

Determinación del **RIESGO** de los **IMPACTOS** del **CAMBIO CLIMÁTICO** en las costas de Chile

Volumen 1: Amenazas
Ministerio del Medio Ambiente
22 de octubre de 2019

Equipo consultor del estudio

- Andrés Pica (PUC)
- Carolina Martínez (PUC)
- Catalina Marinkovic (PUC)
- César Esparza (UV)
- Cristián Larraguibel (PUCV)
- David Morales (PUC)
- Iván Torres (PUC)
- Javiera Mora (UV)
- José Miguel Fariña (PUC)
- Julio Salcedo (UPLA)
- Luis Flores (PUC)
- Macarena Pérez
- Manuel Contreras-López (UPLA)
- Nickolas Bassi (UPLA)
- Nicolás Bambach (PUC)
- Oscar Melo (PUC)
- Patricio Winckler (UV)
- Roberto Agredano (UCM)
- Sebastián Vicuña (PUC)
- Stefan Gelcich (PUC)

Equipo consultor del volumen 1: Amenazas

- Patricio Winckler (UV)
- Manuel Contreras-López (UPLA)
- Julio Salcedo (UPLA)
- Javiera Mora (UV)
- César Esparza (UV)
- Manuel Contreras-López (UPLA)
- Nicolás Bambach (PUC)

Contraparte técnica del Ministerio del Medio Ambiente

- Maritza Jadrijevic
- Nico Kohlhas
- Gladys Santis
- Priscilla Ulloa

Cómo citar este informe

Ministerio del Medio Ambiente, 2019. Volumen 1: Amenazas en "Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile", Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile.

Resumen del estudio

El estudio **Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile**, busca generar información de proyecciones de la amenaza, exposición, vulnerabilidad y riesgo de los sistemas humanos y naturales de la zona costera ubicados en 104 comunas de Chile continental, además de Rapa Nui y el Archipiélago Juan Fernández. El objetivo de este estudio es sentar las bases para el diseño de políticas e implementación de medidas de adaptación. El estudio se desarrolló entre octubre de 2018 y octubre de 2019 y se presenta mediante un resumen ejecutivo, 8 volúmenes temáticos y un Sistema de Información Geográfica (SIG). El estudio, financiado y desarrollado por el Ministerio del Medio Ambiente, contó con la participación de 21 investigadores de 5 universidades (PUC, UV, UPLA, PUCV y UCM) y 3 centros de investigación (CCG-UC, CIGIDEN y COSTAR-UV).

El **estudio de amenaza** se basa en el análisis histórico del oleaje y del nivel medio del mar (NMM), además de una proyección para el período 2026-2045 de estas variables y de la cota de inundación. En primer lugar, se analiza el comportamiento histórico del oleaje obtenido a partir un modelo numérico (WWIII) cada 2° de latitud (1980-2015). El análisis de clima medio del oleaje concluye que ha habido un incremento leve en la altura y el período, además de un giro al sur del oleaje, probablemente asociados a la migración al sur del Anticiclón Permanente del Pacífico Sur. El análisis de clima extremo demuestra en todo Chile se ha registrado un aumento en la cantidad de marejadas de 0.1 a 0.3 eventos más por año, dependiendo de la latitud. El estudio de NMM, basado en el análisis de 11 mareógrafos con más de 30 años de data, muestra que no existe una tendencia clara de aumento en Chile, lo que puede atribuirse a las deformaciones de la corteza producto del ciclo sísmico. En particular, en el norte existe un descenso del NMM probablemente asociado al acoplamiento de las placas tectónicas luego del terremoto de 1877.

En segundo lugar, el estudio busca evaluar los cambios del oleaje (marejadas), NMM y cota de inundación entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) correspondiente al escenario de emisiones RCP 8.5 del IPCC. El estudio de oleaje basa en el forzamiento del modelo WWIII mediante 6 modelos de viento en toda la cuenca del Pacífico. El modelo es calibrado y validado con registros de boyas direccionales y altimetría satelital entre 1980 y 2015. El estudio de clima medio concluye que la altura de ola y el período seguirán incrementándose levemente y el oleaje girará más al sur, también en forma moderada. Los eventos extremos, no obstante, serán más frecuentes e intensos, sobre todo en la zona central de Chile, lo que seguramente aumentará los daños en la infraestructura costera. El estudio de NMM, por su parte, se basa en 21 modelos disponibles en el CMIP5 los cuales se analizan cada 5 [km] en forma latitudinal. El estudio concluye que en todo Chile, incluidas Rapa Nui y Juan Fernández, se espera un ascenso de 0.15 a 0.18 [m], con un rango de incertidumbre del orden de ± 0.1 [m] para la proyección. A fines de siglo, no obstante, el incremento sería del orden de 0.65 ± 0.3 [m]. La cota de inundación, calculada a partir del oleaje, el NMM, la marea astronómica y la marea meteorológica, presenta valores de 2.5 [m] NRS en el extremo norte a 3.5 [m] NRS en el Canal Chacao para el escenario histórico y de entre 2.8 a 3.8 [m] NRS para ambos extremos. El aumento de la cota de inundación abarca desde +0.23 a +0.29 [m] en los extremos sur y norte, respectivamente.

El **estudio de exposición** consiste en elaborar un modelo de elevación digital (DEM) en 106 comunas a partir de tres fuentes satelitales (ASTER GDEM-2, ALOS WORLD 3D y ALOS PALSAR). A partir del DEM se elabora un inventario de exposición de los sistemas humanos y naturales ubicados bajo los 10 metros sobre el nivel del mar (msnm). El inventario es generado a partir de información disponible en los servicios públicos, levantamientos en terreno y talleres efectuados en Antofagasta, Valparaíso y Concepción. Luego de un proceso de limpieza de 174.746 registros identificados inicialmente, se llega a un inventario con 18.376 entradas, separadas en 6 categorías (población, infraestructura, equipamiento, economía, sistemas naturales y otros), subdivididas a su vez en 76 tipos de entidades. La información más relevante del inventario es presentada a nivel nacional, regional y comunal. En síntesis, el inventario identifica un total de 972.623 personas habitando en los primeros 10 msnm y que en dicha área se ubican 546 caletas de pescadores, 1692 humedales, 256 campos dunares, 1172 playas, 156 lugares de interés para la biodiversidad, 1198 equipamientos (colegios, jardines infantiles, carabineros, entre otros), 171 terminales marítimos, 475 elementos de infraestructura costera y 477 asentamientos, entre otros elementos (Tabla 22, Volumen 1). A partir inventario y mediante el juicio experto, se definen 12 comunas críticas en las que se utilizan planos de borde costero del SHOA para refinar el cálculo de la vulnerabilidad. Las comunas críticas son Antofagasta, Coquimbo, Viña del Mar, Valparaíso, Pichilemu, Talcahuano, Coronel, Arauco, Puerto Saavedra, Valdivia, Rapa Nui y el Archipiélago Juan Fernández; ambas últimas que se detallan en el volumen de **vulnerabilidad y riesgo en islas oceánicas**.

El **estudio de vulnerabilidad** se orienta a los sistemas humanos y naturales identificados en el estudio de exposición. Dada la gran cantidad y complejidad de categorías (6) y entidades existentes (76), el análisis se reduce a evaluar si cada objeto del inventario de exposición será o no inundado durante la proyección (2026-2045) bajo el escenario RCP 8.5. Las líneas de inundación para el período histórico y la proyección se presentan en el SIG. El estudio concluye que 589 manzanas censales, 46357 personas y 18338 viviendas pasarían a ubicarse en zonas de inundación. Lo mismo ocurriría 17 puentes, 4245 puntos de la red vial, 8 centros de distribución de energía por hidrocarburos, 1 central termoeléctrica, 2 subestaciones y 53 elementos de infraestructura sanitaria. Con respecto al equipamiento comunal, 10 edificaciones de bomberos, 7 establecimientos de salud, 49 de educación y 5 de policía se ubicarían en zonas inundables. Por último, se identifican 358 elementos asociados al turismo en dichas zonas. Adicionalmente, y en volúmenes separados, se caracteriza la vulnerabilidad (y cuando es posible el riesgo) de playas, caletas, puertos y humedales, proponiendo también medidas de adaptación específicas para estos sistemas.

En el estudio de **vulnerabilidad en playas** se determinan los cambios en la posición de la línea litoral para 35 playas en las regiones de Antofagasta, Coquimbo, Valparaíso, O'Higgins y Biobío. Para ello se usa el software DSAS, fotografías aéreas, imágenes satelitales y levantamientos topográficos. El análisis cubre desde 39 años (La Serena) a sólo 3 años (Lebu-Tirúa), pero en 33 playas exceden los 20 años. Los resultados integrados en el SIG indican que el 9% de estas playas presenta erosión alta (mayor a 1.5 m anuales), el 71% erosión, el 11% un estado estable y solo un 9% acreción. Los casos de mayor erosión corresponden a extensos litorales arenosos, asociados a campos dunares y humedales. El estudio histórico no establece las causas que explican la erosión generalizadas, que pueden ser de origen oceanográfico, geofísico, antrópico o hidrológico. En el estudio de **riesgo en playas** se estima, en forma general, que aquellas playas

ubicadas entre Arica y el Canal Chacao experimentarán retrocesos medios de entre 3 y 23 [m] por efecto de cambios en oleaje y nivel del mar en el escenario RCP 8.5 en el período 2026-2045. La tendencia es que playas largas experimenten erosión en sus extremos sur y acreción en sus extremos norte debido a un leve cambio en la dirección del oleaje. La estimación del daño económico calculado en forma específica para 6 playas en la Región de Valparaíso permite estimar una pérdida cercana a los 500 mil dólares anuales producto del riesgo de erosión causada por cambio climático.

En el estudio de **vulnerabilidad en puertos** se analiza el impacto histórico asociado a la pérdida de disponibilidad de sitios de atraque debido a oleaje (*downtime*). A partir de los certificados de cierre de puerto (2015 a 2017) y una base de datos de SERVIMET (2007 a 2014) se concluye que, entre 2008 y 2017, se registraron 9097 cierres de puerto en 19 capitanías expuestas al Océano Pacífico de las cuales se contó con información. Los puertos con mayor cantidad de cierres son Arica (850), Tocopilla (802) y Quintero (761). El estudio de **riesgo en puertos** se evalúa el *downtime* operacional en 9 puertos en Chile (Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio y San Vicente). El oleaje en aguas profundas se transfiere a cada puerto utilizando un modelo numérico (SWAN). Luego, el *downtime*, expresado en horas de cierre por año, se calcula comparando el clima del oleaje local con límites operacionales definidos en la ROM 3.1-99 (PPEE, 2000) para el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045). Se concluye que algunos puertos mejorarán y otros empeorarán su operatividad y que el clima extremo será más severo a mediados de siglo. La mejora operativa puede explicarse por el giro al sur del oleaje que mejoraría las condiciones de abrigo de puertos ubicados en el extremo sur de las bahías. En términos económicos, el análisis a nivel agregado para los 9 puertos se traduce en pérdidas de US\$ 4,12 millones anuales y ganancias por US\$ 6,34 millones anuales, dando como resultado unas ganancias netas de US\$ 2,22 millones anuales como efecto del cambio climático. El aumento del NMM, sumado al incremento en la frecuencia e intensidad de las marejadas, no obstante, significará un aumento significativo del sobrepaso y del daño estructural de obras portuarias. Se proponen medidas de adaptación para mejorar las condiciones operacionales y para la gestión de la infraestructura en un contexto de clima futuro más severo que el actual.

Dada su similitud operacional, el estudio de **vulnerabilidad en caletas** equivale al de puertos y busca mostrar que estas han experimentado numerosos cierres debido a marejadas en la última década. En el estudio de **riesgo en caletas** de pescadores se evalúa el *downtime* operacional de las 546 caletas agrupadas cada 2° de latitud para el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045), considerando los límites operacionales definidos en base a *focus groups* y encuestas para diferentes actividades (buzos, recolectores, embarcaciones de eslora inferior y superior a 12 m). El oleaje en aguas profundas se transfiere a la costa utilizando una metodología simplificada que rescata la física fundamental de la zona de aproximación a la costa, pero no las condiciones locales de cada caleta. El análisis concluye que un 23% de los registros pesqueros artesanales se encuentran en zonas con predicciones de aumento en *downtime* de pesca (19°S a 34°S). Hacia el sur, las condiciones operacionales asociadas al oleaje mejorarían en la proyección. Considerando los valores de desembarque y de precios en playa del año 2017, se estima una pérdida a nivel agregado que podría fluctuar entre los US\$ 1,3 y 7,6 millones anuales para las caletas ubicadas entre los 19°S y 34°S, dependiendo del escenario. Las pérdidas en desembarque representan alrededor de un 2-5% de capturas actuales.

El estudio de **vulnerabilidad de humedales** presenta la distribución comunal de 1692 humedales costeros. A nivel específico y dependiendo de la disponibilidad de información y levantamientos en terreno, se identifica una tendencia general a la reducción del área de los espejos de agua (18 de 21 casos analizados) que podría explicarse por la reducción de los caudales (100% de 30 ríos analizados). Debido al incremento histórico de la frecuencia e intensidad de las marejadas extremas, los episodios de sobrepaso que aportan agua salada a los humedales podrían generar cambios en el patrón de dominancia de las especies vegetales levantadas en los humedales costeros. No obstante, los cambios identificados en los humedales podrían deberse a otros factores no estudiados como la influencia de perturbaciones naturales provenientes de la cuenca (aluviones), al efecto del pastoreo ejercido por vacas y caballos, al pisoteo de turistas y al efecto combinado de dichos factores, tsunamis y tormentas marinas.

