees to slash methane emissions*, THE ECONOMIST.

¹⁰⁰⁵ Oil Change International (1 December 2023) *Open Letter: The World Needs A Transformational Outcome, Not More Voluntary Pledges* (“By refusing to commit to address the emissions from oil and gas being burned and to end fossil fuel expansion, the proposed ‘Global Decarbonization Accelerator’ would serve as a smokescreen to hide the reality that we need to phase out oil, gas, and coal. Voluntary commitments are a dangerous distraction from what is needed at COP28. Oil and gas companies meeting to sign a pledge that only deals with their operational emissions is like a group of arsonists meeting to promise to light fires more efficiently.”).

¹⁰⁰⁶ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The Oil and Gas Methane Partnership 2.0 announced new members. The Partnership now represents over 120 companies with assets in more than 60 countries on five continents and covers over 35% of the world’s oil and gas production and over 70% of LNG flows.”).

¹⁰⁰⁷ United Nations Environment Programme (24 November 2020) *Oil and Gas Industry commits to new framework to monitor, report and reduce methane emissions*, Press Release (“Crucially, the OGMP 2.0 includes not only a company’s own operations, but also the many joint ventures responsible for a substantial share of their production. The OGMP 2.0 framework applies to the full oil and gas value chain, not only upstream production, but also midstream transportation and downstream processing and refining – areas with substantial emissions potential that are often left out of reporting today.... In order to support the realization of global climate targets, OGMP 2.0 aims to deliver a 45 per cent reduction in the industry’s methane emissions by 2025, and a 60-75 per cent reduction by 2030.”).

¹⁰⁰⁸ Climate and & Clean Air Coalition (2020) *Oil and Gas Methane Partnership (OGMP) 2.0 Framework* (“To achieve ‘gold standard’, a company must demonstrate an explicit and credible path to the required reporting levels (according to 4.3.2) within the required period (according to 4.2.2 and 4.4). The path should be demonstrated through a multi-year plan that shows how the company plans to achieve these objectives. For clarity, ‘gold standard’ includes the credible path towards the agreed endpoint within the agreed timeline, rather than just the endpoint itself.”)

¹⁰⁰⁹ European Commission (14 October 2020) *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, and the Committee of the Regions on an EU Strategy to Reduce Methane Emissions*, 11 (“The Commission will deliver legislative proposals in 2021 on: • Compulsory measurement, reporting, and verification (MRV) for all energy related methane emissions, building on the Oil and Gas Methane Partnership (OGMP 2.0) methodology. • Obligation to improve leak detection and repair (LDAR) of leaks on all fossil gas infrastructure, as well as any other infrastructure that produces, transports or uses fossil gas, including as a feedstock. 7. The Commission will consider legislation on eliminating routine venting and flaring in the energy sector covering the full supply chain, up to the point of production. 8. The Commission will work to extend

the OGMP framework to more companies in the gas and oil upstream, midstream and downstream as well as to the coal sector and closed as well as abandoned sites. 9. The Commission will promote remedial work under the initiative for Coal Regions in Transition. Best-practice recommendations and/or enabling legislation will be brought forward if necessary.”).

¹⁰¹⁰ United Nations Environment Programme (24 November 2020) *Oil and Gas Industry commits to new framework to monitor, report and reduce methane emissions*, Press Release (“Crucially, the OGMP 2.0 includes not only a company’s own operations, but also the many joint ventures responsible for a substantial share of their production. The OGMP 2.0 framework applies to the full oil and gas value chain, not only upstream production, but also midstream transportation and downstream processing and refining – areas with substantial emissions potential that are often left out of reporting today.... In order to support the realization of global climate targets, OGMP 2.0 aims to deliver a 45 per cent reduction in the industry’s methane emissions by 2025, and a 60-75 per cent reduction by 2030.”). OGMP 2.0 signatories are expected to provide continually updated implementation plans showing continuous improvement in measurement, coverage, and technical guidelines. See Climate & Clean Air Coalition (2020) *Oil and Gas Methane Partnership (OGMP) 2.0 Framework* (“To achieve ‘gold standard’, a company must demonstrate an explicit and credible path to the required reporting levels (according to 4.3.2) within the required period (according to 4.2.2 and 4.4). The path should be demonstrated through a multi-year plan that shows how the company plans to achieve these objectives. For clarity, ‘gold standard’ includes the credible path towards the agreed endpoint within the agreed timeline, rather than just the endpoint itself.”).

¹⁰¹¹ World Biogas Association, *What is our mission?* (last visited 5 February 2023) (“The World Biogas Association is the global trade association for the biogas, landfill gas and anaerobic digestion (AD) sectors, dedicated to facilitating the adoption of biogas globally. We believe that the global adoption of biogas technologies is a multi-faceted opportunity to produce clean, renewable energy while resolving global issues related to development, public health and economic growth. We seek to represent all organisations working in the biogas industry at the international level across the world, including; national associations, biogas operators and developers, equipment providers, water companies, the agricultural sector, waste companies, and academic & research institutions.”).

¹⁰¹² World Biogas Association, *Membership benefits* (last visited 5 February 2023) (“At the same time we will support our industry members to take advantage of these growing markets through direct contact, our networking events and numerous publications. And continue to promote and develop industry standards, support best practice across all areas including health & safety and invest in research and innovation to ensure that we as an industry perform to the highest levels and deliver maximum value from the resources we process.”).

¹⁰¹³ World Biogas Summit, *2021 Programme* (last visited 5 February 2023).

¹⁰¹⁴ World Biogas Association (29 November 2023) *No time to waste – World Biogas Association hosts side event at COP28 in Dubai on the role of the waste sector in delivering the Global Methane Pledge* (“No time to waste – World Biogas Association hosts side event at COP28 in Dubai on the role of the waste sector in delivering the Global Methane Pledge The global biogas trade body will host a COP28 official side event in partnership with the Climate and Clean Air Coalition (CCAC), the International Solid Waste Association (ISWA) and the Institute for Governance and Sustainable Development (IGSD)”).

¹⁰¹⁵ See generally Lackner M. & Mohlin K. (2022) *Certification of Natural Gas With Low Methane Emissions: Criteria for Credible Certification Programs*, Environmental Defense Fund; and Hmiel B., Lyon D. R., Warren J. D., Yu J., Cusworth D. H., Duren R. M., & Hamburg S. P. (2023) *Empirical quantification of methane emission intensity from oil and gas producers in the Permian basin*, ENVIRON. RES. LETT. 18(2): 024029. See also Ball J. (30 January 2023) *Inside the high-dollar race to sell natural gas as low-carbon*, CANARY MEDIA.

¹⁰¹⁶ See The Payne Institute for Public Policy (30 May 2023) *MINES Responsible Gas: Glossary of Terminology related to Responsible Gas*.

¹⁰¹⁷ MiQ, *Why Methane & Certification* (last visited 25 January 2023) (“We are already certifying 4% of the global gas market. Our aim is to differentiate all natural gas within the next decade.”).

¹⁰¹⁸ MiQ, *Welcome to the MiQ Registry* (last visited 25 January 2023) (“An MiQ Certificate represents the methane emissions performance attributes of 1 MMBtu of natural gas. Each certificate, which has a unique identifier, evidences where and when the gas was produced and the methane intensity of production. Unlike other frameworks that assess emissions at the national or company level, MiQ Certification is based on an independent Standard that is assessed at the facility or platform level. This more granular assessment by a third party provides transparent metrics for practically comparing gas supplies based on their methane emissions performance.”).

¹⁰¹⁹ MiQ, *What is the MiQ standard for operators* (last visited 25 January 2023) (“What requirements does MiQ’s Standard look at? Methane Intensity – The MiQ Standard uses the Natural Gas Sustainability Initiative (NGSI) protocol for calculating the methane intensity of natural gas, or robust alternative methodologies. Company Practices – The MiQ Standard requires operators to deploy monitoring technology at source and facility level (bottom up and top down) to detect unintended methane emissions, specifying frequencies and minimum detection levels. Monitoring Technology – The MiQ Standard requires operators to deploy monitoring technology at source and facility level to detect unintended methane emissions. As the grading increases, operators will be required to implement best practices, leading to more robust methane emissions management.”).

¹⁰²⁰ MiQ (2022) *Main Document – Onshore Production v1.0*, 15 (Table 2).

¹⁰²¹ MiQ (8 June 2023) *MiQ-Highwood Index Reveals Up-to-Date, Measurement-Informed Estimate of U.S. Average Methane Intensity*, Press Release. See also Rutherford J., Romo J., Fox T., & Owens L. (2023) *THE MIQ-HIGHWOOD INDEX™: A NATIONAL-SCALE MEASUREMENT- INFORMED METHANE INTENSITY FOR THE UNITED STATES*, MiQ & Highwood Emissions Management.

¹⁰²² <https://www.equitableorigin.org/>

¹⁰²³ Project Canary, *About* (last visited 3 February 2023); Project Canary, *TrustWell by Project Canary* (last visited 3 February 2023) (“TrustWell certifications evaluate the highest number of data points within 24 operational categories, including 12 dynamic scores for continuous performance improvement.”). See also International Environmental Standards PBC (1 September 2020) *TrustWell Standard Definitional Document*.

¹⁰²⁴ American Gas Association, *Natural Gas Sustainability Initiative (NGSI)* (last visited 5 February 2023) (“NGSI is a voluntary, industry-wide approach for companies to calculate methane emissions intensity by segment—the Methane Emissions Intensity Protocol (Protocol). This consistent, transparent and comparable method for measuring and reporting methane emissions throughout the natural gas supply chain will improve the quality of information available and will help companies more effectively identify ways to reduce methane emissions and communicate progress.”).

¹⁰²⁵ Project Canary, *About* (last visited 3 February 2023); Project Canary, *TrustWell by Project Canary* (last visited 3 February 2023) (“TrustWell certifications evaluate the highest number of data points within 24 operational categories, including 12 dynamic scores for continuous performance improvement.”). See also International Environmental Standards PBC (1 September 2020) *TrustWell Standard Definitional Document*.

¹⁰²⁶ Project Canary, *Emissions Management* (last visited 3 February 2023).

¹⁰²⁷ Project Canary, *Measure and Reduce, Measured Total Site Emissions for Upstream Facilities: Operators Need Reportable Data & Actionable Insights* (last visited 3 February 2023) (“Our quantification model is underpinned by machine learning to measure total site emissions versus single emission events; We provide an accurate inventory of emissions generated by all sources on a pad, from consistent flux of small emissions off tanks, to the larger discrete

emission events; Our model identifies offsite emissions and allows the user to choose whether to receive alerts on those or not; We track the cumulative effect of extremely short duration emissions sources, such as pneumatic releases.”).

¹⁰²⁸ Project Canary, *Environmental Assessments* (last visited 3 February 2023).

¹⁰²⁹ Project Canary & Colorado State University Center for Energy Water Sustainability (24 August 2021) *Certification of Freshwater Resource Use as Part of a Responsibly Sourced Gas ESG Strategy*. See also Project Canary, *Environmental Assessments* (last visited 3 February 2023).

¹⁰³⁰ See Project Canary, *Emissions Management* (last visited 3 February 2023); Project Canary, *Sensing Devices* (last visited 3 February 2023); and Project Canary (8 November 2022) *Seize the Methane Moment* (“We believe you can’t improve what you don’t measure. Today, our Canary X/ monitors, software and analytics measure, visualize, and quantify methane. We are also evolving our innovative platform to aggregate and analyze data from other sensors, including aerial devices. Our customers now have more sensor options to choose from to help impact climate change positively, while future-proofing their methane detection and quantification strategies. Our *Aeris by Project Canary* line of infrared spectrum monitors can measure methane and ethane to differentiate between biogenic and thermogenic methane in real time, ethylene oxide, formaldehyde, and numerous other hazardous air sources pollutants. These same monitors, coupled with Project Canary’s models and analytics, can tune carbon dioxide measurements down to 2 parts per trillion (PPT). In the new Canary portal, multiple sensor data sources can be reconciled, giving operators more choices about sensor types and deployment. A comprehensive set of technologies (both hardware and software) will be needed to make a lasting impact on the world around us.”).

¹⁰³¹ Project Canary (24 August 2022) *Kellas Midstream Installs Project Canary Continuous Emissions Monitoring at Teesside CATS Terminal, Showcasing Peer-Leading ESG Commitment* (“Kellas Midstream, the BlackRock and GIC backed company responsible for transporting 40 percent of the U.K.’s domestic gas production, announced today that it has deployed continuous emissions monitoring at its Teesside Central Area Transmission System (CATS) terminal in partnership with Project Canary®, a U.S.-based SaaS-focused ESG data analytics firm. The ultra-sensitive Canary sensors have been installed at multiple points around CATS to precisely detect, monitor, and measure methane emissions at the site level in real-time.”).

¹⁰³² For a recently-published guide for journalists on covering methane and investigating specific sources, see McIntosh T. (6 February 2022) *GIJN’s Guide to Investigating Methane — A Key to Fighting Climate Change*, GLOBAL INVESTIGATIVE JOURNALISM NETWORK. See also Francis D., Weston M., Fonseca R., Temimi M., & Alsuwaidi A. (2023) *Trends and variability in methane concentrations over the Southeastern Arabian Peninsula*, FRONT. ENVIRON. SCI. 11: 1–17, 14 (“Policy and procedures to reduce emissions through mitigation and adaptation. Ground-based CH₄ measurements, collected through a dense network of surface observations, and higher spatial and temporal resolution satellite products are needed to identify the major sources and further our understanding of the processes behind the observed CH₄ variability in the region.”).

¹⁰³³ For an overview of new measurement techniques and technologies in the oil and gas sector, see generally Dreyfus G. & Ferris T. (2023) *Metrics and Measurement of Methane Emissions*, in *INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND CARBON SEQUESTRATION MONITORING*, China Council for International Cooperation on Environment and Development.

¹⁰³⁴ Lee M. (25 October 2021) *The key for EPA rules? Inside the methane tech revolution*, E&E NEWS (“The laboratory, known as the Methane Emissions Technology Evaluation Center (METEC), was built five years ago at Colorado State University with a grant from the Energy Department. It has since become a central player in a boom of methane detection companies — a surge being driven partly by corporate pressure to cut emissions and looming EPA regulations. In the past four years, the number of such firms has doubled, with many testing their specialized drones and cutting-edge sensors on staged gas releases at METEC.”).

¹⁰³⁵ For example, see Clarke A. (29 September 2023) *The Climate Sleuth Uncovering Methane Leaks for the United Nations*, BLOOMBERG (“The 27-year-old Ph.D. student isn’t a detective but she may be the closest thing the world has to climate police. She’s one of the world’s foremost remote sensing scientists who uses satellite observations to identify some of the most damaging emissions.”).

¹⁰³⁶ Duran R. (2021) *Towards a multi-scale methane monitoring system of systems* (Carbon Mapper presentation at Day 2 of U.S. EPA Methane Detection Technology Workshop on August 24, 2021, starting at 5:05:00).

¹⁰³⁷ Schlingler R. (15 April 2021) *Carbon Mapper launches satellite program to pinpoint methane and CO₂ super emitters*, PLANET (“Carbon Mapper, a new nonprofit organization, and its partners – the State of California, NASA’s Jet Propulsion Laboratory (NASA JPL), Planet, the University of Arizona, Arizona State University (ASU), High Tide Foundation and RMI – announced a pioneering program to help improve understanding of and accelerate reductions in global methane and carbon dioxide (CO₂) emissions. In addition, the Carbon Mapper consortium announced its plan to deploy a ground-breaking hyperspectral satellite constellation with the ability to pinpoint, quantify and track point-source methane and CO₂ emissions.”).

¹⁰³⁸ Carbon Mapper (14 September 2023) *Road to Launch: The Carbon Mapper Coalition achieves key satellite milestones* (“While these milestones are an exciting step on our journey to develop and deploy the first two Carbon Mapper Coalition satellites, we now turn efforts toward integrating the instrument with the satellite bus this fall and preparing for launch, targeting early 2024.”).

¹⁰³⁹ Schlingler R. (15 April 2021) *Carbon Mapper launches satellite program to pinpoint methane and CO₂ super emitters*, PLANET (“Carbon Mapper, in collaboration with its public and private partners, is developing the satellite constellation in three phases. The initial study phase is complete and included two years of preliminary engineering development and manufacturing. Phase 1 is underway and includes development of the first two satellites by Planet and NASA JPL, planned to launch in 2023, accompanying data processing platforms, and ongoing cooperative methane mitigation pilot projects using aircraft in California and other US states. Phase 2, which is in development, would encompass the expansion to an operational multi-satellite constellation starting in 2025.”).

¹⁰⁴⁰ Carbon Mapper Data Portal (*last visited* 4 February 2023).

¹⁰⁴¹ Carbon Mapper, *Carbon Mapper Launches New Initiative to Guide Global Action on Solid Waste Methane Emissions Thanks to \$8M Commitment from the Grantham Foundation* (*last visited* 4 February 2023).

¹⁰⁴² Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial*, (“Further Progress in Collecting and Disseminating Actionable Methane Data, including the release of a beta version of IMEO’s Methane Data Platform, which integrates data from dozens of public Earth observing satellites, the launch of complementary efforts like new United States Greenhouse Gas Center, and MethaneSAT and Carbon Mapper announcing plans for satellite launches in 2024.”).

¹⁰⁴³ Copernicus, *About Copernicus* (*last visited* 5 February 2023) (“Copernicus is the European Union’s Earth observation programme, looking at our planet and its environment to benefit all European citizens. It offers information services that draw from satellite Earth Observation and in-situ (non-space) data.”).

¹⁰⁴⁴ Copernicus, *About Copernicus* (*last visited* 5 February 2023) (“The European Commission manages the Programme. It is implemented in partnership with the Member States, the European Space Agency (ESA), the European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), EU Agencies and Mercator Océan.”).

¹⁰⁴⁵ Copernicus, *Copernicus in detail* (last visited 5 February 2023) (“Copernicus is served by a set of [dedicated satellites](#) (the Sentinel families) and contributing missions (existing commercial and public satellites). The Sentinel satellites are specifically designed to meet the needs of the Copernicus services and their users. Since the launch of Sentinel-1A in 2014, the European Union set in motion a process to place a constellation of almost 20 more satellites in orbit before 2030.”).

¹⁰⁴⁶ Copernicus, *Atmosphere* (last visited 5 February 2023) (“The service focuses on five main areas: 1. Air quality and atmospheric composition; 2. Ozone layer and ultra-violet radiation; 3. Emissions and surface fluxes; 4. Solar radiation; 5. Climate forcing.”).

¹⁰⁴⁷ Copernicus, *Land* (last visited 5 February 2023) (“It supports applications in a variety of domains such as spatial and urban planning, forest management, water management, agriculture and food security, nature conservation and restoration, rural development, ecosystem accounting and mitigation/adaptation to climate change.”).

¹⁰⁴⁸ Copernicus, *Climate Change* (last visited 5 February 2023) (“The C3S mission is to support adaptation and mitigation policies of the European Union by providing consistent and authoritative information about climate change. We offer free and open access to climate data and tools based on the best available science. We listen to our users and endeavour to help them meet their goals in dealing with the impacts of climate change.”).

¹⁰⁴⁹ Climate Trace, *Our Vision* (last visited 7 February 2024) (“Climate TRACE is a non-profit coalition of organizations building a timely, open, and accessible inventory of exactly where greenhouse gas emissions are coming from.”).

¹⁰⁵⁰ Climate Trace, *Approach* (last visited 7 February 2024) (“We use satellites, other remote sensing techniques, and artificial intelligence to deliver a detailed look at global emissions that gets even better over time.”). *See also* Gordan D. (24 January 2024) *From Global to Local: Climate TRACE Helps Prioritize Emissions Reductions from the Oil and Gas Industry*, ROCKY MOUNTAIN INSTITUTE (“There is increasing urgency to immediately address the climate impacts of oil and gas, a major yet easy-to-abate source of methane worldwide. Following a year of mounting climate catastrophes, methane — and especially methane satellite data — took center stage in shaping COP28 negotiations. Improved inventories and advances in emissions monitoring are playing a growing and important role in making emissions visible and actionable. Climate TRACE is a perfect example. At COP28, Climate TRACE unveiled updates to its open emissions database — an inventory that includes every country and territory in the world, every major sector of the economy, and nearly every major source of greenhouse gas emissions encompassing more than 352 million assets.”).

¹⁰⁵¹ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial*, (“Launch of the Data to Methane Action Campaign. The Global Methane Hub, in collaboration with IMEO and its partners, launched a Campaign to comprehensively deliver increased funding to enable governments, businesses, and other actors to radically reduce methane emissions, including harmful leaks, and drive effective policy change through never-before-leveraged data. At COP28, the Global Methane Hub announced \$10 million in seed funding toward the Campaign and a funding target of \$300 million by COP29.”).

¹⁰⁵² National Aeronautics and Space Administration Jet Propulsion Laboratory (25 October 2022) *Methane ‘Super-Emitters’ Mapped by NASA’s New Earth Space Mission* (“NASA’s Earth Surface Mineral Dust Source Investigation (EMIT) mission is mapping the prevalence of key minerals in the planet’s dust-producing deserts – information that will advance our understanding of airborne dust’s effects on climate. But EMIT has demonstrated another crucial capability: detecting the presence of methane, a potent greenhouse gas.”).

¹⁰⁵³ Thorpe A. K., *et al.* (2023) *Attribution of individual methane and carbon dioxide emission sources using EMIT observations from space*, SCI. ADV. 9(46): 1–13, 7 (“Compared to airborne results (AVIRIS-NG and GAO) across a number of regions in the United States, the EMIT distribution is shifted to larger emissions. This is expected both

because EMIT is observing a class of emissions far larger than those seen in U.S. airborne surveys and because EMIT is less sensitive to smaller emission rates due to the coarser spatial resolution. ... The total EMIT detected emissions by sector is shown in Fig. 6B, with 88.7% from oil and gas (63.5% upstream, 24.3% midstream, and 0.9% downstream). Emissions from the waste sector represent 8.6% of total observed emissions, including examples from 11 landfills and one wastewater treatment facility (Fig. 2C). ... Emissions can be quantified and attributed to specific sectors, which is particularly important when multiple emissions from different sectors are present in close proximity (Fig. 3). We highlight the first examples of EMIT imaging spectrometer observations of methane and carbon dioxide emissions from sources spanning the oil and gas (upstream, midstream, and downstream), waste (landfill and wastewater treatment), and energy sectors (power plant).”).

¹⁰⁵⁴ National Aeronautics and Space Administration Jet Propulsion Laboratory (25 October 2022) *Methane ‘Super-Emitters’ Mapped by NASA’s New Earth Space Mission* (“In the data EMIT has collected since being installed on the International Space Station in July, the science team has identified more than 50 “super-emitters” in Central Asia, the Middle East, and the Southwestern United States. Super-emitters are facilities, equipment, and other infrastructure, typically in the fossil-fuel, waste, or agriculture sectors, that emit methane at high rates.”).

¹⁰⁵⁵ National Aeronautics and Space Administration Jet Propulsion Laboratory (25 October 2022) *Methane ‘Super-Emitters’ Mapped by NASA’s New Earth Space Mission* (“EMIT’s methane observations came as scientists verified the accuracy of the imaging spectrometer’s mineral data. Over its mission, EMIT will collect measurements of surface minerals in arid regions of Africa, Asia, North and South America, and Australia. The data will help researchers better understand airborne dust particles’ role in heating and cooling Earth’s atmosphere and surface. ... With wide, repeated coverage from its vantage point on the space station, EMIT will potentially find hundreds of super-emitters – some of them previously spotted through air-, space-, or ground-based measurement, and others that were unknown.”).

¹⁰⁵⁶ Thorpe A. K., *et al.* (2023) *Attribution of individual methane and carbon dioxide emission sources using EMIT observations from space*, *SCI. ADV.* 9(46): 1–13, 8 (“Building on the design heritage and capabilities of the EMIT instrument, the JPL as part of the Carbon Mapper Coalition is supporting the launch of the first two satellites equipped with a JPL-developed imaging spectrometer in late 2023. Those instruments will feature an improved 5-nm spectral sampling and finer spatial resolution (30 m) and will be hosted on Planet Labs’ satellites, offering target tracking (higher effective SNR) in noon-crossing sunsynchronous orbits, resulting in greater sensitivity for methane and carbon dioxide point source emissions. Combining measurements obtained from different instruments improves global coverage and revisit frequency, which is critical to improving understanding of global emissions and informing mitigation strategies. To this end, the EMIT greenhouse gas applications online mapping tool (<https://earth.jpl.nasa.gov/data/data-portal/> Greenhouse-Gases) will facilitate the distribution of scientific findings in support of NASA’s Open Source Science Initiative.”).

¹⁰⁵⁷ MethaneSAT, *Purpose* (last visited 9 March 2024) (“MethaneSAT will locate and quantify methane emissions from oil and gas operations almost anywhere on Earth and track progress over time. The free data will enable both companies and countries to identify, manage and reduce their emissions, and allow investors, gas buyers and the public to see and compare results.”). Google Cloud will provide computing capabilities to process the information and create a map of oil and gas infrastructure to be used with the MethaneSAT DATA. See Google Sustainability (14 February 2024) *How satellites, algorithms and AI can help map and trace methane sources* (“EDF’s new satellite, MethaneSAT, will map, measure and track methane with unprecedented precision, offering a comprehensive view of methane emissions. Launching in early March on a SpaceX Falcon 9 rocket, MethaneSAT will orbit the Earth 15 times a day at an altitude of over 350 miles. It will measure methane levels in the top oil and gas regions in the world for regular analysis. MethaneSAT is highly sophisticated; it has a unique ability to monitor both high-emitting methane sources and small sources spread over a wide area. To calculate the amount of methane emitted in specific places and track those emissions over time, EDF developed algorithms powered by Google Cloud in collaboration with scientists at Harvard University’s School of Engineering and Applied Science and its Center for Astrophysics, and scientists at the Smithsonian Astrophysical Observatory.”).

¹⁰⁵⁸ spaceQ (9 September 2019) *GHGSat Signs Data Agreement with the Canadian Space Agency and the European Space Agency* (“The deal will see GHGSat providing 5% of the GHGSat-C1 Iris satellite imaging capacity for free. The CSA and ESA will use that capacity for remote sensing, climate research, and data validation projects according to a GHGSat Tweet.”).

¹⁰⁵⁹ European Space Agency (3 November 2021) *ESA and GHGSat support new International Methane Emissions Observatory* (“The new initiative builds on the success of long-term and evolving data-sharing partnership between ESA and GHGSat, through the Canada–ESA Cooperation Agreement. Having proved the concept of high-resolution emissions monitoring from space, GHGSat launched its commercial constellation in 2019, rapidly building its capability and data archive. A *Memorandum of Intent*, between ESA, the Canadian Space Agency and GHGSat was signed that same year, with the aim of stimulating scientific uptake of this unique dataset.”).

¹⁰⁶⁰ (4 May 2022) *Methane from cow burps seen from space for the first time*, NEWSROUND (“The researchers at GHG Sat decided to use satellite technology to accurately measure the levels of methane produced by farms - because previously it has been difficult to do. Looking at their results, the scientists found the amount of methane released at the farm they studied in Joaquin Valley was between 361 to 668 kilogrammes per hour. GHGSat share their findings with the United Nation's International Methane Emissions Observatory programme (IMEO). The hope is that this information can be used to help set official targets to limit the amount of methane produced. The company is aiming to put around 10 satellites into orbit by next year to help continue their research.”). *See also* GHGSat.com.

¹⁰⁶¹ Maasackers J. D., Varon D. J., Elfarsdóttir A., McKeever J., Jervis D., Mahapatra G., Pandey S. Lorente A., Borsdorff T., Foothuis L. R., Schuit B. J., Tol P., van Kempen T. A., van Hees R., & Aben I. (2022) *Using satellites to uncover large methane emissions from landfills*, SCI. ADV. 8(32): 1–8, 1 (“We use the global surveying Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) to identify large emission hot spots and then zoom in with high-resolution target-mode observations from the GHGSat instrument suite to identify the responsible facilities and characterize their emissions. Using this approach, we detect and analyze strongly emitting landfills (3 to 29 t hour⁻¹) in Buenos Aires, Delhi, Lahore, and Mumbai. Using TROPOMI data in an inversion, we find that city-level emissions are 1.4 to 2.6 times larger than reported in commonly used emission inventories and that the landfills contribute 6 to 50% of those emissions. Our work demonstrates how complementary satellites enable global detection, identification, and monitoring of methane superemitters at the facility level.”); *discussed in* Dickie G. (11 August 2022) *Landfills around the world release a lot of methane - study*, REUTERS.

¹⁰⁶² GHGSat (5 December 2023) *GHGSat Signs Strategic Partnership With Yahsat and ADNOC Supporting the Mitigation of Global Energy Sector's Methane Emissions*, NEWSWIRE (“GHGSat, the global leader in emissions monitoring with satellites, today announced a strategic collaboration with Al Yah Satellite Communications Company (ADX: YAHSAT) and Abu Dhabi National Oil Company (ADNOC), aimed at reducing methane emissions from the global energy sector. The three entities signed a Memorandum of Understanding (MoU) during the Canada-UAE Future Energy Forum, organized by the Canada UAE Business Council in Dubai on 5th December. The new strategic partnership has also been selected by the COP28 Energy Transition team as a Lighthouse Project due to its ambitious scope and potential to reduce climate change.”).

¹⁰⁶³ GOSAT Project, *Home* (last visited 7 February 2024) (“The Greenhouse Gases Observing Satellite "IBUKI" (GOSAT) is the world's first spacecraft to measure the concentrations of carbon dioxide and methane, the two major greenhouse gases, from space. The spacecraft was launched successfully on January 23, 2009, and has been operating properly since then. Through analyzing the GOSAT observational data, scientists will be able to ascertain the global distribution of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄), and how the sources and sinks of these gases vary with seasons, years, and locations. These new findings will enhance scientific understanding on the causes of global warming. Also, they will serve as fundamental information for improving climate change prediction and establishing sound plans for mitigating global warming. The GOSAT Project is a joint effort of the Ministry of the Environment (MOE), the National Institute for Environmental Studies (NIES), and the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA).”).

¹⁰⁶⁴ GOSAT Project, *Home* (last visited 7 February 2024) (“The Greenhouse Gases Observing Satellite "IBUKI" (GOSAT) is the world's first spacecraft to measure the concentrations of carbon dioxide and methane, the two major greenhouse gases, from space. The spacecraft was launched successfully on January 23, 2009, and has been operating properly since then. Through analyzing the GOSAT observational data, scientists will be able to ascertain the global distribution of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄), and how the sources and sinks of these gases vary with seasons, years, and locations. These new findings will enhance scientific understanding on the causes of global warming. Also, they will serve as fundamental information for improving climate change prediction and establishing sound plans for mitigating global warming. The GOSAT Project is a joint effort of the Ministry of the Environment (MOE), the National Institute for Environmental Studies (NIES), and the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA).”).

¹⁰⁶⁵ International Energy Forum, *IEF Methane Initiative: Methane Measurement Methodology Project* (last visited 5 February 2023) (The International Energy Forum (IEF) launched the IEF Methane Initiative in June 2021 to develop a methane emissions measurement methodology, enabling its member countries to collect standardized data to mitigate methane emissions from the energy industry and address its share of climate change goals.”).

¹⁰⁶⁶ International Energy Forum, *IEF Methane Initiative: Methane Measurement Methodology Project* (last visited 5 February 2023) (“Experts estimate that currently reported methane emissions are about 10 percent of what is observed by satellite. The new methodology will allow IEF member countries to consider the best available data on methane emissions, define their historical methane baseline and set mitigation goals in a transparent and consistent manner. With these targets, IEF members would be able to present credible plans for reducing their countries' methane emissions in their Nationally Determined Contributions (NDC) ahead of the 26th UN Climate Change Conference of the Parties (COP26) in November 2021.”).

¹⁰⁶⁷ United Nations Environment Programme (2021) *An Eye on Methane: International Methane Emissions Observatory 2021 Report*, VI (“IMEO’s Theory of Change - IMEO has a clear proposition to catalyze change in the reality of the political economy. At the heart of IMEO’s Theory of Change is the need for an independent and trusted entity to integrate data from multiple sources, such as companies, satellites, scientific studies and national inventories. Using scientific insights, IMEO will integrate these multiple sources of heterogeneous data into a coherent and policy relevant dataset that highlights the confidence of each data element.”).

¹⁰⁶⁸ United Nations Environment Programme (31 October 2021) *Methane Observatory launched to boost action on powerful climate-warming gas*, Press Release (“IMEO will improve the reporting accuracy and public transparency of human-caused methane emissions. IMEO will initially focus on methane emissions from the fossil fuel sector, and then expand to other major emitting sectors like agriculture and waste.”).

¹⁰⁶⁹ United Nations Environment Programme (31 October 2021) *Methane Observatory launched to boost action on powerful climate-warming gas*, Press Release (“IMEO will provide the means to prioritize actions and monitor commitments made by state actors in the *Global Methane Pledge* – a US- and EU-led effort by over thirty countries to slash methane emissions by 30 per cent by 2030.”).

¹⁰⁷⁰ United Nations Environment Programme, *International Methane Emissions Observatory* (last visited 5 February 2023) (“Launched at the G20 Summit, the International Methane Emissions Observatory (IMEO) is a data-driven, action-focused initiative by the UN Environment Programme (UNEP) with support from the *European Commission* to catalyse dramatic reduction of methane emissions, starting with the energy sector.”).

¹⁰⁷¹ United Nations Environment Programme (31 October 2021) *Methane Observatory launched to boost action on powerful climate-warming gas*, Press Release (“Critical to this effort are data collected through OGMP 2.0, launched in November 2020 in the framework of the Climate and Clean Air Coalition. OGMP 2.0 is the only comprehensive, measurement-based reporting framework for the oil and gas sector, and its 74 member companies represent many of

the world’s largest operators across the entire value chain, with assets that account for over 30 per cent of all oil and gas production.”).

¹⁰⁷² See generally United Nations Environment Programme (2021) [AN EYE ON METHANE: INTERNATIONAL METHANE EMISSIONS OBSERVATORY 2021 REPORT](#); United Nations Environment Programme (2022) [AN EYE ON METHANE: INTERNATIONAL METHANE EMISSIONS OBSERVATORY 2022 REPORT](#); and United Nations Environment Programme (2023) [AN EYE ON METHANE: INTERNATIONAL METHANE EMISSIONS OBSERVATORY 2022 REPORT](#).

¹⁰⁷³ United States Department of State (17 November 2022) [Fact Sheet, Global Methane Pledge: From Moment to Momentum](#) (describing progress on the Global Methane Pledge Energy Pathway).

¹⁰⁷⁴ Kayrros Methane Watch, [FAQ](#) (last visited 18 December 2023) (“Our primary collaboration is with the UNEP’s International Methane Emission Observatory (IMEO), where we serve as a key data provider for the Methane Alert and Response System (MARS)”). See also Kayrros Methane Watch, [Kayrros Methane Watch](#) (last visited 18 December 2023) (“Access consolidated data from multiple satellite constellations into a single platform, allowing you to access real-time insights and make informed decisions.”).

¹⁰⁷⁵ United Nations Environment Programme, [MARS](#) (last visited 2 December 2023) (“UNEP’s International Methane Emissions Observatory launched the Methane Alert and Response System (MARS) at COP27, a new initiative to accelerate implementation of the Global Methane Pledge by transparently scaling up global efforts to detect and act on major methane emissions sources. At COP28 results of the MARS pilot period have gone live, publicly sharing satellite data for notified emissions events.”).

¹⁰⁷⁶ Clarke A. (1 December 2023) [Methane Leak in Argentina Halted After Satellite Observation](#), BLOOMBERG (“Scientists working for the United Nations’ International Methane Emissions Observatory in March spotted a leak in satellite data in Argentina, and relayed that information to government officials who quickly shared the data with the responsible operator. The energy company, which wasn’t identified, found that a heat exchanger had suffered ruptured tubes causing the potent greenhouse gas to leak and quickly conducted repairs. “This is the first example of how we really can make this data actionable,” Manfredi Caltagirone, the head of IMEO, said in an interview referring to a new wave of satellites that are allowing scientists to track global methane emissions. “It’s just the first of what we expect is going to be many use cases that this data and these capabilities will be giving us.”).

¹⁰⁷⁷ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) [Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial](#) (“Continued Progress on Methane Data Science, including IMEO’s support for 34 new science studies to fill existing knowledge gaps about the location and magnitude of emissions, including the first scientific measurement campaigns in Sub-Saharan Africa (Angola and Gabon) and the Middle East (Oman).”).

¹⁰⁷⁸ Gordon D., Koomey J., Brandt A., & Bergerson J. (2022) [Know Your Oil and Gas: Generating Climate Intelligence to Cut Petroleum Industry Emissions](#), ROCKY MOUNTAIN INSTITUTE, 8–9 (“The OCI+ model offers a way forward. This life-cycle assessment model was first unveiled in 2015 by the Carnegie Endowment. The OCI+ has since received significant attention and use by governments, industry, nongovernmental organizations, and academics.ⁱⁱ The OCI+ offers an alternative to opaque and overly simplistic emissions assessments done by countries and companies using equipment counts and basic emissions factors. Instead, the OCI+’s suite of advanced models, together with operational inputs and satellite data, estimates GHG emissions through the entire oil and gas supply chain. Emissions intensities can be parsed in different ways—by resource category, region, operation, pollutant, and more—to identify significant reduction potential.”). Access the Oil Climate Index plus Gas tool at: ociplus.rmi.org.

¹⁰⁷⁹ Malik N. S. (23 June 2022) [World’s Dirtiest Oil and Gas Fields Are in Russia, Turkmenistan and Texas](#), BLOOMBERG (Created by researchers at RMI, Stanford University, the University of Calgary and Koomey Analytics, the OCI+ tool and an accompanying report conclude that significant fossil-fuel emissions occur not just at the point of combustion, but directly at the wellhead and during processing, refining, and transportation.”).

¹⁰⁸⁰ Malik N. S. (23 June 2022) *World's Dirtiest Oil and Gas Fields Are in Russia, Turkmenistan and Texas*, BLOOMBERG (“Methane, a greenhouse gas that is the primary component of natural gas and a powerful global warming agent, accounts for more than half of operational emissions at sites worldwide. Curbing the flaring and venting of the gas and ensuring that oil-field equipment is working properly can help significantly reduce upstream emissions, the report says, calling methane reductions ‘the highest priority for the oil and gas sector.’”).

¹⁰⁸¹ Gordan D., Kornbluh E., Huffman M., Marchan E., & Conway T. J. (2023) *NEW CLIMATE TOOLS FOR FINANCIAL INSTITUTIONS: METHANE DATA TRANSPARENCY FOR TARGETED INVESTMENTS*, ROCKY MOUNTAIN INSTITUTE, 2 (“Banks and other financial institutions (FIs) have an opportunity to leverage emissions models and detection and measurement technologies to inform near-term investment decisions that reduce methane in their energy portfolios. This is part of FIs’ broader strategy to transition oil and gas portfolios in line with climate goals. Methane is a highly potent greenhouse gas (GHG) that is routinely emitted by the oil and gas industry, which accounts for an estimated one-half of their corporate GHG emissions. Yet, equivalent barrels of oil and gas have wide-ranging methane emissions. Combining asset-level emissions modeling — using publicly available, peer-reviewed tools such as RMI’s Oil Climate Index plus Gas (OCI+) — with top-down emissions detection via satellites and aircraft offers climate intelligence to pinpoint methane hot spots and mitigate leakage.”).

¹⁰⁸² Dooren J. M. (4 December 2023) *NASA, Partners Launch US Greenhouse Gas Center to Share Climate Data*, NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (“The U.S. Greenhouse Gas Center will serve as a hub for collaboration between agencies across the U.S. government as well as non-profit and private sector partners. Data, information, and computer models from observations from the International Space Station, various satellite and airborne missions, and ground stations are available online. As the lead implementing agency of the center, NASA partnered with the EPA, National Institute of Standards and Technology, and National Oceanic and Atmospheric Administration. Science experts from each of these U.S. federal agencies curated this catalog of greenhouse gas datasets and analysis tools.”). *See generally U.S. Greenhouse Gas Center (last visited 5 December 2023)*.

¹⁰⁸³ National Aeronautics and Space Administration (4 December 2023) *NASA, Partners Launch US Greenhouse Gas Center to Share Climate Data* (“The center’s data catalog includes a curated collection of data sets that provide insights into greenhouse gas sources, sinks, emissions, and fluxes.”).

¹⁰⁸⁴ National Aeronautics and Space Administration (4 December 2023) *NASA, Partners Launch US Greenhouse Gas Center to Share Climate Data* (“The center’s data catalog includes a curated collection of data sets that provide insights into greenhouse gas sources, sinks, emissions, and fluxes. Initial information in the center website is focused on three areas: Estimates of greenhouse gas emissions from human activities. Naturally occurring greenhouse gas sources and sinks on land and in the ocean. Large methane emission event identification and quantification, leveraging aircraft and space-based data.”).

¹⁰⁸⁵ GTI Energy, *GTI Energy's Methane Emissions Measurement and Verification Initiative (last visited 3 November 2023)* (“Veritas, GTI Energy’s Methane Emissions Measurement and Verification Initiative, is meeting the urgent need for credible, comparable methane emissions measurement and accelerating actions that reduce methane emissions reductions. The standardized, science-based, technology-neutral, and measurement-informed protocols were built to assemble methane emissions inventories that are verified by direct field measurements.”).

¹⁰⁸⁶ Moore C., Weller Z., Blanton E., Rai S., Harmon A., Van Wagener D., Merino Guerrero M., Salahshoor S., Wong H. X., Harrison M., Rufael T., Van Horne J., Shumlich J., & Fox T. (2023) *Veritas Demonstrations: Results, Challenges, and Implications for Creation of Measurement Informed Inventories* Veritas, GTI Energy, 1 (“The Veritas protocols provide a guiding framework for operators across the natural gas supply chain to use measurements to estimate their methane emissions. As part of protocol development, 14 operators from across the natural gas supply chain participated in pilot demonstrations of the protocols in 2022. These operators executed draft versions of the

protocols to examine their expected emissions and deploy a variety of detection and quantification technologies, from handheld instruments to aircraft surveys.”).

¹⁰⁸⁷ Waste MAP, *About WasteMAP* (last visited 30 January 2024) (“The Waste Methane Assessment Platform, or WasteMAP, was created by RMI and Clean Air Task Force, with funding from the Global Methane Hub, to improve waste methane emissions transparency, highlight mitigation opportunities and best practices to reduce solid waste methane emissions.”).

¹⁰⁸⁸ Waste MAP, *About WasteMAP* (last visited 30 January 2024) (“WasteMAP consolidates modeled and reported waste data and methane emissions data from Carbon Mapper, Climate TRACE, EDGAR, RMI, SRON, UNFCCC, UN-Habitat, and the World Bank. You can learn more on the data and methodologies page.”).

¹⁰⁸⁹ Waste MAP, *Data and Methodology*, (last visited 30 January 2024) (“One unique feature of WasteMAP is the decision support tool (DST), which allows users to estimate baseline methane emissions from current waste management practices in a given city and project alternative methane emission scenarios with improved waste management practices. The DST is a step forward on emissions data transparency, because it enables users to uncover the material impact of certain waste management practices on methane emissions mitigation. This extra know-how makes it possible for users to translate emissions transparency into actionable policies and practices that lead to emissions mitigation.”).

¹⁰⁹⁰ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2022) *GREENHOUSE GAS EMISSIONS INFORMATION FOR DECISION MAKING: A FRAMEWORK GOING FORWARD*, The National Academies Press, 4 (“As more GHG emissions information becomes available and as more decision makers use this information, a common evaluation framework can help users determine what information products best meet their needs and understand the limitations of that information. A common framework can also provide guidance to researchers for designing more useful and trusted data and information. The Committee has identified six criteria or “pillars” that form a common framework to evaluate current and future GHG emissions information: 1. usability and timeliness: information is comparable and responsive to decision maker needs and available on timescales relevant to decision-making; 2. information transparency: information is both publicly available and traceable by anyone; 3. evaluation and validation: review, assessment, and comparison to independent datasets; 4. completeness: comprehensive spatial and temporal coverage of GHG emissions information; 5. inclusivity: who is involved in GHG emissions information creation and who is covered by the information; and 6. communication: methodologies and assumptions are described in understandable forms, well documented, and openly accessible.”).

¹⁰⁹¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 6-7 (This report confirms the findings of the *Global Methane Assessment* that “[s]ustained methane mitigation, wherever it occurs, stands out as an option that combines near-and long-term gains on surface temperature (*high confidence*) and leads to air quality benefits by reducing surface ozone levels globally (*high confidence*).”). See also Lean G. (30 May 2023) *Biden plan is the world’s best hope to avoid critical warming – but Britain’s dragging its feet*, INEWS (“An international methane agreement is inevitable, because it’s not possible to solve climate change without it,” says Durwood Zaelke, president of the DC-based Institute for Governance and Sustainable Development. “The question is: will it come early enough?”).

¹⁰⁹² AzerNews (7 March 2024) *Azerbaijan's joining Global Methane Pledge aligns with international efforts to limit global warming* (“Methane reduction is of global significance. The fact that 155 countries, contributing to around 50% of global methane pollution, have pledged to reduce emissions underscores the widespread recognition of the urgency to address this potent greenhouse gas. Azerbaijan’s decision to join the “Global Methane Pledge” is a notable step. The voluntary commitment to reduce methane emissions by at least 30% by 2030 aligns with the overall goal set by the initiative at COP26. This demonstrates Azerbaijan’s recognition of the role it can play in combating climate change and its willingness to contribute to international efforts. On March 4th, Azerbaijan announced its participation in the

"Global Methane Pledge," which involves voluntary commitments by states to reduce methane emissions.”). *See also Global Methane Pledge* (“With 155 country participants, representing a little over 50% of global anthropogenic methane emissions, we are well on our way to achieving the Pledge goal”); and United States Department of State (2 November 2021) *United States, European Union, and Partners Formally Launch Global Methane Pledge to Keep 1.5°C Within Reach*, Press Release (“Today, the United States, the European Union, and partners formally launched the Global Methane Pledge, an initiative to reduce global methane emissions to keep the goal of limiting warming to 1.5 degrees Celsius within reach. A total of over 100 countries representing 70% of the global economy and nearly half of anthropogenic methane emissions have now signed onto the pledge.”). As noted, the Global Methane Pledge sets a collective target to reduce global methane emissions by at least 30% from 2020 levels by 2030, would reduce warming by at least 0.2 °C by 2050 and keep the planet on a pathway consistent with staying below 1.5 °C. *See* United States Department of State (11 October 2021) *Joint U.S.-EU Statement on the Global Methane Pledge*, Press Release (“Countries joining the Global Methane Pledge commit to a collective goal of reducing global methane emissions by at least 30 percent from 2020 levels by 2030 and moving towards using highest tier IPCC good practice inventory methodologies to quantify methane emissions, with a particular focus on high emission sources. Successful implementation of the Pledge would reduce warming by at least 0.2 degrees Celsius by 2050.”).

¹⁰⁹³ Climate & Clean Air Coalition (7 December 2023) *Opportunities for Increasing Ambition of NDCs Through Integrated Air Pollution and Climate Change Planning: Progress & Looking Ahead to 2025*, 3 (“As of November 2023, 95% of NDCs include methane within the scope of their overall mitigation target. The absolute number of NDCs including methane in their overall target has more than doubled, from 90 to 184. Forty countries (~20%) include methane as a supplementary target or assessment of the mitigation potential of the measure(s) identified, growing from a base of two in 2016. Most of the countries who include methane in this way (88%) are GMP partners.”). *See also* Mar K. A., Unger C., Walderdorff L. & Butler T. (2022) *Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health*, ENVIRON. SCI. POLICY 134: 127–136, 131 (“A closer look into the NDCs shows that some go beyond simply listing CH₄ under the scope of covered gases and provide more detailed information on CH₄ mitigation. For instance, a number of NDCs include sector-specific policies in the areas of agriculture, waste, oil and gas, and coal that will reduce CH₄ emissions (Ross et al., 2018; Walderdorff, 2020). An even smaller number of NDCs include a quantitative, CH₄-specific reduction target, such as Canada, Japan, and New Zealand. Table 2 provides a summary of NDCs that include a quantitative descriptor of CH₄ mitigation as of January 1, 2021. While some of the NDCs shown in Table 2 include true quantitative CH₄ reduction targets, others quantify the potential for CH₄ reductions, or specify goals expressed in terms of efficiency or intensity. In aggregate, very few NDCs provide concrete or quantitative details on CH₄ mitigation activities – indeed, the NDCs summarized in Table 2 are among those that provide the greatest amount of specificity on CH₄ mitigation, which still tends to be very little.”). IGSD makes the following note re: the following three countries included in Mar *et al.* (2022): • Afghanistan: Afghanistan included methane reduction targets within its quantitative emissions reductions goals, but this is not reflected in Mar *et al.* (2022); • China: China’s 2016 Intended NDC included a numeric target for coal-bed methane capture, but this target is absent from its updated 2021 submission; China was therefore not included as a country with a numeric methane target; and • Dominica: Dominica’s Intended NDC included plans to install methane capture at a landfill. This project was slated for 2016–2021, but project completion remains unconfirmed. *See* United Nations Framework Convention on Climate Change (2022) *Nationally determined contributions under the Paris Agreement: Synthesis report by the secretariat*, Conference of the Parties, Fourth Session, 15 (“All NDCs cover CO₂ emissions, almost all (91 per cent) cover CH₄ and most (89 per cent) cover N₂O emissions, many (53 per cent) cover HFC emissions and some cover PFC and SF₆ (36 per cent) and NF₃ (26 per cent) emissions.”); and United States Department of State (17 November 2022) *Global Methane Pledge: From Moment to Momentum*, Press Release. *See also* Paris Agreement Article 4(2) and Article 4(3) (“2. Each Party shall prepare, communicate and maintain successive nationally determined contributions that it intends to achieve. Parties shall pursue domestic mitigation measures, with the aim of achieving the objectives of such contributions. 3. Each Party’s successive nationally determined contribution will represent a progression beyond the Party’s then current nationally determined contribution and reflect its highest possible ambition, reflecting its common but differentiated responsibilities and respective capabilities, in the light of different national circumstances.”).

¹⁰⁹⁴ United States Department of State (14 November 2023) *Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis* (“11. The two countries will immediately initiate technical working group cooperation on policy dialogue, technical solutions exchanges, and capacity building, building on their respective national methane action plans to develop their respective methane reduction actions/targets for inclusion in their 2035 NDCs and support each country’s methane reduction/control progress.”).

¹⁰⁹⁵ United States Department of State (2 December 2023) *Accelerating Fast Mitigation: Summit on Methane and Non-CO2 Greenhouse Gases*, Fact Sheet (“*The United States, People’s Republic of China, and United Arab Emirates today convened a Summit to accelerate actions to cut methane and other non-CO2 greenhouse gases as the fastest way to reduce near-term warming and keep a goal of limiting global average temperature increase to 1.5 degrees Celsius within reach.*”).

¹⁰⁹⁶ United Nations Framework Convention on Climate Change (2023) *Draft decision -/CMA.5 Outcome of the first global stocktake* (“Further recognizes the need for deep, rapid and sustained reductions in greenhouse gas emissions in line with 1.5 °C pathways and calls on Parties to contribute to the following global efforts, in a nationally determined manner, taking into account the Paris Agreement and their different national circumstances, pathways and approaches”).

¹⁰⁹⁷ See generally (3 December 2021) *Methane matters*, Editorial, NAT. GEOSCI. 14: 875. See also Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, NATURE 575(7784): 592–595, 594 (“In our view, the clearest emergency would be if we were approaching a global cascade of tipping points that led to a new, less habitable, ‘hothouse’ climate state¹¹. Interactions could happen through ocean and atmospheric circulation or through feedbacks that increase greenhouse-gas levels and global temperature. Alternatively, strong cloud feedbacks could cause a global tipping point^{12,13}. We argue that cascading effects might be common. ... If damaging tipping cascades can occur and a global tipping point cannot be ruled out, then this is an existential threat to civilization. No amount of economic cost–benefit analysis is going to help us. We need to change our approach to the climate problem. ... In our view, the evidence from tipping points alone suggests that we are in a state of planetary emergency: both the risk and urgency of the situation are acute...”); and Steffen W., et al. (2018) *Trajectories of the Earth System in the Anthropocene*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 115(33): 8252–8259, 8254 (“This analysis implies that, even if the Paris Accord target of a 1.5 °C to 2.0 °C rise in temperature is met, we cannot exclude the risk that a cascade of feedbacks could push the Earth System irreversibly onto a “Hothouse Earth” pathway. The challenge that humanity faces is to create a “Stabilized Earth” pathway that steers the Earth System away from its current trajectory toward the threshold beyond which is Hothouse Earth (Fig. 2). The human-created Stabilized Earth pathway leads to a basin of attraction that is not likely to exist in the Earth System’s stability landscape without human stewardship to create and maintain it.”).

¹⁰⁹⁸ See, e.g., Volcovici V. (27 November 2023) *COP28 climate summit puts spotlight on turning methane pledges into action*, REUTERS (“‘If it’s just a pledge, it will land with a thump,’ said Rachel Kyte, the World Bank’s former climate envoy. ‘The UAE needs to commit companies and countries to sit down and negotiate a binding agreement to x-out methane’ and ‘there are a lot of pieces coming together,’ said Durwood Zaelke, president of the Institute for Governance and Sustainable Development, a Washington, D.C.-based think tank. ‘With major emitters like the U.S., China and EU announcing new rules, the time is right for an agreement.’”). See also International Chamber of Commerce (23 November 2023) *Strengthening the Global Methane Pledge to keep 1.5 °C within reach* (“While businesses across our network are firmly committed to reducing methane emissions, clear policy signals from governments – backed by strong accountability measures within the GMP framework – are urgently needed to scale-up the mitigation efforts that are ultimately required by the end of this decade.”); Climate & Clean Air Coalition (9 December 2023) *Ministers Unite for Immediate Action on Climate and Clean Air, Urging Bold Financing and Swift Measures on Non-CO2 Super Pollutant Greenhouse Gases* (“As CCAC High-level Advocate for Finance Rachel Kyte, who moderated the session, said in her closing: “It’s 2023. With peak oil, peak coal, and peak emissions, we are also ‘peak-pledge.’” This Coalition has proven to turn ambition into action, it set out as the Coalition of the Working”); Clausing K., Garicano L., & Wolfram C. (2023) *How an international agreement on methane emissions can pave the*

way for enhanced global cooperation on climate change, Peterson Institute for International Economics, 2 (“Under the IRA, the United States has for the first time implemented a methane emissions fee as a backstop to new methane regulations in the oil and gas sectors. The European Union is also implementing new methane regulations on fossil energy, and the European Parliament proposal would penalize imports from countries that do not meet certain regulatory standards. Building on these parallel approaches, this Policy Brief proposes transatlantic coordination that uses an import charge as a lever to seek similarly ambitious regulatory reforms in the oil and gas sectors abroad. Specifically, oil and gas exporters can be encouraged to adopt regulations comparable to those in the United States and the European Union or, if they fail to implement regulations, pay a border adjustment fee on exports to the two jurisdictions. With time, most major energy importers would ideally join the coalition of countries cooperating on both stringent domestic regulations on oil and gas production (if applicable) and border adjustments on any dirty, nonregulating exporters.”); and Salata Institute for Climate and Sustainability (2023) *RESEARCH BRIEF: METHANE AND TRADE: PAVING THE WAY FOR ENHANCED GLOBAL COOPERATION ON CLIMATE CHANGE* (“As a first step, the United States, the European Union, and partner countries can work to coordinate their methane reduction policies, with an eye toward the eventual imposition of border adjustments on imports from countries that fail to raise their standards. The Biden administration could work with Congress on next steps for implementing a US methane border adjustment, while simultaneously leading efforts with the European Union, the G7, and other potential coalition members to develop a framework for a multilateral agreement. Ideally, a proposed framework could be presented at the 28th Conference of the Parties to the UN Framework Convention on Climate Change (COP28) in Dubai in late 2023.”).

¹⁰⁹⁹ United States Department of State (11 October 2021) *Joint U.S.-EU Statement on the Global Methane Pledge*, Press Release (“Successful implementation of the Pledge would reduce warming by at least 0.2 degrees Celsius by 2050.”). It would also keep the planet on a pathway consistent with staying within 1.5 °C. See United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *Briefing on the Global Methane Pledge* (“The Global Methane Pledge is a strong first step as the first-ever Heads-of State global commitment to cut methane emissions at a level consistent with a 1.5 C pathway.”).

¹¹⁰⁰ (16 September 1987) *Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*, 26 I.L.M. 1541 (entered into force 1 January 1989). For a discussion of the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, see generally Miller A. S., Zaelke D., & Andersen S. O. (2021) *Resetting Our Future: Cut Super Climate Pollutants Now! The ozone treaty’s urgent lessons for speeding up climate action*, John Hunt Publishing; and Andersen S., Zaelke D., Taddonio K., Ferris R., & Sherman N. (2021) *Ozone Layer, International Protection*, in Max Planck Encyclopedia of Public International Law, Oxford University Press, Peters A., & Wolfrum R. (eds.).

¹¹⁰¹ Weiss E. B. (2009) *Introductory Note on the Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer and Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*, United Nations Audiovisual Library of International Law (“A working group under UNEP began negotiations on a protocol, and the Montreal Protocol was concluded in September, 1987, only nine months after the formal diplomatic negotiations opened in December, 1986. It went into effect on January 1, 1989.”).

¹¹⁰² Velders G. J. M., Andersen S. O., Daniel J. S., Fahey D. W., & McFarland M. (2007) *The importance of the Montreal Protocol in protecting climate*, PROC. NAT’L. ACAD. SCI. 104(12): 4814–4819, 4814 (“The 1987 Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer is a landmark agreement that has successfully reduced the global production, consumption, and emissions of ozone-depleting substances (ODSs). ODSs are also greenhouse gases that contribute to the radiative forcing of climate change. Using historical ODSs emissions and scenarios of potential emissions, we show that the ODS contribution to radiative forcing most likely would have been much larger if the ODS link to stratospheric ozone depletion had not been recognized in 1974 and followed by a series of regulations. The climate protection already achieved by the Montreal Protocol alone is far larger than the reduction target of the first commitment period of the Kyoto Protocol. Additional climate benefits that are significant compared with the Kyoto Protocol reduction target could be achieved by actions under the Montreal Protocol, by managing the emissions of substitute fluorocarbon gases and/or implementing alternative gases with lower global warming potentials.”).

¹¹⁰³ Young P. J., Harper A. B., Huntingford C., Paul N. D., Morgenstern O., Newman P. A., Oman L. D., Madronich S., & Garcia R. R. (2021) *The Montreal Protocol protects the terrestrial carbon sink*, NATURE 596: 384–388, 384 (“Overall, at the end of the century, worldAvd warms by an additional 2.5 K (2.4–2.7 K) above the RCP 6.0 baseline in worldProj. Of this warming, 1.7 K comes from the previously explored¹⁹ additional radiative forcing due to the higher CFC concentrations in worldProj. Newly quantified here is the additional warming of global-mean air temperature of 0.85 K (0.65–1.0 K)—half as much again—that arises from the higher atmospheric CO₂ concentrations due to the damaging effect of UV radiation on terrestrial carbon stores.”).

¹¹⁰⁴ Secretariat of the United Nations Framework Convention on Climate Change (2 November 2021) *World Leaders Kick Start Accelerated Climate Action at COP26*, Press Release (“Today is also the first time a COP in recent history has hosted a major event on methane, with 103 countries, including 15 major emitters including Brazil, Nigeria and Canada, signing up to the Global Methane Pledge.”).

¹¹⁰⁵ United States Department of State (11 October 2021) *Joint U.S.-EU Statement on the Global Methane Pledge*, Press Release (“At the Major Economies Forum on Energy and Climate (MEF) on September 17, 2021, President Biden and European Commission President Ursula von der Leyen announced, with support from seven additional countries, the Global Methane Pledge—an initiative to be launched at the World Leaders Summit at the 26th UN Climate Change Conference (COP-26) this November in Glasgow, United Kingdom.”).

¹¹⁰⁶ Global Methane Pledge, *About the Global Methane Pledge (last visited 15 November 2023)* (“Participants joining the Pledge agree to take voluntary actions to contribute to a collective effort to reduce global methane emissions at least 30 percent from 2020 levels by 2030, which could eliminate over 0.2°C warming by 2050. This is a global, not a national reduction target.”).

¹¹⁰⁷ United States Department of State (11 October 2021) *Joint U.S.-EU Statement on the Global Methane Pledge*, Press Release (“Countries joining the Global Methane Pledge commit to a collective goal of reducing global methane emissions by at least 30 percent from 2020 levels by 2030 and moving towards using best available inventory methodologies to quantify methane emissions, with a particular focus on high emission sources.”).

¹¹⁰⁸ Climate & Clean Air Coalition (20 September 2023) *New Global Methane Pledge Champions Call for Accelerated Action on Methane to Keep 1.5°C Within Reach*, News and Announcements (“Canada, Federated States of Micronesia (FSM), Germany, Japan, and Nigeria have joined the United States and the European Union as Champions of the Global Methane Pledge (GMP) to advocate for accelerated methane action to achieve the Pledge – to reduce global anthropogenic methane emissions by at least 30 per cent below 2020 levels by 2030.”).

¹¹⁰⁹ United States Department of State (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial*, (“New members and expanded leadership. Canada, Federated States of Micronesia, Germany, Japan, and Nigeria joined the United States and European Union as Global Methane Pledge Champions. Turkmenistan, Kazakhstan, Kenya, Romania, and Angola joined the Pledge, bringing total participation to 155 governments.”); AzerNews (7 March 2024) *Azerbaijan's joining Global Methane Pledge aligns with international efforts to limit global warming* (“Methane reduction is of global significance. The fact that 155 countries, contributing to around 50% of global methane pollution, have pledged to reduce emissions underscores the widespread recognition of the urgency to address this potent greenhouse gas. Azerbaijan's decision to join the "Global Methane Pledge" is a notable step. The voluntary commitment to reduce methane emissions by at least 30% by 2030 aligns with the overall goal set by the initiative at COP26. This demonstrates Azerbaijan's recognition of the role it can play in combating climate change and its willingness to contribute to international efforts. On March 4th, Azerbaijan announced its participation in the "Global Methane Pledge," which involves voluntary commitments by states to reduce methane emissions.”).

¹¹¹⁰ European Commission (4 December 2023) *2023 Global Methane Pledge Ministerial: decisive action to curb emissions*, (“At today’s COP28 Global Methane Pledge Ministerial, Ministers welcomed transformational national actions and catalytic grant funding to deliver on the goal to cut methane at least 30 percent by 2030.”).

¹¹¹¹ United States Department of State (11 October 2021) *Joint U.S.-EU Statement on the Global Methane Pledge*, Press Release (“Countries joining the Global Methane Pledge commit to a collective goal of reducing global methane emissions by at least 30 percent from 2020 levels by 2030 and moving towards using highest tier IPCC good practice inventory methodologies to quantify methane emissions, with a particular focus on high emission sources. Successful implementation of the Pledge would reduce warming by at least 0.2 degrees Celsius by 2050.”). Note that studies that assume a declining baseline in methane emissions calculate a lower avoided warming. See Forster P., Smith C., & Rogelj J. (2021) *Guest Post: The Global Methane Pledge needs to go further to help limit warming to 1.5C*, CARBONBRIEF; and International Energy Agency (2022) *GLOBAL METHANE TRACKER 2022*, 19 (“Meeting the Global Methane Pledge target has the potential to make an enormous impact on climate change, similar to the entire global transport sector adopting net zero emission technologies (see *Methodology*). Action will be particularly important in the period up to 2030 because sharp cuts in methane can deliver a net cooling effect within a relatively short period. This could keep the door open to a 1.5 °C stabilisation in global average temperatures, while the world pursues lasting reductions in CO₂.”).

¹¹¹² United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 9 (“Currently available measures could reduce emissions from these major sectors by approximately 180 Mt/yr, or as much as 45 per cent, by 2030. This is a cost-effective step required to achieve the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) 1.5° C target. According to scenarios analysed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), global methane emissions must be reduced by between 40–45 per cent by 2030 to achieve least cost-pathways that limit global warming to 1.5° C this century, alongside substantial simultaneous reductions of all climate forcers including carbon dioxide and short-lived climate pollutants. (Section 4.1).”).

¹¹¹³ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 8 (“Available targeted methane measures, together with additional measures that contribute to priority development goals, can simultaneously reduce human-caused methane emissions by as much as 45 per cent, or 180 million tonnes a year (Mt/yr) by 2030. This will avoid nearly 0.3°C of global warming by the 2040s and complement all long-term climate change mitigation efforts.”).

¹¹¹⁴ United Nations Framework Convention on Climate Change (2023) *Draft decision -/CMA.5 Outcome of the first global stocktake*, (“Further recognizes the need for deep, rapid and sustained reductions in greenhouse gas emissions in line with 1.5 °C pathways and calls on Parties to contribute to the following global efforts, in a nationally determined manner, taking into account the Paris Agreement and their different national circumstances, pathways and approaches”).

¹¹¹⁵ United Nations Framework Convention on Climate Change (2023) *Draft decision -/CMA.5 Outcome of the first global stocktake* (“Accelerating and substantially reducing non-carbon-dioxide emissions globally, including in particular methane emissions by 2030”).

¹¹¹⁶ (8 November 2021) *LIVE: President Obama delivers a speech at COP26 climate summit in Glasgow, Scotland*, YAHOO FINANCE, YouTube (from 23:12–23:19).

¹¹¹⁷ (13 November 2021) Parties to the Paris Agreement, Decision -/CP.26 ¶19, *Glasgow Climate Pact Advance unedited version*.

¹¹¹⁸ United States White House (12 May 2022) *FACT SHEET: U.S.-ASEAN Special Summit in Washington, DC*, Statements and Releases (“Reducing Methane Emissions: The United States is committed to working with the nations of Southeast Asia to reduce the region’s methane emissions. The United States welcomed Indonesia, Vietnam, Malaysia, the Philippines, and Singapore joining the Global Methane Pledge at COP-26, and we are accelerating technical assistance, financial resources, and project pipeline development for methane mitigation in Global Methane

Pledge countries, including through the EPA, USTDA, DFC, and EXIM, as well as the newly-created Global Methane Hub, a philanthropic fund that can support methane mitigation priorities in the region.”).