Contenidos

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 OBJETIVOS	10
1.2 ESTRUCTURA DEL INFORME	11
1.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO	11
1.4 EQUIPO DE TRABAJO	13
1.5 AGRADECIMIENTOS	14
1.6 GLOSARIO	15
2 MARCO TEÓRICO	17
2.1 MAREJADAS	18
2.1.1 Oleaje en las costas de Chile	18
2.1.2 Definición de marejadas	20
2.1.3 Modelos de oleaje	22
2.1.4 Impactos de las marejadas	26
2.2 NIVEL DEL MAR	26
2.2.1 Componentes que definen el nivel del mar	27
2.2.2 Nivel medio del mar absoluto y Nivel medio del mar relativo	31
2.3 METODOLOGÍA DE CÁLCULO UTILIZADA EN ESTE INFORME	32
2.3.1 Definiciones	32
2.3.2 Cambio en valores medios	33
2.3.3 Cambio en valores extremos	35
2.3.4 Escenarios climáticos futuros	36
2.4 REFERENCIAS	37
3 ESTUDIO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR	39
3.1 ANÁLISIS HISTÓRICO	39
3.1.1 Metodología	41
3.1.2 Resultados	41
3.1.3 Discusión	42
3.2 PROYECCIONES	44
3.2.1 Revisión de estudios previos	44
3.2.2 Modelos utilizados en este estudio	46
3.2.3 Metodología	49
3.2.4 Resultados	51
3.2.5 Discusión	54
3.3 REFERENCIAS	55
4 ESTUDIO DE OLEAJE	59
4.1 REVISIÓN DE ESTUDIOS SIMILARES	59
4.1.1 Predicciones de oleaje (CEPAL, 2013)	65
4.1.2 Predicciones de marea meteorológica (CEPAL, 2013)	67
4.2 ANÁLISIS HISTÓRICO DEL IMPACTO DE MAREJADAS	68
4.3 ANÁLISIS HISTÓRICO DE OLEAJE	70
4.3.1 Análisis de clima medio	70
4.3.2 Análisis de extremo	72
4.4 PROYECCIONES	75
4.4.1 Metodología	77

4.4.2	Resultados del análisis de clima medio.....	82
4.4.3	Resultados del análisis de clima extremo.....	101
4.4.4	Conclusiones y recomendaciones.....	104
4.5	REFERENCIAS.....	106
5	ESTUDIO DE COTA DE INUNDACIÓN.....	108
5.1	METODOLOGÍA.....	108
5.2	TRANSFORMACIÓN DE OLAJE.....	110
5.2.1	Transformación mediante metodología simplificada.....	111
5.2.2	Transformación espectral de oleaje.....	112
5.3	RESULTADOS.....	114
5.3.1	Cambio en el nivel absoluto medio del mar.....	114
5.3.2	Marea astronómica.....	114
5.3.3	Marea meteorológica.....	114
5.3.4	Runup y setup de oleaje.....	115
5.3.5	Cota de inundación.....	115
5.3.6	Cartografía comunal del área vulnerable.....	123
5.4	DISCUSIÓN.....	123
6	ANEXOS.....	125
6.1	DETALLE DE MODELOS DE NIVEL DEL MAR.....	125
6.2	ANÁLISIS DE SESGOS DE LOS MODELOS DE OLAJE.....	132
6.3	ANÁLISIS PUNTUAL DE CAMBIOS EN EL CLIMA MEDIO.....	137
6.3.1	Mejillones.....	137
6.3.2	Valparaíso.....	142
6.3.3	Talcahuano.....	147
6.3.4	Rapa Nui.....	152
6.3.5	Isla Robinson Crusoe, Archipiélago Juan Fernández.....	157

1. INTRODUCCIÓN

Muchos de los cambios observados en el sistema climático desde la década de 1950 no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios (IPCC, 2014). Este fenómeno ha forzado la adopción de medidas y acuerdos a nivel internacional para atenuar, en la medida de lo posible, las consecuencias de este fenómeno. En una primera instancia, los acuerdos se enfocaron en mitigación de gases efecto invernadero, pero los impactos del calentamiento global se han visto de manera más recurrente, teniendo que enfocarse esfuerzos en adaptación. Los impactos asociados a los efectos agudos y crónicos del cambio climático son cada vez más evidentes en el caso de Chile. Para avanzar en el desafío de la adaptación es necesario entender los riesgos en distintos componentes del sistema productivo, ambiental y social del país.

Atendiendo a la escasez de información sobre los efectos de este fenómeno en el litoral de nuestro país, se presenta el primer informe de la consultoría "Determinación del riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile", cuyas bases administrativas y técnicas corresponden a la R.E. N° 0568, del 11 de julio de 2018, del Ministerio del Medio Ambiente. El estudio es desarrollado por una alianza entre el Centro de Cambio Global UC (CCG), el Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), la Universidad de Valparaíso, la Universidad de Playa Ancha, la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y la Universidad Católica del Maule.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto es "Generar información de proyecciones respecto de la amenaza del cambio climático en las costas de Chile y sus impactos, a escala regional, y determinar el riesgo asociado a este fenómeno, para el diseño de políticas e implementación de medidas de adaptación".

A partir de este objetivo general, se desprenden los siguientes objetivos específicos:

- a) Generar proyecciones de la amenaza del cambio climático en el borde costero de Chile continental e insular, considerando el escenario de emisiones RCP 8.5 del IPCC.
- b) Elaborar información sobre la exposición de sistemas humanos y naturales del borde costero de Chile continental e insular según los resultados del objetivo específico a).
- c) Realizar una evaluación de la vulnerabilidad frente a la amenaza del cambio climático, para el borde costero de Chile continental e insular
- d) Determinar el riesgo humano y físico frente a esta amenaza según los resultados de los objetivos específicos a) y b).

1.2 ESTRUCTURA DEL INFORME

Dado el gran volumen de información generada en esta consultoría, se presentan los resultados en los siguientes volúmenes:

- Resumen Ejecutivo
- Volumen 1: Amenazas (oleaje, nivel del mar y cota de inundación)
- Volumen 2: Exposición de zonas costeras
- Volumen 3: Vulnerabilidad de sistemas humanos y naturales
- Volumen 4: Vulnerabilidad y riesgo en playas
- Volumen 5: Vulnerabilidad y riesgo en puertos
- Volumen 6: Vulnerabilidad en humedales costeros
- Volumen 7: Vulnerabilidad y riesgo en caletas pesqueras
- Volumen 8: Vulnerabilidad en Rapa Nui y Archipiélago Juan Fernández

El presente Volumen 1 cubre los estudios de nivel del mar, oleaje y cota de inundación.

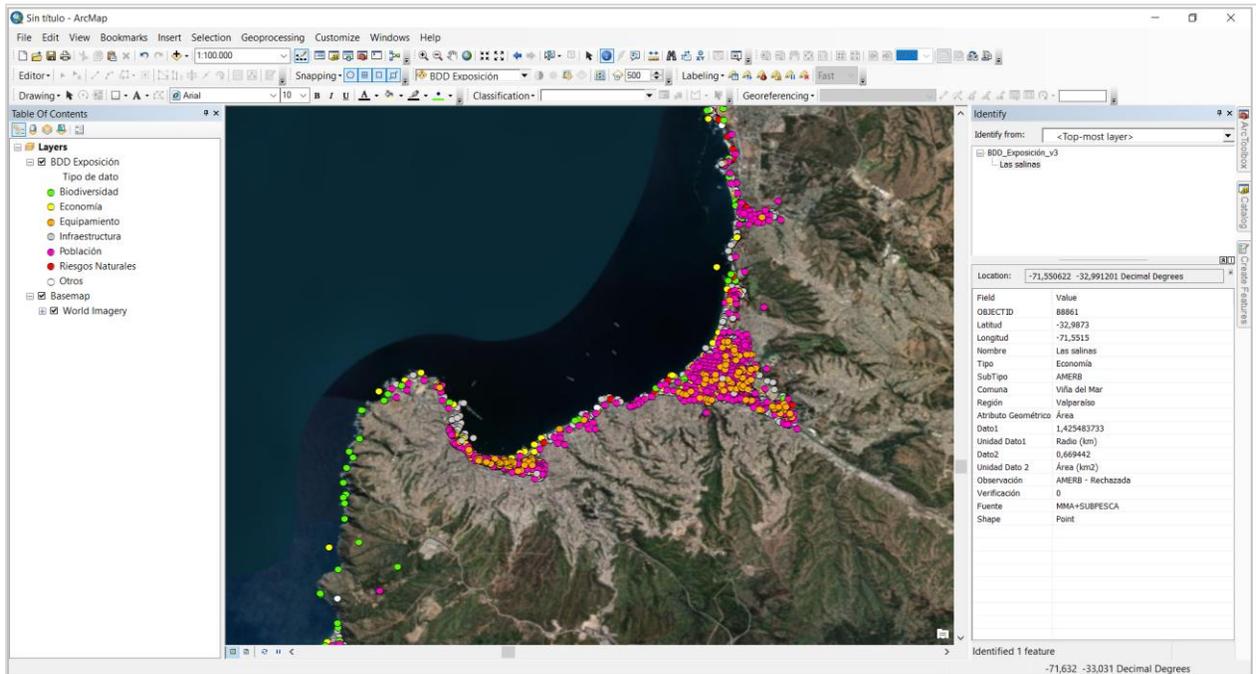
1.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO

La información generada en el estudio fue proporcionada al Ministerio de Medio Ambiente en forma de un Sistema de Información Geográfica (SIG) mediante la elaboración de una Geodatabase¹ (GDB). Esta base de datos, compatible con el software ArcGis 10 o superior, se utilizó para elaborar sets planimétricos de exposición, vulnerabilidad y erosión costera, los cuales fueron entregados en formato PNG y como archivo editable propio del software (MXD).

La GDB contiene archivos vectoriales (puntos, líneas o polígonos) y ráster (matriz de datos compuesta por píxeles). Los primeros poseen una tabla de atributos con información detallada de cada elemento que conforma la base de datos. En los archivos ráster cada pixel tiene un valor asociado al dato observado. La base de datos SIG del proyecto tiene un aspecto como el ilustrado en la Figura 1.

¹ Información geoespacial contenida en una carpeta de archivos que comparten un origen común.

Figura 1: Ejemplo de visualización de la base de datos de Exposición en el SIG.



El SIG se estructuró de la siguiente manera:

- **Área expuesta:** contiene planos (PNG) y archivos editables (MXD) del área expuesta correspondiente a la franja de borde costero que se encuentra entre los 0 y 10 [m] sobre el nivel del mar (Volumen 2).
- **Área vulnerable:** contiene planos (PNG) y archivos editables (MXD) del área vulnerable correspondiente a la franja de borde costero afecta a la cota de inundación actual y futura (Volúmenes 1 y 2).
- **GDB CCCostas (.gdb):** contiene la base de datos de exposición y vulnerabilidad (Volúmenes 1 y 2). En su interior posee la siguiente información:
 - Área expuesta definida mediante un polígono del área expuesta nacional además de polígonos y curva de exposición para las comunas críticas².
 - Área vulnerable definida mediante un polígono y curvas de vulnerabilidad identificadas a partir de las proyecciones de las cotas de inundación actual y futura, entre Arica y Canal Chacao.
 - Inventario de exposición separado en 7 categorías (biodiversidad, economía, equipamiento, infraestructura, población, riesgos naturales, otros) para 106

² El estudio de exposición (Volumen 2) identifica las siguientes comunas críticas: Antofagasta, Arauco, Coquimbo, Coronel, La Serena, Pichilemu, Saavedra, Talcahuano, Valdivia, Valparaíso y Viña del Mar.

comunas.

- Línea de costa del INE, modificada en algunos sectores y utilizada para calcular las longitudes costeras del territorio nacional.
 - Archivo vectorial de puntos con las características principales de las playas analizadas.
 - Modelos de elevación digital elaborados a partir de información topográfica detallada entregada por el SHOA para las comunas críticas.
 - Ortomosaicos de humedales generados en base a imágenes de dron de algunos de los humedales visitados en este estudio³.
- **Líneas de playa:** contiene los planos (PNG), archivos editables (MXD) y GDB de las playas analizadas en el estudio de erosión costera (Volumen 4).

1.4 EQUIPO DE TRABAJO

El equipo de trabajo está conformado por 21 académicos y profesionales de apoyo de la Pontificia Universidad Católica de Chile, de la Universidad de Valparaíso, de la Universidad de Playa Ancha, de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y la Universidad Católica del Maule (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El trabajo se desarrolla bajo la coordinación del Centro UC de Cambio Global (CCG-UC⁴), centro de investigación interdisciplinario cuya misión es promover la colaboración académica (nacional e internacional) para investigar los fenómenos relacionados al cambio global, abordando integralmente las dimensiones biofísicas y humanas. Miembros del equipo de trabajo son también parte del Centro Integrado de Gestión de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN⁵), centro de investigación de excelencia que tiene como misión desarrollar, integrar y transferir conocimiento científico, y formar capital humano avanzado que contribuya a reducir las consecuencias sociales de los eventos naturales extremos. Se cuenta también con el apoyo del Centro de Observación Marino para estudios de Riesgos del Ambiente Costero de la Universidad de Valparaíso (COSTAR-UV⁶).

³ Los humedales son: Carampangue, Cartagena, Cebada, Chaihuín, Conchalí, Cucao, El Culebrón, Tongoy, Huasco, Huentelauquén, La Boca (los Choros), Limarí, Mantagua, Merquinche, Pachingo, Pucotrihue, Punta Teatinos, Quilimarí, Salinas Chica, Salinas Grande, Salinas de Copiapó (Norte y Sur), San Alfonso, Vegas de Coliumo y Vegas del Itata.

⁴ <https://cambioglobal.uc.cl/>

⁵ <http://cigiden.cl/en/>

⁶ <https://costar.uv.cl/>

Figura 2: Organigrama del equipo de trabajo e instituciones desarrolladoras.



1.5 AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a todas las instituciones que proporcionaron información en forma desinteresada o mediante la Ley de Transparencia y, en particular a aquellas personas en dichas instituciones que levantaron la información utilizada en este estudio. En particular, a las diferentes unidades del Ministerio del Medio Ambiente, a la Dirección de Obras Portuarias y a la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, al Ministerio de Bienes Nacionales y al Ministerio de Vivienda y Urbanismo, a la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas del Ministerio de Defensa, a SUBPESCA, SERNAPESCA, ONEMI, DIRECTEMAR, SHOA, IGM, Servicio Sismológico de la Universidad de Chile, SISS, INE, SERNATUR, Subsecretaría de Transporte (MTT). Finalmente, queremos agradecer a Gladys Santis, Maritza Jadrijevic, Nico Kohlhas y Priscila Ulloa, quienes ofician de contraparte técnica del proyecto.