¹¹¹⁹ G7 (27 May 2022) *G7 Climate, Energy and Environment Ministers’ Communiqué* (“65. Methane: We highlight that in order to keep 1.5 °C within reach and to reduce the likelihood of overshoot, significant methane emission reductions must be achieved globally by 2030. In this context and in the light of the latest findings of the IPCC, we highlight the need to reduce global methane emissions by 34 percent by 2030 and by 44 percent by 2040 relative to the 2019 level to limit global warming to 1.5 °C by 2100 with no or limited overshoot. We therefore reaffirm our commitment made at COP26 to implement the Global Methane Pledge, whose endorsers are committed to collectively reduce global anthropogenic methane emissions by at least 30 percent below 2020 levels by 2030. In order to accelerate its implementation, those of us who have not already done so endeavour to implement domestic methane emission reductions by developing national climate plans and strategies and implementing accompanying measures, and we encourage those who do not yet have such plans to develop them. We stand ready to support the Climate and Clean Air Coalition as a core implementing partner of the Pledge. While the generation of waste is not encouraged, we recognise the opportunities to mitigate methane emissions from the waste sector, primarily by diversion of organic waste from landfills through best management practice and processes aiming at material and energy recovery and as appropriate by sound management of landfill sites as well as by using waste-to-fuel technologies to produce renewable methane from organic waste, agricultural residues and biomass that does not depend on arable land or cannot be utilised in a better way. The waste sector can contribute to a reduction in atmospheric methane emissions if the infrastructure in place to transport the renewable methane does not allow for intentional or unintentional venting of methane. We also recognise the opportunities to mitigate methane emissions from the energy sector by capturing and using methane from the oil and gas sector that would otherwise have been vented, wasted, flared or lost in transport, and by using best practices to minimise methane from coal mining. We further recognise that more efforts are needed to reduce agricultural methane emissions. We recognise the need to continuously improve emissions measurement, reporting and verification to inform national emissions inventories and the work of the International Methane Emissions Observatory (IMEO), launched during G20 2021 by the UN Environment Programme (UNEP) with the support from the European Union, in collecting, reconciling and verifying anthropogenic methane emissions data at a global level and encourage continued cooperation with relevant stakeholders such as the International Energy Agency. In addition to our national efforts, we highlight the importance of reducing the methane emissions associated with energy production and consumption. We therefore will consider providing increased support to methane reduction and elimination projects in developing and emerging economies. In particular, we are committed to working with other oil and gas producing countries to accelerate flaring and methane abatement projects and strengthen policies to reduce methane emissions in the oil and gas sector.... We acknowledge that investment in this sector is necessary in response to the current crisis, in a manner consistent with our climate objectives and without creating lock-in effects. The current crisis highlights the real, urgent need and the opportunity for Europe to reduce its dependency on Russia by diversifying supply, accelerating the roll out of clean, safe and sustainable energy technologies, and critically enhancing energy efficiency, with significant progress possible by the end of the year.”).

¹¹²⁰ G7 (28 June 2022) *G7 Leaders’ Communiqué*.

¹¹²¹ United States Department of State (17 June 2022) *U.S.-EU Joint Press Release on the Global Methane Pledge Energy Pathway*, Press Release (“Today, the United States, the European Union, and 11 countries launched the Global Methane Pledge Energy Pathway to catalyze methane emissions reductions in the oil and gas sector, advancing both climate progress and energy security.... Countries and supporting organizations announced nearly \$60 million in dedicated funding to support implementation of the Pathway. Countries and supporting organizations have announced \$59 million in dedicated funding and in-kind assistance in support of the GMP Energy Pathway that was announced at today’s MEF, including: \$4 million to support the World Bank Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR). The United States intends to support the transfer by the World Bank of at least \$1.5 million in funding to the GGFR. Germany intends to provide \$1.5 million, and Norway intends to provide approximately \$1 million to GGFR. \$5.5 million to support the Global Methane Initiative (GMI). The United States will provide \$3.5 million. Guided by the recommendations of the GMI, Canada will contribute \$2 million over the next four years, as part of its global

climate finance commitment, to support methane mitigation projects in developing countries including in the oil and gas sector. Up to \$9.5 million from the UNEP International Methane Emissions Observatory to support scientific assessments of methane emissions and mitigation potential in the oil and gas sector that are aligned with the Global Methane Pledge Energy Pathway. Up to \$40 million annually from the philanthropic Global Methane Hub to support methane mitigation in the fossil energy sector. These funds will be critical to improve methane measurements in the oil and gas sector, identify priority areas for methane mitigation, develop technical assessments for project development, strengthen regulator and operator capacity, support policy development and enforcement, and other essential activities to achieve reductions in methane emissions.”).

¹¹²² United States Department of State (17 November 2022) *Fact Sheet, Global Methane Pledge: From Moment to Momentum* (describing progress on the Global Methane Pledge Energy Pathway).

¹¹²³ European Commission (11 November 2022) *Joint Declaration from Energy Importers and Exporters*.

¹¹²⁴ United Nations Environmental Programme, *Methane Alert and Response System (MARS)* (last visited 30 August 2023)

¹¹²⁵ United States Department of State (17 November 2022) *Global Methane Pledge: From Moment to Momentum*, Press Release (“Mobilizing multilateral funding for methane action: The World Bank Global Gas Flaring Reduction Partnership will launch the next phase of its trust fund in 2023 to become the Global Flaring and Methane Reduction (GFMR) Partnership and address all methane emissions across the oil and gas value chain.”),

¹¹²⁶ For a general overview of methane developments that took place during COP28 see Escudero JP. (19 December 2023) *COP28: “The Methane COP”*, LEGAL PLANET.

¹¹²⁷ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The United States announced final standards to sharply reduce methane emissions from oil and gas operations, which will reduce over 1.5 Gt of CO₂ equivalent and achieve a nearly 80% reduction below future methane emissions expected without the rule.”).

¹¹²⁸ Council of Europe (15 November 2023) *Climate action: Council and Parliament reach deal on new rules to cut methane emissions in the energy sector* (“The Council and the Parliament agreed on three implementation phases. The first phase will focus on data collection and the creation of a methane emitters global monitoring tool and a super emitter rapid reaction mechanism. In the second and third phases, equivalent monitoring, reporting and verification measures should be applied by exporters to the EU by 1 January 2027, and maximum methane intensity values by 2030. The competent authorities of each member state will have the power to impose administrative penalties if these provisions are not respected.”).

¹¹²⁹ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The United States announced final standards to sharply reduce methane emissions from oil and gas operations, which will reduce over 1.5 Gt of CO₂ equivalent and achieve a nearly 80% reduction below future methane emissions expected without the rule.”).

¹¹³⁰ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“Brazil announced that its National Council of Energy Policy will establish guidelines on methane reduction in the oil and gas sector by the end of 2024, and the National Agency for Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP) aims to finalize regulations by the end of 2025 based on these guidelines.”).

¹¹³¹ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“Egypt announced its intention to develop domestic methane regulations in its oil and gas sector by the end of 2024, as part of developing the sector’s detailed methane emission reduction roadmap.”).

¹¹³² Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“Nigeria showcased major steps taken this year under the Nigeria Gas Flare Commercialization Program (NGFCP), including advancing projects it estimates will capture over half of all gas flaring volumes in Nigeria. Nigeria is committed to accelerate implementation of these projects and to ensure robust enforcement of its oil and gas methane guidelines launched at COP27.”).

¹¹³³ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“Kazakhstan joined the Global Methane Pledge and announced cooperation with the United States to develop national standards to eliminate non-emergency venting of methane and require leak detection and repair in the oil and gas sector as soon as possible before 2030.”).

¹¹³⁴ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The Oil and Gas Methane Partnership 2.0 announced new members. The Partnership now represents over 120 companies with assets in more than 60 countries on five continents and covers over 35% of the world’s oil and gas production and over 70% of LNG flows.”).

¹¹³⁵ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The World Bank launched its Global Flaring and Methane Reduction Partnership (GFMR) with \$255 million in new grant funding to catalyze oil and gas methane and flaring reduction in developing countries. The GFMR is supported by financial contributions from the United Arab Emirates, United States, Norway, BP, ENI, Equinor, Occidental, Shell, and TotalEnergies. Access to project development and financing support through GFMR will be contingent on commitments to achieve near-zero methane emissions by 2030 by reducing methane intensity to below 0.2%, achieve zero routine flaring by 2030, measure and report methane emissions through the Oil and Gas Methane Partnership 2.0 framework, and endorse the Global Methane Pledge.”).

¹¹³⁶ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The United States, the European Commission, and twelve other natural gas importing and exporting countries formed an international working group to advance comparable and reliable information about methane and CO2 emissions across the natural gas supply chain to drive global emissions reductions.”).

¹¹³⁷ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The Oil and Gas Climate Initiative (OGCI) is expanding its Satellite Monitoring Campaign to provide actionable data to reduce emissions from large-magnitude methane plumes and flares, supported by in-kind contributions from OGCI companies. ExxonMobil also intends to provide up to \$25 million in in-kind assistance to address capability shortcomings to reduce methane emissions.”).

¹¹³⁸ United States Department of State (17 November 2022) *Global Methane Pledge: From Moment to Momentum*, Press Release (“In the year since it launched at COP26, the Global Methane Pledge has generated unprecedented momentum for methane action. Country endorsements of the GMP have grown from just over 100 last year to 150, more than 50 countries have developed national methane action plans or are in the process of doing so, substantial new financial resources are being directed to methane action, and partners have launched “pathways” of policies and initiatives to drive methane reductions in key methane-emitting sectors – a GMP Energy Pathway launched at the June 2022 Major Economies Forum on Energy and Climate and a GMP Food and Agriculture Pathway and GMP Waste Pathway, both launched today at COP27.”).

¹¹³⁹ United States Department of State (17 November 2022) *Global Methane Pledge: From Moment to Momentum*, Press Release (“The Green Climate Fund, in partnership with the International Fund for Agricultural Development (IFAD), the Food and Agriculture Organization, Global Dairy Platform and Global Methane Hub, \$3.5 million of project preparation funding with the objective of leveraging up to \$400 million in financing that will help transition dairy systems to lower emission, climate resilient pathways in Kenya, Rwanda, Tanzania and Uganda.”).

¹¹⁴⁰ United States Department of State (17 November 2022) *Global Methane Pledge: From Moment to Momentum*, Press Release (“The Global Methane Hub announced raising \$70 million in support for a new Enteric Methane Research and Development Accelerator to advance critical research on reducing methane emissions from enteric fermentation—the largest single source of methane emissions from agriculture—and has a \$200 million fundraising goal by the first quarter of 2023.”).

¹¹⁴² Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The Global Methane Hub formally launched the Enteric Fermentation R&D Accelerator with \$200 million in funding, making it the largest ever globally coordinated research effort into livestock methane reduction.”).

¹¹⁴³ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The World Bank launched the Global Methane Reduction Platform for Development (CH4D) to support low-and mid-income countries to realize the ‘methane triple-wins’ of abating emissions, enhancing resilience, and empowering livelihoods. Through partnerships, including with the CCAC Methane Roadmap Action Programme (M-RAP), CH4D will mobilize expertise, affordable technologies, and catalytic finance for methane abatement in the agriculture and waste sectors.”).

¹¹⁴⁴ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The International Fund for Agriculture Development’s Reducing Agricultural Methane Program (RAMP) announced that it will, with funding from the U.S. State Department and Global Methane Hub, support 15 governments to incorporate agricultural methane into their nationally determined contributions and 10 governments to build investment pipelines in low-methane agricultural development.”).

¹¹⁴⁵ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The Dairy Methane Action Alliance is a global initiative to accelerate food industry action to drive down dairy methane emissions, launching on December 5 at COP28 with more than three major food companies, representing billions of dollars in global annual dairy sales.”).

¹¹⁴⁶ United States Department of State (17 November 2022) *Global Methane Pledge: From Moment to Momentum*, Press Release (“SCALE-Methane, a new initiative of the Subnational Climate Action Leaders’ Exchange, will support accelerated subnational action on waste methane. This work will complement the Pathway Towards Zero Waste joined by 13 cities at the October 2022 C40 World Mayors Summit.”).

¹¹⁴⁷ United States Department of State (17 November 2022) *Global Methane Pledge: From Moment to Momentum*, Press Release (“To advance both the GMP Waste Pathway and the GMP Food and Agriculture Pathway, a Food Waste Management Accelerator will develop methane mitigation projects in 10 countries in Latin America and the Caribbean, the Global Food Banking Network will launch a new effort to quantify and track food banking methane mitigation, the IDB project #SinDesperdicio is creating projects to reduce food loss, and a new USAID Food Loss and Waste Partnerships Facility will scale efforts in Bangladesh, Kenya, Nepal, Niger, Nigeria, and/or Tanzania.”).

¹¹⁴⁸ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The Launch of the Lowering Organic Waste Methane (LOW-Methane) initiative. The ambition of LOW-Methane is to deliver at least 1 million metric tons of annual waste sector methane reductions well before 2030 with 40 subnational jurisdictions and their national government counterparts, including by working to unlock over \$10 billion in public and private investment. The consortium effort will be supported by a coordination group housed within the UNEP-convened CCAC.”).

¹¹⁴⁹ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The Inter-American Development Bank launched a new “Too Good to Waste” initiative which aims to contribute

at least a 30% reduction in methane emissions in solid waste operations in Latin America and the Caribbean financed by the Bank, including three recently approved projects totaling \$372.5 million.”).

¹¹⁵⁰ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The United States announced new steps on waste methane. The Environmental Protection Agency (EPA) is planning a rule-making to review and, if appropriate, revise its Clean Air Act emission standards for new and existing municipal solid waste landfills, considering new monitoring technology, incentivization of organics waste diversion, and emissions controls at landfills not currently covered by current regulations. In 2024, EPA will release updates on emissions estimates for MSW landfills. In addition, the United States released for public comment a draft national strategy for Reducing Food Loss and Waste and Recycling Organics in line with its 2030 50% food loss and waste reduction goal.”).

¹¹⁵¹ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The leaders of Canada, the United States, and Mexico committed to reducing methane emissions from the waste sector by at least 15% by 2030 at the 2023 North American Leaders Summit.”). *See also* United States White House (10 January 2023) *Key Deliverables for the 2023 North American Leaders’ Summit*, Fact Sheet (“Committing to reduce methane emissions from the solid waste and wastewater sector by at least 15% by 2030 from 2020 levels and deepen collaboration on waste and agriculture methane measurement and mitigation, including achieving the Global Methane Pledge through trilateral cooperation on methane and black carbon emissions.”).

¹¹⁵² Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The CCAC’s new Technology and Economic Assessment Panel (CCAC-TEAP) released its first report. The CCAC-TEAP, co-chaired by Ireland and Senegal, released a brief on Driving Innovation and Technology in the Waste Sector”). *See also* Climate & Clean Air Coalition (2023) [BRIEF: SCALING UP UNDERFINANCED SLCP MITIGATION SOLUTIONS: DRIVING INNOVATION AND TECHNOLOGY IN THE WASTE SECTOR](#).

¹¹⁵³ United States Department of State (17 November 2022) *Global Methane Pledge: From Moment to Momentum*, Fact Sheet (“Launched today, the GMP Food and Agriculture Pathway advances climate and food security goals through new actions that increase agricultural productivity, reduce food loss and waste, and improve the viability of agriculture in the future. Initial components of the GMP Food and Agriculture Pathway include:

- **Boosting Support for Smallholder Farmers:** The Green Climate Fund, in partnership with the International Fund for Agricultural Development (IFAD), the Food and Agriculture Organization, Global Dairy Platform and Global Methane Hub, \$3.5 million of project preparation funding with the objective of leveraging up to \$400 million in financing that will help transition dairy systems to lower emission, climate resilient pathways in Kenya, Rwanda, Tanzania and Uganda. Costa Rica, Uruguay, Colombia, Pakistan, and Vietnam are planning to prepare similar programs through a partnership with Pathways to Dairy Net Zero. IFAD and United States a partnership to advance climate resilience and methane mitigation with smallholder farmers including by prioritizing methane mitigation in IFAD’s pipeline of country and regional projects with combined investment of over \$500 million dollars in methane-emitting sectors. In addition, the United States has announced \$5 million for the African Development Bank to advance agriculture and waste methane work within the Africa Climate Change Fund.
- **Increasing Innovation:** The Global Methane Hub announced raising \$70 million in support for a new Enteric Methane Research and Development Accelerator to advance critical research on reducing methane emissions from enteric fermentation—the largest single source of methane emissions from agriculture—and has a \$200 million fundraising goal by the first quarter of 2023. Under the Agricultural Innovation Mission for Climate (AIM4C), seven methane innovation sprints have been launched related to both livestock and rice methane mitigation with total existing funding of \$123 million.
- **Highlighting Ambitious National Actions:** The **United States** Department of Agriculture is investing over \$500 million in methane reduction projects via Partnerships for Climate Smart Commodities, up to \$90 million for domestic food loss and waste reduction, and last year supported dozens of anaerobic digester

projects and a broader range of methane-reducing investments through over \$64 million in additional grants and guaranteed loans. In the **European Union**, the new Common Agricultural Policy starting in 2023 increases the emphasis on climate action, including methane from livestock. In total, 40 percent of the budget will be dedicated to climate-related measures, including improved rules and monitoring requirements, and quantitative targets to reduce food waste, among others. The EU has also published a Biomethane Actions Plan with the goal of doubling production to reach 35 billion cubic meters by 2030.”).

¹¹⁵⁴ African Development Bank (15 September 2022) *US government announces \$5 million grant to support African Development Bank in tackling methane emissions* (“The United States government has announced it will provide a \$5 million grant to the African Development Bank to support efforts to abate methane gas emission, across Africa. Methane accounts for about half of the net rise in global average temperature since the pre-industrial era. The grant, subject to the completion of US domestic procedures and approvals, will go to the multi-donor Africa Climate Change Fund, which is managed by the African Development Bank. The Fund supports a broad range of activities covering climate resilience and low-carbon growth.”).

¹¹⁵⁵ United States Department of Agriculture (14 September 2022) *Biden-Harris Administration Announces Historic Investment in Partnerships for 70 Climate-Smart Commodities and Rural Projects*, Press Release (“Agriculture Secretary Tom Vilsack announced today that the Biden-Harris Administration through the U.S. Department of Agriculture is investing up to \$2.8 billion in 70 selected projects under the first pool of the Partnerships for Climate-Smart Commodities funding opportunity, with projects from the second funding pool to be announced later this year...USDA will work with the applicants for the 70 identified projects to finalize the scope and funding levels in the coming months. A complete list of projects identified for this first round of funding is available at usda.gov/climate-smart-commodities. These include: ...

- **Scaling Methane Emissions Reductions and Soil Carbon Sequestration:** Through this project, Dairy Farmers of America (DFA) climate-smart pilots will directly connect the on-farm greenhouse gas reductions with the low-carbon dairy market opportunity. DFA will use its cooperative business model to ensure that the collective financial benefits are captured at the farm, creating a compelling opportunity to establish a powerful self-sustaining circular economy model benefiting U.S. agriculture, including underserved producers. Lead partner: Dairy Farmers of America, Inc...
- **The Grass is Greener on the Other Side: Developing Climate-Smart Beef and Bison Commodities:** This project will create market opportunities for beef and bison producers who utilize climate-smart agriculture grazing and land management practices. The project will guide and educate producers on climate-smart practices most suited for their operations, manage large-scale climate-smart data that will be used by producers to improve decision-making, and directly impact market demand for climate-smart beef/bison commodity markets. Lead university: South Dakota State University.”).

¹¹⁵⁶ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“In addition to the over \$1 billion in new grant funding, international financial institutions approved over \$3.5 billion in new investments for methane-reducing projects since COP27. Approvals include \$375 million from the Green Climate Fund and partners, over \$1.9 billion (€1.78 billion) from the European Investment Bank, over \$218 million (€200 million) from the European Bank for Reconstruction and Development, and \$372.5 million from the Inter-American Development Bank. The World Bank approved at least \$700 million in investments, including a \$255 million for rice project in China, \$300 million for landfill methane reduction in Cote d'Ivoire, and \$145 million for wastewater methane reduction in Malawi.”).

¹¹⁵⁷ (17 May 2005) *Protocol to the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone*, 2319 U.N.T.S. 81 (Entered into force in accordance with article 17 which reads as follows: “1. The present Protocol shall enter into force on the ninetieth day following the date on which the sixteenth instrument of ratification, acceptance, approval or accession has been deposited with the Depositary. 2. For each State and organization that meets the requirements of article 14, paragraph 1, which ratifies,

accepts or approves the present Protocol or accedes thereto after the deposit of the sixteenth instrument of ratification, acceptance, approval or accession, the Protocol shall enter into force on the ninetieth day following the date of deposit by such Party of its instrument of ratification, acceptance, approval or accession.”).

¹¹⁵⁸ (16 May 1983) [1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution](#), 1302 U.N.T.S 217, Art. 2 (“The Contracting Parties, taking due account of the facts and problems involved, are determined to protect man and his environment against air pollution and shall endeavour to limit and, as far as possible, gradually reduce and prevent air pollution including long-range transboundary air pollution.”).

¹¹⁵⁹ (17 May 2005) [Protocol to the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone](#), 2319 U.N.T.S. 81 (Entered into force in accordance with article 17 which reads as follows: “1. The present Protocol shall enter into force on the ninetieth day following the date on which the sixteenth instrument of ratification, acceptance, approval or accession has been deposited with the Depository. 2. For each State and organization that meets the requirements of article 14, paragraph 1, which ratifies, accepts or approves the present Protocol or accedes thereto after the deposit of the sixteenth instrument of ratification, acceptance, approval or accession, the Protocol shall enter into force on the ninetieth day following the date of deposit by such Party of its instrument of ratification, acceptance, approval or accession.”).

¹¹⁶⁰ Economic Commission for Europe (8 September 2015) [UNECE joins Climate and Clean Air Coalition](#), Press Release (“At a Working Group meeting in Paris (8–9 September), CCAC welcomed UNECE to the Coalition. By joining the Coalition, UNECE gains access to a broad network of experts and partners. Drawing on its long-standing expertise, UNECE will contribute through exchanges of experiences, knowledge and best practices, particularly as they relate to the work under the [Committee on Sustainable Energy](#) and the [Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution](#), including its amended [Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone \(Gothenburg Protocol\)](#).”)

¹¹⁶¹ Executive Body for the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (2018) [Decision 2018/5 Long-term Strategy for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution for 2020–2030 and Beyond](#), Annex ¶ 28 (“Although peak ozone concentrations have been reduced, there is evidence of widespread damage to human health, natural vegetation, crops and forests, and some materials in the ECE region. Even with full implementation of the Gothenburg Protocol and its 2012 amendments (e.g., reducing emissions of nitrogen oxides and non-methane volatile organic compounds, both of which are ozone precursors), wide-scale problems will remain. Model simulations indicate that background levels of tropospheric ozone will begin to increase again after 2020–2030, driven progressively by methane emissions outside the ECE region. Therefore, further reduction in precursors, including methane, will be required to reduce the formation of tropospheric ozone.”). The [Task Force on Techno-Economic Issues \(TFTEI\)](#) updates and assesses emission abatement technologies to reduce emissions of many conventional air pollutants, including SO₂, NO_x, VOCs, and dust (including PM₁₀, PM_{2.5} and black carbon). Its [December 2020 report](#) on methane emissions provides information on emissions from landfill gases, the natural gas grid, and biogas facilities as well as methods of emission abatement. The TFTEI held its 7th Meeting on 29 October 2021. The 7th Meeting agenda included a discussion on its contributions to the Gothenburg Protocol review. The documents from the meeting are forthcoming. The [Task Force on Integrated Assessment Modelling \(TFIAM\)](#) brings together information gathered from the Parties and from Convention bodies on cost-effective emission-control strategies. It provides regular reports to the negotiating bodies of the Convention to assist in the development of future legal instruments and to regularly review the existing legal instruments. The Task Force is modelling future trends, impacts, and mitigation measures for methane emissions. The [Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution \(TFHTAP\)](#) has examined methane emission as part of its mandate to examine the transport of air pollution across the northern hemisphere and its impacts within and outside of the UNECE region.

¹¹⁶² See 1984 (Geneva) [Protocol on Long-term Financing of the Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe](#); 1985 (Helsinki) [Protocol on the Reduction of Sulphur Emissions or their Transboundary Fluxes by at least 30 per cent](#); 1988 (Sofia) [Protocol concerning the Control](#)

of Nitrogen Oxides or their Transboundary Fluxes; 1991 (Geneva) Protocol concerning the Control of Emissions of Volatile Organic Compounds or their Transboundary Fluxes; 1994 (Oslo) Protocol on Further Reduction of Sulphur Emissions; 1998 (Aarhus) Protocol on Heavy Metals; 1998 (Aarhus) Protocol on Persistent Organic Pollutants (POPs); and the 1999 (Gothenburg) Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone. *See also* Lawyers Responding to Climate Change (2 December 2010) *LRTAP and extending MEAs to non-party states – Part II* (“The initial Convention has been extended by 8 Protocols which have imposed specific measures and obligations on the parties. The 1985 Helsinki Protocol on the Reduction of Sulphur Emissions or their Transboundary Fluxes by at least 30%, as its name suggests, established a commitment on all parties to reduce their national annual sulphur emissions or their transboundary fluxes by at least 30% as soon as possible and at the latest by 1993 using 1980 levels as the basis for calculation of the reductions. Further reductions were adopted by the 1994 Oslo Protocol on ‘Further Reduction of Sulphur Emissions’. A commitment to control nitrogen oxides was addressed in the third Sofia Protocol on the ‘Control of Emissions of Nitrogen Oxides or Their Transboundary Fluxes’ in 1988. This required the reduction of ‘total annual emissions’ and introduced into international law the concept of ‘national emission standards’. It also recognised the need to create more favourable conditions for exchange of technology. The fourth Protocol in Geneva in 1991 addressed the ‘Control of Emissions of Volatile Organic Compounds (VOCs) and their Transboundary Fluxes’. In 1998 the Aarhus ‘Heavy Metals Protocol’ targeted 3 harmful heavy metals- lead, cadmium and mercury- and required the parties to reduce their emissions of those metals below the levels in a selected reference year between 1985 and 1995. The Aarhus Protocol on Persistent Organic Pollutants (POPs) was adopted at the same time with the objective of eliminating emissions and discharges of POPs to the atmosphere. This focused on 16 substances rated according to their risk to the environment. The parties agreed to eliminate the production and use of some POPs and to restrict the use of others. Finally the 1999 Gothenburg Protocol to ‘Abate Acidification, Eutrophication and Ground-Level Ozone’ aimed to control and reduce anthropogenic emissions of 4 pollutants- sulphur, NOx, ammonia and VOCs which are likely to cause adverse effects to human health, ecosystems and crops.”).

¹¹⁶³ Hunter D., Salzman J., & Zaelke D. (2021) *INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL LAW AND POLICY*, Foundation Press, (6th Ed.), 529 (“Ultimately, LRTAP would require that countries develop the ‘best available technology which is economically feasible and low-and non-waste technology.’ Art. 6. The protocols to LRTAP adopt technology-based standards, targets, and timetables, as well as other policy responses. LRTAP and its protocols thus provide a good vehicle for exploring different potential policy approaches to air pollution.”).

¹¹⁶⁴ European Monitoring and Evaluation Programme (17 June 2021) *EMEP History and Structure* (“In this process, the main objective of the EMEP programme (Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe) is to regularly provide governments and subsidiary bodies under the LRTAP Convention with qualified scientific information to support the development and further evaluation of the international protocols on emission reductions negotiated within the Convention.”).

¹¹⁶⁵ (5 August 1998) *Protocol on Further Reduction of Sulphur Emissions*, 2030 U.N.T.S. 122, Art. 5(1) (“Each Party shall report, through the Executive Secretary of the Commission, to the Executive Body, on a periodic basis as determined by the Executive Body, information on: (a) The implementation of national strategies, policies, programmes and measures referred to in article 4, paragraph 1; (b) The levels of national annual sulphur emissions, in accordance with guidelines adopted by the Executive Body, containing emission data for all relevant source categories; and (c) The implementation of other obligations that it has entered into under the present Protocol, in conformity with a decision regarding format and content to be adopted by the Parties at a session of the Executive Body. The terms of this decision shall be reviewed as necessary to identify any additional elements regarding the format and/or content of the information that are to be included in the reports.”).

¹¹⁶⁶ UNECE is composed of 56 member States: Albania, Andorra, Armenia, Austria, Azerbaijan, Belarus, Belgium, Bosnia and Herzegovina, Bulgaria, Canada, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Georgia, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Israel, Italy, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Latvia, Liechtenstein, Lithuania, Luxembourg, Malta, Monaco, Montenegro, The Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Republic of Moldova, North Macedonia, Romania, Russian Federation, San Marino, Serbia, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden,

Switzerland, Tajikistan, Turkey, Turkmenistan, Ukraine, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, United States of America, and Uzbekistan. See United Nations Economic Commission for Europe, *Member States and Member States Representatives* (last visited 5 February 2023).

¹¹⁶⁷ Monaco A., Ross K., Waskow D., & Ge M. (2021) *How Methane Emissions Contribute to Climate Change*, WORLD RESOURCES INSTITUTE (“Twelve countries are responsible for around two-thirds of global methane emissions: China, Russia, India, the United States, Brazil, the European Union, Indonesia, Pakistan, Iran, Mexico, Australia and Nigeria.”).

¹¹⁶⁸ (17 May 2005) *Protocol to the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone*, 2319 U.N.T.S. 81 (Entered into force in accordance with article 17 which reads as follows: “1. The present Protocol shall enter into force on the ninetieth day following the date on which the sixteenth instrument of ratification, acceptance, approval or accession has been deposited with the Depository. 2. For each State and organization that meets the requirements of article 14, paragraph 1, which ratifies, accepts or approves the present Protocol or accedes thereto after the deposit of the sixteenth instrument of ratification, acceptance, approval or accession, the Protocol shall enter into force on the ninetieth day following the date of deposit by such Party of its instrument of ratification, acceptance, approval or accession.”).

¹¹⁶⁹ (amended 4 May 2012) *1999 Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone to the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*, ECE/EB.AIR/114, Art. 2(1) (“The objective of the present Protocol is to control and reduce emissions of sulphur, nitrogen oxides, ammonia and [non-methane] volatile organic compounds that are caused by anthropogenic activities and are likely to cause adverse effects on human health, natural ecosystems, materials and crops, due to acidification, eutrophication or ground-level ozone as a result of long-range transboundary atmospheric transport....”).

¹¹⁷⁰ Fiore A. M., Jacob D. J., Field B. D., Streets D. G., Fernandes S. D., & Jang C. (2002) *Linking ozone pollution and climate change: The case for controlling methane*, GEOPHYS. RES. LETT. 29(19): 25-1–25-4, 25-1 (“Methane is a known major source of the tropospheric O₃ background, but is not generally considered a precursor to regional O₃ pollution episodes in surface air because of its long lifetime (8–9 years)... Our global 3-D model analysis shows that reducing CH₄ emissions enables a simultaneous pursuit of O₃ air quality and climate change mitigation objectives. Whereas reductions in NO_x emissions achieve localized decreases in surface O₃ concentrations, reductions in CH₄ emissions lower the global O₃ background and improve surface air quality everywhere.”). See also United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 45 (“Next, the linearity of the response to different magnitudes of methane concentration change was examined. At the national level, population weighted ozone changes are extremely linear across a range of methane increases and decreases (Figure 3.4). Though the response itself varies from country to country (i.e. the slopes are different), the ozone change at the national level is directly proportional to the methane concentration change regardless of the ozone metric chosen. This result is consistent with prior studies which also indicate that the ozone/methane relationship is approximately linear (Fiore *et al.* 2008) but its magnitude depends on the local availability of nitrogen oxides, and, through nitrogen oxides, of hydroxyl (West *et al.* 2006; Wang and Jacob 1998).”).

¹¹⁷¹ (amended 4 May 2012) *1999 Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone to the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*, ECE/EB.AIR/114, Art. 1(11 quater) (“‘Ozone precursors’ means nitrogen oxides, volatile organic compounds, methane and carbon monoxide”).

¹¹⁷² Executive Body for the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (2018) *Decision 2018/5 Long-term Strategy for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution for 2020–2030 and Beyond*, Annex ¶ 28 (“Although peak ozone concentrations have been reduced, there is evidence of widespread damage to human health, natural vegetation, crops and forests, and some materials in the ECE region. Even with full implementation of the Gothenburg Protocol and its 2012 amendments (e.g., reducing emissions of nitrogen oxides and non-methane volatile

organic compounds, both of which are ozone precursors), wide-scale problems will remain. Model simulations indicate that background levels of tropospheric ozone will begin to increase again after 2020–2030, driven progressively by methane emissions outside the ECE region. Therefore, further reduction in precursors, including methane, will be required to reduce the formation of tropospheric ozone.”).

¹¹⁷³ Executive Body Working Group on Strategies and Review (30 September 2020) *Preparations for the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2020/3–EBE/EB.AIR/WG.5/2020/3 at ¶ 20 (“As per the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond (paragraph 50), the review should look at appropriate steps towards reducing emissions of black carbon, ozone precursors not yet addressed such as methane, and emissions from shipping with due consideration for International Maritime Organization (IMO) policies and measures. . . . In line with the priorities identified in the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond, the following should specifically be considered in answering the questions in annex I: (b) Hemispheric transport of ozone and particulate matter and their precursors and advancing efforts to address air pollution on a broader scale per paragraphs 63 and 78 of the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond; health and ecosystem impacts from outside the ECE region; (c)Methane and its relationship to the hemispheric transport of ozone and its contribution to ozone in the ECE region;”).