1.6 GLOSARIO

En esta sección se presentan términos esenciales para comprender el texto. El glosario incluido en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014b) ofrece una definición mucho más detallada de términos que pueden complementar a los incluidos en esta lista. Adicionalmente, en los 8 volúmenes se incluyen otros términos (e.g. marejadas, marea meteorológica, nivel del mar) que son definidos en el marco teórico correspondiente a cada tópico.

- **Adaptación:** Proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación trata de moderar o evitar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y a sus efectos (IPCC, 2014).
- **Amenaza:** Es un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales.
- **AR:** Assessment Report (Informe de Evaluación). Son documentos elaborados por centenares de expertos del IPCC, que dan cuenta del estado del arte de la ciencia del cambio climático. Se han elaborado cinco AR desde el primero en 1990. El último fue publicado entre los años 2013 y 2014.
- **Cambio climático:** El IPCC (2014b) define al cambio climático como la variación del estado del clima identificable en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo (decenios o períodos más largos). El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo. La CMNUCC define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad atribuible a causas naturales.
- **CMNUCC:** La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático ofrece una estructura para canalizar los esfuerzos intergubernamentales dirigidos a resolver el desafío del cambio climático.
- **Exposición:** La presencia de personas, medios de subsistencia, especies, ecosistemas, funciones, servicios y recursos ambientales, infraestructura, activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente (IPCC, 2014).
- **IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). Está compuesto por centenares de científicos y expertos que contribuyen de manera voluntaria, escribiendo informes para dar cuenta

del estado del arte de la ciencia del cambio climático y generando la mejor información técnica posible, para apoyar la toma de decisiones de los países.

- **Impactos:** Efectos sobre los sistemas naturales y humanos de episodios meteorológicos y climáticos extremos y del cambio climático. Los impactos generalmente se refieren a efectos en las vidas, medios de subsistencia, salud, ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructuras debido a la interacción de los cambios climáticos o fenómenos climáticos peligrosos que ocurren en un lapso de tiempo específico y a la vulnerabilidad de las sociedades o los sistemas expuestos a ellos. Los impactos también se denominan consecuencias y resultados. Los impactos del cambio climático sobre los sistemas geofísicos,
- **Mitigación:** es una intervención humana que busca disminuir las fuentes (y/o las emisiones de las mismas) o mejorar los sumideros de Gases Efecto Invernadero (GEI).
- **Riesgo:** Consecuencias eventuales en situaciones en que algo de valor está en peligro y el desenlace es incierto, reconociendo la diversidad de valores. A menudo el riesgo se representa como la probabilidad de ocurrencia de fenómenos o tendencias peligrosos multiplicada por los impactos en caso de que ocurran tales fenómenos o tendencias.
- **RCPs:** Las Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathways) son escenarios que abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de la gama completa de gases de efecto invernadero y aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso del suelo y la cubierta terrestre (IPCC, 2014b). Las RCPs, que hacen referencia a la parte de la trayectoria de concentración hasta el año 2100, son:
 - RCP2.6: Trayectoria en la que el forzamiento radiativo alcanza el valor máximo a aproximadamente 3 [W/m²] antes de 2100 y posteriormente disminuye.
 - RCP4.5 y RCP6.0: Trayectorias intermedias en las cuales el forzamiento radiativo se estabiliza a aproximadamente 4.5 [W/m²] y 6.0 [W/m²] después de 2100.
 - RCP8.5: Trayectoria alta para la cual el forzamiento radiativo alcanza valores mayores a 8.5 [W/m²] en 2100 y sigue aumentando durante un lapso de tiempo.
- **SRES:** Special Report on Emissions Scenarios (Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones), usados para el AR4. Estos escenarios hacen supuestos ("historias") respecto al crecimiento de la población global futura, el desarrollo tecnológico, la globalización y los valores sociales. El escenario A1 ('una familia global') asume un futuro de globalización y rápido crecimiento económico y tecnológico, con uso intensivo de combustibles fósiles (A1FI), no intensivo en combustibles fósiles (A1T) y versiones equilibradas (A1B). El escenario A2 ('un mundo dividido') asume un mayor énfasis en las identidades nacionales. Los escenarios B1 y B2 asumen prácticas más sostenibles ('utopía'), con un enfoque más global y regional, respectivamente.
- **Vulnerabilidad:** Propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación (IPCC, 2014b).

2 MARCO TEÓRICO

El territorio costero es uno de los ambientes más dinámicos del planeta, donde interactúan agentes meteorológicos, geológicos y oceánicos en distintas magnitudes y escalas espacio-temporales. En un contexto de cambio climático, el conocimiento de estos agentes es de fundamental importancia para resguardar la seguridad de los asentamientos humanos, reducir los impactos de las obras costeras y garantizar el desarrollo de la industria portuaria (Winckler et al., 2015). La Figura 3 presenta algunas variables físicas relevantes en el estudio de los procesos costeros, a las que se suman aquellas de naturaleza hidrológica e hidráulica que definen el comportamiento de las desembocaduras, las variables arquitectónicas y urbanísticas que establecen criterios de emplazamiento, las variables biológicas, oceanográficas y la ecológicas que permiten evaluar el impacto sobre el medio biótico y físico, además de otras variables que rigen los marcos político, económico, turístico, social, legal y ambiental en los que se enmarcan las actuaciones costeras (Winckler, 2018).

Figura 3: Algunas variables típicas de un proyecto de ingeniería marítima.



La gran mayoría de las variables atmosféricas, marítimas y morfológicas están afectas al cambio climático. Ello se debe a que existe una relación causal entre aquellas variables comúnmente utilizadas para caracterizar el cambio climático (temperatura atmosférica), con las variables que generan impacto en las costas, como lo son el oleaje, las ondas largas, las corrientes, el nivel del mar y la marea meteorológica (sección 2.2.1.2). A modo de ejemplo, el patrón de temperatura condiciona los campos de presión atmosférica y viento que activan las mareas meteorológicas. El oleaje y las corrientes oceánicas, por su parte, se generan producto del forzamiento del viento en la superficie del océano. El aumento de la temperatura, asimismo, es causante de la

expansión térmica del océano y del derretimiento de los glaciares, que en conjunto explican el aumento del nivel absoluto del mar. Por otra parte, existen otras variables de origen astronómico (marea astronómica) o geofísico (sismos y tsunamis), que no son sensibles al cambio climático, pero sí explican la configuración de las costas.

Este estudio se centra en el análisis de los cambios históricos y futuros del nivel del mar y de las marejadas. Dado que el nivel del mar es una variable que se puede definir en función de diferentes escalas de tiempo, en este estudio se considera el nivel medio mensual, relativo a la cota del terreno, como el descriptor más adecuado de ella. Por otra parte, dado que existen diversas definiciones de marejadas, se asume que éstas son producto de la combinación del oleaje extremo y los fenómenos de baja frecuencia, como la marea meteorológica y los tsunamis. A continuación se profundiza en los aspectos teóricos asociados a las marejadas (sección 2.1) y nivel del mar (sección 0).

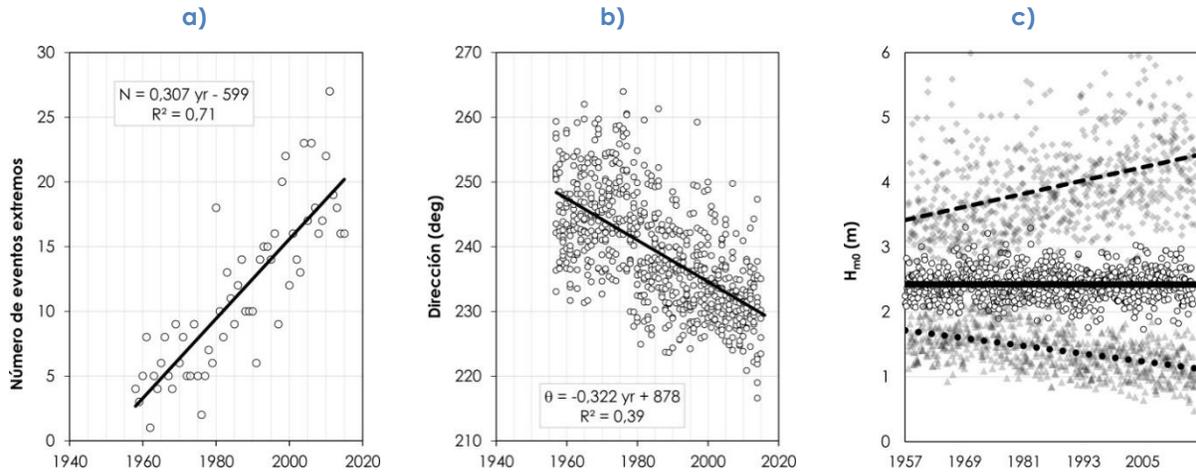
2.1 MAREJADAS

2.1.1 Oleaje en las costas de Chile

La costa es una zona dinámica en donde coexisten distintos procesos físicos asociados a la hidrodinámica y al transporte de sedimentos. El oleaje, en particular, es el principal agente modelador de los procesos litorales en las costas abiertas de Chile y su comportamiento condiciona la operatividad y seguridad portuaria. Los eventos extremos, conocidos en términos coloquiales como marejadas, definen asimismo los valores para el diseño estructural de obras marítimas.

En décadas recientes, las costas de Chile central han experimentado un intenso proceso de urbanización. La incidencia de marejadas en los últimos años, junto con el incremento en la demanda de infraestructura costera y el eventual cambio del nivel del mar atribuido al calentamiento global, aumentan el riesgo en una zona también afecta a recurrentes terremotos y tsunamis. La Figura 4a muestra el número de eventos extremos anuales entre 1958 y 2015 frente a Valparaíso, estimado mediante la selección de marejadas cuya altura significativa superó un umbral establecido como dos desviaciones estándar por sobre la media (Martínez et al., 2018). La tendencia muestra que los eventos extremos han aumentado de un promedio de 5 por año a mediados del siglo pasado a aproximadamente 20 por año en el siglo XXI. Asimismo, se ha observado un giro de la dirección del oleaje en aguas profundas del orden de 20° hacia el sur (Figura 4b) y un aumento de las alturas significativas máximas mensuales durante dicho período (Figura 4c). Sobre la base de una recopilación de artículos de prensa digital y archivos históricos, Campos-Caba (2016) indica que las marejadas que causaron el mayor daño en el área (1965, 1968, 1986 y 1987) se generaron localmente durante el invierno. Recientemente, los eventos extremos no han exhibido una clara distinción estacional, ocurriendo incluso en verano (Martínez et al., 2018). Si extrapolamos este comportamiento a un futuro cercano, se espera un escenario con aumento en la frecuencia e intensidad de las marejadas.

Figura 4: Evolución temporal de estadísticas de oleaje entre 1958 y 2015 en aguas profundas frente a Valparaíso. a) Número de eventos extremos anuales de oleaje. b) Dirección media mensual. c) Altura significativa promedio (círculos en contorno negro), máxima (diamantes grises) y mínima mensuales (triángulos), con sus respectivas rectas de ajuste. Adaptado de Martínez et al. (2018).



Dado que la costa chilena se encuentra expuesta al océano Pacífico, es frecuente encontrar estados de mar compuestos por múltiples sistemas de oleaje, los cuales inciden desde distintas direcciones y con diferentes alturas, periodos y contenido espectral. Cada componente que alcanza las costas chilenas proviene de diferentes zonas de generación (Figura 5), haciendo que el oleaje sea, en general, de carácter multimodal.

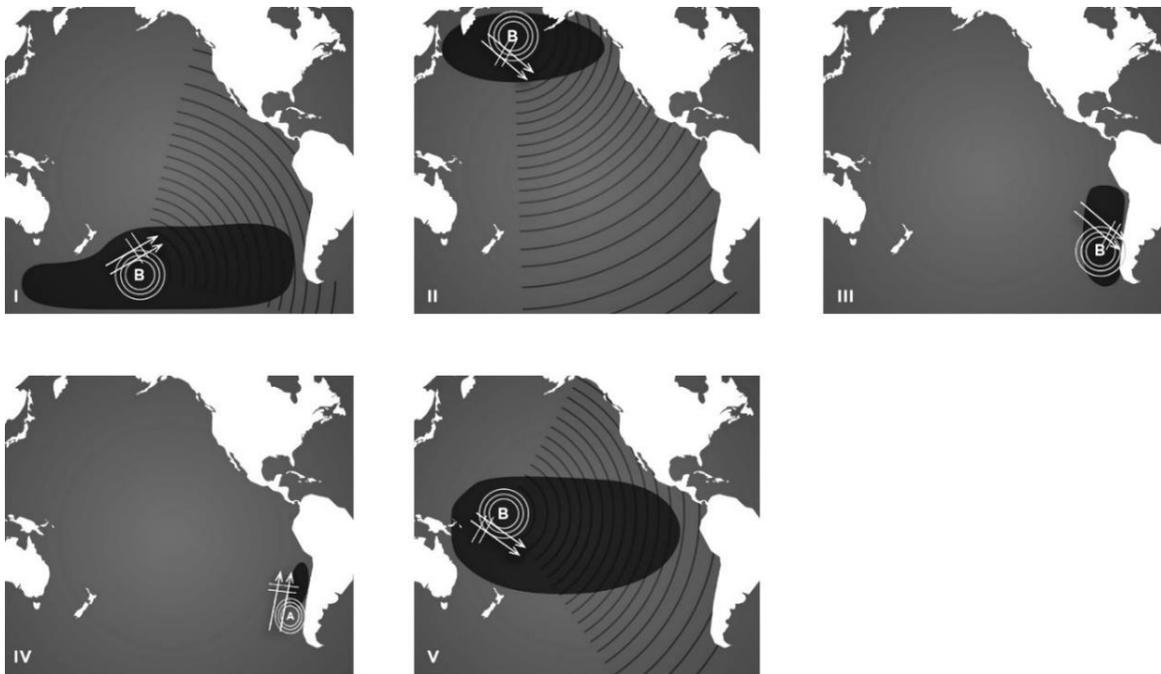
En la costa de Chile continental, el clima de oleaje se encuentra dominado por los vientos asociados a la actividad ciclónica extratropical que se presenta entre las latitudes 35°S a 60°S. El oleaje generado en dicha región se propaga a través del océano Pacífico, arribando a las costas bajo una condición denominada mar de fondo (swell). Durante el invierno meridional, el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste migra en promedio desde los 33°S a los 27°S, condición que favorece el desplazamiento de ciclones extratropicales hacia latitudes más bajas, los cuales en casos extremos alcanzan la zona central con intensos vientos y olas de varios metros de altura. Este tipo de oleaje se le denomina mar de viento local (wind sea). Durante el verano meridional se forman frente a las Islas Aleutianas centros de baja presión, los cuales generan olas que se propagan a lo largo del Océano Pacífico y arriban a las costas de Chile con períodos elevados y alturas relativamente bajas. Este tipo de oleaje, denominado swell del noroeste, es de particular importancia para puertos que se encuentran expuestos al cuarto cuadrante⁷, como es el caso de la bahía de Mejillones.