¹¹⁷⁴ Executive Body Working Group on Strategies and Review (30 September 2020) *Preparations for the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2020/3–EBE/EB.AIR/WG.5/2020/3 at ¶ 14 (Item 6.3(d) in Annex I stating the question “how methane could be addressed in a future instrument?”).

¹¹⁷⁵ Executive Body Working Group on Effects & Steering Body to the Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe (2 July 2021) *2021 Joint progress report on contribution to the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone*, ECE/EB.AIR/GE.1/2021/3–ECE/EB.AIR/WG.1/2021/3 at ¶ 79 (“79. Methane proves to be the main driver behind increasing background ozone levels. CIAM has identified cost-effective measures to reduce methane emissions in world regions. In Europe, measures in the waste sector have the largest potential. In eastern Europe and central Asia, measures in oil and gas sector, and in the US measures in (unconventional) gas production can deliver most of the abatement potential. In all regions, emissions from agriculture (especially from cattle) tend to be a source with a low technical abatement potential. United Nations Environment’s Global Methane Assessment estimates that reduced dairy and meat consumption could give a significant contribution to avoiding warming, ozone related deaths, morbidity as well as crop losses.”).

¹¹⁷⁶ Executive Body (2020) *Decision 2020/2*, ECE/EB.AIR.16, ¶ 4 (“Requests the Chair of the Working Group on Strategies and Review to compile the inputs and information received into an annotated outline for consideration at the fifty-ninth session of the Working Group on Strategies and Review; to undertake the policy-related work of the review, including assessing the policy implications of the information received; and to elaborate and prepare the report of the review, including its conclusions;”).

¹¹⁷⁷ LRTAP Gothenburg Protocol Review Group (21 September 2022) *Report on the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone, as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2022/3, at ¶ 77 (“Even with full implementation of the Protocol, background levels of O₃ in the ECE region are expected to continue to increase due to methane, NO_x and VOC emissions outside the ECE region. Further reductions of O₃ precursor emissions within the ECE region are technically feasible and can decrease O₃ concentrations and impacts within the region. In addition, cooperation with other countries, organizations and forums outside of the ECE region to enable and motivate emissions reductions outside the ECE region will also be needed. Options should be explored for how this cooperation could be realized, including through the work of the Forum for International Cooperation on Air Pollution.”).

¹¹⁷⁸ LRTAP Gothenburg Protocol Review Group (21 September 2022) *Report on the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone, as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2022/3, at ¶ 78 (“The expected increase in global methane concentrations offsets the decreases in surface O₃ due to NO_x and NMVOC controls within Europe and North America. Model studies consistently show that decreasing methane concentrations leads to lower levels of ground-level O₃, independent of other emission controls. In addition, decreasing methane concentrations has a larger impact on local O₃ concentrations in VOC-limited areas where NO_x emissions are high.”).

¹¹⁷⁹ LRTAP Gothenburg Protocol Review Group (21 September 2022) *Report on the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone, as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2022/3, at ¶ 83 (“A number of options are available for addressing CH₄ as an O₃ precursor under the Convention. The methane contribution to transboundary O₃ is significant enough to warrant considering potential policy action under the Air Convention (see annex II to the present report for additional information).”).

¹¹⁸⁰ EMEP Steering Body & the Working Group on Effects (29 September 2022) *Strategy for scientific bodies under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*, ECE/EB.AIR/2022/10, at ¶ 72 (“Improving knowledge for some source categories, pollutants, and their fate: the following priorities have been identified: (b) PM speciation (condensable, carbonaceous aerosols, inorganic compounds, etc.) and CH₄ are important issues highlighted by the Gothenburg Protocol review process;”).

¹¹⁸¹ EMEP Steering Body & the Working Group on Effects (29 September 2022) *Strategy for scientific bodies under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*, ECE/EB.AIR/2022/10, at ¶ 93 (“Linking the scales in integrated assessment modelling: echoing the atmospheric modelling priorities, extending the GAINS model to enable assessment of the cost effectiveness of additional local and hemispheric measures to reduce O₃ and PM levels in the ECE region. At the local scale, work will continue with the Expert Panel on Clean Air in Cities to develop nested control strategies. At the global scale, linking the scale also means taking into account the questions of CH₄ control strategies and the evaluation of the impacts and cost effectiveness of global and regional CH₄ measures to reduce O₃ levels in the ECE region.”).

¹¹⁸² Task Force on Techno-economic Issues (12 June 2023) *Draft Guidance document on technical measures for reduction of methane emissions from landfill, the natural gas grid and biogas facilities*, ECE/EB.AIR/WG.5/2023/3, ¶ 1 (“The present draft Guidance document on measures for the reduction of methane (CH₄) emissions, developed by the Task Force on Techno-economic Issues, is aimed at supporting the Parties in reducing CH₄ emissions from the main non-agricultural sources. The Guidance document covers CH₄ emissions from municipal solid waste landfills, natural gas supply systems and biogas facilities. The document includes information on landfill gas emissions and techno-economic analyses of landfill gas collection and utilization systems. Furthermore, information on emissions from the natural gas grid and associated emissions along the entire value chain is addressed. Besides technical aspects of emission reduction through, for example, the application of zero-emitting pneumatic and compressor systems, more management measures, such as the reduction of maintenance emissions and inspection programmes, to identify non-intended fugitive emissions early on, also referred to as “leak detection and repair”, are of key importance in reducing CH₄ emissions from the natural gas supply system. An outlook on CH₄ emissions from biogas plants, which are also considered to be an important source of CH₄ emissions from technical applications, is also provided in the present document.”).

¹¹⁸³ Task Force on Reactive Nitrogen & Task Force on Techno-economic Issues (12 June 2023) *Co-mitigation of methane and ammonia emissions from agricultural sources: policy brief and guidance*, ECE/EB.AIR/WG.5/2023/5, 1 (“The present document was prepared by the Task Force on Reactive Nitrogen in cooperation with the Task Force on Techno-economic Issues in accordance with item 2.2.1 of the 2022–2023 workplan for the implementation of the Convention. It provides information on possible interactions between ammonia and methane mitigation measures and on considerations to be taken into account for simultaneous mitigation, as well as serving as a background document for future policy development.”).

¹¹⁸⁴ Executive Body (2023) *Draft decisions of the Executive Body*, ECE/EB.AIR/2023/4, Preamble, ¶ 2 (d) (“The Executive Body, ... Acknowledging that global methane reduction (in addition to methane, nitrogen oxides and volatile organic compound control in the United Nations Economic Commission for Europe (ECE) region) will be needed to reduce ground-level ozone in the ECE region, ... Also decides that the revision process could include consideration of, inter alia: ... How to address methane emissions;”).

¹¹⁸⁵ Expert Group on Policy Option Development (22 September 2023) *Options to address the conclusions of the review of the Gothenburg Protocol, as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2023/9, ¶ 10 (“Two pathways for revisions have been identified: the first is through revision of annexes IV–XI to the Protocol only, as amendments thereto may become effective within one year of adoption for those Parties that have accepted the expedited amendment procedure pursuant to article 13 bis (6)–(7) of the Protocol regarding amendments to annexes IV–XI, which shall be adopted by consensus of the Parties present at a session of the Executive Body; and the second is a comprehensive revision of the Protocol text and all its annexes.”), ¶ 14 (“This approach could include one or more new binding and/or non-binding instrument(s) or measure(s), or a combination thereof. A new instrument could be considered to replace or complement the amended Gothenburg Protocol (i.e. a new kind of multipollutant protocol and/or a complementary instrument for a specific pollutant (i.e. CH₄). Under this approach, there are binding and non-binding options, some of which have overlaps with approaches 1–2 and 4.”), ¶ 17 (“Regardless of which approach or options are chosen, capacity-building, awareness-raising, cooperation and other support are cross-cutting efforts that could be continued and/or expanded to help to further address the Gothenburg Protocol review’s conclusions and long term Convention objectives. This is a flexible approach that includes actions that could be initiated in the short-term, sustained in the long-term, and adjusted to best serve the Convention’s objectives. These activities could be tailored to and combined with any other approach (and/or options within the other approaches) presented in this document.”), ¶ 18 (“The level of complexity, effort, timeline and resources required for this approach would depend largely on the number of activities selected and the extent to which the Executive Body would like to increase capacity-building, outreach and cooperation under the Convention. Selection of this approach would also require further discussion on the resources required and on who would be responsible for each action (e.g., the secretariat, the Chair of the Executive Body, task forces, Convention Parties, etc.). Political will would be important for the success of actions in cross-cutting approach 4. A visible political Executive Body decision could help to generate political will in support of expanded capacity-building and cooperation.”).

¹¹⁸⁶ United States Department of State (14 November 2023) *Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis*.

¹¹⁸⁷ United States Department of State (2 December 2023) *Accelerating Fast Mitigation: Summit on Methane and Non-CO₂ Greenhouse Gases*, Fact Sheet (“The United States, People’s Republic of China, and United Arab Emirates today convened a Summit to accelerate actions to cut methane and other non-CO₂ greenhouse gases as the fastest way to reduce near-term warming and keep a goal of limiting global average temperature increase to 1.5 degrees Celsius within reach.”).

¹¹⁸⁸ United States White House (21 April 2023) *Chair’s Summary of the Major Economies Forum on Energy and Climate Held by President Joe Biden*, Statements and Releases (“Argentina, Australia, Brazil, Canada, People’s Republic of China, Egypt, the European Commission, France, Germany, India, Indonesia, Italy, Japan, the Republic of Korea, Mexico, the Kingdom of Saudi Arabia, Türkiye, the United Arab Emirates, the United Kingdom, the United Nations Secretary General, and the International Energy Agency Director participated in the virtual meeting.” “MEF participants Canada, the European Union, France, Germany, Japan, and the United States, as well as Ireland and Norway, joined in launching the Methane Finance Sprint, which aims to scale up methane finance. This includes mobilizing, by COP 28, at least \$200 million in new public and philanthropic support for methane abatement activities, with a view to developing a pipeline of projects. Philanthropies have committed \$100 million in new funding through the Global Methane Hub towards the \$200 million goal.”)

¹¹⁸⁹ United States White House (8 June 2013) *United States and China Agree to Work Together on Phase Down of HFCs*, Press Release (“Today, President Obama and President Xi agreed on an important new step to confront global climate change. For the first time, the United States and China will work together and with other countries to use the expertise and institutions of the Montreal Protocol to phase down the consumption and production of hydrofluorocarbons (HFCs), among other forms of multilateral cooperation. A global phase down of HFCs could potentially reduce some 90 gigatons of CO₂ equivalent by 2050, equal to roughly two years’ worth of current global greenhouse gas emissions.”). *See also* Sun X. & Ferris T. (2018) *The Kigali Amendment’s and China’s Critical Roles in Evolving the Montreal Protocol*, Natural Resources & Environment, American Bar Association (“China filled a key role in bringing about the global consensus that resulted in the Kigali Amendment’s adoption. U.S. and China agreements reflected this diplomatic leadership, initially during the meeting between President Obama and President Xi in Sunnylands, California.”).

¹¹⁹⁰ Hunter D., Salzman J., & Zaelke D. (2021) *INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL LAW AND POLICY*, Foundation Press, (6th Ed.), 545 (“With 24 nations and the EU signing in Montreal, the Protocol was universally hailed as a diplomatic triumph. Starting from low or no expectations in Vienna, within eighteen months strict international controls had been negotiated that would be refined and changed over time with the benefit of more scientific and technical knowledge. This structured evolution, employing first a framework convention followed by a protocol, marked a new feature of international environmental law following the “start and strengthen” strategy put forward by UNEP Executive Director Mostafa Tolba, who is often referred to as the father of the Montreal Protocol.”); *see also* Andersen S. O., Zaelke D., Taddonio K., Ferris R., & Sherman N. (2021) *Ozone Layer, International Protection*, in *MAX PLANCK ENCYCLOPEDIA OF PUBLIC INTERNATIONAL LAW*, Oxford University Press, Peters A. & Wolfrum R. (eds.).

¹¹⁹¹ United States White House (15 November 2023) *Readout of President Joe Biden’s Meeting with President Xi Jinping of the People’s Republic of China*, Press Release (“The two leaders underscored the importance of working together to accelerate efforts to tackle the climate crisis in this critical decade. They welcomed recent positive discussions between their respective special envoys for climate, including on national actions to reduce emissions in the 2020s, on common approaches toward a successful COP 28, and on operationalizing the Working Group on Enhancing Climate Action in the 2020s to accelerate concrete climate actions. President Biden stated that the United States stands ready to work with the PRC to address transnational challenges, such as health security and debt and climate finance in developing countries and emerging markets.”).

¹¹⁹² United States Department of State (14 November 2023) *Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis* (“4. The United States and China decide to operationalize the Working Group on Enhancing Climate Action in the 2020s, to engage in dialogue and cooperation to accelerate concrete climate actions in the 2020s. The Working Group will focus on the areas of cooperation that have been identified in the Joint Statement and the Joint Declaration, including on energy transition, methane, circular economy and resource efficiency, low-carbon and sustainable provinces/states & cities, and deforestation, as well as any agreed topics. ... 6. Both countries support the G20 Leaders Declaration to pursue efforts to triple renewable energy capacity globally by 2030 and intend to sufficiently accelerate renewable energy deployment in their respective economies through 2030 from 2020 levels so as to accelerate the substitution for coal, oil and gas generation, and thereby anticipate post-peaking meaningful absolute power sector emission reduction, in this critical decade of the 2020s. 7. Both sides agree to restart the U.S.-China Energy Efficiency Forum to deepen policy exchanges on energy-saving and carbon-reducing solutions in key areas including industry, buildings, transportation, and equipment. 8. The United States and China intend to recommence bilateral dialogues on energy policies and strategies, carry out exchanges on mutually agreed topics, and facilitate track II activities to enhance pragmatic cooperation. 9. The two countries aim to advance at least 5 large-scale cooperative CCUS projects each by 2030, including from industrial and energy sources. ... 24. Both countries are committed to working with each other and with other Parties to adopt a consensus Global Stocktake decision. In the view of both countries, the decision ... should take account of equity and be informed by the best available science, including the most recent IPCC reports; ... should send signals with respect to the energy transition (renewable energy, coal/oil/gas), carbon sinks including forests, non-CO₂ gases including methane, and low-carbon technologies, etc.”).

¹¹⁹³ United States Department of State (14 November 2023) *Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis* (“4. The United States and China decide to operationalize the Working Group on Enhancing Climate Action in the 2020s, to engage in dialogue and cooperation to accelerate concrete climate actions in the 2020s. The Working Group will focus on the areas of cooperation that have been identified in the Joint Statement and the Joint Declaration, including on energy transition, methane, circular economy and resource efficiency, low-carbon and sustainable provinces/states & cities, and deforestation, as well as any agreed topics. ... 10. The two countries will implement their respective national methane action plans and intend to elaborate further measures, as appropriate. 11. The two countries will immediately initiate technical working group cooperation on policy dialogue, technical solutions exchanges, and capacity building, building on their respective national methane action plans to develop their respective methane reduction actions/targets for inclusion in their 2035 NDCs and support each country’s methane reduction/control progress. 12. The two countries intend to cooperate on respective measures to manage nitrous oxide emissions. 13. The two countries intend to work together under the Kigali Amendment to phase down HFCs and commit to ensure application of ambitious minimum efficiency standards for all cooling equipment manufactured.”).

¹¹⁹⁴ United States Department of State (14 November 2023) *Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis* (“14. Recognizing the importance of developing circular economy and resource efficiency in addressing the climate crisis, relevant government agencies of the two countries intend to conduct a policy dialogue on these topics as soon as possible and support enterprises, universities, and research institutions of both sides to engage in discussions and collaborative projects. 15. The United States and China are determined to end plastic pollution and will work together and with others to develop an international legally binding instrument on plastic pollution, including the marine environment.”).

¹¹⁹⁵ United States Department of State (14 November 2023) *Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis* (“20. Both countries intend to cooperate in promoting relevant policies and measures and the deployment of technologies to enhance synergy of controlling GHG emissions and air pollutants, including NOx, VOCs, and other tropospheric ozone precursors.”).

¹¹⁹⁶ United States Department of State (14 November 2023) *Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis* (“16. The United States and China will support climate cooperation among states, provinces, and cities with regard to areas including, inter alia, the power, transportation, buildings, and waste sectors. ... 17. The United States and China intend to hold a high-level event on subnational climate action in the first half of 2024. 18. Both sides welcome with appreciation existing subnational cooperation between the two countries and encourage states, provinces, and cities to promote practical climate cooperation.”).

¹¹⁹⁷ United States Department of State (14 November 2023) *Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis* (“19. Both sides commit to advance efforts to halt and reverse forest loss by 2030, including by fully implementing through regulation and policy, and effectively enforcing, their respective laws on banning illegal imports. They intend to engage in discussions and exchanges, including under the Working Group, on ways to improve efforts to strengthen implementation of this commitment.”).

¹¹⁹⁸ United States Department of State (14 November 2023) *Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis* (“21. Reaffirming the nationally determined nature of NDCs, and recalling Article 4.4 of the Paris Agreement, both countries’ 2035 NDCs will be economy-wide, include all greenhouse gases, and reflect the reductions aligned with the Paris temperature goal of holding the increase in global average temperature to well below 2 degrees C and pursuing efforts to limit the temperature increase to 1.5 degrees C.”).

¹¹⁹⁹ United States Department of State (14 November 2023) *Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis* (“3. The United States and China ... stress the importance of COP 28 in responding meaningfully to the climate crisis during this critical decade and beyond. They are aware of the important role they

play in terms of both national responses and working together cooperatively to address the goals of the Paris Agreement and promote multilateralism. They will work together and with other Parties to the Convention and the Paris Agreement to rise up to one of the greatest challenges of our time for present and future generations of humankind.”).

¹²⁰⁰ China Ministry of Ecology and Environment, Ministry of Foreign Affairs, National Development and Reform Commission, Ministry of Science and Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Finance, Ministry of Natural Resources, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ministry of Emergency Management, and National Energy Administration, *China Methane Emissions Control Plan* [甲烷排放控制行动方案] (7 November 2023) (hyperlink to original Chinese). See also Institute for Governance & Sustainable Development, *annotated English reference translation of the China Methane Emissions Control Plan* (8 November 2023).

¹²⁰¹ United States Department of State (14 November 2023) *Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis* (“22. The United States and China, with the United Arab Emirates, invite countries to a Methane and Non-CO2 Greenhouse Gases Summit at COP 28.”).

¹²⁰² United States Department of State (10 November 2021) *U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s*, Press Release (“2. The United States and China, alarmed by reports including the Working Group I Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report released on August 9th, 2021, further recognize the seriousness and urgency of the climate crisis. They are committed to tackling it through their respective accelerated actions in the critical decade of the 2020s, as well as through cooperation in multilateral processes, including the UNFCCC process, to avoid catastrophic impacts.”).

¹²⁰³ United States Department of State (10 November 2021) *U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s*, Press Release (“8(C)(II). In addition to its recently communicated NDC, China intends to develop a comprehensive and ambitious National Action Plan on methane, aiming to achieve a significant effect on methane emissions control and reductions in the 2020s.”).

¹²⁰⁴ United States Department of State (10 November 2021) *U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s*, Press Release (“8(D). The United States and China intend to convene a meeting in the first half of 2022 to focus on the specifics of enhancing measurement and mitigation of methane, including through standards to reduce methane from the fossil and waste sectors, as well as incentives and programs to reduce methane from the agricultural sector.”).

¹²⁰⁵ United States Department of State (10 November 2021) *U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s*, Press Release (“16. The two sides intend to establish a ‘Working Group on Enhancing Climate Action in the 2020s,’ which will meet regularly to address the climate crisis and advance the multilateral process, focusing on enhancing concrete actions in this decade. This may include, inter alia, continued policy and technical exchanges, identification of programs and projects in areas of mutual interest, meetings of governmental and non-governmental experts, facilitating participation by local governments, enterprises, think tanks, academics, and other experts, exchanging updates on their respective national efforts, considering the need for additional efforts, and reviewing the implementation of the Joint Statement and this Joint Declaration.”).

¹²⁰⁶ United States Department of State (10 November 2021) *U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s*, Press Release (“15. Both countries intend to communicate 2035 NDCs in 2025.”).

¹²⁰⁷ United States Department of State (14 November 2023) *Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis* (“21. Reaffirming the nationally determined nature of NDCs, and recalling Article 4.4 of the Paris Agreement, both countries’ 2035 NDCs will be economy-wide, include all greenhouse gases, and reflect the

reductions aligned with the Paris temperature goal of holding the increase in global average temperature to well below 2 degrees C and pursuing efforts to limit the temperature increase to 1.5 degrees C.”).

¹²⁰⁸ United States Department of State (10 November 2021) *U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s*, Press Release (“In addition to its recently communicated NDC, China intends to develop a comprehensive and ambitious National Action Plan on methane, aiming to achieve a significant effect on methane emissions control and reductions in the 2020s.”).

¹²⁰⁹ China Ministry of Ecology and Environment, Ministry of Foreign Affairs, National Development and Reform Commission, Ministry of Science and Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Finance, Ministry of Natural Resources, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ministry of Emergency Management, and National Energy Administration, *China Methane Emissions Control Plan* [甲烷排放控制行动方案] (7 November 2023) (hyperlink to original Chinese); *see also* Institute for Governance & Sustainable Development, *annotated English reference translation of the China Methane Emissions Control Plan* (8 November 2023).

¹²¹⁰ At COP27, China Special Envoy on Climate Change, Xie Zhenhua, announced that China “attaches great importance to methane” emissions reduction and has completed a draft National Action Plan on strictly controlling methane emissions from key sectors, including energy (oil, gas, and coal), agriculture, and waste. In separate remarks provided at the *Global Methane Pledge Ministerial on 17 November 2022*, at the invitation of U.S. Presidential Climate Envoy John Kerry, Xie noted that the Plan is currently undergoing administrative and legislative processes (necessary before the Plan’s public release). At the time, Special Envoy Xie also mentioned that China’s ability to control methane emissions remained “relatively weak,” and the plan focuses on preliminary goals like improving monitoring capabilities and measurement, reporting, and verification (MRV) mechanisms, and promoting resource utilization efficiency. *See* World Bank (8 November 2022) *It’s Time to Sprint: Targeting Methane Emissions* (COP27 Side Event). In early January 2023, China’s Ministry of Ecology and Environment (MEE) announced progress that on laying the foundation for a National Action Plan on methane. In particular, MEE described work on greenhouse gas data access and monitoring and evaluation pilot projects, including pilot projects exploring preliminary technical methodologies for methane emissions data access and analysis. *See* Institute for Governance & Sustainable Development (17 January 2023) *China Announces Progress in Methane Monitoring and Evaluation In Preparation for the Release of Its National Action Plan on Methane* (“China’s Ministry of Ecology and Environment (MEE) highlighted progress on carbon dioxide and other greenhouse gas monitoring and evaluation pilot projects aimed at answering critical questions on ‘what to measure,’ ‘where to measure,’ and ‘how to measure.’ This includes pilot projects exploring preliminary technical methodologies for methane leakage detection. In particular, MEE noted that the oil and gas industry pilots have established a methane leakage detection mechanism by implementing an integrated “satellite + unmanned aerial vehicle + cruise” monitoring system for tracking methane leakage in production processes. For the coal mining industry pilots, MEE observed that a collaborative methane emissions monitoring technology has been developed using existing coal mine safety monitoring systems. Last but not least, MEE commented that it has established a preliminary understanding of the concentrations and the spatial and temporal distributions of global methane emissions through analysis of satellite remote sensing data.”).

¹²¹¹ People’s Republic of China (2021) *China’s Achievements, New Goals and New Measures for Nationally Determined Contributions*, submission to the Secretariat of the UNFCCC. *See also* Institute for Governance & Sustainable Development (28 October 2021) *Ahead of COP 26, China Submits Update to NDC and Mid-Century Development Strategy* (listing actions to address non-CO2 greenhouse gases (GHGs) incorporated into China’s updated NDCs.).

¹²¹² European Parliament (21 October 2021) *Resolution on an EU strategy to reduce methane emissions*, 2021/2006 (INI) (“The European Parliament ‘calls on the Commission and the Member States to suggest and negotiate a binding global agreement on methane mitigation at the COP26 meeting in Glasgow in line with the modelled pathways that

limit global warming to 1,5°C from the IPCC 1,5°C Special Report, the IPCC Sixth Assessment Report and the UNEP Global Methane Assessment. . . .’ It also ‘[p]oints to the lack of global leadership on the mitigation of methane emissions, with very little action being taken on methane internationally; calls on the Commission to make methane emissions reduction a top priority in its climate diplomacy and to take action, notably through a UN-based pathway, within the framework of the EU’s diplomatic and external relations in order to spearhead an international agreement on methane mitigation, promoting coordinated action to reduce methane emissions, as well as updating methane mitigation requirements”).

¹²¹³ See for example United Nations Environment Assembly (2022) *End plastic pollution: towards an international legally binding instrument*; United Nations General Assembly (2023) *Draft agreement under the United Nations Convention on the Law of the Sea on the conservation and sustainable use of marine biological diversity of areas beyond national jurisdiction*; United Nations Environment Program (4 November 2023) *Minamata Convention COP-5 takes crucial steps in its mission of eliminating mercury pollution*; United Nations Economic Commission for Europe (15 December 2023) *Governments in Europe and North America agree to revise Gothenburg Protocol to avoid long-term damage from air pollution to health, ecosystems, yields and climate*; Climate Overshoot Commission (2023) *REDUCING THE RISKS OF CLIMATE OVERSHOOT*, 59 (“To supplement a fossil fuel phase-out, efforts to control short-lived climate pollutants should be boosted substantially, to reduce near-term warming and improve public health. Measures to reduce emissions of some hydrofluorocarbons, methane, and black carbon, including the Kigali Amendment to the Montreal Protocol and the Global Methane Challenge, should be strongly supported including through policy frameworks. Methane reduction options that should be promoted include methane fees, feed additives for livestock, upgrading pipelines, and capturing methane from extractive and agricultural activities.”); and Parson E. (21 September 2023) *A Radical Proposal Hidden in Plain Sight in the Overshoot Commission Report*, LEGAL PLANET (“Third, the proposal is modeled on, and adopts a few key design elements from the extraordinarily successful provisions of the Montreal Protocol to cut CFCs and other ozone-depleting chemicals. Picking up these elements invokes the powerful symbolism of the only global environmental regime to have achieved a socio-technological transformation of remotely the scale required for greenhouse gases. In addition, and more concretely, these elements give credibility and force to the proposal, because they are the main points that enabled the Montreal Protocol to achieve what many thought impossible, and do it faster than even the most optimistic expected. There is a lot to unpack in the parallels between the Commission’s proposal and the Montreal Protocol, far too much to do justice to in one post. And there are some real problems in porting the model from ozone-depleting chemicals to fossil-fuels, which will need serious effort to work out and may ultimately turn out to be unresolvable. But there are good reasons to hope that with creative design and strategy, these elements may be transportable. To the extent they are, they may make the proposal something that governments actually can do – and thus hold the promise of driving bigger and faster changes than any mitigation proposal currently being considered.”).

¹²¹⁴ United Nations Framework Convention on Climate Change (2023) *First global stocktake, Proposal by the President Draft decision -/CMA.5 Outcome of the first global stocktake*, S28 (“Further recognizes the need for deep, rapid and sustained reductions in greenhouse gas emissions in line with 1.5 °C pathways and calls on Parties to contribute to the following global efforts, in a nationally determined manner, taking into account the Paris Agreement and their different national circumstances, pathways and approaches.”). For a brief overview of the key takeaways of COP28, see Chandrasekhar A., et al. (15 December 2023) *COP28 DeBriefed*, CARBONBRIEF.

¹²¹⁵ United Nations Framework Convention on Climate Change (2023) *First global stocktake, Proposal by the President Draft decision -/CMA.5 Outcome of the first global stocktake*, S28(f) (“Accelerating and substantially reducing non-carbon-dioxide emissions globally, including in particular methane emissions by 2030.”).

¹²¹⁶ Climate & Clean Air Coalition (9 December 2023) *Ministers Unite for Immediate Action on Climate and Clean Air, Urging Bold Financing and Swift Measures on Non-CO2 Super Pollutant Greenhouse Gases* (“As CCAC High-level Advocate for Finance Rachel Kyte, who moderated the session, said in her closing: “It’s 2023. With peak oil, peak coal, and peak emissions, we are also ‘peak-pledge.’” This Coalition has proven to turn ambition into action, it set out as the Coalition of the Working.”). See also Mckenna P. (4 December 2023) *Government, Corporate and*

Philanthropic Interests Coalesce On Curbing Methane Emissions as Calls at COP28 for Binding Global Methane Agreement Intensify, INSIDE CLIMATE NEWS (“Durwood Zaelke, president of the Institute for Governance and Sustainable Development, a climate advocacy organization based in Washington, pushed for mandatory action. “We can’t catch up to solve the climate problem without realizing that voluntary measures are now unbelievably naive,” Zaelke said, noting that past pledges from the oil and gas industry have failed to curb methane emissions. “We’ve got to toughen up and demand mandatory measures starting with the fossil fuel industry.”). *See generally* (30 November 2023) *What the world must do to tame methane*, THE ECONOMIST.

¹²¹⁷ Velders G. J. M., Andersen S. O., Daniel J. S., Fahey D. W., & McFarland M. (2007) *The importance of the Montreal Protocol in protecting climate*, PROC. NAT. ACAD. SCI. 104(12): 4814–4819, 4816 (“In contrast, without the early warning of the effects of CFCs (MR74 scenario), estimated ODS emissions would have reached 24–76 GtCO₂-eq yr⁻¹ in 2010. Thus, in the current decade, in a world without ODS restrictions, annual ODS emissions using only the GWP metric could be as important for climate forcing as those of CO₂.”).

¹²¹⁸ (16 September 1987) *Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*, 26 I.L.M. 1541 (entered into force 1 January 1989). For a discussion of the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, *see generally* Miller A. S., Zaelke D., & Andersen S. O. (2021) *RESETTING OUR FUTURE: CUT SUPER CLIMATE POLLUTANTS NOW! THE OZONE TREATY’S URGENT LESSONS FOR SPEEDING UP CLIMATE ACTION*, John Hunt Publishing; and Andersen S., Zaelke D., Taddonio K., Ferris R., & Sherman N. (2021) *Ozone Layer, International Protection*, in MAX PLANCK ENCYCLOPEDIA OF PUBLIC INTERNATIONAL LAW, Oxford University Press, Peters A. & Wolfrum R. (eds.). *See also* Zaelke, D., Bledsoe P., Dreyfus G. (9 November 2022) *COP27: A global methane agreement can prevent climate catastrophe*, THE HILL; and Zaelke D. & Murphy A. (16 December 2022) *A global methane agreement can prevent climate chaos*, ONE EARTH.

¹²¹⁹ (16 September 1987) *Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*, 26 I.L.M. 1541 (entered into force 1 January 1989). *See also* United Nations General Assembly (1992) *REPORT OF THE UNITED NATIONS CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (Rio Declaration on Environment and Development)*, A/CONF.151/26 (Vol. I), Principle 7 (“States shall cooperate in a spirit of global partnership to conserve, protect and restore the health and integrity of the Earth’s ecosystem. In view of the different contributions to global environmental degradation, States have common but differentiated responsibilities. The developed countries acknowledge the responsibility that they bear in the international pursuit of sustainable development in view of the pressures their societies place on the global environment and of the technologies and financial resources they command.”); and (9 May 1992) *United Nations Framework Convention on Climate Change*, 1771 U.N.T.S. 107, 31 I.L.M. 849, Art. 3(1) (“The Parties should protect the climate system for the benefit of present and future generations of humankind, on the basis of equity and in accordance with their common but differentiated responsibilities and respective capabilities Accordingly, the developed country Parties should take the lead in combating climate change and the adverse effects thereof.”).

¹²²⁰ (16 September 1987) *Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*, 26 I.L.M. 1541 (entered into force 1 January 1989).

¹²²¹ Parties to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer (1990) *Decision II/8: Financial Mechanism*. *See also* Miller A. S., Zaelke D., & Andersen S. O. (2021) *RESETTING OUR FUTURE: CUT SUPER CLIMATE POLLUTANTS NOW! THE OZONE TREATY’S URGENT LESSONS FOR SPEEDING UP CLIMATE ACTION*, John Hunt Publishing, 83 (“The Multilateral Fund is replenished every three years by the developed countries, most recently at around \$550 million. The fund has been extremely cost-effective. Considering only the climate benefits, the Multilateral Fund has reduced CO₂ at a cost of less than \$0.10 a ton.”).

¹²²² United Nations Environment Programme, *National Ozone Officers’ Capacity Building (last visited 5 February 2023)* (“Since 1991, UN Environment Ozone Action has devoted itself to supporting and strengthening National Ozone Units in all 147 developing countries. The *Compliance Assistance Programme (CAP)* uses a participatory approach

that draws on the experience of numerous NOOs, guidance from international agencies and individual experts. UN Environment promotes learning and skill growth through sharing the collective wisdom of the wider community of Ozone Officers who are leading National Ozone Units.”).

¹²²³ United Nations Environment Programme Ozone Secretariat, *Scientific Assessment Panel (SAP)* (last visited 5 February 2023) (“The Scientific Assessment Panel (SAP) assesses the status of the depletion of the ozone layer and relevant atmospheric science issues. Pursuant to Article 6 of the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, a report is prepared every three or four years by the SAP which consists of hundreds of top scientists from around the world.”).