En las islas oceánicas del archipiélago Juan Fernández, Rapa Nui e Islas Desventuradas, el clima de oleaje contiene además componentes del primer y segundo cuadrantes, dada la exposición a todo el rango de direcciones. Para acceder a una descripción detallada del clima de oleaje

⁷ Los cuadrantes se utilizan para dividir la dirección de donde viene el oleaje. El primer, segundo, tercer y cuarto cuadrante corresponden a direcciones entre 0°-90° (N a E), 90°-180° (E a S), 180°-270° (S a O) y 270°-360° (O a N) respectivamente, donde 0° corresponde al N y el ángulo de mide en sentido horario. Así, un oleaje del SW corresponde a la dirección 225°, y al tercer cuadrante.

y a estadísticas a lo largo del país, recomendamos consultar el Atlas de Oleaje de Chile⁸ (Beyá et al., 2016, 2017). Las marejadas pueden tener un origen local (wind sea) o distante (swells).

Figura 5: Zonas de generación del oleaje que alcanza las costas chilenas. I) Núcleos de bajas presiones en las latitudes medias del hemisferio sur responsables del oleaje reinante. II) Núcleos de bajas presiones en latitudes medias del hemisferio norte responsables del mar de fondo del noroeste. III) Núcleos de bajas presiones que generan mal tiempo y marejadas de mar de viento en Chile continental durante el invierno. IV) Anticiclones que generan buen tiempo, viento (surazo) y mar de viento del sur-suroeste. V) Tormentas tropicales en el Pacífico. Adaptado de Beyá et al. (2016).



2.1.2 Definición de marejadas

En la literatura hispanoparlante internacional no existe una definición comúnmente aceptada y se utilizan diversos términos para referirse al fenómeno. Puelma et al. (2016) efectúan una revisión de las definiciones asociadas a marejadas que se usan en nuestro país, la que es adaptada y complementada en este informe:

- El Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, consigna en su “Glosario de marea y corrientes” (SHOA, 2002) que una marejada es una “ola larga ocasionada generalmente por una tormenta lejana; tienen por lo común varios centenares de metros de longitud”. Esta definición no cuantifica las características del oleaje, no contempla la combinación con otros fenómenos ni incluye aspectos relacionados con el impacto de las marejadas en la costa.
- El Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016) define una marejada como un “evento de

⁸ www.oleaje.uv.cl

oleaje extremo que está asociado al cese de las actividades marítimas y en ocasiones a naufragios y daños en el borde costero". Esta definición adolece de las mismas limitaciones que la anterior.

- El Servicio Meteorológico de la Armada (SERVIMET), utiliza también términos tales como "marejadilla", "marejada" y "gruesa". La única publicación nacional oficial hallada en que se describen dichos términos, corresponde a la "Carta de Estados de Mar y Escala Beaufort" (SHOA, 2001), en la que se indica que "el criterio del mar está concebido solo para aguas profundas". Durante 2016, SERVIMET dio a conocer los criterios para la emisión de avisos de marejadas y marejadas anormales (Figura 6), donde el término "anormal" describe a las marejadas de fuerza excepcional (SERVIMET, 2016).

Figura 6: Criterios SERVIMET para emisión de avisos de marejadas y marejadas anormales.

CRITERIOS PARA LA EMISIÓN DE AVISOS DE MAREJADAS				
ORIGEN DEL MAR DE FONDO	DIRECCIÓN DE LAS OLAS OCEÁNICAS	ALTURA DE LAS OLAS EN METROS	PERIODO DE LAS OLAS EN SEGUNDOS	OBSERVACIÓN
OCÉANO PACÍFICO SUR O CAMPO LEJANO	SURWESTE/WESTE	$\geq 3,0$ Ó $4,0$	NO CONSIDERADO	SE PROYECTAN EN FORMA DE ABANICO, BUSCANDO LA PERPENDICULARIDAD DE LA COSTA
CAMPO LEJANO	NORWESTE	$> 1,8$ E $< 2,5$	< 18	OLAS INGRESAN DIRECTAMENTE AL INTERIOR DE BAHÍAS
CRITERIOS PARA LA EMISIÓN DE AVISOS DE MAREJADAS ANORMALES				
ORIGEN DEL MAR DE FONDO	DIRECCIÓN DE LAS OLAS OCEÁNICAS	ALTURA DE LAS OLAS EN METROS	PERIODO DE LAS OLAS EN SEGUNDOS	OBSERVACIÓN
OCÉANO PACÍFICO SUR O CAMPO LEJANO	SURWESTE/WESTE	$\geq 4,0$ Ó $6,0$	NO CONSIDERADO	SE PROYECTAN EN FORMA DE ABANICO, BUSCANDO LA PERPENDICULARIDAD DE LA COSTA, GENERANDO POTENCIALES DAÑOS A LA INFRAESTRUCTURA COSTERA.
CAMPO LEJANO	NORWESTE	$\geq 2,5$	> 14 y < 18	OLAS INGRESAN DIRECTAMENTE AL INTERIOR DE BAHÍAS, GENERANDO POTENCIALES DAÑOS A LA INFRAESTRUCTURA COSTERA. SOPREPASAN LA LÍNEA DE COSTA. GENERAN INUNDACIONES.
CAMPO LEJANO	NORWESTE	$\geq 2,0$	≥ 18	OLAS INGRESAN DIRECTAMENTE AL INTERIOR DE BAHÍAS, GENERANDO POTENCIALES DAÑOS A LA INFRAESTRUCTURA COSTERA. SOBREPASAN LA LÍNEA DE COSTA. GENERAN INUNDACIONES.

Si bien la definición de SERVIMET (Figura 6) cuantifica la dirección, altura y período del oleaje, no contempla la combinación con otros fenómenos, excluye los aspectos relacionados con el impacto de las marejadas en la costa y se utiliza, de manera regular, para alertar en forma regional sin atender a los efectos locales en las bahías y costas expuestas⁹.

⁹ Los avisos de marejadas se disponen en el sitio http://meteoarmada.directemar.cl/prontus_meteo/site/edic/base/port/inicio.html

En un reciente libro, Ciavola y Coco (2017) proponen el término “coastal storms” para referirse al fenómeno de las marejadas. En dicho volumen, Harley (2017) define una marejada como una perturbación meteorológica inducida en las condiciones marítimas locales que tiene el potencial de alterar significativamente la morfología costera y exponer la costa al oleaje, las corrientes y/o la inundación. Las marejadas se asocian con el paso de ciclones tropicales o extratropicales que pueden impactar en forma local a la línea de costa o ser de generación distante. Las marejadas también pueden coincidir con vientos fuertes y/o precipitaciones que, junto con las condiciones marítimas anómalas, contribuyen a la severidad de una tormenta.

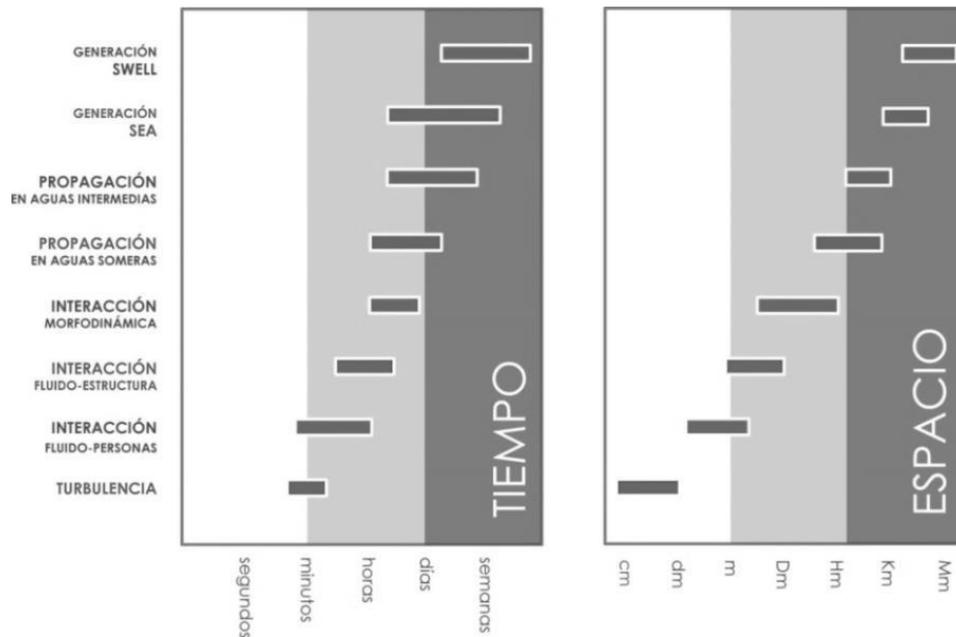
Según Harley (2017), la perturbación de las condiciones locales que se producen durante una marejada es de una magnitud suficiente para que la morfología (bancos de arena, arrecifes de coral, etc.) pueda alterarse significativamente de su condición normal. Esto significa que, en ausencia de obras costeras o condiciones anormales previas, la morfología alterada por la marejada regresa a una condición normal en una escala de tiempo mayor que la tormenta en sí. En el caso de grupos de marejadas, el período de recuperación puede prolongarse inusualmente a medida que las tormentas continúan interrumpiendo o invirtiendo el proceso de recuperación, como ocurrió en la marejada del 8 de agosto de 2015 en la zona central (Winckler et al., 2017). Para marejadas extremas, es posible que la zona costera nunca se recupere y se alcance un nuevo estado de equilibrio asociado con estas condiciones de mayor energía.

Para efectos de este informe, se adopta la definición de Harley (2017), pues esta menciona en forma genérica una perturbación meteorológica inducida en las condiciones marítimas locales, sin restringirlas solo a oleaje. Para efectos cuantitativos, la definición de marejadas en este informe se implementa seleccionando aquellos eventos extremos de oleaje cuya altura significativa sobrepasa cierto umbral. De esta forma, se excluye el análisis de la ocurrencia conjunta de los eventos extremos de oleaje con otros fenómenos como los meteotsunamis, la marea meteorológica, la marea astronómica y las ondas largas. Esta limitación obedece a la gran complejidad asociada a implementar este tipo de estudios a escala nacional. A modo de simplificación, estos fenómenos de origen meteorológico serán cuantificados, pero no necesariamente combinados en forma temporal, con los eventos extremos de oleaje.

2.1.3 Modelos de oleaje

Las marejadas se caracterizan por olas de gran altura formadas por fuertes vientos en el área oceánica, evolucionando en diferentes escalas temporales y espaciales a medida que se propagan desde la zona de generación hacia las costas (Figura 7). Por ende, para estudiarlas, se deben abordar dichas escalas en forma adecuada, lo que es solo posible mediante diferentes tipos de modelos, dependiendo del objetivo del estudio.

Figura 7: Escalas de evolución espacio-temporal de las marejadas.



Para estudiar la evolución del oleaje desde la generación hasta el arribo a la costa, y en orden de complejidad creciente, existen los modelos que promedian temporalmente la fase (esto es, que no resuelven las olas individuales), aquellos que resuelven la fase permitiendo la resolución espacio-temporal de olas individuales y los basados en versiones promediadas de las ecuaciones de Navier-Stokes y que se agrupan en forma genérica bajo el término CFD (Computational Fluid Dynamics). Basándonos en el texto de Winckler et al. (2019), estos modelos se describen a continuación:

- Los **modelos que promedian la fase** (Phase-averaged models) se basan en la ecuación de balance de energía y permiten calcular la evolución en el tiempo y espacio del oleaje, en la medida que ésta sea suave (Holthuijsen, 2007). Estos modelos permiten cuantificar fenómenos como el crecimiento y la disipación del oleaje en escalas oceánicas, además del asomeramiento y la refracción en zonas próximas a la costa (Roland, 2009). Sin embargo, no calculan en forma adecuada la difracción, la reflexión y la rotura del oleaje. A partir del espectro de energía, estos modelos permiten calcular los parámetros estadísticos de un estado de mar¹⁰, como la altura significativa, el periodo (peak o medio) y la dirección (peak o media), entre otros. A pesar de ser simples y rápidos, estos modelos no permiten calcular olas individuales, y por ende se utilizan en extensiones relativamente grandes, desde aguas profundas a profundidades en torno a los 10-20 metros, dependiendo de si la costa es rocosa o se caracteriza por pendientes suaves.
- Los **modelos que resuelven la fase** (Phase-resolving models) se basan en ecuaciones de

¹⁰ Un estado de mar corresponde a un intervalo de tiempo, usualmente considerado entre 1 y 3 horas, en el cual (se asume que) las propiedades estadísticas del oleaje permanecen constantes.

conservación de la masa y momentum que permiten caracterizar la evolución en el tiempo y espacio de la superficie libre y la velocidad para olas individuales. Estos modelos tienen la ventaja de que pueden dar cuenta de los fenómenos de asomeramiento, refracción, difracción, reflexión y disipación, característicos de zonas costeras. Sin embargo, debido a la alta resolución espacial y temporal requerida para su resolución, están limitados a áreas relativamente pequeñas. Otra desventaja es que a la fecha no permiten resolver en forma adecuada la generación de oleaje por viento.