¹²²⁴ United Nations Environment Programme Ozone Secretariat, *Technical and Economic Assessment Panel* (last visited 5 February 2023) (“In 1990 the Technology and Economic Assessment Panel was established as the technology and economics advisory body to the Montreal Protocol Parties. The Technology and Economic Assessment Panel (TEAP) provides, at the request of Parties, technical information related to the alternative technologies that have been investigated and employed to make it possible to virtually eliminate use of Ozone Depleting Substances (such as CFCs and halons), that harm the ozone layer.”).

¹²²⁵ Parson E. (2006) *Chapter 11: Ground for Hope: Assessing Technological Options to Manage Ozone Depletion*, in ASSESSMENTS OF REGIONAL AND GLOBAL ENVIRONMENTAL RISKS: DESIGNING PROCESSES FOR THE EFFECTIVE USE OF SCIENCE IN DECISIONMAKING, Resources for the Future, Farrell A. & Jager J. (eds.), 231 (“A series of design decisions made in these initial consultations were decisive for the subsequent effectiveness of the panels. Most importantly, organizational decisions made in the interests of fast work had the effect of substantially reducing the political control over the panels from what was originally envisioned in Protocol negotiations. Rather than authorizing a political body to supervise and integrate the work ... each of these four groups operated with substantial independence under its chair.”). See also Kuijpers L., Tope H., Banks J., Brunner W., & Woodcock A. (1998) *Scientific Objectivity, Industrial Integrity, and the TEAP Process*, in PROTECTING THE OZONE LAYER: LESSONS, MODELS, AND PROSPECTS, Springer, Le Prestre P. G., Reid J. D., & Morehouse E. T. (eds.), 167 (“The principles of scientific objectivity and industrial integrity are critical to the TEAP’s ability to provide useful policy-relevant, technical information to the Parties to the Montreal Protocol. ... Reports are developed through a consensus approach and this leads to the quality technical data on which the parties can rely. ... In many cases members are drawn from industry with direct experience in the use of ODS and their alternatives. It is important to have individuals with the integrity to remain independent despite the funding they receive from their sponsoring organisations or companies.”).

¹²²⁶ (22 March 1985) *Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer*, 26 I.L.M. 1516 (entered into force 22 September 1988) (“The Vienna Convention, among other things, provides that: Parties shall take appropriate measures in accordance with the provisions of this Convention and of those protocols in force to which they are party to protect human health and the environment against adverse effects resulting or likely to result from human activities which modify or are likely to modify the ozone layer. Article 2(1). To this end the Parties shall, in accordance with the means at their disposal and their capabilities: a. Co-operate by means of systemic observations, research and information exchange in order to better understand and assess the effects of human activities on the ozone layer and the effects on human health and the environment from modification of the ozone layer; b. Adopt appropriate legislative or administrative measures and co-operate in harmonizing appropriate policies to control, limit, reduce or prevent human activities under their jurisdiction or control should it be found that these activities have or are likely to have adverse effects resulting from modification or likely modification of the ozone layer; c. Co-operate in the formulation of agreed measures, procedures and standards for the implementation of this Convention, with a view to the adoption of protocols and annexes; d. Co-operate with competent international bodies to implement effectively this Convention and protocols to which they are party.”).

¹²²⁷ Miller A. S., Zaelke D., & Andersen S. O. (2021) *RESETTING OUR FUTURE: CUT SUPER CLIMATE POLLUTANTS NOW! THE OZONE TREATY’S URGENT LESSONS FOR SPEEDING UP CLIMATE ACTION*, John Hunt Publishing, 82 (“The Montreal Protocol’s sectoral approach can be thought of as a series of frames or lenses to look at the other super

climate pollutants and gain insights that can help change climate strategy—themes we explore in the concluding section of this chapter. Another benefit of a sectoral approach is that it can make it easier to address the challenge of keeping the playing field level for businesses. No company wants to be put at a competitive disadvantage because it is the only one following the rules. All the companies in a sector need to follow the rules and need to help police one another. The sectoral focus has allowed the Parties to develop the expertise they need to solve their specific part of the climate problem, and this has given them the confidence to strengthen their treaty continuously.”).

¹²²⁸ Jackson R. B., Solomon E. I., Canadell J. G., Cargnello M., & Field C. B. (2019) *Methane removal and atmospheric restoration*, NAT. SUSTAIN. 2: 436–438, 436 (“In contrast to negative emissions scenarios for CO₂ that typically assume hundreds of billions of tonnes removed over decades and do not restore the atmosphere to preindustrial levels, methane concentrations could be restored to ~750 ppb by removing ~3.2 of the 5.3 Gt of CH₄ currently in the atmosphere. Rather than capturing and storing the methane, the 3.2 Gt of CH₄ could be oxidized to CO₂, a thermodynamically favourable reaction.... In total, the reaction would yield 8.2 additional Gt of atmospheric CO₂, equivalent to a few months of current industrial CO₂ emissions, but it would eliminate approximately one sixth of total radiative forcing. As a result, methane removal or conversion would strongly complement current CO₂ and CH₄ emissions-reduction activities. The reduction in short-term warming, attributable to methane’s high radiative forcing and relatively short lifetime, would also provide more time to adapt to warming from long-lived greenhouse gases such as CO₂ and N₂O.”). Klaus Lackner critiqued the Jackson *et al.* article in a published response, arguing that implementing zeolite mechanisms to facilitate CH₄ removal is not practical. Lackner noted CH₄ removal faces the challenge of extreme dilution in the atmosphere, so “the amount of air that would need to be moved [to facilitate CH₄ removal] would simply be too great” to be economically feasible. However, Lackner did note passive methods of CH₄ removal through the use of zeolites may still be a viable solution. Lackner further argues that N₂O may be a more worthy target for removal due to its long lifetime in the atmosphere. See Lackner K. S. (2020) *Practical Constraints on Atmospheric Methane Removal*, NAT. SUSTAIN. 3: 357. Jackson *et al.* published a response to Lackner, acknowledging his stature in the greenhouse gas removal field and his concerns about the feasibility and energy requirements of their proposed mechanism, offering additional explanation about alternative options for use of the captured methane instead of just converting it to CO₂ as suggested in the original study. See Jackson R. B., Solomon E. I., Canadell J. G., Cargnello M., Field C. B., & Abernethy S. (2020) *Reply to: Practical constraints on atmospheric methane removal*, NAT. SUSTAIN. 3: 358–359. Another study looking at removing non-CO₂ GHGs investigated the potential of using solar chimney power plants (SCPPs) with select photocatalysts (depending on what GHGs desired to be captured). While the SCPP serves as a source of renewable energy that could remove methane and nitrous oxide among other atmospheric pollutants, scaling up the prototype would require a massive amount of land area (roughly 23 times the size of the entire Beijing municipality) and a chimney stretching 1000–1500 m into the air, which limits how practical the existing technology may be. See de Richter R., Tingzhen M., Davies P., Wei L., & Caillol S. (2017) *Removal of non-CO₂ greenhouse gases by large-scale atmospheric solar photocatalysis*, PROG. ENERGY COMBUST. SCI. 60: 68–96 (“Large-scale atmospheric removal of greenhouse gases (GHGs) including methane, nitrous oxide and ozone-depleting halocarbons could reduce global warming more quickly than atmospheric removal of CO₂. Photocatalysis of methane oxidizes it to CO₂, effectively reducing its global warming potential (GWP) by at least 90%.”). See also Methane Action (16 April 2021) *Scientists’ Statement on Lowering Atmospheric Methane Concentrations* (“To deal with methane emissions that can’t otherwise be mitigated, to reduce the overall methane burden, and to get atmospheric methane levels to a range consistent with meeting climate goals, we must combine prevention and mitigation of new methane emissions with actively lowering the concentration of methane already in the atmosphere.”); Jackson R. B. & Wysham D. (28 September 2021) *Focus on methane is timely and appropriate*, THE HILL; and Nisbet E. G., Dlugokencky E. J., Fisher R. E., France J. L., Lowry D., Manning M. R., Michel S. E., & Warwick N. J. (2021) *Atmospheric methane and nitrous oxide: challenges along the path to Net Zero*, PHILOS. TRANS. R. SOC. A 379(20200457): 1–24, 10 (“Methane potentially provides many good near-future (this decade) mitigation targets. Cutting methane emission is broadly cost-effective compared to methane removal from ambient air [94], though with appropriate technology in appropriate high methane settings, removal may indeed be an option [95,96]. Jackson *et al.* [97] point in particular to the need to more research into removal methods.”).

¹²²⁹ Molina M., Zaelke D., Sarma K. M., Andersen S. O., Ramanathan V., & Kaniaru D. (2009) *Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 106(49): 20616–20621, 20616 (“Current emissions of anthropogenic greenhouse gases (GHGs) have already committed the planet to an increase in average surface temperature by the end of the century that may be above the critical threshold for tipping elements of the climate system into abrupt change with potentially irreversible and unmanageable consequences. This would mean that the climate system is close to entering if not already within the zone of ‘dangerous anthropogenic interference’ (DAI). Scientific and policy literature refers to the need for ‘early,’ ‘urgent,’ ‘rapid,’ and ‘fast-action’ mitigation to help avoid DAI and abrupt climate changes. We define ‘fast-action’ to include regulatory measures that can begin within 2–3 years, be substantially implemented in 5–10 years, and produce a climate response within decades.”). See also Molina M., Ramanathan V. & Zaelke D. (2020) *Best path to net zero: Cut short-lived climate pollutants*, BULLETIN OF THE ATOMIC SCIENTISTS (“And let us be clear: By ‘speed,’ we mean measures—including regulatory ones—that can begin within two-to-three years, be substantially implemented in five-to-10 years, and produce a climate response within the next decade or two.”).

¹²³⁰ Drijfhout S., Bathiany S., Beaulieu C., Brovkin V., Claussen M., Huntingford C., Scheffer M., Sgubin G., & Swingedouw D. (2015) *Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models*, PROC. NAT'L. ACAD. SCI. 112(43): E5777–E5786, E5777 (“Abrupt transitions of regional climate in response to the gradual rise in atmospheric greenhouse gas concentrations are notoriously difficult to foresee. However, such events could be particularly challenging in view of the capacity required for society and ecosystems to adapt to them. We present, to our knowledge, the first systematic screening of the massive climate model ensemble informing the recent Intergovernmental Panel on Climate Change report, and reveal evidence of 37 forced regional abrupt changes in the ocean, sea ice, snow cover, permafrost, and terrestrial biosphere that arise after a certain global temperature increase. Eighteen out of 37 events occur for global warming levels of less than 2°, a threshold sometimes presented as a safe limit.”). See also Lenton T. M., Rockstrom J., Gaffney O., Rahmstorf S., Richardson K., Steffen W., & Schellnhuber H. J. (2019) *Climate tipping points—too risky to bet against*, Comment, NATURE 575(7784): 592–595, 593 (“A further key impetus to limit warming to 1.5 °C is that other tipping points could be triggered at low levels of global warming. The latest IPCC models projected a cluster of abrupt shifts between 1.5 °C and 2 °C, several of which involve sea ice. This ice is already shrinking rapidly in the Arctic...”); Arias P. A., et al. (2021) *Technical Summary*, in CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), TS-71–TS-72 (“It is likely that under stabilization of global warming at 1.5°C, 2.0°C, or 3.0°C relative to 1850–1900, the AMOC will continue to weaken for several decades by about 15%, 20% and 30% of its strength and then recover to pre-decline values over several centuries (*medium confidence*). At sustained warming levels between 2°C and 3°C, there is limited evidence that the Greenland and West Antarctic Ice Sheets will be lost almost completely and irreversibly over multiple millennia; both the probability of their complete loss and the rate of mass loss increases with higher surface temperatures (*high confidence*). At sustained warming levels between 3°C and 5°C, near-complete loss of the Greenland Ice Sheet and complete loss of the West Antarctic Ice Sheet is projected to occur irreversibly over multiple millennia (*medium confidence*); with substantial parts or all of Wilkes Subglacial Basin in East Antarctica lost over multiple millennia (*low confidence*). Early-warning signals of accelerated sea-level-rise from Antarctica, could possibly be observed within the next few decades. For other hazards (e.g., ice sheet behaviour, glacier mass loss and global mean sea level change, coastal floods, coastal erosion, air pollution, and ocean acidification) the time and/or scenario dimensions remain critical, and a simple and robust relationship with global warming level cannot be established (*high confidence*). ... The response of biogeochemical cycles to anthropogenic perturbations can be abrupt at regional scales and irreversible on decadal to century time scales (*high confidence*). The probability of crossing uncertain regional thresholds increases with climate change (*high confidence*). It is very unlikely that gas clathrates (mostly methane) in deeper terrestrial permafrost and subsea clathrates will lead to a detectable departure from the emissions trajectory during this century. Possible abrupt changes and tipping points in biogeochemical cycles lead to additional uncertainty in 21st century atmospheric GHG concentrations, but future anthropogenic emissions remain the dominant uncertainty (*high confidence*). There is potential for abrupt water cycle changes in some high-emission scenarios, but there is no overall consistency regarding the magnitude and timing of such changes. Positive land surface feedbacks, including vegetation, dust, and snow, can contribute to abrupt changes in aridity, but there is only low confidence that such

changes will occur during the 21st century. Continued Amazon deforestation, combined with a warming climate, raises the probability that this ecosystem will cross a tipping point into a dry state during the 21st century (*low confidence*).”); Lee J.-Y., Marotzke J., Bala G., Cao L., Corti S., Dunne J. P., Engelbrecht F., Fischer E., Fyfe J. C., Jones C., Maycock A., Mutemi J., Ndiaye O., Panickal S., & T. Zhou (2021) *Chapter 4: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information*, in *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.), 4-96 (Table 4.10 lists 15 components of the Earth system susceptible to tipping points); and Armstrong McKay D. I., Staal A., Abrams J. F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S. E., Rockström J., & Lenton T. M. (2022) *Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points*, *SCIENCE* 377(6611): 1–10, 7 (“The chance of triggering CTPs is already non-negligible and will grow even with stringent climate mitigation (SSP1-1.9 in Fig. 2, B and C). Nevertheless, achieving the Paris Agreement’s aim to pursue efforts to limit warming to 1.5°C would clearly be safer than keeping global warming below 2°C (90) (Fig. 2). Going from 1.5 to 2°C increases the likelihood of committing to WAIS and GrIS collapse near complete warm-water coral die-off, and abrupt permafrost thaw; further, the best estimate threshold for LABC collapse is crossed. The likelihood of triggering AMOC collapse, Boreal forest shifts, and extra-polar glacier loss becomes non-negligible at >1.5°C and glacier loss becomes likely by ~2°C. A cluster of abrupt shifts occur in ESMs at 1.5 to 2°C (19). Although not tipping elements, ASSI loss could become regular by 2°C, gradual permafrost thaw would likely become widespread beyond 1.5°C, and land carbon sink weakening would become significant by 2°C.”).

¹²³¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., et al. (eds.); and Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.).

¹²³² United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*.

¹²³³ The Arctic Council has two working groups and two expert groups that work on controlling methane emissions. These two working groups, the Arctic Contaminants Action Program (ACAP) and Arctic Monitoring & Assessment Programme (AMAP), each have an SLCP-specific expert group: the Expert Group on Short-Lived Climate Pollutants (within ACAP) and the Expert Group on Black Carbon and Methane (within AMAP). See Arctic Council, *Black Carbon and Methane Expert Group* (last visited 5 February 2023); Arctic Council, *Arctic Contaminants Action Program* (last visited 5 February 2023); and Arctic Council, *AMAP and the Arctic Council* (last visited 5 February 2023).

¹²³⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (28 February 2022) *Climate change: a threat to human wellbeing and health of the planet. Taking action now can secure our future*, NEWSROOM (“Any further delay in concerted anticipatory global action on adaptation and mitigation will miss a brief and rapidly closing window of opportunity to secure a liveable and sustainable future for all, said [AR6 WGII co-chair] Hans-Otto Pörtner.”). See also Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) *Summary for Policymakers*, in *CLIMATE CHANGE 2022: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., & Rama B. (eds.), SPM-11 (“Approximately 3.3 to 3.6 billion people live in contexts that are highly vulnerable to climate change (*high confidence*). ... Levels of risk for all Reasons for Concern (RFC) are assessed to become high to very high at lower global warming levels than in AR5 (*high confidence*). Between 1.2°C and 4.5°C global warming level very high risks emerge in all five RFCs compared to just two RFCs in AR5 (*high confidence*). Two of these transitions from high to very high risk are associated with near-term warming: risks to unique and threatened systems at a median value of 1.5°C [1.2 to 2.0] °C (*high confidence*) and risks associated with extreme weather events at a median value of 2°C [1.8 to 2.5] °C (*medium*

confidence). Some key risks contributing to the RFCs are projected to lead to widespread, pervasive, and potentially irreversible impacts at global warming levels of 1.5–2°C if exposure and vulnerability are high and adaptation is low (*medium confidence*.”), SPM-13 (“SPM.B.3 Global warming, reaching 1.5°C in the near-term, would cause unavoidable increases in multiple climate hazards and present multiple risks to ecosystems and humans (*very high confidence*). The level of risk will depend on concurrent near-term trends in vulnerability, exposure, level of socioeconomic development and adaptation (*high confidence*).”).

¹²³⁵ United Nations Environment Programme & Climate & Clean Air Coalition (2021) *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: BENEFITS AND COSTS OF MITIGATING METHANE EMISSIONS*, 17 (“Mitigation of methane is very likely the strategy with the greatest potential to decrease warming over the next 20 years.”).

¹²³⁶ Climate & Clean Air Coalition (7 December 2023) *Opportunities for Increasing Ambition of NDCs Through Integrated Air Pollution and Climate Change Planning: Progress and Looking Ahead to 2025* (“As of November 2023, 95% of NDCs include methane within the scope of their overall mitigation target. The absolute number of NDCs including methane in their overall target has more than doubled, from 90 to 184. Forty countries (~20%) include methane as a supplementary target or assessment of the mitigation potential of the measure(s) identified, growing from a base of two in 2016. Most of the countries who include methane in this way (88%) are GMP partners.”).

¹²³⁷ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“As of October 2023, it is estimated that over 90% of Nationally Determined Contributions (NDCs) cover methane emissions within the scope of their target. At the Ministerial, Special Presidential Envoy for Climate John Kerry issued a challenge to all governments to include all greenhouse gases from all sectors in their revised 2035 NDC target.”).

¹²³⁸ United States White House (17 September 2021) *Meeting of the Major Economies on Energy and Climate September 17 2021: Chair’s Summary*, Press Release (“Recognizing that methane is a powerful, short-lived climate pollutant that already accounts for about half of 1.0 degrees C of net warming to date, the Global Methane Pledge, an effort co-initiated by the United States and the European Union, will involve a collective goal of reducing global methane emissions by at least 30 percent below 2020 levels by 2030 and implementation of related domestic actions. There was broad recognition at the meeting of the importance of rapidly reducing methane emissions, and many MEF members, including the European Union, Argentina, Indonesia, Italy, Mexico, the United Kingdom, and the United States, declared their intention to join. It was reported that non-MEF countries, including Ghana and Iraq, have also signaled intent to join the Global Methane Pledge. These early supporters of the Pledge include six of the top 15 methane emitters globally and together account for over one-fifth of global methane emissions and nearly half of the global economy.”).

¹²³⁹ United States White House (18 September 2021) *Joint US-EU Press Release on the Global Methane Pledge*, Statements and Releases (“The European Union and eight countries have already indicated their support for the Global Methane Pledge: Argentina / European Union / Ghana / Indonesia / Iraq / Italy / Mexico / United Kingdom / United States”).

¹²⁴⁰ G20 (31 October 2021) *Rome Leaders’ Declaration*, 8 (“We commit to significantly reduce our collective greenhouse gas emissions, taking into account national circumstances and respecting our NDCs. We acknowledge that methane emissions represent a significant contribution to climate change and recognize, according to national circumstances, that its reduction can be one of the quickest, most feasible and most cost-effective ways to limit climate change and its impacts. We welcome the contribution of various institutions, in this regard, and take note of specific initiatives on methane, including the establishment of the International Methane Emissions Observatory (IMEO). We will further promote cooperation, to improve data collection, verification, and measurement in support of GHG inventories and to provide high quality scientific data.”).

¹²⁴¹ (30 June 2021) *Commission Regulation 2021/1119*, 2021 O.J.L. 243, Art. 4(1) (“In order to reach the climate-neutrality objective set out in Article 2(1), the binding Union 2030 climate target shall be a domestic reduction of net

greenhouse gas emissions (emissions after deduction of removals) by at least 55 % compared to 1990 levels by 2030.”).

¹²⁴² European Commission (14 October 2020) *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on an EU strategy to reduce methane emissions*, 16 (“As the largest importer of oil and gas, the EU has the leverage to promote energy-related methane emission reductions globally. Estimates show that the external carbon or methane emissions associated with EU fossil gas consumption (i.e. the emissions released outside the EU to produce and deliver fossil gas to the EU) are between three to eight times the quantity of emissions occurring within the EU. The Commission therefore intends to mobilise a coalition of key import countries to coordinate efforts on energy sector methane emissions. Moreover, the EU will leverage its leadership in the circular economy and its advanced agricultural practices that balance animal welfare with productivity to accelerate international action. The Commission will also support international data sharing on methane emissions through the foreseen international methane emissions observatory as well as by making EU satellite data available to global partners. In this way, the EU will lead by example in international collaboration on data sharing.”).

¹²⁴³ (amended 4 May 2012) 1999 Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone to the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (“Gothenburg Protocol”), ECE/EB.AIR/114, Art. 1(11 quarter) (“Ozone precursors’ means nitrogen oxides, volatile organic compounds, methane and carbon monoxide”); and Executive Body Working Group on Strategies and Review (30 September 2020) *Preparations for the review of the Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone as amended in 2012*, ECE/EB.AIR/2020/3 – EBE/EB.AIR/WG.5/2020/3, 20 (“As per the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond (paragraph 50), the review should look at appropriate steps towards reducing emissions of black carbon, ozone precursors not yet addressed such as methane, and emissions from shipping with due consideration for International Maritime Organization (IMO) policies and measures.... In line with the priorities identified in the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond, the following should specifically be considered in answering the questions in annex I: (b) Hemispheric transport of ozone and particulate matter and their precursors and advancing efforts to address air pollution on a broader scale per paragraphs 63 and 78 of the long-term strategy for the Convention for 2020–2030 and beyond; health and ecosystem impacts from outside the ECE region; I Methane and its relationship to the hemispheric transport of ozone and its contribution to ozone in the ECE region.”).

¹²⁴⁴ Parry I. W. H., Black S., Minnett D. N., Mylonas V., & Vernon N. (2022) *HOW TO CUT METHANE EMISSIONS*, International Monetary Fund, 15 (“Global and national strategies for cutting methane emissions need to be fleshed out, but the GMP provides a potential platform for discussion. Some countries will pursue pricing and others non-pricing approaches. Thus, operational methodologies for comparing efforts across countries need to be approved. Continued refinement of methane monitoring technologies is needed, particularly atmospheric measures that can better map readings to specific emission sources. Successful methane abatement programs, such as Norway’s methane tax, need to be disseminated, along with the lessons that can be drawn for other countries. Financing would need to be part of an international agreement, given that mitigation costs would fall disproportionately on emerging market economies. Last, dialogue is needed on design issues for internationally coordinated mitigation regimes as well as strategies for advancing critical methane abatement technologies.”).

¹²⁴⁵ Climate & Clean Air Coalition (9 November 2021) *Climate and Clean Air Coalition Ministers approve strategy to significantly cut short-lived climate pollutants this decade*, Press Release (“Ministers approved the implementation of a Methane Flagship, which, starting in 2022, will foster and strengthen high level commitments to reduce methane, amplify and raise awareness, support planning and delivery of strategies and plans, provide analysis and tools to support action, and scale up financing. There was strong and broad support for the recently launched Global Methane Pledge and ministers welcomed the CCAC having a leadership role in supporting its implementation.”).

¹²⁴⁶ Climate & Clean Air Coalition, *National Planning and Policy Development (last visited 1 February 2024)* (“The CCAC helps countries develop national plans that integrate climate and clean air objectives through actions to reduce

short-lived climate pollutants (SLCPs). To date, 15 countries have endorsed national SLCP plans. The full list of national plans can be found on our policy database.”).

¹²⁴⁷ United Nations Environment Program, *Oil and Gas Methane Partnership 2.0, About OGMP 2.0*, (“The Oil & Gas Methane Partnership 2.0 (OGMP 2.0) is the United Nations Environment Programme’s flagship oil and gas reporting and mitigation programme. OGMP 2.0 is the only comprehensive, measurement-based reporting framework for the oil and gas industry that improves the accuracy and transparency of methane emissions reporting. This is key to prioritising methane mitigation actions in the sector. If you can’t measure it, you can’t fix it.”).

¹²⁴⁸ United States Department of State (2022) *Joint Declaration from Energy Importers and Exporters on Reducing Greenhouse Gas Emissions from Fossil Fuels* (“The United States, European Union, Japan, Canada, Norway, Singapore, and the United Kingdom are committed to taking rapid action to address the dual climate and energy security crises that the world faces. We affirm the need to accelerate global transitions to clean energy, recognizing that reliance on unabated fossil fuels leaves us vulnerable to market volatility and geopolitical challenges. We also recognize that under IPCC 1.5°C-aligned scenarios, fossil fuel consumption will persist, at rapidly declining levels, as the global energy transition unfolds. As such, we emphasize that dramatically reducing methane, CO₂, and other greenhouse gas emissions across the fossil fuel energy value chain is a necessary complement to global energy decarbonization in order to limit warming to 1.5°C. We commit to taking immediate action to reduce the greenhouse gas emissions associated with fossil energy production and consumption, particularly to reduce methane emissions. We emphasize that reducing methane and other greenhouse gas emissions from the fossil energy sector enhances energy security by reducing avoidable routine flaring, venting, and leakage that wastes natural gas. We also note that these measures will also improve health outcomes by eliminating black carbon and other associated air pollutants. We call on fossil energy importers to take steps to reduce the methane emissions associated with their energy consumption, which can spur emissions reductions across the value chain. We also call on fossil energy producers to implement projects and supporting policies and measures to achieve emissions reductions across fossil energy operations. We call for global action to reduce methane emissions in the fossil energy sector to the fullest extent practicable, with the aim to reduce warming by 0.1°C by midcentury, consistent with International Energy Agency findings of the near-term warming reduction effects of fully deploying technically feasible mitigation in this sector. We reaffirm the call to action under the Global Methane Pledge to reduce collective anthropogenic methane emissions by at least 30 percent from 2020 levels by 2030 as an essential strategy to reduce warming in the near term and keep a 1.5°C limit on temperature rise within reach. We recognize that the fossil energy sector must lead in rapid methane mitigation given the abundance of technically feasible and cost-effective mitigation measures available in the fossil energy sector, as called for in the Global Methane Pledge Energy Pathway. Recognizing the urgency of reducing emissions from fossil energy value chains, we commit to working towards the creation of an international market for fossil energy that minimizes flaring, methane, and CO₂ emissions across the value chain to the fullest extent practicable, as we also work to phase down fossil fuel consumption. We support the development of frameworks or standards for fossil energy suppliers to provide accurate, transparent, and reliable information to purchasers about the methane and CO₂ emissions associated with their value chains.”).

¹²⁴⁹ International Energy Agency (2 October 2023) *International Climate and Energy Summit in Madrid builds momentum behind efforts to reach 1.5 °C goal* (“Highlight the critical role of, and opportunity for, the fossil fuel industry to reduce methane emissions from their operations, with the aim of cutting them 75% by 2030.”).

¹²⁵⁰ United States Department of Energy (15 November 2023) *Public Announcement of International Working Group to Establish a Greenhouse Gas Supply Chain Emissions Measurement, Monitoring, Reporting, and Verification (MMRV) Framework for Providing Comparable and Reliable Information to Natural Gas Market Participants* (“Therefore, twelve countries, the European Commission and the East Mediterranean Gas Forum have formed a multi-national working group to develop a consensus-based approach for the measurement, monitoring, reporting and verification (MMRV) of GHG emissions across the international supply chain from pre-production through final delivery to enable the provision of comparable and reliable information. Natural gas producers and exporters, importers and end users, governments, and

other key stakeholders have made significant progress towards addressing this challenge through various measurement, reporting and verification protocols at local and international levels. A number of well-established domestic and international emissions reporting approaches already exist, our efforts are aimed at building on these existing approaches. This includes, but is not limited to, the United Nations Environmental Program’s Oil and Gas Methane Partnership 2.0 (OGMP 2.0). The MMRV Working Group will advance comparability by reviewing and building upon existing standards and protocols to provide a consistent set of technical criteria for reporting emissions and operating data at various levels of data availability. The approach will encourage and prefer measured data over modeled data and estimation of emissions, while balancing economic and technical feasibility. The MMRV Framework will also be technology neutral with respect to approaches for measurement of emissions. These actions will improve the accuracy and representativeness of the reported data. Comparability will be further supported by using transparent and consistent tools for estimating GHG supply chain emissions and data quality from pre-production through final delivery of the natural gas. To provide comparable and reliable information, the MMRV Working Group will support independent third-party verification of the accuracy and representativeness of the emissions data and the aggregate supply chain GHG emissions intensity. It will also support accreditation to ensure that certifiers are independent of the reporting entity and are technically qualified to conduct reviews.”).

¹²⁵¹ Dreyfus G. & Ferris T. (2023) *Metrics and Measurement of Methane Emissions*, in [INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND CARBON SEQUESTRATION MONITORING](#), China Council for International Cooperation on Environment and Development, 22 (“This section on Metrics and Measurement of Methane Emissions focuses on oil and gas methane emissions and will help answer the following questions: Why is it important to accurately measure methane emissions? What are the main sources of methane gas emissions, and do these sources pose particular measurement challenges? Are there known gaps in current methane measurement approaches? Are there current or emerging methane monitoring systems that can improve the accuracy and timeliness of emissions data?”).

¹²⁵² Clausing K., Garicano L., & Wolfram C. (2023) *How an international agreement on methane emissions can pave the way for enhanced global cooperation on climate change*, Peterson Institute for International Economics, 2 (“Under the IRA, the United States has for the first time implemented a methane emissions fee as a backstop to new methane regulations in the oil and gas sectors. The European Union is also implementing new methane regulations on fossil energy, and the European Parliament proposal would penalize imports from countries that do not meet certain regulatory standards. Building on these parallel approaches, this Policy Brief proposes transatlantic coordination that uses an import charge as a lever to seek similarly ambitious regulatory reforms in the oil and gas sectors abroad. Specifically, oil and gas exporters can be encouraged to adopt regulations comparable to those in the United States and the European Union or, if they fail to implement regulations, pay a border adjustment fee on exports to the two jurisdictions. With time, most major energy importers would ideally join the coalition of countries cooperating on both stringent domestic regulations on oil and gas production (if applicable) and border adjustments on any dirty, nonregulating exporters.”). *See also* Salata Institute for Climate and Sustainability (2023) [METHANE AND TRADE: PAVING THE WAY FOR ENHANCED GLOBAL COOPERATION ON CLIMATE CHANGE](#), Research Brief (“As a first step, the United States, the European Union, and partner countries can work to coordinate their methane reduction policies, with an eye toward the eventual imposition of border adjustments on imports from countries that fail to raise their standards. The Biden administration could work with Congress on next steps for implementing a US methane border adjustment, while simultaneously leading efforts with the European Union, the G7, and other potential coalition members to develop a framework for a multilateral agreement. Ideally, a proposed framework could be presented at the 28th Conference of the Parties to the UN Framework Convention on Climate Change (COP28) in Dubai in late 2023.”).

¹²⁵³ United States Department of State (10 November 2021) *U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s*, Media Note (“8. Recognizing specifically the significant role that emissions of methane play in increasing temperatures, both countries consider increased action to control and reduce such emissions to be a matter of necessity in the 2020s. To this end: A. The two countries intend to cooperate to enhance the measurement

of methane emissions; to exchange information on their respective policies and programs for strengthening management and control of methane; and to foster joint research into methane emission reduction challenges and solutions.”).

¹²⁵⁴ United States Department of State (14 November 2023) *Sunnylands Statement on Enhancing Cooperation to Address the Climate Crisis* (“10. The two countries will implement their respective national methane action plans and intend to elaborate further measures, as appropriate. 11. The two countries will immediately initiate technical working group cooperation on policy dialogue, technical solutions exchanges, and capacity building, building on their respective national methane action plans to develop their respective methane reduction actions/targets for inclusion in their 2035 NDCs and support each country’s methane reduction/control progress. 12. The two countries intend to cooperate on respective measures to manage nitrous oxide emissions. 13. The two countries intend to work together under the Kigali Amendment to phase down HFCs and commit to ensure application of ambitious minimum efficiency standards for all cooling equipment manufactured.”).

¹²⁵⁵ Good K. (22 August 2022) *Drought Negatively Impacting China, the U.S. and Europe, as Ukrainian Black Sea Exports Continue*, Farm Policy News (“Parts of China are experiencing their longest sustained heat wave since record-keeping began in 1961, according to China’s National Climate Center, leading to manufacturing shutdowns owing to lack of hydropower. The drought affecting Spain, Portugal, France and Italy is on track to be the worst in 500 years, according to Andrea Toreti, a climate scientist at the European Commission’s Joint Research Center. In the American West, a drought that began two decades ago now appears to be the worst in 1,200 years, according to a study led by the University of California, Los Angeles.”).