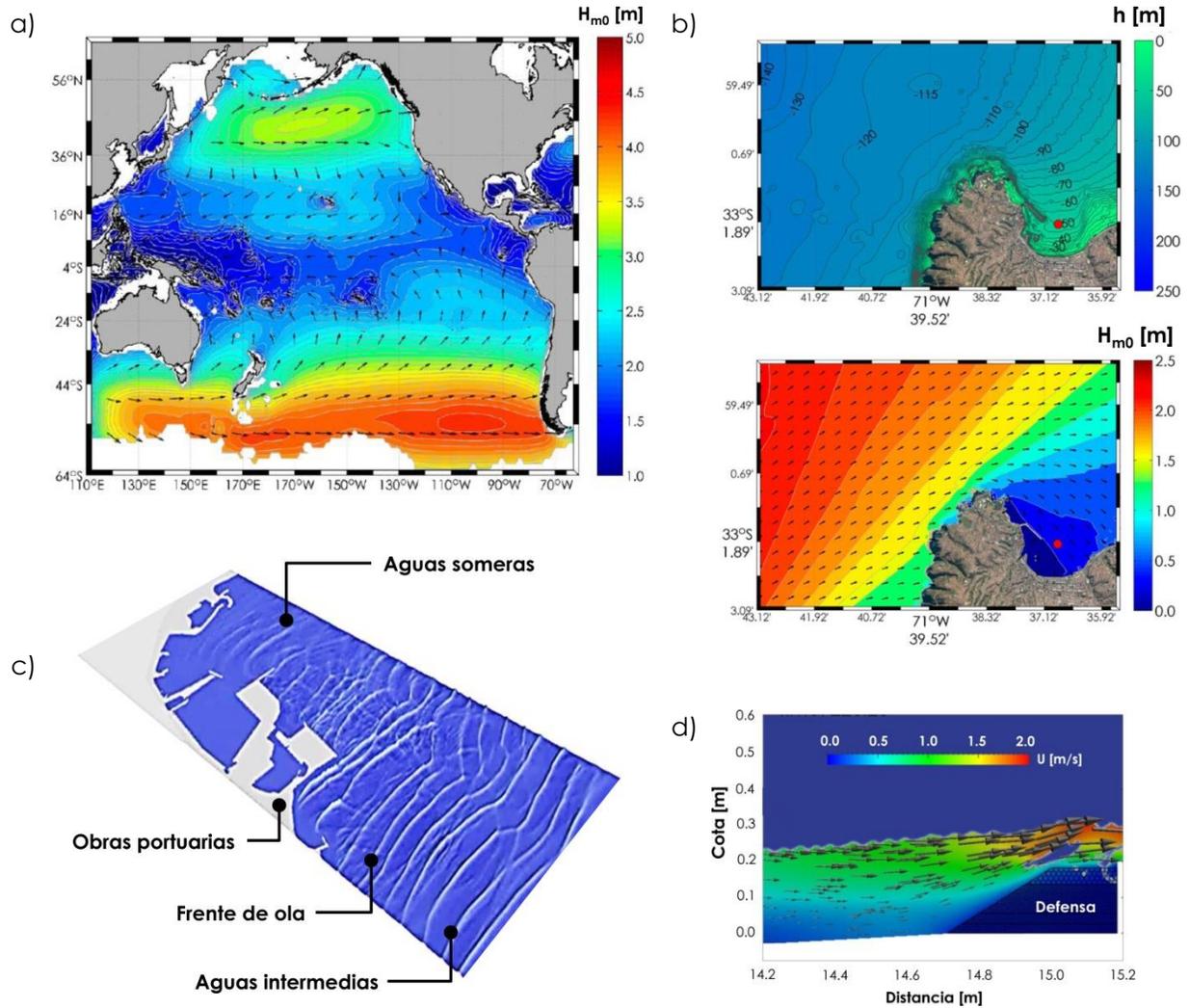
- Los **modelos CFD** se basan en versiones promediadas (en el tiempo, espacio y/o volumen) de las ecuaciones de Navier-Stokes, sin efectuar supuestos respecto de la estructura tridimensional del flujo. Estos modelos permiten calcular la velocidad y la presión en tres dimensiones, a un costo computacional comparativamente alto. Entre éstos destacan aquellos basados en las ecuaciones RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations), en técnicas de filtrado LES (Large Eddy Simulation) y en la solución de movimiento de partículas mediante SPH (Smooth Particle Hydrodynamics).

En la práctica, estos modelos son complementarios y pueden acoplarse según sea el objetivo de estudio. Los modelos que promedian la fase son utilizados en la zona de generación de oleaje (Figura 8a) y para propagación en aguas intermedias donde los efectos de refracción y asomeramiento predominan por sobre los de interacción con obras costeras y costas abruptas (Figura 8b). Para estudiar marejadas, por ejemplo, se puede propagar el oleaje desde aguas profundas a intermedias con modelos de baja resolución espacial ($10^0 \sim 10^2$ m) y temporal ($10^2 \sim 10^3$ s). La propagación se realiza usualmente a partir de aguas profundas pues es ahí donde se conocen los campos de viento forzante o donde existen condiciones de contorno conocidas, tales como datos obtenidos mediante boyas, satélites o modelos globales que no están afectos al fondo. En playas de pendiente suave donde no existen grandes singularidades, los modelos que promedian la fase pueden ser utilizados hasta las cercanías de la zona de rompiente, sin grandes errores.

La secuencia lógica es llevar los datos de aguas intermedias a la costa con modelos que resuelven la fase. Este proceso se efectúa con mejor resolución espacial ($10^{-1} \sim 10^0$ m) y temporal ($10^{-1} \sim 10^0$ s), de modo de evaluar en forma adecuada la agitación y la resonancia de bahías cerradas y dársenas debidas al oleaje. Estos modelos permiten caracterizar las zonas donde domina la difracción y reflexión por sobre el asomeramiento y refracción. Permiten asimismo, describir la zona previa a la rotura, pues consideran términos no lineales que cuantifican la asimetría del oleaje antes de romper (Figura 8c). Los modelos que resuelven la fase pueden usarse en otros flujos gravitacionales como las mareas astronómicas y meteorológicas, tsunamis, flujos de lava, lahares y ondas a escala oceánicas, como las de Poincaré, Kelvin y Rossby.

Los modelos CFD, por su parte, permiten evaluar fenómenos sumamente complejos como la rotura, la interacción fluido-estructura y la interacción fluido-sedimentos, con una resolución muy alta ($10^{-3} \sim 10^{-1}$ m; $10^{-3} \sim 10^{-1}$ s). Con esa capacidad se puede estimar el sobrepaso en una defensa, las velocidades de escurrimiento y las fuerzas sobre personas, vehículos, edificaciones y el equipamiento urbano.

Figura 8: Modelo que promedia la fase utilizado para a) la generación en el Océano Pacífico y b) la propagación del oleaje desde aguas profundas a la bahía de Valparaíso, obtenidos del Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016, 2017). Se ilustran los campos de altura significativa y la profundidad de la bahía. c) Modelo que resuelve la fase, donde se observan las olas individuales propagándose desde aguas profundas a la costa (adaptado de DHI). d) Modelo de interacción del oleaje con una defensa costera proyectada para Av. Perú, Viña del Mar (Gentileza de Stephanie Fritz).



En este estudio se evalúan los cambios históricos y futuros en la intensidad, periodicidad y dirección de eventos extremos de oleaje, mediante el modelo numérico espectral de oleaje de tercera generación WAVEWATCH III v4.18 (Tolman, 2014), modelo que promedia la fase, que será alimentado con diversos modelos forzantes de vientos, de manera de incorporar incertidumbre en las proyecciones. El modelo se elaborará con una resolución espacial de 5 km a lo largo de la costa de Chile, y mayor resolución en 19 sectores costeros de interés. Las forzantes corresponderán al GEI RCP 8.5, del IPCC para los horizontes de proyección entre 2026 y 2045. El análisis se efectuará para aguas profundas y en la costa. Los detalles de la implementación del modelo WAVEWATCH III para Chile están disponibles en Beyá et al. (2016, 2017).

2.1.4 Impactos de las marejadas

El clima de las olas es el factor físico más relevante que afecta los procesos litorales, la seguridad de la navegación y las operaciones portuarias en las costas abiertas de Chile (18° 21'S a 41°45'S). El oleaje de sur a sudoeste prevalece a lo largo del año, con alturas significativas que van desde 1.8 [m] en el extremo norte hasta 4.0 [m] en la Patagonia (Beyá et al., 2017). Los gradientes latitudinales son evidentes en las alturas y otros parámetros estadísticos. Las condiciones normales se alternan con marejadas que pueden alcanzar alturas de ola significativas de hasta 5 [m] y 15 [m] en los extremos norte y sur del país. Estas tormentas han causado daños a la infraestructura costera al menos 201 veces desde 1823 (Winckler et al., 2017) y se ubican como el tercer desastre natural en términos de daños en el país, después de terremotos y tsunamis (EMDAT, 2017). Aunque la ocurrencia de marejadas en Chile ha sido poco documentada (e.g. Esparza y Winckler, 2017; Carvajal et al., 2018), estas impactan generando inundaciones costeras (Beyá y Winckler, 2013), daño en la infraestructura (Winckler et al., 2017) y pérdida de playas (Ibaceta et al., 2017; Molteni et al., 2017).

Los impactos físicos asociados al cambio climático en el territorio costero mediante una combinación de marejadas y las variaciones del nivel del mar pueden clasificarse en:

- Inundación de las zonas bajas
- Cambios en la dinámica y desaparición de humedales
- Erosión de playas y acantilados
- Efectos en la dinámica de las dunas
- Efectos en la hidrodinámica y morfodinámica de estuarios
- Efectos sobre la operación de puertos y caletas
- Daños más frecuentes sobre las obras marítimas
- Pérdida de deltas
- Intrusión salina en acuíferos
- Otros efectos

2.2 NIVEL DEL MAR

El nivel medio del mar, por su parte, corresponde al promedio del nivel de la superficie del agua en un tiempo relativamente prolongado. Según el SHOA (1999), *“Su expresión física sería la del plano que adoptarían las aguas en reposo, depurada la acción de la marea. /.../ Existen variaciones de corto período causadas por condiciones atmosféricas y de mar (marejadas anormales, mar de fondo); de período medio (variaciones estacionales de la presión y del viento atmosférico) y de largo período, que pueden tomar décadas y aun siglos”*. Para efectos de este estudio, el nivel medio del mar corresponde al promedio mensual del nivel instantáneo del mar.

Según Winckler et al. (2015), “en Chile no existen criterios o metodologías estandarizadas para el establecimiento de los niveles máximos de inundación por marejadas. Históricamente los diseños de infraestructura costera han considerado variaciones de nivel del mar adicionales a la marea astronómica, aunque los criterios que se utilizan para su cálculo son variados dada la falta de

consenso, escasez de mediciones y la falta de estudios específicos. Esta información es de carácter difusa y no existe estudio u organismo que administre este tipo de estudios en forma sistemática".

Como primera aproximación, el impacto de las marejadas puede estudiarse como la combinación del oleaje y el nivel del mar en el corto plazo (mensual), para lo cual este último puede descomponerse en la suma de sus componentes (sección 2.2.1). A estas variables se pueden adicionar aquellas relacionadas con la variabilidad climática (e.g. fenómenos ENSO, SAM, PDO) y con el cambio climático a largo plazo (variación del nivel medio del mar) que han sido escasamente estudiadas en Chile. Otros fenómenos poco documentados para su consideración en los diseños son la existencia de ondas largas en bahías, puertos, playas, estuarios y freak waves. A continuación, se describen las componentes que definen el nivel medio del mar, descripción que es adaptada de Winckler et al. (2015).

2.2.1 Componentes que definen el nivel del mar

Dada la amplia variedad y complejidad de los fenómenos hidro-meteorológicos que inciden en la costa es necesario considerar todos los agentes involucrados de manera probabilística. Una primera aproximación a la definición de las cotas de inundación, por ejemplo, puede lograrse mediante la siguiente expresión:

$$Z = NRS + Z_A + Z_P + Z_V + W_S + O + \dots$$

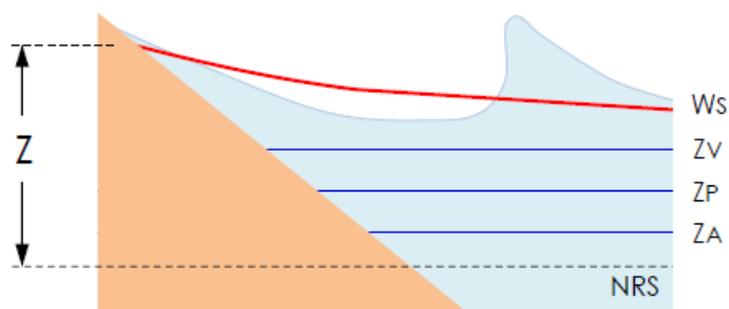
Donde:

Z	: Cota de inundación
NRS	: Nivel de reducción de sondas
Z_A	: Marea astronómica
Z_P	: Marea meteorológica por variación de la presión atmosférica
Z_V	: Marea meteorológica por viento
W_S	: Set-up de oleaje
O	: Ondas infragravitatorias

El Nivel de Reducción de Sondas (NRS) en Chile corresponde al plano determinado por la mayor bajamar en sicigias estando la Luna en perigeo (SHOA, 1999) y se determina mediante levantamientos topo-batimétricos. El NRS es fundamental en el diseño de infraestructura costera pues corresponde al nivel de referencia altimétrico en obras marítimas, a diferencia de las obras terrestres que utilizan el nivel medio del mar.

Todas estas variables, a excepción de la marea astronómica, pueden ser afectadas por el cambio climático. En particular, el NRS puede ser afectado en el largo plazo debido a cambios en el nivel medio del mar, o debido a los movimientos cosísmicos verticales que experimenta la corteza terrestre debido a los sismos. La Figura 9 muestra algunos de los componentes que definen el nivel del mar en el corto plazo, entendido este como el promedio de un mes. La descripción de cada componente se incluye a continuación.

Figura 9: Algunos de los componentes que definen el nivel del mar en el corto plazo (línea roja), sobre el cual impacta el oleaje.



$$Z = NRS + Z_A + Z_P + Z_V + W_S + O + \dots$$

Z	= Nivel del mar
Z _{NRS}	= Nivel de reducción de sondas
Z _A	= Marea astronómica
Z _P	= Marea meteorológica por variación de la presión atmosférica
Z _V	= Marea meteorológica por viento
W _S	= Set-up de oleaje
O	= Ondas largas

2.2.1.1 Marea astronómica

En una variación cíclica regular de origen astronómico, que se explica con la superposición de ciclos regulares actuando a diferentes escalas: desde semidiurno a ciclos mensuales, anuales, e incluso interdecadales (Pugh y Woodworth, 2014). La marea astronómica, Z_A , se puede estimar a partir de las proyecciones de marea que efectúa el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA, 2016) en forma anual a partir de los registros de la red de mareógrafos¹¹. Este mismo servicio propone un método oficial para el cálculo de los valores no-armónicos de la marea en el contexto de los estudios oceanográficos requeridos para la ejecución de una obra (SHOA, 1999).

Usualmente la marea astronómica se analiza y pronostica considerando la interacción gravitacional de El Sol, La Luna y La Tierra solamente, descontando el efecto de otros cuerpos celestes como los grandes planetas de nuestro sistema solar (Júpiter y Saturno), los que son capaces de generar una alteración del 4% (Wenzel 1998).

2.2.1.2 Marea meteorológica

Este fenómeno (storm surge) ocurre durante los temporales, que traen asociados campos de baja presión atmosférica y vientos fuertes. En la literatura, se suele separar el aumento del nivel del mar por presión atmosférica, Z_P (barometric set-up), de la sobre-elevación por viento, Z_V (wind set-up), generada por el esfuerzo de corte de éste sobre la interfaz agua-aire. La primera

¹¹¹¹ <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>

componente se produce por la variación de la presión atmosférica respecto de su valor medio. Ejemplos recientes de la cuantificación de la marea meteorológica asociada a huracanes, incluyendo asimismo el oleaje han sido realizados para las costas de Chile Central (Carvajal et al., 2017). La Figura 10 muestra una marea meteorológica en la Estación de Montemar, en Viña del Mar. Este tipo de fenómenos alcanza valores en torno a 1 [m] en condiciones extremas en la zona central de Chile.

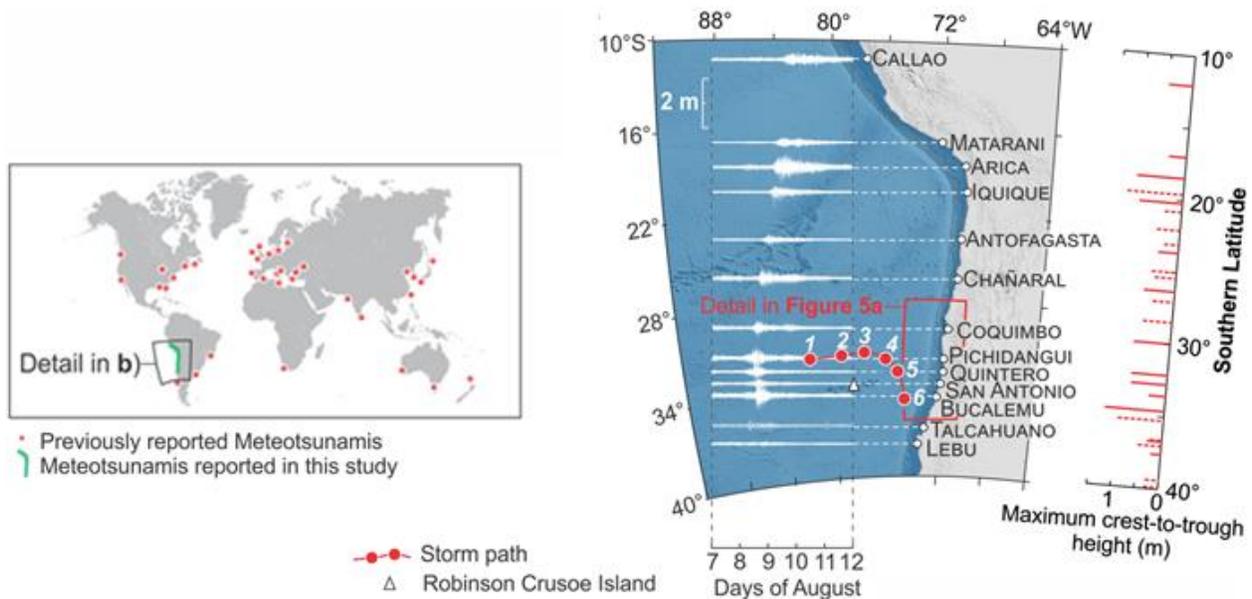
Figura 10: Marea meteorológica en la Estación de Montemar, de la Universidad de Valparaíso. Fuente: Gentileza de Mauricio Molina, de Ingeniería Civil Oceánica UV.



2.2.1.3 Meteotsunamis

La marea meteorológica puede ocurrir de manera conjunta con un meteotsunami, que corresponde a un aumento del nivel del mar producido por variaciones de presión y rachas de viento en una escala temporal de entre 5 minutos y 2 horas. Este fenómeno se produce con frecuencia y su ámbito de influencia es mundial, pero su conocimiento y estudio es insuficiente. Un ejemplo del primer meteotsunami ocurrido el 8 de agosto de 2015 en las costas de Chile se ilustra en la Figura 11 (Carvajal et al. 2017). El evento alcanzó en torno 1 [m] de amplitud en la zona central de Chile y abarcó incluso a puertos peruanos.

Figura 11: Ejemplo del primer meteotsunami reportado en las costas de Chile. Fuente: Carvajal et al. (2017).



2.2.1.4 Wave Set-up

Ante la presencia de olas rompientes se produce un aumento del nivel medio del mar en la costa que compensa en parte la formación del intenso gradiente espacial del flujo de energía del oleaje que induce la disipación por rotura. La cuantificación del wave set-up W_s se efectúa a partir de la teoría de los tensores de radiación (Longuet-Higgins and Stewart, 1962), donde se asume un proceso estacionario y promediado en el tiempo, para calcular el set-up a partir de las características del oleaje incidente.

2.2.1.5 Ondas de infra-gravedad y surf-beat

Ondas de períodos característicos superiores al del oleaje pueden estar asociadas a trenes de olas u otras forzantes. Estas ondas, θ , dependiendo de las características geográficas y batimétricas, pueden propagarse como ondas de contorno y quedar atrapadas en regiones semiconfinadas como playas encajadas, bahías, estuarios o dársenas portuarias. Según la geometría de la región costera son los períodos característicos en los cuales estas ondas pueden sufrir interferencia constructiva o resonancia y también amplificación por reflexiones, reducción del ancho y profundidad de propagación.

2.2.1.6 Otros efectos

Entre los otros efectos deben incluirse causas de tipo excepcional como sollevamientos y subsidencia costera, los cambios locales que sufre el nivel medio del mar durante un gran terremoto y los cambios en la morfodinámica producto del efecto combinado de un sismo y un tsunami (Catalán et al., 2014). Se tiene también, la resonancia en dársenas, variaciones en el largo plazo, entre otros. El cuerpo de ingenieros de EEUU propuso una metodología para analizar

los cambios del nivel medio del mar en proyectos civiles es un contexto de cambio climático (USACE, 2011). En dicha metodología se distinguen los cambios "globales" del NMM con respecto a los "locales", y que se deben estos últimos a procesos de origen oceanográfico, atmosférico, geológico y tectónico.

A estos mecanismos que ocurren en costas abiertas al Océano Pacífico se suma el efecto de los caudales efluentes en ríos importantes. Durante episodios de alta escorrentía, el eje hidráulico en las cercanías de la desembocadura tiende a peraltarse por el aumento del caudal. Este efecto es local y puede ser de relevancia en la generación de sobrepaso por oleaje en sectores donde las desembocaduras han sido canalizadas (e.g. Estero Marga Marga, en Viña del Mar), e inundación aguas arriba de las mismas. Su cuantificación es posible mediante modelos numéricos de uso común en ingeniería marítima. Es un fenómeno recurrente en Chile central, algunas veces con bastante dramatismo como el ocurrido en el año 1987 en la desembocadura del Río Maipo, afectando Santo Domingo y Lolleo en San Antonio (Winckler et al., 2015). Se debe observar que aumento desmesurados de la escorrentía, precipitaciones y caudales, se encuentra asociado a la presencia de la fase cálida del fenómeno conocido como El Niño – Oscilación Sur.

2.2.2 Nivel medio del mar absoluto y Nivel medio del mar relativo

Se debe considerar que el nivel medio del mar relativo del mar (NMMR) incluye tanto las variaciones del nivel del mar como del fondo marino donde se ubica el mareógrafo, estas últimas causadas por la actividad tectónica. Estos resultados no son directamente comparables con los del nivel absoluto del mar (NMMA) que usualmente se reporta en estudios de tipo climático. En el capítulo 3 se presenta un análisis histórico del NMMR obtenido a partir de registros de mareógrafos en tanto que las proyecciones a partir de modelos climáticos globales contemplan sólo el NMMA.

2.3 METODOLOGÍA DE CÁLCULO UTILIZADA EN ESTE INFORME

En esta sección se presenta la metodología de cálculo utilizada para evaluar el cambio de las variables de oleaje (marejadas) y nivel medio del mar entre las ventanas de tiempo histórico y futuro.

2.3.1 Definiciones

Sea $x(\phi, \lambda, t)$ una variable que depende de la latitud (ϕ), longitud (λ) y tiempo (t). Esta variable es analizada mediante N modelos, tanto para las ventanas de tiempo histórico y futuro. Se introduce la siguiente terminología

$$x_{(i,j,\tau)}^{(n,v)}$$

Donde $i = 1 \dots I$, $j = 1 \dots J$ y $\tau = 1 \dots T$ corresponden a los índices asociados a la latitud, longitud y tiempo, I y J representan la cantidad de nodos y T la cantidad de pasos de tiempo del análisis. El índice $n = 1 \dots N$ representa a cada modelo de un total de N . El índice binario $v = h, p$ representa las ventanas de tiempo analizadas, donde h representa el período histórico (01-01-1985 a 31-12-2004) y p el la proyección (01-01-2026 a 31-12-2045). Esto corresponde a 20 años de estadística. La decisión de usar la misma duración de las ventanas de tiempo asegura que se capturan fenómenos que ocurren en frecuencias comparables en ambos casos.

Para el modelo de nivel del mar, $x \equiv z$ representa la altura del nivel del mar respecto del geode en un mes específico, obtenido para $N = 32$ modelos mediante diferentes métodos de cálculo. Esta variable se conoce como *zos* (sea_surface_height_above_geoid) en la literatura especializada¹². La cantidad pasos de tiempo para el período histórico y la proyección es $T = 12 \times 20 = 240$.

Para el modelo de oleaje, $x \equiv Hs, Tm, Dm$ representan la altura significativa Hs , el período medio Tm y la dirección media Dm obtenidos para $N = 7$ modelos. La cantidad pasos de tiempo para el período histórico y la proyección es $T = 8 \times 365 \times 20 = 58.400$. Cabe mencionar que, a diferencia del nivel medio del mar donde se bajan datos de modelos corridos por otros agentes, en el oleaje se corren modelos a partir de datos de viento.

Con el objetivo de calcular el cambio en la variable $x(\phi, \lambda, t)$ se calcula la mediana y el percentil 99% para caracterizar el comportamiento medio y extremo, respectivamente. El percentil es una medida de posición que indica el valor de la variable por debajo del cual se encuentra un porcentaje dado de observaciones. Por ejemplo, el percentil 99° es el valor bajo el cual se encuentran el 99% de estas. La mediana corresponde al percentil 50. Estos estadígrafos se calculan tanto el tiempo y para los modelos.

¹² www.dkrz.de/up/services/data-management/projects-and-cooperations/ipcc-data/cmip5-variables/cmip5-ocean-variables

2.3.2 Cambio en valores medios

En primer lugar, se calcula la mediana temporal para la ventana de tiempo histórico en cada punto del dominio (Figura 12a)

$$x^{50(n,h)}_{(i,j)} = \text{mediana}_{\text{temporal}} \{x^{(n,v)}_{(i,j,\tau)}\}$$

y para la proyección (Figura 12b)

$$x^{50(n,p)}_{(i,j)} = \text{mediana}_{\text{temporal}} \{x^{(n,v)}_{(i,j,\tau)}\}.$$

Luego se calcula la diferencia entre ambas medianas temporales

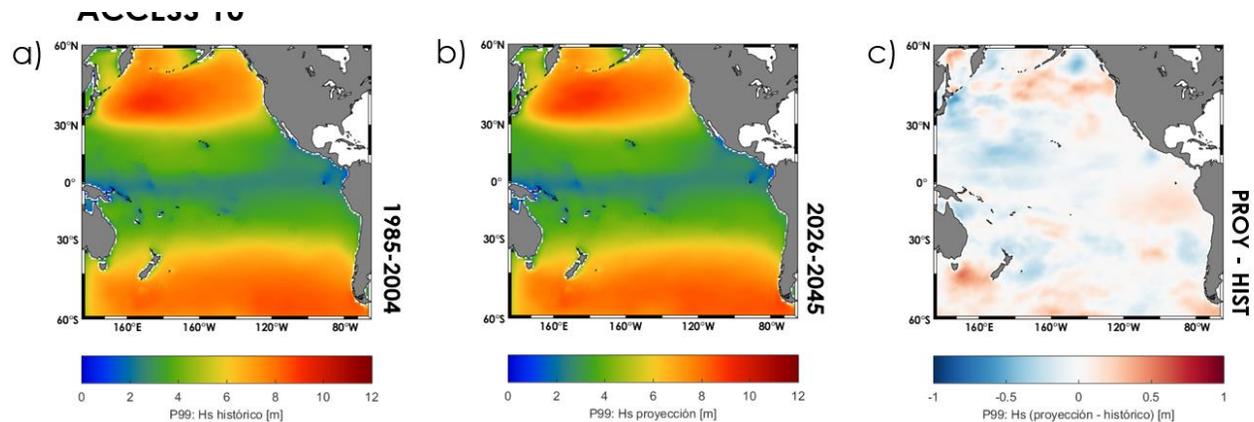
$$\Delta x^{50(n)}_{(i,j)} = x^{50(n,p)}_{(i,j)} - x^{50(n,h)}_{(i,j)}.$$

Finalmente, se calcula la mediana de esta diferencia entre modelos (Figura 12c)

$$\Delta x^{50}_{(i,j)} = \text{mediana}_{\text{modelo}} \{\Delta x^{50(n)}_{(i,j)}\}.$$

Como expresa la notación, esta diferencia se calcula para todo el dominio espacial definido por los nodos (i, j) . Este valor es lo que se denomina *ensemble mean* en la literatura especializada.