¹²⁵⁶ Environment and Climate Change Canada (2019) *Regulations Respecting Reduction in the Release of Methane and Certain Volatile Organic Compounds (Upstream Oil and Gas Sector)* (“Companies must register their facilities before April 30th, 2020, or within 120 days of when the facility begins to be covered by any of the requirements. There are also provisions in the regulations to retain information for record-keeping, inspection purposes, and for on-demand reporting to Environment and Climate Change Canada. Regulatory requirements for fugitive equipment leaks, venting from well completions, and compressors, come into force on January 1, 2020. Regulatory requirements for facility production venting restrictions and venting limits for pneumatic equipment come into force on January 1, 2023.”).

¹²⁵⁷ Government of Mexico Agency for Safety, Energy and Environment (6 November 2018) *DISPOSICIONES Administrativas de carácter general que establecen los Lineamientos para la prevención y el control integral de las emisiones de metano del Sector Hidrocarburos* (“Que la información disponible a nivel internacional y nacional ha demostrado que, implementando mejoras operativas y tecnológicas disponibles, es factible reducir las emisiones de metano en el Sector Hidrocarburos. En ese sentido, la Agencia Internacional de Energía en la publicación Perspectiva Mundial de la Energía 2017, concretamente en lo relativo al caso ambiental del gas natural, reconoce que, aplicando las mejores prácticas internacionales, tales como las que este instrumento regulatorio integra, es factible y posible que a nivel mundial el sector reduzca las emisiones de metano hasta en un 75%.”); *discussed in Clean Air Task Force* (13 November 2018) *Mexico Takes a Giant Leap Forward in Regulating Methane Emissions*, Press Release; and Del Rio D., Evangelista R., & Arrieta Maza M. (21 November 2018) *Mexico: Program For The Prevention And Comprehensive Management Of Methane Emissions Within The Hydrocarbon Sector (“PPCIEM”)*, MONDAQ.

¹²⁵⁸ United States White House (10 January 2023) *Fact Sheet: Key Deliverables for the 2023 North American Leaders’ Summit* (“The United States, Mexico, and Canada recognize the urgency for rapid, coordinated and ambitious measures to build clean energy economies and respond to the climate crisis. At the NALS, the three leaders committed to combatting the climate crisis by: Committing to reduce methane emissions from the solid waste and wastewater sector by at least 15% by 2030 from 2020 levels and deepen collaboration on waste and agriculture methane measurement and mitigation, including achieving the Global Methane Pledge through trilateral cooperation on methane and black carbon emissions.”). *See also* United States White House (29 June 2016) *Leaders’ Statement on a North American Climate, Clean Energy, and Environment Partnership*, Statements and Releases (“Today, Mexico

will join Canada and the United States in committing to reduce their methane emissions from the oil and gas sector – the world’s largest industrial methane source – 40% to 45% by 2025, towards achieving the greenhouse gas targets in our nationally determined contributions. To achieve this goal, the three countries commit to develop and implement federal regulations to reduce emissions from existing and new sources in the oil and gas sector as soon as possible. We also commit to develop and implement national methane reduction strategies for key sectors such as oil and gas, agriculture, and waste management, including food waste. Finally, we pledge to continue collaborating with one another and with international partners as we commit to significant national actions to reduce black carbon emissions in North America, and promote alternatives to highly polluting hydrofluorocarbons.”).

¹²⁵⁹ Climate & Clean Air Coalition (12 January 2023) *Nigeria Cements Methane Guidelines, and its Role as an African Climate and Clean Air Leader: Nigeria is the first country in Africa to regulate methane emissions in the energy sector*.

¹²⁶⁰ Institute for Governance & Sustainable Development (2023) *China Methane Emissions Control Action Plan*.

¹²⁶¹ United States White House (26 July 2023) *Biden-Harris Administration Hosts White House Methane Summit to Tackle Dangerous Climate Pollution, while Creating Good-Paying Jobs and Protecting Community Health* (“Today, the Biden-Harris Administration will convene the first ever White House Methane Summit around the urgent need to dramatically reduce methane emissions, especially from leaks in the oil and gas sector, as a way to protect public health, create good-paying jobs, save consumers money, and advance President Biden’s ambitious climate agenda. The President’s Investing in America agenda is accelerating adoption of technologies and tools to address methane emissions and helping the U.S. unlock a win-win opportunity for communities and the economy. Just this week, new analysis from the Blue Green Alliance found that full adoption of the Biden-Harris Administration’s proposed leak-reducing actions will create 10,000 net direct and indirect jobs each year, in sectors like manufacturing, construction, and operations and maintenance.”).

¹²⁶² European Parliament (7 May 2024) **REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the reduction of methane emissions in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942** (“This Regulation lays down rules for the accurate measurement, quantification, monitoring, reporting and verification of methane emissions in the energy sector in the Union, as well as the reduction of those emissions, including through leak detection and repair surveys, repair obligations and restrictions on venting and flaring. This Regulation also lays down rules on tools ensuring transparency as regards methane emissions.”).

¹²⁶³ See, e.g., *Greenhouse Gas Emission Standards for Crude Oil and Natural Gas Facilities*, Cal. Code Regs. Tit. 17, §§ 95665–95677.

¹²⁶⁴ New Mexico Administrative Code (26 July 2022) *Venting and Flaring of Natural Gas*, NMAC 19.15.27.8; discussed in Evans B. (26 March 2021) *New Mexico regulator puts in place rule requiring operators to eliminate gas flaring*, S&P GLOBAL (“The New Mexico Oil Conservation Commission finalized the rules to eliminate venting and flaring at new and existing wells across the state on March 25. Routine flaring occurs when operators burn off gas produced from oil-directed wells instead of capturing it because of limitations in gathering and processing capacity. New Mexico joins Colorado in becoming the first states in the Lower 48 to end flaring.”). See also New Mexico Environment Department (14 April 2022) *New Mexico adopts nationally leading oil and gas emissions rule*, Press Release (“After two and half years of collaborative public and stakeholder engagement, the Environmental Improvement Board (EIB) adopted new air quality rules that will eliminate hundreds of millions of pounds of harmful emissions annually from oil and gas operations in New Mexico. The new rule will improve air quality for New Mexicans by establishing innovative and actionable regulations to curb the formation of ground-level ozone. The new rule will reduce harmful emissions of ozone precursor pollutants – volatile organic compounds and oxides of nitrogen – by approximately 260 million pounds annually, and will have the co-benefit of reducing methane emissions by over 851 million pounds annually. Starting this summer, compliance obligations for new and existing oil and gas operations in New Mexico counties with high ozone levels will begin to take effect. These counties are Chaves, Doña Ana, Eddy,

Lea, Rio Arriba, Sandoval, San Juan, and Valencia counties.”); *and* State of New Mexico Environmental Improvement Board (2022) *Hearing Officer’s Report*, 20.2.50 NMAC – Oil and Gas Sector – Ozone Precursor Pollutants (*discussing* the methane emissions reduction co-benefit of adopting mitigation measures for volatile organic compounds (VOCs) and nitrogen oxides (NOx) in the oil and gas sector).

¹²⁶⁵ *Drilling units - pooling interests*, Colo. Rev. Stat. § 34-60-116 (2020) (“To prevent or to assist in preventing waste, to avoid the drilling of unnecessary wells, or to protect correlative rights, the commission, upon its own motion or on a proper application of an interested party, but after notice and hearing as provided in this section, may establish one or more drilling units of specified size and shape covering any pool or portion of a pool.”). *See also Venting or Flaring Natural Gas*, 2 Colo. Code Regs. § 404-1-903 (2022).

¹²⁶⁶ British Columbia (2021) *CLEANBC: ROADMAP TO 2030*, 51 (“With this Roadmap, we are committed to building on that research and applying it across the industrial sector to achieve our goal of zero emissions from methane – or as close to zero as possible – by 2035, and to reduce methane emissions in the oil and gas sector by 75% (compared to 2014) by 2030, consistent with the federal commitment. Methane from industrial wood waste landfills can be converted to less-harmful greenhouse gases through landfill management.”).

¹²⁶⁷ C40 Cities, *Waste Management* (*last visited* 5 February 2023) (“Waste disposal is responsible for 3-5% of the overall direct GHG emissions in cities and those are projected to increase from 1.12 billion tonnes today to 2.38 billion tonnes of CO₂e per year by 2050. 97% of those emissions are in the form of methane, an extremely powerful greenhouse gas and climate forcer, emitted when organic waste breaks down in open dumps or landfills without gas collection. Because methane is a short-lived greenhouse gas, reducing its emissions would see impact within this generation. This is a particularly urgent opportunity for Global South cities where the organics content of waste is highest, and action taken here will improve its economic development, reduce social and climate vulnerability, reduce operational and opportunity costs, while extending the operational lifetime of disposal sites.”).

¹²⁶⁸ Climate Group, Under2 Coalition, *Methane Project* (*last visited* 5 February 2023) (“A forum for state and regional governments to share effective ways to reduce methane emissions, beginning with a focus on the oil and gas sector.”).

¹²⁶⁹ California Air Resources Board (3 December 2023) *California launches methane-cutting effort with subnational governments at COP28* (“California officially kicked off a new international climate initiative that creates a partnership of subnational governments that are committed to reducing methane today at the United Nations Climate Change Conference (COP28) hosted in Dubai. The effort, which was initially announced in September during Climate Week, has expanded to 15 signatories, which include additions from Brazil, Canada, South Korea, Bolivia, Germany, Spain, and the United States. The Subnational Methane Action Coalition creates collaboration with jurisdictions that oversee and regulate key sources of methane such as agriculture, energy and landfills to share goals and best practices in reducing the short-lived climate pollutant that accounts for almost 30% of current global warming and is 80 times more potent than carbon dioxide over a 20-year period.”).

¹²⁷⁰ United Nations Environment Programme (31 October 2021) *Methane Observatory launched to boost action on powerful climate-warming gas*, Press Release (“IMEO will improve the reporting accuracy and public transparency of human-caused methane emissions. IMEO will initially focus on methane emissions from the fossil fuel sector, and then expand to other major emitting sectors like agriculture and waste.”).

¹²⁷¹ World Bank, *GGFR to evolve to the Global Flaring & Methane Reduction Partnership* (*last visited* 1 February 2024) (“At COP28 the World Bank launched the Global Flaring and Methane Reduction (GFMR) Partnership, a new multi-donor trust fund focused on helping developing countries cut carbon dioxide and methane emissions generated by the oil and gas industry. GFMR will provide more than \$250 million and mobilize billions from the private sector to support those countries with the least capacity and resources to address these emissions. The partnership will focus on providing grant funding, technical assistance, policy and regulatory reform advisory services, institutional strengthening, and mobilizing financing to support action by governments and operators.”).

¹²⁷² Parry I. W. H., Black S., Minnett D. N., Mylonas V., & Vernon N. (2022) [HOW TO CUT METHANE EMISSIONS](#), International Monetary Fund, 1 (“Limiting global warming to 1.5 to 2°C above preindustrial levels requires rapid cuts in greenhouse gas emissions. This includes methane, which has an outsized impact on temperatures. To date, 125 countries have pledged to cut global methane emissions by 30 percent by 2030. This Note provides background on methane emission sources, presents practical fiscal policy options to cut emissions, and assesses impacts. Putting a price on methane, ideally through a fee, would reduce emissions efficiently, and can be administratively straightforward for extractives industries and, in some cases, agriculture. Policies could also include revenue-neutral ‘feebates’ that use fees on dirtier polluters to subsidize cleaner producers. A \$70 methane fee among large economies would align 2030 emissions with 2°C. Most cuts would be in extractives and abatement costs would be equivalent to just 0.1 percent of GDP. Costs are larger in certain developing countries, implying climate finance could be a key element of a global agreement on a minimum methane price.”).

¹²⁷³ International Monetary Fund, [Resilience and Sustainability Trust](#) (last visited 12 March 2024) (“The IMF’s Resilience and Sustainability Trust (RST) helps low-income and vulnerable middle-income countries build resilience to external shocks and ensure sustainable growth, contributing to their longer-term balance of payments stability. It complements the IMF’s existing lending toolkit by providing longer-term, affordable financing to address longer-term challenges, including climate change and pandemic preparedness.”).

¹²⁷⁴ Global Methane Initiative, [About the Global Methane Initiative](#) (last visited 5 February 2023) (“Launched in 2004, the GMI is an international public-private initiative that advances cost-effective, near-term methane abatement and recovery and use of methane as a clean energy source in three sectors: biogas (including agriculture, municipal solid waste, and wastewater), coal mines, and oil and gas systems. Focusing collective efforts on methane emission sources is a cost-effective approach to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and increase energy security, enhance economic growth, improve air quality and improve worker safety.”).

¹²⁷⁵ Oil and Gas Climate Initiative, [About Us](#) (last visited 5 February 2023) (“OGCI member companies commit to: **Methane Intensity** -> By 2025, reduce the collective average methane intensity of aggregated upstream oil and gas operations to well below 0.20%, from a 2017 baseline of 0.30%. **Carbon Intensity** -> Reduce member companies’ aggregate upstream carbon intensity from 23 kg of greenhouse gases per barrel of oil or gas in 2017 to 17 kg by 2025. **CCUS Kickstarter** -> By 2030, help to decarbonize multiple industrial hubs and kickstart a commercial **CCUS** industry that can have a significant impact on greenhouse gas emissions. **OGCI Climate Investments** -> Invest OGCI’s \$1B+ fund over a ten-year period to deliver a tangible impact on greenhouse gas emissions through accelerated innovation across the energy and industrial sectors. **Zero Routine Flaring** -> Support explicitly the aims of Zero Routine Flaring by 2030.”).

¹²⁷⁶ MiQ, [The Methane Mission](#) (last visited 5 February 2023) (“To tackle methane emissions, companies need a granular understanding of where these are coming from, as well as robust methane mitigation practices and technology to enable them to actually address the issue. That’s where MiQ comes in. MiQ has developed a global solution for a global issue, grading gas on methane emissions to drive change in parallel with regulation through a not-for-profit and independently audited certification standard. Why? Because differentiating producers based on their methane emissions performance will incentivise businesses to improve because it simply makes good climate – and business – sense.”).

¹²⁷⁷ American Gas Association, [Natural Gas Sustainability Initiative \(NGSI\)](#) (last visited 5 February 2023) (“NGSI is a voluntary, industry-wide approach for companies to calculate methane emissions intensity by segment—the Methane Emissions Intensity Protocol (Protocol). This consistent, transparent and comparable method for measuring and reporting methane emissions throughout the natural gas supply chain will improve the quality of information available and will help companies more effectively identify ways to reduce methane emissions and communicate progress.”).

¹²⁷⁸ See Kaniaru D., Shende R., & Zaelke D. (2008) *Landmark Agreement to Strengthen Montreal Protocol Provides Powerful Climate Mitigation*, SUSTAIN. DEV. LAW POL. 8(2): 46–50, 46 (“The HCFC agreement and its climate benefits were possible largely because of the Montreal Protocol’s unique history of continuous adjustment to keep pace with scientific understanding and technological capability. The Parties to the Protocol generally regard the treaty as fair, due to its objective technical assessment bodies and its effective financial mechanism, the Multilateral Fund. These features and others have made the Protocol the world’s most successful multilateral environmental agreement, phasing out ninety-five percent of global production of ozone-depleting substances in just twenty years and placing the ozone layer on a path to recovery.”); and Parson E. (2006) *Chapter 11: Ground for Hope: Assessing Technological Options to Manage Ozone Depletion*, in ASSESSMENTS OF REGIONAL AND GLOBAL ENVIRONMENTAL RISKS: DESIGNING PROCESSES FOR THE EFFECTIVE USE OF SCIENCE IN DECISIONMAKING, Resources for the Future, Farrell A. & Jager J. (eds.), 228 (“Indeed, although technical option assessments have been less frequently undertaken, less frequently effective, and less prominent in policy debate than scientific assessments of environmental risk, [the case of the Montreal Protocol TEAP] suggests that they may hold far greater prospect for exercising decisive influence on policy debate and action to manage environmental risks—if the factors contributing to their strong influence in this case can be repeated elsewhere.”).

¹²⁷⁹ Climate & Clean Air Coalition (2023) *Clean Air Flagship* (“At the Climate and Clean Air Ministerial 2022, CCAC Partners requested a new effort to achieve clean air across the world. At the Climate and Clean Air Ministerial 2023, the CCAC launched the “Clean Air Flagship” to mobilise the partnership and ‘move the needle’ on this important topic. It is aimed at: Saving lives: Supporting governments to achieve cleaner air as quickly as possible, consistent with improved WHO air quality interim targets. Slowing climate change: Taking full advantage of win-win opportunities to reduce the emissions of short-lived climate pollutants simultaneously with other harmful pollutants. Maximizing co-benefits: Improving agricultural productivity, economic development and the overall quality of life.”).

¹²⁸⁰ Climate & Clean Air Coalition (2023) *Clean Air Flagship 2024-2026*, 6 (“Support science cooperation and information-sharing initiatives within the regional frameworks, especially with respect to tropospheric ozone, black carbon, and methane (See Annex 1).”).

¹²⁸¹ Climate & Clean Air Coalition (2023) *Clean Air Flagship 2024-2026*, 4 (“Strengthen and support regional and sub-regional cooperation and the implementation of political commitments to achieve the WHO Air Quality Guidelines and Global Methane Pledge.”).

¹²⁸² Climate & Clean Air Coalition (2023) *BRIEF: SCALING UP UNDERFINANCED SLCP MITIGATION SOLUTIONS: DRIVING INNOVATION AND TECHNOLOGY IN THE WASTE SECTOR*.

¹²⁸³ See Breitmeier H., Underdal A., & Young O. R. (2011) *The Effectiveness of International Environmental Regimes: Comparing and Contrasting Findings from Quantitative Research*, INT’L. STUD. REV. 13(4): 579–605, 584 (“Although the nature of the project makes it somewhat harder to tease out findings of a general nature about effectiveness, the overall message that AIER generates is that regimes frequently do matter; sometimes they matter a lot.”); Miles E. L., Andresen S., Carlin E. M., Skjærseth J. B., Underdal A., & Wettestad J. (2001) *ENVIRONMENTAL REGIME EFFECTIVENESS: CONFRONTING THEORY WITH EVIDENCE*, MIT Press; and Breitmeier H., Young O. R., & Zürn M. (2006) *ANALYZING INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL REGIMES: FROM CASE STUDY TO DATABASE*, MIT Press.

¹²⁸⁴ Weiss E. B. (2009) *Introductory Note on the Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer and Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*, United Nations Audiovisual Library of International Law (“A working group under UNEP began negotiations on a protocol, and the Montreal Protocol was concluded in September, 1987, only nine months after the formal diplomatic negotiations opened in December, 1986. It went into effect on January 1, 1989.”).

¹²⁸⁵ United Nations Environment Assembly (2 March 2022) *Draft Resolution: End plastic pollution: Towards an international legally binding instrument*, UNEP/EA.5/L.23/Rev.1 (“... Underlining that further international action is

needed by developing an international legally binding instrument on plastic pollution, including in the marine environment, 1. Requests the Executive Director to convene an intergovernmental negotiating committee, commencing its work during the second half of 2022, with the ambition of completing its work by the end of 2024; 2. Acknowledges that some legal obligations arising out of a new international legally binding instrument will require capacity building and technical and financial assistance in order to be effectively implemented by developing countries and countries with economies in transition; 3. Decides that the intergovernmental negotiating committee is to develop an international legally binding instrument on plastic pollution, including in the marine environment henceforth referred to as the instrument, which could include both binding and voluntary approaches, based on a comprehensive approach that addresses the full lifecycle of plastic, taking into account among other things, the principles of the Rio Declaration on Environment and Development, as well as national circumstances and capabilities....”).

¹²⁸⁶ Rosane P., Naran B., Pastor A. O., Connolly J., & Wignarajah D. (2022) *The Landscape of Methane Abatement Finance*, Climate Policy Initiative & Global Methane Hub, 9 (“Methane abatement solutions are severely underfunded considering their climate change mitigation potential. While also underfunded, other climate change solutions with similar mitigation potential, such as low-carbon transport, received 15 times the investment of methane abatement measures, while solutions such as solar and wind received 26 times the investment. Wind and solar energy have an average of 8.35 GtCO₂e mitigation potential (CO₂) by 2030, and received USD 296 billion in 2019/2020, while targeted methane abatement solutions received only USD 6.3 billion with an average mitigation potential of 3.3 GtCO₂e – the ratio of investment flows to mitigation potential was almost 20 times lower than that of the renewable energy sector (Figure 4). Estimated mitigation potential of methane abatement solutions is 3 GtCO₂e by 2030 over a 100-year timeframe (GWP₁₀₀). However, if a 20-year timeframe (GWP₂₀) is considered, the mitigation potential would be substantially higher.”).

¹²⁸⁷ Banga A. (5 February 2024) *A Fireside Chat with World Bank President Ajay Banga* (“Methane is 80 times more dangerous than carbon dioxide. It gets 2% of climate financing. When something that is 80 times more dangerous gets 2% of financing, something is not right. In addition to flaring and the leaks in pipelines which is a real big issue with methane, there is rice paddy cultivation, waste management, agricultural and dairy methane, things the bank knows and has run for years. Getting those to scale is what I’ve committed to doing in these coming 18 months, and then try to fight methane in the atmosphere.”).

¹²⁸⁸ Rosane P., Naran B., Pastor A. O., Connolly J., & Wignarajah D. (2022) *The Landscape of Methane Abatement Finance*, Climate Policy Initiative & Global Methane Hub, 8 (“Total tracked targeted methane abatement finance amounted to USD 11.6 billion in 2019/2020. Although methane emissions are responsible for almost half of global warming, targeted methane abatement finance represented about 2% of total climate finance tracked in CPI’s Global Landscape of Climate Finance (Buchner et al., 2021). Even with data gaps factored in (see discussion on data limitations in Chapter 2), this initial stocktake indicates that actions to reduce methane are not in line with necessary actions to meet climate goals (Figure 3).”); 11 (“Estimates suggest targeted methane abatement finance falls well short of the average USD 119 billion needed each year through 2050 under a +2C of warming scenario (Harmsen et al., 2019): a 10-fold increase from currently tracked investments. Fossil fuel, at USD 32 billion per year, and AFOLU, at USD 43 billion per year, are the two sectors where the gap with current levels is the greatest.”); citing Harmsen J. H. M., van Vuuren D. P., Nayak D. R., Hof A. F., Höglund-Isaksson L., Lucas P. L., Nielsen J. B., Smith P., & Stehfest E. (2019) *Long-term marginal abatement cost curves of non-CO₂ greenhouse gases*, ENVIRON. SCI. POLICY 99: 136–149.

¹²⁸⁹ Rosane P., Naran B., Pastor A. O., Connolly J., & Wignarajah D. (2022) *The Landscape of Methane Abatement Finance*, Climate Policy Initiative & Global Methane Hub, 10 (“As shown in Figure 6, almost two-thirds of methane abatement funding is concentrated in the waste and water sector, whereas 82% of emission sources comes from the AFOLU and energy sectors which only received 33% of the total tracked funding.”); 11 (“As shown in Figure 6, almost two-thirds of methane abatement funding is concentrated in the waste and water sector, whereas 82% of emission sources comes from the AFOLU and energy sectors which only received 33% of the total tracked funding.”; “Estimates suggest targeted methane abatement finance falls well short of the average USD 119 billion needed each

year through 2050 under a +2C of warming scenario (Harmsen et al., 2019): a 10-fold increase from currently tracked investments. Fossil fuel, at USD 32 billion per year, and AFOLU, at USD 43 billion per year, are the two sectors where the gap with current levels is the greatest.”).

¹²⁹⁰ Rosane P., Naran B., Pastor A. O., Connolly J., & Wignarajah D. (2022) *The Landscape of Methane Abatement Finance*, Climate Policy Initiative & Global Methane Hub, 11 (“As shown in Figure 6, almost two-thirds of methane abatement funding is concentrated in the waste and water sector, whereas 82% of emission sources comes from the AFOLU and energy sectors which only received 33% of the total tracked funding. ... Estimates suggest targeted methane abatement finance falls well short of the average USD 119 billion needed each year through 2050 under a +2C of warming scenario (Harmsen et al., 2019): a 10-fold increase from currently tracked investments. Fossil fuel, at USD 32 billion per year, and AFOLU, at USD 43 billion per year, are the two sectors where the gap with current levels is the greatest.”).

¹²⁹¹ Climate Policy Initiative (2023) *LANDSCAPE OF METHANE ABATEMENT FINANCE 2023*, 7 (“At 13.7 billion, methane abatement finance is at its highest level yet, but annual flows need to be at least 3.5 times larger until 2030. Despite increased methane reduction pledges and their status among the most powerful contributors to global temperature rise, methane emissions continue to increase. Methane abatement is one of the most effective mitigation investments, but finance is still far below the global estimated needs of USD 48 billion annually by 2030. Funding for methane abatement has seen a small improvement of 18% since 2019/20: the annual average increased from USD 11.6 billion in fiscal years 2019/20 to USD 13.7 billion in 2021/22. Estimated needs are set to grow significantly from 2030 to 2050 there is urgent need to accelerate finance at a continuously increasing rate. Even considering data gaps, this implies that current methane emissions reduction measures fall short of those needed to meet climate goals.”).

¹²⁹² Clean Air Task Force (2023) *BARRIERS AND SOLUTIONS TO SCALING-UP METHANE FINANCE* (Figure 5 “Constraints to Scaling Methane Mitigation.”).

¹²⁹³ International Energy Agency (2024) *GLOBAL METHANE TRACKER 2024* (“Fossil fuel companies and governments around the world now need to deliver clear strategies for how they will implement these pledges effectively and rapidly. This needs to be accompanied by verification and accountability mechanisms to ensure that actors are taking the necessary steps towards their goals. Further commitments – particularly in financing – are needed to deliver the reductions required this decade.” ...” We estimate that around USD 170 billion in spending is needed to deliver the methane abatement measures deployed by the fossil fuel industry in the NZE Scenario. This includes around USD 100 billion of spending in the oil and gas sector and USD 70 billion in the coal industry. Through 2030, roughly USD 135 billion goes towards capital expenditures, while USD 35 billion is for operational expenditures.”).

¹²⁹⁴ Dietz S., Rising J., Stoerk T., & Wagner G. (2021) *Economic impacts of tipping points in the climate system*, PROC. NAT. ACAD. SCI. 118(34): 1–9, 1 (“We provide unified estimates of the economic impacts of all eight climate tipping points covered in the economic literature so far using a meta-analytic integrated assessment model (IAM) with a modular structure. The model includes national-level climate damages from rising temperatures and sea levels for 180 countries, calibrated on detailed econometric evidence and simulation modeling. Collectively, climate tipping points increase the social cost of carbon (SCC) by ~25% in our main specification. The distribution is positively skewed, however. We estimate an ~10% chance of climate tipping points more than doubling the SCC. Accordingly, climate tipping points increase global economic risk. A spatial analysis shows that they increase economic losses almost everywhere. The tipping points with the largest effects are dissociation of ocean methane hydrates and thawing permafrost. Most of our numbers are probable underestimates, given that some tipping points, tipping point interactions, and impact channels have not been covered in the literature so far; however, our method of structural meta-analysis means that future modeling of climate tipping points can be integrated with relative ease, and we present a reduced-form tipping points damage function that could be incorporated in other IAMs.”); 2 (“Combining all eight tipping points increases the expected SCC by 24.5%. As discussed below, this should be seen as a probable underestimate, given the literature we synthesize has yet to cover some tipping points, and misses possible impact channels and interactions even for those it does cover. Fig. 1 shows that the distribution of expected increases in the

SCC is positively skewed. The median percentage increase in the SCC from all tipping points combined is 18.8%; the 75th percentile is 22.5%, and the 99.5th percentile is 132.2%.’”).

¹²⁹⁵ Bennett V. (2 November 2021) *World Leaders in Global Methane Pledge*, European Bank for Reconstruction and Development (“President Odile Renaud-Basso endorsed the declaration on behalf of the European Bank for Reconstruction and Development (EBRD), saying: ‘The Bank is supporting the economies in which it invests in increasing their environmental sustainability, including by supporting methane abatement across the agribusiness, waste and energy sectors. We are committed to working closely with the signatories of the Global Methane Pledge to help achieve the important target it sets.’”).

¹²⁹⁶ Bennett V. (2 November 2021) *World Leaders in Global Methane Pledge*, European Bank for Reconstruction and Development (“The EBRD has been at the forefront of efforts to reduce methane gas emissions. The Bank has historically financed projects of around €650 million per year in sub-sectors that are directly responsible for the vast majority of methane emissions, including energy and natural resources, municipal infrastructure and agribusiness.”).

¹²⁹⁷ Renaud-Basso O. (2 November 2021) *Launch of Global Methane Pledge* (“Today, we are committing to supporting our countries of operation to advance their domestic methane emission reduction efforts. We will provide technical assistance to support the development of effective inventories, policies, regulations, and standards. And we stand ready to provide funding for methane abatement projects across key sectors of the economy. You can count on our support.”).

¹²⁹⁸ European Commission (2 November 2021) *Launch by United States, the European Union, and Partners of the Global Methane Pledge to Keep 1.5 Within Reach*, Statement (“The U.S. and EU are also proud to announce a significant expansion of financial and technical support to assist implementation of the Pledge. [Global philanthropies have committed \\$328 million](#) in funding to support scale up of these types of methane mitigation strategies worldwide. The European Bank for Reconstruction and Development, the European Investment Bank, and the Green Climate Fund have committed to support the Pledge through both technical assistance and project finance. The International Energy Agency will also serve as an implementation partner.”).

¹²⁹⁹ African Development Bank (15 September 2022) *US government announces \$5 million grant to support African Development Bank in tackling methane emissions*, Press Release (“The United States government has announced it will provide a \$5 million grant to the African Development Bank to support efforts to abate methane gas emission, across Africa... Additional funding was also promised by the Climate and Clean Air Coalition (CCAC) and the Global Methane Hub to tackle methane emissions in African countries. The Global Methane Hub will contribute \$5 million dollars over the next three years. The Hub funds methane mitigation efforts. The Coalition, a voluntary partnership of governments, intergovernmental organizations, businesses, and research institutions, will provide \$1.2 million.”).

¹³⁰⁰ African Development Bank (15 September 2022) *US government announces \$5 million grant to support African Development Bank in tackling methane emissions*, Press Release (“Welcoming the contributions, African Development Bank Vice President for Power, Energy, Climate and Green Growth, Kevin Kariuki said the Bank planned to create activities within the ACCF to support methane abatement. “With the support of the U.S. government, and other donors and non-state actors, we intend to create a dedicated pillar of activities within our Africa Climate Change Fund to support methane abatement including working with countries to include methane in their Nationally Defined Contributions and develop pipelines of methane abatement projects for further investment,” Kariuki said.”).

¹³⁰¹ African Development Bank (2022) *METHANE IN AFRICA: A high-level assessment of anthropogenic methane emissions in Africa with case studies on potential evolution and abatement*.

¹³⁰² United Nations Environment Programme (2021) *REPORT OF THE TECHNOLOGY AND ECONOMIC ASSESSMENT PANEL, Volume 6: Assessment of the Funding Requirement for the Replenishment of the Multilateral Fund for the Period 2021-2023*, 59 (“The funding approved for IS support has played a paramount role in establishing and

maintaining the capacity of national ozone units and is recognized as a major factor in the success of A5 parties achieving compliance with the Montreal Protocol’s control measures.¹²⁰⁹); *citing* Paragraphs 11 to 13 of UNEP/OzL.Pro/ExCom/74/51 (Review of Funding of Institutional Strengthening Projects (Decision 61/43(b)) (April 2015)).

¹³⁰³ William and Flora Hewlett Foundation (2 November 2021) *20+ philanthropies join to provide \$328M to dramatically reduce methane emissions* (Remarks by Larry Kramer, “The speed with which the pledge came together has been remarkable—something for which we must thank the extraordinary leadership of Presidents Biden and von der Leyen. Now we must match that speed with similar speed in implementing and fulfilling it. And for that, I am proud (and humbled) to speak on behalf of the more than 20 philanthropies that likewise came together quickly to compile a fund well in excess of \$325 million to assist nations that have taken the pledge. This flexible philanthropic aid can be used to provide technical assistance to countries that need it and to develop and deploy innovative new solutions. This means grant dollars that can be moved quickly and nimbly for feasibility studies, project development, and other efforts needed to create the conditions to scale investment in methane reduction now.”).

¹³⁰⁴ William and Flora Hewlett Foundation (2 November 2021) *20+ philanthropies join to provide \$328M to dramatically reduce methane emissions* (Remarks by Larry Kramer, “The speed with which the pledge came together has been remarkable—something for which we must thank the extraordinary leadership of Presidents Biden and von der Leyen. Now we must match that speed with similar speed in implementing and fulfilling it. And for that, I am proud (and humbled) to speak on behalf of the more than 20 philanthropies that likewise came together quickly to compile a fund well in excess of \$325 million to assist nations that have taken the pledge. This flexible philanthropic aid can be used to provide technical assistance to countries that need it and to develop and deploy innovative new solutions. This means grant dollars that can be moved quickly and nimbly for feasibility studies, project development, and other efforts needed to create the conditions to scale investment in methane reduction now.”).

¹³⁰⁵ Global Methane Hub (4 April 2022) *The Global Methane Hub Donates \$10 Million to the Climate and Clean Air Coalition (CCAC) for Immediate Action to Reduce Methane Emissions* (“The \$10M donation is part of the Hub’s commitment to support and sustain action from civil society, government, and private industry, including the more than 100 countries that have signed on to the Global Methane Pledge by meaningfully investing in methane reduction solutions.”).

¹³⁰⁶ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“In addition to the over \$1 billion in new grant funding, international financial institutions approved over \$3.5 billion in new investments for methane-reducing projects since COP27. Approvals include \$375 million from the Green Climate Fund and partners, over \$1.9 billion (€1.78 billion) from the European Investment Bank, over \$218 million (€200 million) from the European Bank for Reconstruction and Development, and \$372.5 million from the Inter-American Development Bank. The World Bank approved at least \$700 million in investments, including a \$255 million for rice project in China, \$300 million for landfill methane reduction in Cote d’Ivoire, and \$145 million for wastewater methane reduction in Malawi.”).

¹³⁰⁷ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“In addition to the over \$1 billion in new grant funding, international financial institutions approved over \$3.5 billion in new investments for methane-reducing projects since COP27. Approvals include \$375 million from the Green Climate Fund and partners, over \$1.9 billion (€1.78 billion) from the European Investment Bank, over \$218 million (€200 million) from the European Bank for Reconstruction and Development, and \$372.5 million from the Inter-American Development Bank. The World Bank approved at least \$700 million in investments, including a \$255 million for rice project in China, \$300 million for landfill methane reduction in Cote d’Ivoire, and \$145 million for wastewater methane reduction in Malawi.”).

¹³⁰⁸ Clean Air Task Force (2023) *BARRIERS AND SOLUTIONS TO SCALING UP METHANE FINANCE*, 18 (“Funders and development finance institutions should prioritize methane mitigation in their funding activities. Relevant climate and

sector-specific funding vehicles should specify that methane mitigation projects are eligible for support. This includes funds that support project design and development of project pipelines, such as readiness funds, and those that support project implementation with both activity- and results-based financing.”). *See also* International Energy Agency. (2023) [FINANCING REDUCTIONS IN OIL AND GAS METHANE EMISSIONS](#), 3 (“Oil and gas companies carry primary responsibility for abatement. The spending required to cut methane emissions in the NZE Scenario is less than 2% of the net income received by the industry in 2022. Private sources of finance can provide capital where internal financing options are limited. Regulations and policies on methane abatement are essential to drive down methane emissions. These can be paired with public financing, either directly from governments or through multilateral development banks, to help catalyse private investments and fill gaps where private sources of finance may not be willing or able to invest at the levels needed.”). *The Financial Times* reported that ADNOC “has earmarked \$150bn in capital expenditure over the next five years towards expanding its oil and gas production, with \$15bn set aside for low-carbon solutions over a longer period. ... Jaber is also using dealmaking to strengthen Adnoc’s renewables business.’ ‘In terms of their strategic thinking they are generally way ahead of most other state energy companies when it comes to thinking about their place in the energy transition,’ said Amrita Sen at Energy Aspects.” *See* Levingston I., Sheppard D., & England A. (9 August 2023) [Abu Dhabi oil giant builds internal ‘investment bank’ to chase \\$50bn in global deals](#), FINANCIAL TIMES. In addition to strengthening their renewables business, this investment should support methane mitigation from all sectors, as well as other efforts to decarbonize and ensure a just energy transition during the phaseout of fossil fuels.

¹³⁰⁹ Inflation Reduction Act 2022 Sec. 60113. (“The Administrator shall impose and collect a charge on methane emissions that exceed an applicable waste emissions threshold under subsection (f) from an owner or operator of an applicable facility that reports more than 25,000 metric tons of carbon dioxide equivalent of greenhouse gases emitted”). *See also* Congressional Research Brief (2022) [INFLATION REDUCTION ACT METHANE EMISSIONS CHARGE: IN BRIEF](#) 9. (“the methane emissions charge in IRA starts in calendar year 2024 at \$900 per metric ton of methane, increases to \$1,200 in 2025, and increases to \$1,500 in 2026. The charge remains at \$1,500 in subsequent years.”).

¹³¹⁰ Parry I. W. H., Black S., Minnett D. N., Mylonas V., & Vernon N. (2022) [HOW TO CUT METHANE EMISSIONS](#), International Monetary Fund, 1 (“Putting a price on methane, ideally through a fee, would reduce emissions efficiently, and can be administratively straightforward for extractives industries and, in some cases, agriculture. Policies could also include revenue-neutral ‘feebates’ that use fees on dirtier polluters to subsidize cleaner producers. A \$70 methane fee among large economies would align 2030 emissions with 2oC. Most cuts would be in extractives and abatement costs would be equivalent to just 0.1 percent of GDP. Costs are larger in certain developing countries, implying climate finance could be a key element of a global agreement on a minimum methane price.”).

¹³¹¹ Parry I. W. H., Black S., Minnett D. N., Mylonas V., & Vernon N. (2022) [HOW TO CUT METHANE EMISSIONS](#), International Monetary Fund, 1 (“Putting a price on methane, ideally through a fee, would reduce emissions efficiently, and can be administratively straightforward for extractives industries and, in some cases, agriculture. Policies could also include revenue-neutral ‘feebates’ that use fees on dirtier polluters to subsidize cleaner producers. A \$70 methane fee among large economies would align 2030 emissions with 2oC. Most cuts would be in extractives and abatement costs would be equivalent to just 0.1 percent of GDP. Costs are larger in certain developing countries, implying climate finance could be a key element of a global agreement on a minimum methane price.”).

¹³¹² Global Methane Hub (23 March 2022) [Former environment minister of Chile, Marcelo Mena, named CEO of the newly formed Global Methane Hub](#) (“Funding from The Global Methane Hub will support and sustain action from civil society, government, and private industry, including in the more than 100 countries that have signed on to the Pledge by meaningfully investing in methane reduction solutions. Initiatives have already begun by developing sector-based strategies for waste, agriculture, and fossil fuels. In addition, The Global Methane Hub is currently forming a comprehensive Monitoring, Evaluation, and Learning (MEL) framework for strategy and grantmaking applications. This approach will focus on monitoring performance, evaluating activities, and supporting continuous learning.”).

¹³¹³ *Global Methane Hub* (last visited 1 February 2024) (“While many countries have methane reduction strategies in place, this will be the first coordinated approach to methane mitigation funding. We will move fast, be nimble and operate with ambition and vision. The Hub will focus on the energy, agricultural, and waste sectors which account for 96% of human-caused methane emissions. We will support ambitious catalytic investments, lay the groundwork for long-term transformation of challenging sectors, and also deliver quick wins in sectors that are ripe for action on the ground.”).

¹³¹⁴ Global Methane Hub (2022) *ANNUAL IMPACT REPORT*, 17 (“Most of our funding has focused on cross-cutting emissions in the highest methane emitting regions and sources around the globe. We believe directing efforts to where emissions are greatest is the most effective way to mitigate methane and meet our reduction targets.”).

¹³¹⁵ Global Methane Hub (1 December 2023) *Global Methane Hub Spearheads Transformative Climate Action at COP28* (“The Global Methane Hub organizes the field of philanthropists, experts, nonprofits, and government organizations to ensure we unite around a strategy to maximize methane reductions. We have raised over \$200 million in pooled funds from more than 20 of the largest climate philanthropies to accelerate methane mitigation across the globe.”).

¹³¹⁶ United States Department of State (17 June 2022) *U.S.-EU Joint Press Release on the Global Methane Pledge Energy Pathway*, Press Release (“Today, the United States, the European Union, and 11 countries launched the Global Methane Pledge Energy Pathway to catalyze methane emissions reductions in the oil and gas sector, advancing both climate progress and energy security.... Countries and supporting organizations announced nearly \$60 million in dedicated funding to support implementation of the Pathway. Countries and supporting organizations have announced \$59 million in dedicated funding and in-kind assistance in support of the GMP Energy Pathway that was announced at today’s MEF, including: \$4 million to support the World Bank Global Gas Flaring Reduction Partnership (GGFR). The United States intends to support the transfer by the World Bank of at least \$1.5 million in funding to the GGFR. Germany intends to provide \$1.5 million, and Norway intends to provide approximately \$1 million to GGFR. \$5.5 million to support the Global Methane Initiative (GMI). The United States will provide \$3.5 million. Guided by the recommendations of the GMI, Canada will contribute \$2 million over the next four years, as part of its global climate finance commitment, to support methane mitigation projects in developing countries including in the oil and gas sector. Up to \$9.5 million from the UNEP International Methane Emissions Observatory to support scientific assessments of methane emissions and mitigation potential in the oil and gas sector that are aligned with the Global Methane Pledge Energy Pathway. Up to \$40 million annually from the philanthropic Global Methane Hub to support methane mitigation in the fossil energy sector. These funds will be critical to improve methane measurements in the oil and gas sector, identify priority areas for methane mitigation, develop technical assessments for project development, strengthen regulator and operator capacity, support policy development and enforcement, and other essential activities to achieve reductions in methane emissions.”).

¹³¹⁷ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The Global Methane Hub formally launched the Enteric Fermentation R&D Accelerator with \$200 million in funding, making it the largest ever globally coordinated research effort into livestock methane reduction.”).

¹³¹⁸ Global Methane Hub (19 December 2023) *COP28 Reflections* (“Alongside our project launches, we announced additional funding initiatives that will deliver necessary and critical resources to governments, businesses, and local climate organizations as they implement their methane mitigation strategies. One initiative was the Data to Methane Action Campaign on which we collaborated with UNEP’s IMEO and its partners. GMH provided \$10 million in funding to help support governments and businesses identify and reduce methane leaks through better data monitoring. GMH also supported the International Fund for Agriculture Development’s Reducing Agricultural Methane Program (RAMP), along with the U.S. State Department, which will develop agricultural methane strategies in 25 countries, helping pave a path forward for more sustainable agriculture.”).

¹³¹⁹ Global Methane Hub (19 December 2023) *COP28 Reflections* (“Alongside our project launches, we announced additional funding initiatives that will deliver necessary and critical resources to governments, businesses, and local climate organizations as they implement their methane mitigation strategies. One initiative was the Data to Methane Action Campaign on which we collaborated with UNEP’s IMEO and its partners. GMH provided \$10 million in funding to help support governments and businesses identify and reduce methane leaks through better data monitoring. GMH also supported the International Fund for Agriculture Development’s Reducing Agricultural Methane Program (RAMP), along with the U.S. State Department, which will develop agricultural methane strategies in 25 countries, helping pave a path forward for more sustainable agriculture.”).

¹³²⁰ United States White House (21 April 2023) *Chair’s Summary of the Major Economies Forum on Energy and Climate Held by President Joe Biden*, Statements and Releases (“MEF participants Canada, the European Union, France, Germany, Japan, and the United States, as well as Ireland and Norway, joined in launching the Methane Finance Sprint, which aims to scale up methane finance. This includes mobilizing, by COP 28, at least \$200 million in new public and philanthropic support for methane abatement activities, with a view to developing a pipeline of projects. Philanthropies have committed \$100 million in new funding through the Global Methane Hub towards the \$200 million goal.”)

¹³²¹ United States White House (21 April 2023) *Chair’s Summary of the Major Economies Forum on Energy and Climate Held by President Joe Biden*, Statements and Releases (“MEF participants Canada, the European Union, France, Germany, Japan, and the United States, as well as Ireland and Norway, joined in launching the Methane Finance Sprint, which aims to scale up methane finance. This includes mobilizing, by COP 28, at least \$200 million in new public and philanthropic support for methane abatement activities, with a view to developing a pipeline of projects. Philanthropies have committed \$100 million in new funding through the Global Methane Hub towards the \$200 million goal.”)

¹³²² Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from the 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“President Biden launched the Methane Finance Sprint in April 2023 at the Major Economies Forum, with the aim of raising at least \$200 million in new high-impact grant funding by COP28. Today, governments, the European Commission, philanthropies, and the private sector significantly exceeded that target, announcing over \$1 billion in new grant funding committed since COP27, which more than triples previous annual methane grant funding and will leverage billions more in urgently needed project investment. These funds will support cutting methane emissions across all sectors with a focus in low- and middle-income countries. The Sprint includes \$255 million for the re-launch of the World Bank Global Flaring and Methane Reduction Partnership, \$200 million for the launch of the Enteric Fermentation Accelerator, and additional support for the Climate and Clean Air Coalition (CCAC), the International Methane Emissions Observatory (IMEO), and other programs, elaborated below.”).

¹³²³ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from the 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“President Biden launched the Methane Finance Sprint in April 2023 at the Major Economies Forum, with the aim of raising at least \$200 million in new high-impact grant funding by COP28. Today, governments, the European Commission, philanthropies, and the private sector significantly exceeded that target, announcing over \$1 billion in new grant funding committed since COP27, which more than triples previous annual methane grant funding and will leverage billions more in urgently needed project investment. These funds will support cutting methane emissions across all sectors with a focus in low- and middle-income countries. The Sprint includes \$255 million for the re-launch of the World Bank Global Flaring and Methane Reduction Partnership, \$200 million for the launch of the Enteric Fermentation Accelerator, and additional support for the Climate and Clean Air Coalition (CCAC), the International Methane Emissions Observatory (IMEO), and other programs, elaborated below.”).

¹³²⁴ World Bank (7 September 2023) *Enhancing IMF-World Bank Collaboration* (“Joint Statement of the IMF Managing Director and of the World Bank President ... The two institutions will further strengthen coordination and focus on results. We will formalize the regular meetings of the new Bank-Fund Climate Advisory Group, tasked with ensuring coordination of our climate related work streams. The group will meet every two months to discuss global

and country level engagements, including the results of CCDRs, country level climate analytical work, and the pipeline of key projects and policy-based lending (World Bank’s DPLs and Fund’s RST engagements). We will also incorporate climate considerations in our ongoing work on debt sustainability, including through the revised joint Low Income Country Debt Sustainability Framework.”).

¹³²⁵ World Bank (7 September 2023) *Enhancing IMF-World Bank Collaboration* (“Joint Statement of the IMF Managing Director and of the World Bank President ... The two institutions will further strengthen coordination and focus on results. We will formalize the regular meetings of the new Bank-Fund Climate Advisory Group, tasked with ensuring coordination of our climate related work streams. The group will meet every two months to discuss global and country level engagements, including the results of CCDRs, country level climate analytical work, and the pipeline of key projects and policy-based lending (World Bank’s DPLs and Fund’s RST engagements). We will also incorporate climate considerations in our ongoing work on debt sustainability, including through the revised joint Low Income Country Debt Sustainability Framework.”).

¹³²⁶ International Monetary Fund (18 April 2022) *Proposal to Establish a Resilience and Sustainability Trust*, 11–12 (“The RST adds to the lending toolkit by helping members address risks to prospective BoP stability stemming from select macro-critical longer-term structural challenges. While not necessarily posing imminent BoP problems, longer-term challenges such as climate change make countries more prone to severe BoP problems in the longer run by raising the likelihood and impact of future shocks and undermining growth prospects. Policy inaction—including on account of scarce financing—to address these challenges could increase these risks and jeopardize *prospective BoP stability*, as defined in ¶9. Helping member countries to address such risks through policy support and financing is consistent with the Fund’s mandate to support members’ BoP stability.”).

¹³²⁷ Parry I. W. H., Black S., Minnett D. N., Mylonas V., & Vernon N. (2022) *HOW TO CUT METHANE EMISSIONS*, International Monetary Fund, 15 (“Global and national strategies for cutting methane emissions need to be fleshed out, but the GMP provides a potential platform for discussion. Some countries will pursue pricing and others non-pricing approaches. Thus, operational methodologies for comparing efforts across countries need to be approved. Continued refinement of methane monitoring technologies is needed, particularly atmospheric measures that can better map readings to specific emission sources. Successful methane abatement programs, such as Norway’s methane tax, need to be disseminated, along with the lessons that can be drawn for other countries. Financing would need to be part of an international agreement, given that mitigation costs would fall disproportionately on emerging market economies. Last, dialogue is needed on design issues for internationally coordinated mitigation regimes as well as strategies for advancing critical methane abatement technologies.”).

¹³²⁸ As of 2 February 2024, the [SDR exchange rate of reference](#) was 0.750289 SDR per USD.

¹³²⁹ United States White House (13 June 2021) *Carbis Bay G7 Summit Communiqué*, Statements and Releases (“65. We welcome the agreement by G7 Finance Ministers and Central Bank Governors to support a new \$650 billion allocation of IMF Special Drawing Rights, urging implementation by the end of August 2021 accompanied by transparency and accountability measures. We encourage the IMF to work quickly with all relevant stakeholders to explore a menu of options for channeling SDRs to further support health needs, including vaccinations, and to help enable greener, more robust recoveries in the most affected countries, supporting the poorest and most vulnerable countries in tackling these urgent challenges. G7 countries are actively considering options that we can take as part of a global effort to magnify the impact of this general allocation for countries most in need, especially in Africa, including through voluntarily channeling SDRs and/or budget loans, in line with national circumstances and legal requirements. This includes scaling up financing to the IMF’s Poverty Reduction and Growth Trust and the IMF’s review of concessional financing and policies to strengthen its capacity to support low-income countries. To support our aim to reach a total global ambition of \$100 billion, we call for contributions from other countries able to do so, alongside the G7. We task G7 Finance Ministers and Central Bank Governors to urgently consider the detail of this, including by working with the G20 and other stakeholders.”).

¹³³⁰ G20 (31 October 2021) *Rome Leaders' Declaration*, 4 (“10. Support to vulnerable countries. We welcome the new general allocation of Special Drawing Rights (SDR), implemented by the International Monetary Fund (IMF) on 23 August 2021, which has made available the equivalent of USD 650 billion in additional reserves globally. We are working on actionable options for members with strong external positions to significantly magnify its impact through the voluntary channeling of part of the allocated SDRs to help vulnerable countries, according to national laws and regulations. We welcome the recent pledges worth around USD [45] billion, as a step towards a total global ambition of USD 100 billion of voluntary contributions for countries most in need. We also welcome the ongoing work to significantly scale up the Poverty Reduction and Growth Trust’s lending capacity and call for further voluntary loan and subsidy contributions from countries able to do so. We also call on the IMF to establish a new Resilience and Sustainability Trust (RST) – in line with its mandate – to provide affordable long-term financing to help low-income countries, including in the African continent, small island developing states, and vulnerable middle-income countries to reduce risks to prospective balance of payments stability, including those stemming from pandemics and climate change. The new RST will preserve the reserve asset characteristics of the SDRs channeled through the Trust. Our Finance Ministers look forward to further discussion of surcharge policy at the IMF Board in the context of the precautionary balances interim review.”).

¹³³¹ International Monetary Fund (18 April 2022) *IMF Executive Board Approves Establishment of the Resilience and Sustainability Trust*, Press Release (“Challenges from the pandemic, spillovers from geopolitical shocks, and long-standing structural problems pose an enormous impediment for balance of payments stability and resilient and sustainable growth, especially for low-income and vulnerable middle-income countries. In this context, on April 13, 2022, the Executive Board of the International Monetary Fund (IMF) approved the establishment of the Resilience and Sustainability Trust (RST) with effect from May 1, 2022. The RST will complement the IMF’s existing lending toolkit by focusing on longer-term structural challenges— including climate change and pandemic preparedness— that entail significant macroeconomic risks and where policy solutions have a strong global public good nature.”).

¹³³² International Monetary Fund (11 April 2022) *Proposal to Establish a Resilience and Sustainability Trust*, 8 (“The proposed RST would complement the IMF’s existing lending toolkit by focusing on longer-term structural challenges. The RST’s goal is to enhance economic resilience and sustainability thereby contributing to prospective balance of payments stability. This will be achieved by providing eligible members affordable, longer-maturity financing to (i) support reforms (including by covering BoP costs associated with them) that reduce macro-critical risks associated with select longer-term structural challenges and (ii) augment policy space and financial buffers to mitigate the risks arising from such longer-term structural challenges. This financing would complement traditional IMF support that focuses on resolving more near-term balance of payments difficulties.”).

¹³³³ International Monetary Fund (7 April 2023) *IMF Executive Board Concludes the 2023 Review of the Resource Adequacy of the Poverty Reduction and Growth Trust, Resilience and Sustainability Trust, and Debt Relief Trusts* (“In relation to the recently established RST, the review highlighted strong and frontloaded demand for arrangements under the Resilience and Sustainability Facility (RSF). To date, five RSF arrangements have been approved since RST operationalization on October 12, 2022, and the pipeline of potential requests is building up quickly.”); and Lawder D. (10 April 2023) *IMF's Georgieva says 44 countries interested in new resilience trust loans*, REUTERS (“International Monetary Fund (IMF) Managing Director Kristalina Georgieva said on Monday that 44 countries have expressed interest in borrowing from its \$40 billion Resilience and Sustainability Trust after an initial five had arranged loans. ... Georgieva said the facility’s current resources of around \$40 billion were “modest in size.” Rwanda, Barbados, Costa Rica, Bangladesh and Jamaica have reached agreements for loan programs from the facility, which come with certain economic policy requirements such as meeting fiscal targets.”).

¹³³⁴ See International Monetary Fund, *Resilience and Sustainability Trust (last visited 1 February 2024)* (“RST Funding Status (as of end December 2023) Total pledges In SDR Billions 31.9 In USD billions 42.8”); and International Monetary Fund (2023) *RESILIENCE AND SUSTAINABILITY TRUST-2023 CONTRIBUTION AGREEMENTS WITH ITALY, LUXEMBOURG, OMAN, AND THE UNITED KINGDOM* (“This paper presents for the information of Executive Directors four Resilience and Sustainability Trust (RST) contribution agreements finalized between April 2023 and

September 15, 2023. Shortly after the Executive Board’s April 2022 approval of the establishment of the RST, the Managing Director wrote to 35 members with strong external positions who were identified as potential RST contributors seeking their contributions in a total amount of at least SDR 33 billion. To date, the Fund has received total pledges amounting to SDR 31.2 billion from 18 members, of which SDR 26.1 billion are pledged contribution packages to all three RST accounts (i.e., the Loan Account (LA), Deposit Account (DA) and the Reserve Account (RA)) that count toward the SDR 33 billion target, corresponding to 78 percent of the targeted loan contributions and projected demand for loan resources. The Fund has concluded contribution agreements with 15 members (or their institutions), eleven of which were already reported to the Executive Board in January 2023 and April 2023, and the remaining and most recent four are presented in this paper.” (citations omitted)).

¹³³⁵ COP28 (4 December 2023) *COP28 Finance Day unlocks innovative financial mechanisms to support vulnerable countries fight climate change*, Press Release (“At the COP28 World Climate Action Summit, the UAE committed \$200 million USD to help low-income and vulnerable countries fight climate change through the International Monetary Fund Resilience and Sustainability Trust (RST)”). In December 2022, the U.S. Congress approved a contribution of US\$20 million to the Poverty Reduction and Growth Trust or the Resilience and Sustainability Trust.¹³³⁵

¹³³⁶ *Consolidated Appropriations Act, 2023*, P.L. 117-328, 117th Cong., Title V (“For contribution by the Secretary of the Treasury to the Poverty Reduction and Growth Trust or the Resilience and Sustainability Trust of the International Monetary Fund, \$20,000,000, to remain available until September 30, 2031.”).

¹³³⁷ International Monetary Fund (18 April 2022) *Proposal to Establish a Resilience and Sustainability Trust*, 12 (“Longer-term structural challenges create a range of possible BoP needs. These needs that could be financed under the RST are typically multidimensional and can materialize over the short-, medium- or longer-term. In the case of climate change, potential sources of such needs—associated with adaptation, transition, and mitigation policies including energy security policies—include, *inter alia*¹⁰: • Costs of climate-related public and/or private investments, such as green energy generation, coastal protection infrastructure, energy-efficient retrofitting of existing building; • Costs associated with climate-focused reforms, such as transitioning to green technologies; • Offsetting the costs of policies typically required to enable a just transition, such as augmenting targeted social assistance in tandem with the unwinding of carbon subsidies;¹¹ and, • Building up policy space and buffers necessary to mitigate risks to longer-term BoP stability, such as establishing and augmenting disaster funds, establishing and financing a multi-layered financial framework for disaster resilience, and augmenting international reserves to face financial stability implications of climate change.”).

¹³³⁸ International Monetary Fund (18 April 2022) *Proposal to Establish a Resilience and Sustainability Trust*, 63–64 (“RST measures would be informed and expected to be consistent with country diagnostics developed in both institutions relevant to the RST’s purposes. On climate change, the Bank’s Country Climate and Development Reports (CCDR), if available, will be a critical input, complemented with other products such as the Fund’s Climate Change Policy Assessments (CCPAs) and its potential successor instrument, Climate Macroeconomic Assessments Programs (CMAPs). In practice, Bank and Fund staff will coordinate the production of CCDRs and CMAPs to complement and ensure consistent advice between the two products for member countries, in line with the agreed coordination between Bank and Fund staff on CCDRs and CMAPs. Fund staff are expected to discuss with their Bank counterparts areas of the CCDR or other diagnostics that they intend to include in the RST program to ensure complementarity. In instances where countries already have an advanced climate change framework, Fund staff could use these inputs flexibly as part of the analytics informing the RST program.”).

¹³³⁹ International Monetary Fund (18 April 2022) *IMF Executive Board Approves Establishment of the Resilience and Sustainability Trust*, Press Release (“The RST will be a loan-based trust, with resources mobilized on a voluntary basis. About three quarters of the IMF’s membership will be eligible for longer-term affordable financing from the RST, including all low-income countries, all developing and vulnerable small states, and lower middle-income countries. Access will be based on the countries’ reforms strength and debt sustainability considerations and capped at the lower of 150 percent of quota or SDR 1 billion. The loans will have a 20-year maturity and a 10½-year grace

period, with borrowers paying an interest rate with a modest margin over the three-month SDR rate, with the most concessional financing terms provided to the poorest countries.”).

¹³⁴⁰ International Monetary Fund (updated July 2023) *The Resilience Sustainability Facility (RSF)* (“Repayment: 20-year maturity and a 10½ -year grace period during which no principal is repaid. ... Access: Overall cumulative access cap set at 150 percent of quota or SDR 1 billion, whichever is smaller.”).

¹³⁴¹ International Monetary Fund (18 April 2022) *Proposal to Establish a Resilience and Sustainability Trust*, 15 (“RST support for the development and implementation of overarching policy frameworks such as green public financial management would improve the integration of climate in policy formulation and enhance governance, thereby giving more comfort to other public and private lenders and donors to provide project financing and technical assistance.”)

¹³⁴² International Monetary Fund (18 April 2022) *Proposal to Establish a Resilience and Sustainability Trust*, 14 (“The RST would focus on downside scenarios associated with select longer -term challenges. It would aim to lower the probability of such scenarios and/or reduce the severity of the BoP problems that would materialize should such a scenario come to pass. The recognition of these risks does not mean that the UCT program becomes inadequate in achieving its short- to medium-term goals”).

¹³⁴³ The IMF, in a joint statement with the World Bank, indicated that RST engagements will be informed by the World Bank’s CCDRs. See World Bank (7 September 2023) *Enhancing IMF-World Bank Collaboration* (“Joint Statement of the IMF Managing Director and of the World Bank President ... The two institutions will further strengthen coordination and focus on results. We will formalize the regular meetings of the new Bank-Fund Climate Advisory Group, tasked with ensuring coordination of our climate related work streams. The group will meet every two months to discuss global and country level engagements, including the results of CCDRs, country level climate analytical work, and the pipeline of key projects and policy-based lending (World Bank’s DPLs and Fund’s RST engagements). We will also incorporate climate considerations in our ongoing work on debt sustainability, including through the revised joint Low Income Country Debt Sustainability Framework.”).

¹³⁴⁴ Parry I. W. H., Black S., Minnett D. N., Mylonas V., & Vernon N. (2022) *HOW TO CUT METHANE EMISSIONS*, International Monetary Fund, 15 (“Differentiated pricing and financial/technological support are likely to be key elements of an international agreement on minimum methane pricing. Varying methane taxes according to broad country groupings classified by development level would promote a more progressive distribution of emission reductions and mitigation costs. Support from high-income countries would also likely be needed to entice emerging market and developing economies into a minimum pricing regime. This might take the form, for example, of donor support (linked to verifiable emission reductions or technology adoption) and/or international transfer of methane mitigation technologies.”).

¹³⁴⁵ World Bank (3 December 2018) *World Bank Group Announces \$200 billion over Five Years for Climate Action*, Press Release (“The World Bank Group today announced a major new set of climate targets for 2021-2025, doubling its current 5-year investments to around \$200 billion in support for countries to take ambitious climate action. The new plan significantly boosts support for adaptation and resilience, recognizing mounting climate change impacts on lives and livelihoods, especially in the world’s poorest countries. The plan also represents significantly ramped up ambition from the World Bank Group, sending an important signal to the wider global community to do the same.”).

¹³⁴⁶ World Bank (3 December 2018) *World Bank Group Announces \$200 billion over Five Years for Climate Action*, Press Release (“The \$200 billion across the Group is made up of approximately \$100 billion in direct finance from the World Bank (IBRD/IDA), and approximately \$100 billion of combined direct finance from the International Finance Corporation (IFC) and the Multilateral Investment Guarantee Agency (MIGA) and private capital mobilized by the World Bank Group.”).

¹³⁴⁷ World Bank, *The World Bank Group and Paris Alignment* (last visited 1 February 2024) (“The World Bank Group made a commitment to align all its financing operations with the goals of the Paris Agreement in its Climate Change Action Plan 2021-2025. The Paris Alignment of the Bank Group’s new financing flows is the most comprehensive institutional undertaking ever done by the Bank Group to reconcile development and climate. The World Bank is on track to align 100% percent of new operations, starting from July 1, 2023. For IFC and MIGA, 85% of new operations will be aligned starting July 1, 2023, and 100% from July 1, 2025. This is part of a broader multilateral development bank (MDB) vision to align financing flows with the objectives of the Paris Agreement.”).

¹³⁴⁸ World Bank Group (2021) *CLIMATE ACTION PLAN*, 13 (“Climate change and ecosystems degradation combined, in turn, push the planet ever closer to irrevocable tipping points.”).

¹³⁴⁹ Abernethy S. & Jackson R. B. (2022) *Global temperature goals should determine the time horizons for greenhouse gas emission metrics*, ENVIRON. RES. LETT. 17(2): 1–10, 7 (“Although NDCs and long-term national pledges are currently insufficient to keep warming below 2 °C, let alone 1.5 °C [50–52], the time horizons used for emission metrics should nevertheless be consistent with that central goal of the Paris Agreement. We therefore support the use of the 20 year time horizon over the 100 year version, when binary choices between these two must be made, due to the better alignment of the former with the temperature goals of the Paris Agreement. The 50 year time horizon, not yet in widespread use but now included in IPCC AR6, is in fact the only time horizon that the IPCC presents that falls within the range of time horizons that align with the Paris Agreement temperature goals (24–58 years). However, to best align emission metrics with the Paris Agreement 1.5 °C goal, we recommend the use of the 24 year time horizon, using 2045 as the end point time, with its associated $GWP_{1.5^{\circ}C} = 75$ and $GTP_{1.5^{\circ}C} = 41$.”).

¹³⁵⁰ United States White House (19 May 2012) *Fact Sheet: G-8 Action on Energy and Climate Change*, Statements and Releases (“Commission the World Bank to prepare a report on ways to integrate reduction of near-term climate pollution into their activities and ask the World Bank to bring together experts from interested countries to evaluate new approaches to financing projects to reduce methane, including through pay-for-performance mechanisms.”).

¹³⁵¹ World Bank (2013) *METHANE FINANCE STUDY GROUP REPORT: USING PAY-FOR-PERFORMANCE MECHANISMS TO FINANCE METHANE ABATEMENT*, 19 (“The Study Group encourages all interested donors to consider this innovative and highly attractive approach which combines immediate impact and maximum cost-effectiveness. Various implementation options can be envisaged. A fund could be established within an international financial institution, allowing interested funders to pool resources for maximum efficiency. A number of bilateral donors have developed deep in-house expertise on methane mitigation and carbon offsets and could implement such mechanisms rapidly. A sub-theme of the Green Climate Fund private sector facility may also be devoted to these approaches.”).

¹³⁵² Pilot Auction Facility, *About the PAF* (last visited 1 February 2024) (“In 2013, the G8 requested for innovative pay-for-performance approaches to addressing methane. A report by the Methane Finance Study Group supported the establishment of the facility. In its design and development phase, the facility benefited from the support of the *Climate and Clean Air Coalition*. ... The PAF auctions are supported by Germany, Sweden, Switzerland (through a joint contribution of the State Secretariat of Economic Affairs (SECO) and the Climate Cent Foundation), and the United States.”).

¹³⁵³ Pilot Auction Facility, *About the PAF* (last visited 1 February 2024) (“The PAF completed three auctions to allocate a guaranteed price for future carbon credits in the form of a tradable put option. Two auctions (July 2015 and May 2016) addressed methane abatement from landfill, animal waste, and wastewater sites, and one auction (January 2017) addressed nitrous oxide emissions from nitric acid (not adipic acid) production. The three auctions allocate up to \$54 million with the potential to abate 20.6 million metric tons of CO₂ equivalent.”).

¹³⁵⁴ Energy Sector Management Assistant Program (ESMAP) is another example. ESMAP is the home for the Sustainable Cooling Facility that received \$157 million from the GCF for work in nine countries. See Green Climate Fund, *Projects & Programmes: FP177 Cooling Facility* (last visited 1 February 2024).