Figura 12: Mediana temporal para las ventanas de tiempo histórico (a) y proyección (b), además de la diferencia entre las medianas temporales entre modelos (c) cada punto del dominio. Este ejemplo corresponde al percentil 99% de la altura significativa espectral.

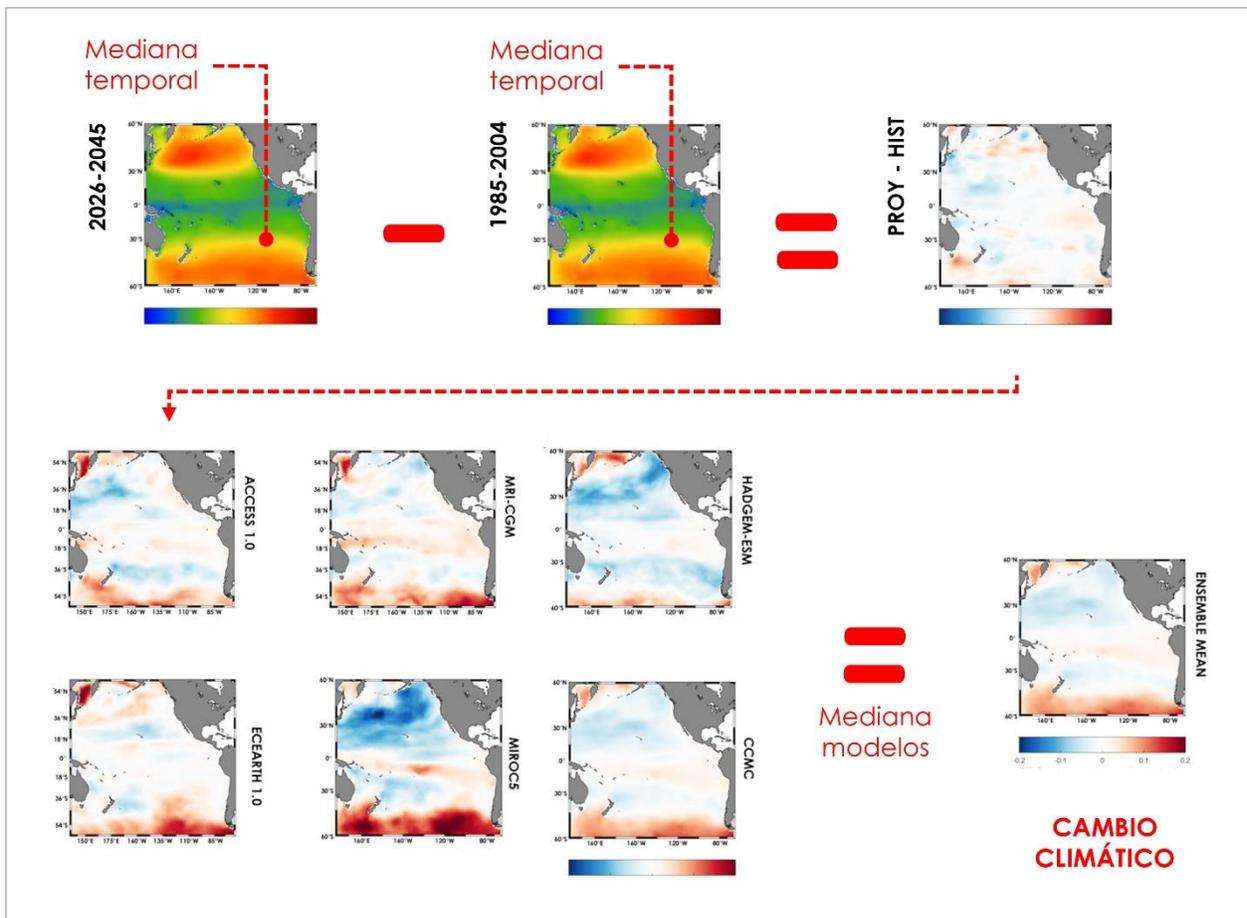


El *ensemble mean* es el promedio de las proyecciones de múltiples modelos climáticos cuantitativos para una variable. Un modelo predice el cambio de una variable climática, basado en un conjunto específico de condiciones iniciales e incertidumbres conocidas y desconocidas. Las proyecciones individuales de los modelos no deben ser vistas como una imagen exacta del clima futuro, puesto que incluso múltiples proyecciones asociadas a un mismo modelo, no son

concordantes en sí. Esta variación en la proyección de cambio climático futuro crea la necesidad de resumir el conjunto de varias proyecciones en una proyección única. El ensemble mean resume un conjunto de proyecciones, pero no es necesariamente la medida más apropiada para el cambio climático. Es difícil definir cuándo utilizar el ensemble mean o una realización individual, especialmente cuando los modelos muestran cambios negativos y positivos en un mismo punto.

En dicho caso la media mostraría cambios cercanos a cero pero la dispersión indica mayor incertidumbre. La Figura 13 muestra el esquema general de cálculo del efecto del cambio climático para una variable genérica.

Figura 13: Esquema general del cálculo del efecto del cambio climático. Arriba se replica el cálculo presentado en la Figura 12. En la sección de abajo se muestra la diferencia entre medianas para los 6 modelos utilizados, a partir de la cual se calcula la mediana entre modelos.



2.3.3 Cambio en valores extremos

Análogamente, para los valores extremos se calcula el percentil 99% para la ventana de tiempo histórico

$$x_{(i,j)}^{99(n,h)} = \underset{\text{modelo}}{\text{percentil 99}} \left\{ x_{(i,j,\tau)}^{(n,v)} \right\}$$

y para la proyección

$$x_{(i,j)}^{99(n,p)} = \underset{\text{modelo}}{\text{percentil 99}} \left\{ x_{(i,j,\tau)}^{(n,v)} \right\}.$$

Luego se calcula la diferencia entre ambas medianas temporales

$$\Delta x_{(i,j)}^{99(n)} = x_{(i,j)}^{99(n,p)} - x_{(i,j)}^{99(n,h)}.$$

Finalmente, la mediana de esta diferencia entre modelos

$$\Delta x_{(i,j)}^{99} = \underset{\text{modelo}}{\text{mediana}} \left\{ \Delta x_{(i,j)}^{99(n)} \right\}$$

se calcula para todo el dominio espacial definido por los nodos (i, j) . Para el nivel del mar, se tiene pocos valores (30 app.) por lo que no tiene sentido definir el percentil 99%. Por ello, se reporta el rango (máximo, mínimo) además de la mediana.

2.3.4 Escenarios climáticos futuros

Para efectos de las proyecciones, el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC¹³) ha definido escenarios futuros de emisiones que han ido variando en el tiempo. A continuación se describe la evolución en estos escenarios.

- En el Primer Informe de Evaluación (**FAR**¹⁴, 1990) se definieron 5 escenarios para ilustrar la evolución que pudiesen tener las emisiones de gases de efecto invernadero. Los tres primeros escenarios fueron: 2030 High Emissions, 2060 Low Emissions, Control Policies; el cuarto y quinto escenario se denominaron Accelerated Policies. Se realizaron proyecciones de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) para los años 2025, 2050, 2075 y 2100.
- En el Segundo Informe de Evaluación (**SAR**¹⁵, 1995) se publicaron 6 nuevos escenarios, los que contemplaron las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas que determinan las emisiones futuras de GEI. Los seis nuevos escenarios fueron: IS92c, IS92d, IS92b, IS92a, IS92f y IS92e.
- En el Tercer Informe de Evaluación (**TAR**¹⁶, 2001) se crearon 40 nuevos escenarios de emisiones (IE-EE) los cuales derivan de 4 líneas evolutivas de las emisiones de GEI (Familias A1, A2, B1 y B2).
- En el Cuarto Informe de Evaluación (**AR4**, 2007) se utilizaron los mismos escenarios publicados en TAR. En este informe estos escenarios fueron denominados SRES (Emission Scenarios).
- En el Quinto Informe de Evaluación (**AR5**, 2014) se introdujeron los escenarios RCP (Representative Concentration Pathways). Estos nuevos escenarios son cuatro: RCP 2.6 (escenario de mitigación de GEI), RCP 4.5, RCP 6.0 (escenarios de estabilización de GEI) y RCP 8.5 (escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI). Estos escenarios difieren de los escenarios utilizados en TAR y AR4 en que representan diferentes combinaciones de futuros económicos, tecnológicos, demográficos, institucionales y políticos (en cambio cada uno de los IE-EE asumían una línea evolutiva determinada).
- El sexto informe de evaluación (**AR6**) se publicará entre los años 2021 y 2022.

De acuerdo a los Términos de referencia, en este estudio se generan proyecciones con el escenario RCP8.5 del Quinto Informe de Evaluación (AR5).

¹³ El IPCC es una entidad científica creada en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, tiene por objeto proporcionar información objetiva, clara, equilibrada y neutral del estado actual de conocimientos sobre el cambio climático a los responsables políticos y otros sectores interesados.

¹⁴ FAR: First Assessment Report

¹⁵ SAR: Second Assessment Report

¹⁶ TAR: Third Assessment Report

2.4 REFERENCIAS

- Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., Aguirre, C., Valdivia, J., Parra, C., Méndez, L., Contreras, C., Winckler, P. Y Molina, M. (2016). Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. Valparaíso: Universidad de Valparaíso.
- Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H. Y Winckler, P. (2017). Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database. *Ocean Modelling*, N° 116, p 16–32.
- Beyá, J., y Winckler, P. (2013). Inundaciones Costeras, Más Allá de los Tsunamis. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*. Volumen 125, Número 2, pp. 63-81. (Incluido en *Revista Chilena de Ingeniería* N°469).
- Campos-Caba, R. (2016). Análisis de Marejadas Históricas y Recientes en la Costa de Chile. Memoria de título Ingeniería Civil Oceánica. Valparaíso: Universidad de Valparaíso.
- Carvajal, M., Contreras-Lopez, M., Winckler, P. Y Sepúlveda, I. (2017). Meteotsunamis Occurring Along the Southwest Coast of South America During an Intense Storm. *Pure and Applied Geophysics* 174(8): 3313–3323.
- Carvajal, M.; Winckler, P.; Contreras-Lopez, M., Sepúlveda, I. y Esparza, C. (2018). Las olas no son las únicas responsables: Fenómenos ocultos en marejadas recientes en Chile
- Catalán, P.A., Cienfuegos, R. Y Villagrán, M. Perspectives on the Long-Term Equilibrium of a Wave Dominated Coastal Zone Affected by Tsunamis: The Case of Central Chile, *Journal of Coastal Research*, 2014, SI 71, p. 55-61.
- Ciavola, P., y Coco, G. (2017). *Coastal Storms: Processes and Impacts*, First Edition, Wiley-Blackwell, pp. 266.
- CR2 (2018). Informe N°1 Proyecto "Simulaciones climáticas regionales para el continente Antártico y territorio insular Chileno". Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (FONDAP 1511009)
- Esparza, C. y Winckler, P. (2017). Un análisis exhaustivo de las marejadas en la bahía de Valparaíso. XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, SOCHID. Valparaíso, Octubre de 2017.
- Harley, M. (2017). Coastal Storm Definition. In book: *Coastal Storms: Processes and Impacts*, First Edition, Chapter: 1, Wiley-Blackwell, Editors: Giovanni Coco, Paolo Ciavola, pp.1-22.
- Holthuijsen, L. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- Ibaceta, I., Díaz, H., Winckler, P., Catalán, P., Agredano, R., Molteni, F. Y Campos-Caba, R. (2017). Evolución morfológica de playas en la escala de tormentas. Aplicación del modelo Xbeach en la Playa Reñaca. En: XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, SOCHID. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. W. (1962). Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats'. *Journal of Fluid Mechanics*, 13(4), 481-504.
- Martínez, C., Contreras-López, M., Winckler, P., Hidalgo, H., Godoy, E. Y Agredano, R. (2018). Coastal erosion in central Chile: A new hazard?, *Ocean & Coastal Management*, 156: 141-155.
- Molteni, F., Winckler, P. Y Ibaceta, R. (2017). Análisis morfodinámico simplificado de playa ante forzantes oceanográficos y tectónicos. En: XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, SOCHID. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Puelma, A; Vásquez, J. y Guerrero, F. (2016). Marejadas costa afuera, pronósticos de oleaje local y cierres de puerto. VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria. Sociedad Chilena De Ingeniería Hidráulica.
- Pugh, D., & Woodworth, P. (2014). *Sea-level science: understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*. Cambridge University Press.

Roland, A. Development of the WWM II (Wind Wave Model II). Spectral Wave Modelling on Unstructured Meshes. (Tesis doctoral) TU Darmstadt, Alemania, 2009.

SERVIMET. (2016). Servicio Meteorológico de la Armada, Análisis de eventos de marejadas en las costas de Chile. Valparaíso, Chile.

SHOA (1999). Glosario de mareas y corrientes. Pub.3013.

SHOA (1999). Método oficial para el cálculo de los valores no –armónicos de la marea, segunda edición. Publicación 3202.

SHOA. (2001). Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, Carta de Estados de Mar y Escala Douglas. Valparaíso, Chile.

SHOA. (2002). Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, Pub. 3103. Glosario de marea y corrientes. Valparaíso, Chile.

SHOA (2016). Tablas de Marea de las costas de Chile 2017. Publicación 3009.

Tolman, H. (2014). User manual and system documentation of WAVEWATCH III ®R version 4.18. Technical Note. Environmental Modeling Center. Marine Modeling and Analysis Branch, NOAA.

USACE (2011). Sea - level change considerations for civil works programs. Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers. Circular N° EC 1165-2-212. 32pp.

Wenze, J.M. (1998). Forma y structure for the Exchange of high precision tidal data. www.ife.uni-hannover.de

Winckler, P., Contreras-López, M., Reyes, M., Cortes, F., y Beyá, J. (2015). Evaluación de riesgos de infraestructura costera en un contexto de cambio climático. Elaborado para la Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas.

Winckler, P., Contreras-López, M., Campos-Caba, R., Beyá, J. Y Molina, M. (2017) El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile Central. Latin American Journal of Aquatic Research, 45(4): 622-648. DOI: 10.3856/vol45-issue4-fulltext-1.