¹³⁵⁵ World Bank (19 September 2022) *World Bank Group Is Leading the Effort on Methane Emissions Reduction with Impactful Projects and Initiatives* (“The World Bank Group (WBG) has a long record of engagement on methane reduction across the key areas of agriculture, energy, and sanitation and waste. ... The WBG is ramping up support to clients to reduce methane emissions. WBG support can include a wide range of interventions including analytical work, capacity building, support on regulatory reforms, leak detection/monitoring, investment prefeasibility studies, and direct lending or investment.”).

¹³⁵⁶ World Bank (29 June 2021) *IFC Provides Landmark Loan to Reduce Gas Flaring, Boost Energy Access, and Power More Homes and Businesses Across Iraq*, Press Release (“IFC is investing in Basrah Gas Company (BGC) to support one of the largest gas flaring reduction projects in the world, helping to improve energy access, prevent associated greenhouse gas (GHG) emissions and support a more resilient, sustainable energy sector in Iraq. BGC is an Iraqi joint venture created to treat and process associated gas that would otherwise be flared. The project is expected to increase BGC's processing capacity, thereby avoiding more unnecessary flaring and associated GHG emissions by around 10 million tons per annum. It will support Iraq's transition to a lower carbon path and improve access to a domestic energy source, helping the country meet its growing power needs. IFC, a member of the World Bank Group, is the lead arranger of the five-year, \$360 million loan to BGC.”).

¹³⁵⁷ International Finance Corporation (2022) *New CWI Landfill Gas* (“IFC funds will be used to finance 24 identified LFGE projects (the “Project”) which include ten sites that are currently under operation (Gaizhou, Lianyuan, Liling, Zhijiang, Nanning, Shanghang, Changting, Wuping, Dingnan, and Yangxin), three sites where construction has started or will commence soon (Wafangdian, Ankang, Shaowu), and one site where the development agreement with the landfills was recently signed (Jingchuan). NCWI is in discussion with landfill operators at multiple other locations to sign project development agreements. IFC funds will also be used for projects at ten of the sites were NCWI is currently in discussions for project development[.]”).

¹³⁵⁸ International Finance Corporation (2022) *New CWI Landfill Gas* (“LFGE projects capture methane in the landfill gas and convert it to CO₂ while also generating electricity. This has a positive impact on resource efficiency and contributes to GHG emission reduction. The project's gross carbon emission (for all 24 sites taken together) is estimated as 1,903,000 tCO₂e per year, but with methane capture, the project is estimated to reduce about 3,428,900 tCO₂e GHG.”).

¹³⁵⁹ International Finance Corporation (2022) *Green Bond Framework*, 5–8 (see table of activities that are “potentially eligible for IFC Green Bond finance”).

¹³⁶⁰ World Bank (12 September 2022) *What is IDA?* (“The World Bank's International Development Association (IDA) is one of the largest and most effective platforms for fighting extreme poverty in the world's lowest income countries.

- IDA works in 74 countries in Africa, East Asia & Pacific, South Asia, Europe & Central Asia, Latin America & Caribbean, and Middle East & North Africa.
- IDA aims to reduce poverty by providing financing and policy advice for programs that boost economic growth, build resilience, and improve the lives of poor people around the world.
- More than half of active IDA countries already receive all, or half, of their IDA resources on grant terms, which carry no repayments at all. Grants are targeted to low-income countries at higher risk of debt distress.
- Over the past 62 years, IDA has provided about \$458 billion for investments in 114 countries. IDA also has a strong track record in supporting countries through multiple crises.”).

¹³⁶¹ See World Bank (19 September 2022) *World Bank Group Is Leading the Effort on Methane Emissions Reduction with Impactful Projects and Initiatives* (“IDA provided \$115 million for an urban sanitation project in Mozambique to improve access to safely managed sanitation and reduce methane emissions with improved wastewater collection and treatment.”); and World Bank, *Mozambique Urban Sanitation Project* (“Approval Date (as of board presentation) May 22, 2019”).

¹³⁶² See World Bank (19 September 2022) *World Bank Group Is Leading the Effort on Methane Emissions Reduction with Impactful Projects and Initiatives* (“IDA provided \$200 million for a project in Logone Valley in Cameroon to improve irrigation and drainage services and agricultural production, limit methane emissions from rice fields and train farmers on climate-smart agriculture approaches.”); and World Bank, *Valorization of Investments in the Valley of the Logone* (“Approval Date (as of board presentation) November 30, 2021”).

¹³⁶³ Multilateral Investment Agency (2021) *Annual Report — 2021*, 28 (“To increase its climate action, the World Bank Group announced a new Climate Change Action Plan (CCAP) to guide its interventions from 2021 through 2025. The CCAP provides a bold strategic road map for tackling climate change and helping client countries to fully integrate their climate and development goals. MIGA’s products have helped cross-border investors protect their long-term investments in climate mitigation and adaptation activities across diverse markets and regions. As one of the few institutions that provides long-maturity guarantees, MIGA will be instrumental in fostering the lock-in of transformational climate action.”).

¹³⁶⁴ World Bank Group (8 November 2021) *It’s Time to Sprint: Targeting Methane Emissions*, COP27 Side Event, Sharm El-Sheikh, Egypt.

¹³⁶⁵ World Bank (19 September 2022) *World Bank Group Is Leading the Effort on Methane Emissions Reduction with Impactful Projects and Initiatives* (“The WBG is ramping up support to clients to reduce methane emissions. WBG support can include a wide range of interventions including analytical work, capacity building, support on regulatory reforms, leak detection/monitoring, investment prefeasibility studies, and direct lending or investment.”).

¹³⁶⁶ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“In addition to the over \$1 billion in new grant funding, international financial institutions approved over \$3.5 billion in new investments for methane-reducing projects since COP27. Approvals include \$375 million from the Green Climate Fund and partners, over \$1.9 billion (€1.78 billion) from the European Investment Bank, over \$218 million (€200 million) from the European Bank for Reconstruction and Development, and \$372.5 million from the Inter-American Development Bank. The World Bank approved at least \$700 million in investments, including a \$255 million for rice project in China, \$300 million for landfill methane reduction in Cote d’Ivoire, and \$145 million for wastewater methane reduction in Malawi.”).

¹³⁶⁷ Climate & Clean Air Coalition (4 December 2023) *Highlights from 2023 Global Methane Pledge Ministerial* (“The World Bank launched the Global Methane Reduction Platform for Development (CH4D) to support low- and mid-income countries to realize the ‘methane triple-wins’ of abating emissions, enhancing resilience, and empowering livelihoods. Through partnerships, including with the CCAC Methane Roadmap Action Programme (M-RAP), CH4D will mobilize expertise, affordable technologies, and catalytic finance for methane abatement in the agriculture and waste sectors.”).

¹³⁶⁸ World Bank (5 December 2023) *GGFR to evolve to the Global Flaring & Methane Reduction Partnership* (“Today the World Bank launched the Global Flaring and Methane Reduction (GFMR) Partnership, a new multi-donor trust fund focused on helping developing countries cut carbon dioxide and methane emissions generated by the oil and gas industry. GFMR will provide more than \$250 million and mobilize billions from the private sector to support those countries with the least capacity and resources to address these emissions. The partnership will focus on providing grant funding, technical assistance, policy and regulatory reform advisory services, institutional strengthening, and mobilizing financing to support action by governments and operators.”).

¹³⁶⁹ International Monetary Fund (18 April 2022) *Proposal to Establish a Resilience and Sustainability Trust*, 63-66.

¹³⁷⁰ World Bank (2021) *COP26 Climate Brief: Country Climate and Development Reports (CCDRs)*.

¹³⁷¹ World Bank (19 September 2022) *World Bank Group Is Leading the Effort on Methane Emissions Reduction with Impactful Projects and Initiatives* (“WBG support can include a wide range of interventions including analytical work, capacity building, support on regulatory reforms, leak detection/monitoring, investment prefeasibility studies, and direct lending or investment. Methane reduction is also a key focus of a number of upcoming Country Climate and Development Reports, or CCDRs, which are new WBG core diagnostic reports that integrate climate change and development considerations and help countries prioritize the most impactful actions that can reduce greenhouse gas (GHG) emissions and boost adaptation.”).

¹³⁷² World Bank, *Country Climate and Development Reports (CCDRs)* (last visited 14 February 2024) (“The World Bank Group’s Country Climate and Development Reports (CCDRs) are a core diagnostic that integrates climate change and development. They help countries prioritize the most impactful actions that can reduce greenhouse gas (GHG) emissions and boost adaptation and resilience, while delivering on broader development goals. CCDRs build on data and rigorous research and identify main pathways to reduce GHG emissions and climate vulnerabilities, including the costs and challenges as well as benefits and opportunities from doing so. The reports suggest concrete, priority actions to support the low-carbon, resilient transition. As public documents, CCDRs aim to inform governments, citizens, the private sector and development partners and enable engagements with the development and climate agenda. CCDRs feed into other core Bank Group diagnostics, country engagements and operations, and help attract funding and direct financing for high-impact climate action.”).

¹³⁷³ See International Monetary Fund (18 April 2022) *PROPOSAL TO ESTABLISH A RESILIENCE AND SUSTAINABILITY TRUST*, 39 (“on climate change, the Bank’s Country Climate and Development Reports (CCDR), if available, will be a critical input, complemented by other products such as the Fund’s Climate Change Policy Assessments (CCPAs) and its potential successor instrument, Climate Macroeconomic Assessments Programs (CMAPs), Climate Public Investment Management Assessment (C-PIMA), and Disaster Resilience Strategies (DRS).”); and International Monetary Fund (2023) *REVIEW OF THE CLIMATE MACROECONOMIC ASSESSMENT PROGRAM PILOTS*, 5 (“This paper reviews the two Climate Macroeconomic Assessment Program (CMAP) pilots and proposes a way forward. It builds on the experience of the previous six Climate Change Policy Assessment (CCPA) pilots, and the recent rollout of the World Bank’s Country Climate and Development Report (CCDR). It also accounts for early experience with countries requesting support under the Fund’s Resilience and Sustainability Trust (RST). The review’s main findings are that: (1) the pilot country authorities find the macro-fiscal section of the CMAP most valuable, but such a comprehensive assessment can be burdensome when there is limited capacity, (2) a CMAP involves a much higher resource cost than a typical CD mission and some of its tools can be further improved, and (3) the CMAP complements CCDRs in the areas of Fund’s comparative advantage, while there are some overlaps. Staff proposes to: (1) streamline the CMAP to focus on the Fund’s comparative advantage in the areas of mitigation, PFM, and macro-fiscal impact of climate change policies; (2) provide a streamlined CMAP only in exceptional circumstances; and (3) expand more targeted CD in particular in support of RST countries. This focused and tailored approach would benefit members as it is more agile, allows the Fund to serve more members within the same resource envelope, and enhances synergies with other Fund products and the WB’s CCDR. ... This CMAP review responds to a request of Executive Directors made at the time of the CCPA review. Six CCPA pilots in small developing states (SDS) were conducted jointly with the World Bank between 2017-2020. The CCPA review drew lessons from these pilots and presented the results of a stakeholder survey. It also proposed to develop an IMF-only CD product, the “CMAP,” because the World Bank had decided to launch its own climate assessment, the Country Climate and Development Report (CCDR). Directors asked that staff test-run two CMAP pilots and report back to the Board.”).

¹³⁷⁴ World Bank (2022) *Climate and Development: An Agenda for Action*; and World Bank (2023) *The Development, Climate, and Nature Crisis : Solutions to End Poverty on a Livable Planet - Insights from World Bank Country Climate and Development Reports covering 42 economies*.

¹³⁷⁵ World Bank (2023) *The Development, Climate, and Nature Crisis : Solutions to End Poverty on a Livable Planet - Insights from World Bank Country Climate and Development Reports covering 42 economies* (“There are cost-effective opportunities to reduce methane emissions At the global level, methane emission reductions offer

opportunities for no- or low-cost GHG emissions reductions in three key sectors: agriculture, oil and gas, and waste management ... In Cambodia, methane emissions from rice production account for 65 percent of all GHG emissions from agriculture. The shift from continuously flooded irrigation to irrigation with one single drainage could reduce the emissions intensity of rice by 40 percent, bring about up to 30 percent in water savings, and reduce fertilizer use. The Kenya CCDR explores options to reduce methane emissions from cattle. By improving animal feed and breeds, it would be possible to achieve the same levels of meat and milk production with 13 million rather than 28 million head of cattle, meeting a per capita milk/ beef consumption of 180 liters/30kg per person, per day, with better rangeland quality, using less water, and reducing methane emissions by 21–36 percent. Farmers in Cambodia are already using waste from livestock farms as input for biodigesters, providing biogas for clean cooking and organic fertilizer for better crops and healthier soil while reducing GHG emissions. This practice should be encouraged and supported to scale. The International Energy Agency estimates that almost 45 percent of oil and gas methane emissions can be avoided with measures that would come at no or negative net cost. Effective established policies include leak detection and repair requirements for fugitive sources, equipment mandates for sources known to emit significant volumes of methane, and measures designed to limit nonemergency flaring and venting, including energy efficiency measures, electrification and integration of renewable energy in operations, displacement of high-carbon fuels with low-carbon heat and power processes, improved operations and maintenance protocols, and carbon capture and storage. Côte d’Ivoire can reduce upstream methane emissions from the oil and gas sector. In 2022, it emitted close to 40 kilotonnes of methane—roughly equivalent to 1.2 million tonnes of carbon dioxide equivalent (MtCO_{2e}). Of this, 63 percent was from venting, 30 percent from fugitive emissions, and 4 percent from incomplete flaring of natural gas. At 2.33 cubic meters of gas flared per barrel of oil produced, flaring intensity in Côte d’Ivoire in 2022 had dramatically improved over the past 10 years, and was well below world average of 4.72. In Azerbaijan, total fugitive emissions (mainly methane leakage in oil and gas operations and gas distribution and carbon dioxide emissions from natural gas flaring) have almost tripled since 2000 and today account for about a quarter of the country’s total GHG emissions. Natural gas losses in the distribution network also remain far above international benchmarks (7.4 percent in 2021), despite improvements since 2015 and a recently announced effort to further reduce them. The Republic of Congo could reduce gas flaring by about 50 percent at no cost over a 10- year horizon, and optimized flaring performance could generate over \$50 million per year in extra overall revenues.”).

¹³⁷⁶ Alterra (*last visited* 9 March 2024) *About Altéra* (“ALTÉRRRA has the ambition to activate and grow a new global climate economy, stimulating innovation, multiplying private capital and reducing barriers to investment in emerging markets and developing economies (EMDEs). With a focus on actionable investments, ALTÉRRRA and its partners are committed to the rapid deployment of capital in high-impact projects across emerging markets. Alterra Management Limited is an Asset Manager incorporated in the ADGM, regulated by the ADGM Financial Services Regulatory Authority that manages the Alterra Climate Vehicles.”). *See* Energy Connects (1 December 2023) *Explained: what is Alterra, the \$30 billion fund launched at COP28?* (“The UAE on Friday announced the launch of Alterra, a groundbreaking US \$30 billion investment fund for transformative climate partnerships at COP28, providing a major impetus to finance the energy transition on the second day of the UN climate summit. The launch of the investment vehicle is a “defining moment” in the history of global climate finance, said COP28 President Dr Sultan Al Jaber – who will also be the Board Chairman of Alterra. When was the fund announced? The creation of Alterra was announced at the opening of the World Climate Action Summit on the second day of COP28 on Friday.”).

¹³⁷⁷ Energy Connects (1 December 2023) *Explained: what is Alterra, the \$30 billion fund launched at COP28?* (“The UAE on Friday announced the launch of Alterra, a groundbreaking US \$30 billion investment fund for transformative climate partnerships at COP28, providing a major impetus to finance the energy transition on the second day of the UN climate summit. The launch of the investment vehicle is a “defining moment” in the history of global climate finance, said COP28 President Dr Sultan Al Jaber – who will also be the Board Chairman of Alterra. When was the fund announced? The creation of Alterra was announced at the opening of the World Climate Action Summit on the second day of COP28 on Friday. “I am pleased to announce the establishment of a \$30 billion fund for global climate solutions. This fund is designed to bridge climate finance gap,” President His Highness Sheikh Mohamed Bin Zayed Al Nahyan said in his address to the Summit. “When we committed to hosting COP28, we pledged to bring the world together to unite, build and to deliver,” he added. What is the concept of Alterra? As the largest of its kind investment

vehicle, Alterra seeks to bridge the climate financing gap by raising and investing a corpus of up to \$250 billion of institutional and private capital by 2030. In collaboration with BlackRock, Brookfield and TPG as the inaugural launch partners, Alterra has already committed \$6.5 billion to climate-dedicated funds for global investments, including in the Global South, according to a COP28 statement. Alterra will work with an increasing number of global partners to mobilise capital from other institutional investors and global entities.”).

¹³⁷⁸ International Energy Agency (2024) [GLOBAL METHANE TRACKER 2024](#) (“Investors and insurers are also starting to establish methane performance requirements as a condition for future lending. This includes requests for improved disclosures to promote transparency on emissions reporting and underwriting standards that include methane reductions. For example, Chubb’s insurance coverage is now contingent on clients adopting evidence-based plans to reduce methane emissions, while Barclays announced that starting from 2026, energy clients will be required to have 2030 methane emissions reduction targets and a commitment to end all routine venting and flaring by 2030.”). *See also* Barclays, [Addressing Climate Change](#) (last visited 19 March 2024) “From January 2026, to access financing, energy clients will be required to have 2030 methane emissions reduction targets, a commitment to end all routine/non-essential venting and flaring by 2030, and near-term net-zero aligned Scope 1 and 2 emissions reduction targets. The energy clients unable or unwilling to reduce their emissions or play a role in the energy transition may find it increasingly difficult to access financing from Barclays.”).

¹³⁷⁹ Parry I. W. H., Black S., Minnett D. N., Mylonas V., & Vernon N. (2022) [HOW TO CUT METHANE EMISSIONS](#), International Monetary Fund, 13 (“A policy scenario is considered, with a fee starting in 2024 at \$10 per tonne of CO₂e and increasing \$10 per tonne each year to reach \$70 per tonne by 2030. The scenario applies to the top 35 methane-emitting countries (henceforth “T35”). This includes the top 25 overall emitters plus an additional 5 large emitters (each for extractives and agriculture). T35 countries account for 85 percent of BAU global methane emissions in 2030. The scenario involves methane taxes for the extractive and agricultural sectors and a regulation that reduces landfill emissions (with a shadow price or incremental mitigation cost equal to \$70 per tonne).”).

¹³⁸⁰ Parry I. W. H., Black S., Minnett D. N., Mylonas V., & Vernon N. (2022) [HOW TO CUT METHANE EMISSIONS](#), International Monetary Fund, 13 (“A policy scenario is considered, with a fee starting in 2024 at \$10 per tonne of CO₂e and increasing \$10 per tonne each year to reach \$70 per tonne by 2030. The scenario applies to the top 35 methane-emitting countries (henceforth “T35”). This includes the top 25 overall emitters plus an additional 5 large emitters (each for extractives and agriculture). T35 countries account for 85 percent of BAU global methane emissions in 2030. The scenario involves methane taxes for the extractive and agricultural sectors and a regulation that reduces landfill emissions (with a shadow price or incremental mitigation cost equal to \$70 per tonne).”).

¹³⁸¹ European Parliament (13 December 2022) [Deal reached on new carbon leakage instrument to raise global climate ambition](#), Press Release (“According to the deal reached, an EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) will be set up to equalise the price of carbon paid for EU products operating under the EU Emissions Trading System (ETS) and the one for imported goods. This will be achieved by obliging companies that import into the EU to purchase so-called CBAM certificates to pay the difference between the carbon price paid in the country of production and the price of carbon allowances in the EU ETS. The law will incentivise non-EU countries to increase their climate ambition and ensure that EU and global climate efforts are not undermined by production being relocated from the EU to countries with less ambitious policies.”).

¹³⁸² Smirnov A. (6 September 2021) [Coal mine methane: a missed opportunity for EU’s CBAM](#), EURACTIV (“One of the many included proposals is the carbon border adjustment mechanism (CBAM), which seeks to prevent greenhouse gas emissions ‘leaking’ over the border by taxing carbon-intensive imports from regions with less stringent emissions policies. However, the CBAM applies mostly to carbon dioxide (CO₂) emissions, excluding other climate-warming gases such as methane — a missed opportunity in the fight to address climate change.”).

¹³⁸³ XV BRICS Summit (23 August 2023) [Johannesburg II Declaration](#), 19 (“We oppose trade barriers including those under the pretext of tackling climate change imposed by certain developed countries and reiterate our

commitment to enhancing coordination on these issues. We underline that measures taken to tackle climate change and biodiversity loss must be WTO-consistent and must not constitute a means of arbitrary or unjustifiable discrimination or a disguised restriction on international trade and should not create unnecessary obstacles to international trade. Any such measure must be guided by the principle of common but differentiated responsibilities and respective capabilities (CBDR-RC), in the light of different national circumstances. We express our concern at any WTO inconsistent discriminatory measure that will distort international trade, risk new trade barriers and shift burden of addressing climate change and biodiversity loss to BRICS members and developing countries.”). Work is underway to design effective border GHG adjustment mechanisms that could align global trade and climate change law and policy. *See generally* Dominiononi G. & Esty D. C. (2023) *Designing Effective Border Carbon Adjustment Mechanisms: Aligning the Global Trade and Climate Change Regimes*, ARIZONA L. REV 65: 1–41.

¹³⁸⁴ European Commission (29 September 2023) *Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) starts to apply in its transitional phase* (“This Sunday, 1 October, the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) will enter into application in its transitional phase. CBAM is the EU's landmark tool to fight carbon leakage and one of the central pillars of the EU's ambitious Fit for 55 Agenda. It will equalise the price of carbon between domestic products and imports. This will ensure that the EU's climate policies are not undermined by production relocating to countries with less ambitious green standards or by the replacement of EU products by more carbon-intensive imports. CBAM is a WTO-compatible measure that encourages global industry to embrace greener and more sustainable technologies. In its transitional phase, CBAM will only apply to imports of **cement, iron and steel, aluminium, fertilisers, electricity and hydrogen. EU importers of these goods** will have to report on the volume of their imports and the greenhouse gas (GHG) emissions embedded during their production, but without paying any financial adjustment at this stage.”) (emphasis in original). *See also* Sholli S. (2 October 2023) *EU carbon border tax enters transitional phase*, International Tax Review, KPMG.

¹³⁸⁵ Clausing K., Garicano L., & Wolfram C. (2023) *HOW AN INTERNATIONAL AGREEMENT ON METHANE EMISSIONS CAN PAVE THE WAY FOR ENHANCED GLOBAL COOPERATION ON CLIMATE CHANGE*, Peterson Institute for International Economics. *See also* Salata Institute for Climate and Sustainability (2023) *METHANE AND TRADE: PAVING THE WAY FOR ENHANCED GLOBAL COOPERATION ON CLIMATE CHANGE*, Research Brief (“As a first step, the United States, the European Union, and partner countries can work to coordinate their methane reduction policies, with an eye toward the eventual imposition of border adjustments on imports from countries that fail to raise their standards. The Biden administration could work with Congress on next steps for implementing a US methane border adjustment, while simultaneously leading efforts with the European Union, the G7, and other potential coalition members to develop a framework for a multilateral agreement. Ideally, a proposed framework could be presented at the 28th Conference of the Parties to the UN Framework Convention on Climate Change (COP28) in Dubai in late 2023.”).

¹³⁸⁶ Council of Europe (15 November 2023) *Climate action: Council and Parliament reach deal on new rules to cut methane emissions in the energy sector* (“The Council and the Parliament agreed on three implementation phases. The first phase will focus on data collection and the creation of a methane emitters global monitoring tool and a super emitter rapid reaction mechanism. In the second and third phases, equivalent monitoring, reporting and verification measures should be applied by exporters to the EU by 1 January 2027, and maximum methane intensity values by 2030. The competent authorities of each member state will have the power to impose administrative penalties if these provisions are not respected.”).

¹³⁸⁷ Clausing K., Garicano L., & Wolfram C. (2023) *How an international agreement on methane emissions can pave the way for enhanced global cooperation on climate change*, Peterson Institute for International Economics, 2 (“Building on these parallel approaches, this Policy Brief proposes transatlantic coordination that uses an import charge as a lever to seek similarly ambitious regulatory reforms in the oil and gas sectors abroad. Specifically, oil and gas exporters can be encouraged to adopt regulations comparable to those in the United States and the European Union or, if they fail to implement regulations, pay a border adjustment fee on exports to the two jurisdictions. With time, most major energy importers would ideally join the coalition of countries cooperating on both stringent domestic regulations on oil and gas production (if applicable) and border adjustments on any dirty, nonregulating exporters.”).

The Inflation Reduction Act includes a Methane Emission Reduction Program that imposes a methane waste fee of up to \$1,500 per ton of methane emitted by 2026, and raises royalty fees for oil and gas extracted from federal lands and waters, including fees on gas avoidably lost by emergency flaring or venting. *See Inflation Reduction Act of 2022*, Pub. L. No. 117-169 (2022) § 60112 (“(e) Charge Amount.—The amount of a charge under subsection (c) for an applicable facility shall be equal to the product obtained by multiplying—“(1) the number of metric tons of methane emissions reported pursuant to subpart W of part 98 of title 40, Code of Federal Regulations, for the applicable facility that exceed the applicable annual waste emissions threshold listed in subsection (f) during the previous reporting period; and “(2)(A) \$900 for emissions reported for calendar year 2024; “(B) \$1,200 for emissions reported for calendar year 2025; or “(C) \$1,500 for emissions reported for calendar year 2026 and each year thereafter.”). *See also* United States Senate (28 July 2022) *Summary of the Energy Security and Climate Change Investments in the Inflation Reduction Act of 2022*; *discussed in* Friedman L. & Plumer B. (28 July 2022) *Surprise Deal Would Be Most Ambitious Climate Action Undertaken by U.S.*, THE NEW YORK TIMES (“The bill would also crack down on leaks of methane, a powerful greenhouse gas, from oil and gas wells, pipelines and other infrastructure. By 2026, polluters would face a penalty of \$1,500 per ton of methane that escaped into the atmosphere in excess of federal limits. The methane fee will raise \$6.3 billion from the oil and gas industry over a decade, much of which will be reinvested in measures to help prevent methane leaks.”); *and Inflation Reduction Act of 2022*, Pub. L. No. 117-169 (2022) §§ 50261–50263 (“For all leases issued after the date of enactment of this Act, except as provided in subsection (b), royalties paid for gas produced from Federal land and on the outer Continental Shelf shall be assessed on all gas produced, including all gas that is consumed or lost by venting, flaring, or negligent releases through any equipment during upstream operations.”).

¹³⁸⁸ Austin S. (1 November 2021) *Prime Minister Mottley: Closing of Gaps Required*, Barbados Government Information Service.

¹³⁸⁹ Austin S. (1 November 2021) *Prime Minister Mottley: Closing of Gaps Required*, Barbados Government Information Service.

¹³⁹⁰ *For example, see* the support provided by the Bahamas to the efforts of Prime Minister Mottley: Office of the Prime Minister of the Bahamas (2 October 2023) *Prime Minister Davis’ Remarks at the Climate Finance in The Americas Meeting’s Opening Session* (“First, we need to drive progress on managing risks to investing in climate action in developing countries. Where risk is real, we need to deploy at scale the risk reduction instruments – such as guarantees, insurance, and local currency hedging and financing – necessary to unlock capital. Where risk is perceived, we need to address the biases that hinder investment at scale, and the expectation of high financial returns when engaging on climate change. Second, we need to drive progress on financing a just and equitable transition. We need to develop transparent transition plans that shift investment portfolios over time, and that enable ramp-ups in climate investments to the same extent as we see a phasing out of harmful investments. Third, we need to drive progress on managing the debt crisis. We need to develop a shared understanding of climate-fiscal-debt links and ensure no country builds up excessive debt because of climate action.”).

¹³⁹¹ Prime Minister Motley (2 December 2023) *Barbados’ National Statement at COP28* (video of Statement).

¹³⁹² COP28 (4 December 2023) *COP28 Finance Day unlocks innovative financial mechanisms to support vulnerable countries fight climate change*, Press Release (“Major international financial institutions and countries made new commitments to offer climate-resilient debt clauses (CRDCs) in their lending. These clauses allow debt service to be paused to provide breathing space when countries are hit by climate catastrophes. The UK, France, World Bank, Inter-American Development Bank (IDB), European Investment Bank (EIB), European Bank for Reconstruction and Development (EBRD) and African Development Bank (AfDB) made new commitments to expand CRDCs in their lending. In total 73 countries called on donors to expand the use of these clauses by 2025.”).

¹³⁹³ COP28 (4 December 2023) *COP28 Finance Day unlocks innovative financial mechanisms to support vulnerable countries fight climate change*, Press Release (“Major international financial institutions and countries made new

commitments to offer climate-resilient debt clauses (CRDCs) in their lending. These clauses allow debt service to be paused to provide breathing space when countries are hit by climate catastrophes. The UK, France, World Bank, Inter-American Development Bank (IDB), European Investment Bank (EIB), European Bank for Reconstruction and Development (EBRD) and African Development Bank (AfDB) made new commitments to expand CRDCs in their lending. In total 73 countries called on donors to expand the use of these clauses by 2025.”).

¹³⁹⁴ COP28 (4 December 2023) *COP28 Finance Day unlocks innovative financial mechanisms to support vulnerable countries fight climate change*, Press Release (“Throughout COP28 Finance day, other announcements included: ... • The IDB announced it had already offered \$1.2 billion of loans covered through CRDCs.”).

¹³⁹⁵ COP28 (4 December 2023) *COP28 Finance Day unlocks innovative financial mechanisms to support vulnerable countries fight climate change* (“Japan and France announced a commitment to support the African Development Bank’s facility to leverage Special Drawing Rights (SDRs) for climate and development.”).

¹³⁹⁶ Office of the Prime Minister of Barbados (23 September 2022) *Urgent and Decisive Action Required for an Unprecedented Combination of Crises The 2022 Bridgetown Agenda for the Reform of the Global Financial Architecture*, Press Release.

¹³⁹⁷ COP28 (2023) *UAE Leaders’ Declaration on a Global Climate Finance Framework* (“Seizing the opportunity: Investing \$5-7tn annually in greening the global economy by 2030 will be critical to achieving our shared climate goals. Our collective efforts to pursue the goals of the Paris Agreement present the opportunity to accelerate local, regional and global low-carbon, climate resilient, and nature-positive growth and inclusive economies, strengthening delivery of the Sustainable Development Goals(SDGs). We urge global leaders to seize this unprecedented economic opportunity for inclusive and shared prosperity so that no country has to choose between fighting poverty and fighting climate change. We need to build on flagship initiatives such as the Paris Pact for People and Planet (4P), Bridgetown Initiative, Accra Marrakesh Agenda, G20 New Delhi Leaders’ Declaration, and African Leaders’ Nairobi Declaration on Climate and Call to Action.”).

¹³⁹⁸ COP28 (4 December 2023) *COP28 Finance Day unlocks innovative financial mechanisms to support vulnerable countries fight climate change*, Press Release (“This marks significant progress to reform the global climate finance architecture by making climate finance available, accessible, and affordable. This has been the central vision of the COP28 UAE Declaration on a Global Climate Finance Framework launched at the World Climate Action Summit at the beginning of COP28. ... The Declaration is endorsed by India, France, Barbados, Kenya, Ghana, Germany, UK, USA, Senegal, and Colombia. It lays out defining principles for a climate finance architecture that delivers for all.”).

¹³⁹⁹ COP28 (2023) *UAE Leaders’ Declaration on a Global Climate Finance Framework* (“3. Freeing up fiscal space for climate action: The international financial architecture, public and private, needs to be made fit for more frequent, profound shocks. This can be done through: wider use of climate-resilient debt clauses; consideration of debt-for-climate swaps; and sustainability linked bonds. Additional voluntary IMF Special Drawing Rights (SDRs) should be rechanneled, subject to national legal frameworks, including through the Resilience and Sustainability Trust. ... 4. Widening the sources of concessional finance for climate action: Mitigating climate change and adapting and responding to climate impacts will require significant additional finance, including concessional finance. Laying the foundations for climate-smart growth in many geographies and sectors may not always offer returns compatible with private sector models. Efforts are needed to bridge these gaps, particularly for adaptation, which often requires non-debt financing. Innovative mechanisms to explore include: better use of hybrid capital; policy-based guarantees; portfolio guarantees of MDB loans; global philanthropy; re-channeling of inefficient subsidies; and emissions pricing and taxation mechanisms, as applicable and in line with national circumstances, and we note forthcoming initiatives in this regard. ... 7. Building better, bigger, and more effective MDBs : Recognizing the Report of the G20 Independent Expert Group on Strengthening MDBs, the MDBs need to enhance operating models, improve responsiveness and accessibility, and increase financial capacity so that they can better address global challenges such as climate change. They need to work as a system, including through common country platforms, and collaborating

with the multilateral funds to streamline access to finance, including local currency financing and making a difference in public adaptation finance.”).

¹⁴⁰⁰ COP28 (2023) *UAE Leaders’ Declaration on a Global Climate Finance Framework* (“LIST OF COUNTRIES

Barbados

Federal Republic of Germany

French Republic

Ireland

Republic of the Philippines

Republic of Colombia

Republic of Ghana

Republic of Kenya

Republic of India

Republic of Senegal

United Arab Emirates

United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland

United States of America”).)