Winckler, P. (2018). Modelado de procesos costeros. Universidad de Valparaíso.

Winckler, P., Esparza, C., Agredano, R. y Ibaceta, R. (2019). Nuevas metodologías para el estudio de marejadas en Chile. GEOLIBRO N° 29. "La zona costera en Chile: adaptación y planificación para la resiliencia". Eds. Hidalgo et al. Ediciones UC.

3 ESTUDIO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR

En este capítulo se efectúa un análisis histórico y se generan proyecciones para mediados de siglo del nivel medio del mar en la zona costera de Chile continental e insular, considerando el escenario de emisiones RCP 8.5 del IPCC. El análisis histórico del nivel medio del mar relativo a la cota de terreno (NMMR) se efectúa en 11 estaciones disponibles en la red mareográfica nacional. Se discuten además las pendientes de cambio obtenidas a partir del análisis histórico de dichos registros.

Las proyecciones del nivel medio bajo un escenario RCP 8.5 se efectúan para la proyección (2026 - 2045) utilizando los mismos 21 modelos del Fifth Assessment Report¹⁷ (Church et al., 2013a, 2013b). En este informe se reportan los cambios pronosticados para la totalidad de los modelos cada 0.5° latitud y sus interpolaciones cada 5 [km] a lo largo de todo el litoral continental del país.

Se debe considerar que el nivel medio del mar relativo del mar (NMMR) incluye tanto las variaciones del nivel del mar como las deformaciones de la corteza terrestre donde se ubica el mareógrafo, estas últimas causadas por el ciclo sísmico (Wyss, 1976; Albrecht y Shaffer, 2016; Montecinos et al., 2017). Estos resultados no son directamente comparables con los del nivel absoluto del mar (NMMA) que usualmente se reportan en estudios de tipo climático.

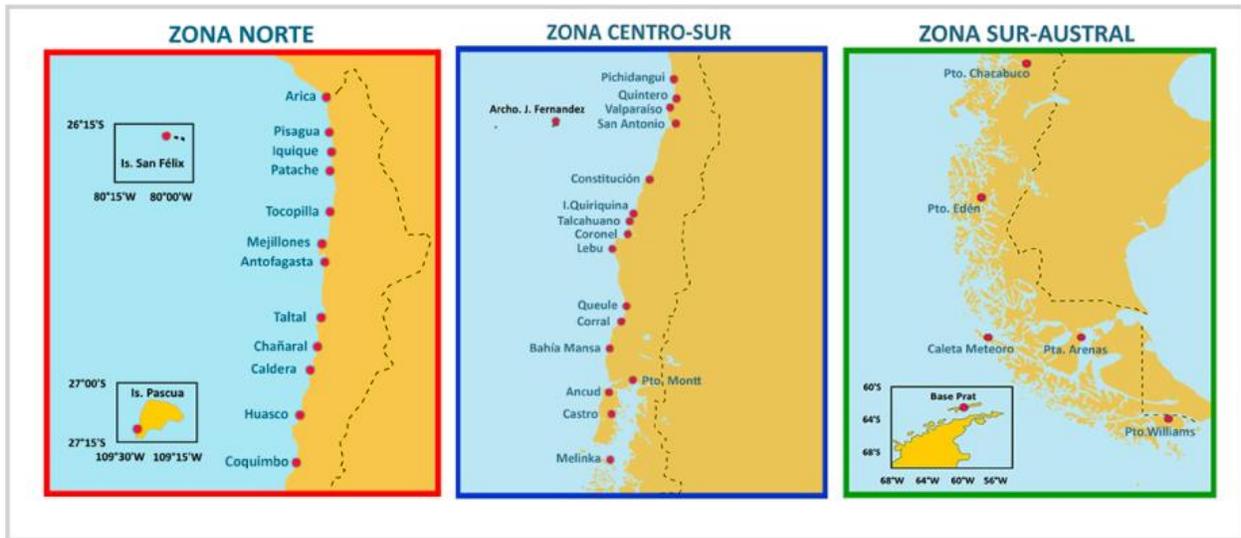
3.1 ANÁLISIS HISTÓRICO

Las mediciones del nivel del mar relativo a la cota del terreno (NMMR) comenzaron en enero de 1944 con el primer mareógrafo analógico instalado en Valparaíso, seguido de Puerto Montt (1945), Antofagasta (1945) y Soberanía (1964). Actualmente, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) mantiene una red mareográfica de 42 estaciones (Figura 14), 37 de las cuales se ubican en Chile continental, 3 en las islas y 1 en la Antártida. Las estaciones se ubican en puertos con el objetivo de la seguridad de la navegación. Del total de estaciones de la red, solo 20 estaciones estaban activas antes del tsunami de Chile del 27 de febrero de 2010 (Contreras et al., 2012) y los 22 restantes fueron instaladas posteriormente para mejorar el Sistema Nacional de Alerta de Tsunami (SNAM). Actualmente las estaciones constan de radares y sensores de presión que proporcionan registros de intervalos de 1 minuto, en tiempo real. Los datos proporcionados por SHOA para efectos de este estudio, sin embargo, corresponden a registros de 1 hora referenciados al Nivel de Reducción de Sondas local¹⁸.

¹⁷ Los modelos son ACCESS1-0, ACCESS1-3, CCSM4, CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, CanESM2, GFDL-CM3, GFDL-ES-M2G, GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, NorESM1-M, NorESM1-ME, Inmcm4.

¹⁸ El Nivel de Reducción de Sondas, o NRS, corresponde al nivel de referencia altimétrico comúnmente utilizado en aplicaciones oceanográficas.

Figura 14: Red mareográfica nacional. Fuente: SHOA.



En general, solo 14 estaciones tienen registros que exceden los 30 años. Los registros en Rapa Nui, Punta Arenas y Base Prat, en la Antártida, fueron descartados debido a la falta de confianza en el dato y los numerosos gaps. Por lo tanto, seleccionamos 11 estaciones que contienen entre 32 y 73 años de datos (Tabla 1). Los valores del NMMR mensual se obtuvieron promediando los registros de 1 minuto. Las tendencias lineales se estimaron mediante el estimador Theil-Sen, con un intervalo de confianza del 95%. Nuestro análisis amplía las 7 estaciones llevadas a cabo anteriormente por Contreras et al. (2012, 2017).

Tabla 1: Estaciones mareográficas utilizadas en este estudio.

Estación	Latitud	Duración
Arica	18.5°S	1951 - 2016
Iquique	20.2°S	1984 - 2016
Antofagasta	23.7°S	1946 - 2016
Caldera	27.1°S	1950 - 2015
Coquimbo	30.0°S	1980 - 2016
Valparaíso	33.0°S	1944 - 2016
San Antonio	33.6°S	1985 - 2016
Talcahuano	36.7°S	1949 - 2015
Corral	39.9°S	1985 - 2016
Puerto Montt	41.5°S	1980 - 2016
Puerto Williams	54.9°S	1965 - 2016

Cabe mencionar que los registros disponibles de mareas presentan una calidad diversa como consecuencia de los cambios en las tecnologías de medición. Las primeras observaciones se realizaban por personal de la Armada en forma visual cada 1 hora sobre una referencia vertical graduada. Posteriormente fueron reemplazadas por medidores de marea analógicos (Metecraft) entre 1980 y 1985. La era digital comenzó en 1999 con el uso de sensores de presión y radares que transmiten en tiempo real a los satélites.

3.1.1 Metodología

Las tendencias lineales para la serie de tiempo del nivel medio mensual del mar se calcularon mediante el estimador no paramétrico propuesto por Theil-Sen (Theil, 1950; Sen, 1968). Este es un método basado en la mediana que, a diferencia del método de mínimos cuadrados, es estable ante la presencia de valores extremos o outliers (Wilcox, 2001; Sen, 1968). Este método se usa regularmente para derivar cantidades in situ a partir de técnicas de teledetección (Fernandes et al., 2005). El error estándar para cada estación j se calculó como

$$SE_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{i,j} - \hat{y}_{i,j})^2}{(N-2) \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}}, \quad (4)$$

donde $y_{i,j}$ son los datos y $\hat{y}_{i,j}$ los valores estimados obtenidos del ajuste lineal de Thiel-Sen durante un período de N años. Para configurar la incertidumbre, el intervalo del 95% se obtuvo mediante la expresión

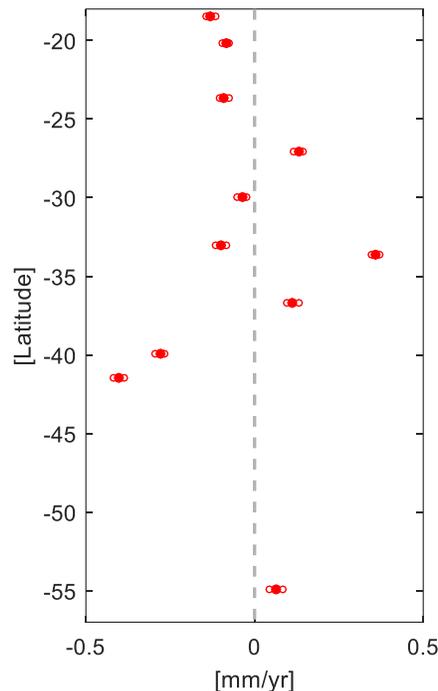
$$U_j = SE_j \times CV, \quad (5)$$

donde el valor crítico CV se obtuvo de la distribución t-Student con $N - 2$ grados de libertad, donde N es el número de años con observaciones.

3.1.2 Resultados

Las tendencias del NMMR para 11 mareógrafos (Figura 15) muestran una distribución espacial no homogénea en el margen continental, con estaciones que muestran aumentos de hasta 0,38 [mm/año] en San Antonio (33,6°S) o disminuciones de hasta -0,40 [mm/año] en Puerto Montt (41,5°S). Con excepción de Caldera (27,1°S), las estaciones del norte, que cubren un área de casi 1600 [km], muestran una caída de -0,13 a -0,04 [mm/año]. La porción central del país muestra una tendencia ascendente con valores máximos de 0,36 [mm/año] en San Antonio y 0,11 [mm/año] en Talcahuano (36,7°S). Los grandes cambios en las tendencias entre las estaciones vecinas de Valparaíso y San Antonio pueden atribuirse a los efectos locales. Hacia el sur, Corral (39,9° S) y Puerto Montt muestran las mayores caídas en el nivel del mar en todo el país. En el mar interior chileno (41°S - 47°S) no hay registros a largo plazo del nivel del mar, mientras que, en Puerto Williams, el aumento es relativamente pequeño. La incertidumbre, cuantificada por el intervalo de confianza del 95%, es pequeña debido a la buena longitud temporal de los datos.

Figura 15: Tasa anual de cambio del NMMR en 11 estaciones mareográficas cuya extensión abarca entre 32 y 73 años. En todos los trazados, los puntos rojos representan la media, mientras que los intervalos de confianza del 95% se muestran en barras y círculos horizontales.



3.1.3 Discusión

El nivel instantáneo del mar en un sitio particular resulta de la combinación de una serie de factores climáticos y geofísicos que actúan a diferentes escalas espaciales y temporales. Los drivers climáticos incluyen el nivel medio del mar a largo plazo, los cambios debidos a la variabilidad climática (por ejemplo, ENOS, estacionalidad), mareas, marejadas, meteotsunamis, el oleaje y ondas de infragravedad, entre otros. El hundimiento secular debido a causas naturales y antropogénicas, así como los cambios causados por los terremotos en los períodos cosísmicos, postsísmicos e intersísmicos, también juegan un papel importante en las zonas de subducción (sección 2.2.1).

La notable diferencia en las tendencias medias del nivel del mar para las ciudades vecinas de Valparaíso y San Antonio podría atribuirse a la compactación de sedimentos en la desembocadura del río Maipo, arriba de la cual se encuentra San Antonio. Esto, sin embargo, sigue siendo una especulación que requiere más estudios para ser probado. Siendo uno de los márgenes más activos sísmicamente del planeta (Giesecke et al., 2004), los cambios en el nivel medio del mar debido al cambio climático parecen ser menores en comparación con las deformaciones de la corteza provocadas por los terremotos. De hecho, la elevación costera y/o el hundimiento de hasta 3 [m] observados durante el período cosísmico de eventos recientes (e.g. Castilla, 1988; Farías et al., 2010) son comparables con siglos de cambio en el nivel del mar debido al cambio climático. De hecho, se espera que el nivel del mar aumente entre 0.34 y 0.74 [m] en la costa chilena para fines del siglo XXI (Albrecht y Shaffer, 2016). Por otra parte, la

distribución espacial no homogénea a lo largo del margen continental indica que la deformación de la corteza durante el período intersísmico también es más rápida que el aumento del nivel del mar (Montecino et al., 2017). Además de la tectónica, los eventos ENSO también son responsables de cambios significativos en el nivel medio del mar, causando un aumento de hasta 30 ~ 40 [cm] durante los fuertes años de El Niño y una caída del mismo orden en años de La Niña (Contreras et al., 2011; Reguero et al., 2015).

Las características distintivas del litoral chileno, donde el aumento del nivel del mar es a veces ensombrecido por la deformación de la corteza sísmica y ENOS, pueden utilizarse para comprender los efectos costeros a largo plazo debido al cambio climático (Silva et al., 2014). Esto es particularmente relevante para las áreas metropolitanas de Valparaíso, Concepción y Valdivia, ya que podrían ser las más expuestas a las inundaciones costeras para 2090 (Reguero et al., 2015). El hundimiento o levantamiento cosísmico cambia casi instantáneamente el nivel del mar local, afectando los ambientes costeros (Silva et al., 2014). Por ejemplo, el hundimiento de casi 2 [m] causado por el terremoto de Valdivia de 1960¹⁹ dramáticamente transformó las zonas bajas utilizadas para la agricultura en extensos humedales. Estas áreas, ricas en biodiversidad, compiten actualmente con desarrollos industriales y urbanos. Otro efecto significativo ha sido la reubicación de ciudades originalmente otrora localizadas en áreas bajas debido a inundaciones por tsunamis (por ejemplo, Arica, Lolleo, Penco y Toltén) hacia tierras altas. Debido a la presión turística y urbana, las áreas vulnerables se han vuelto a habitar cada vez más.

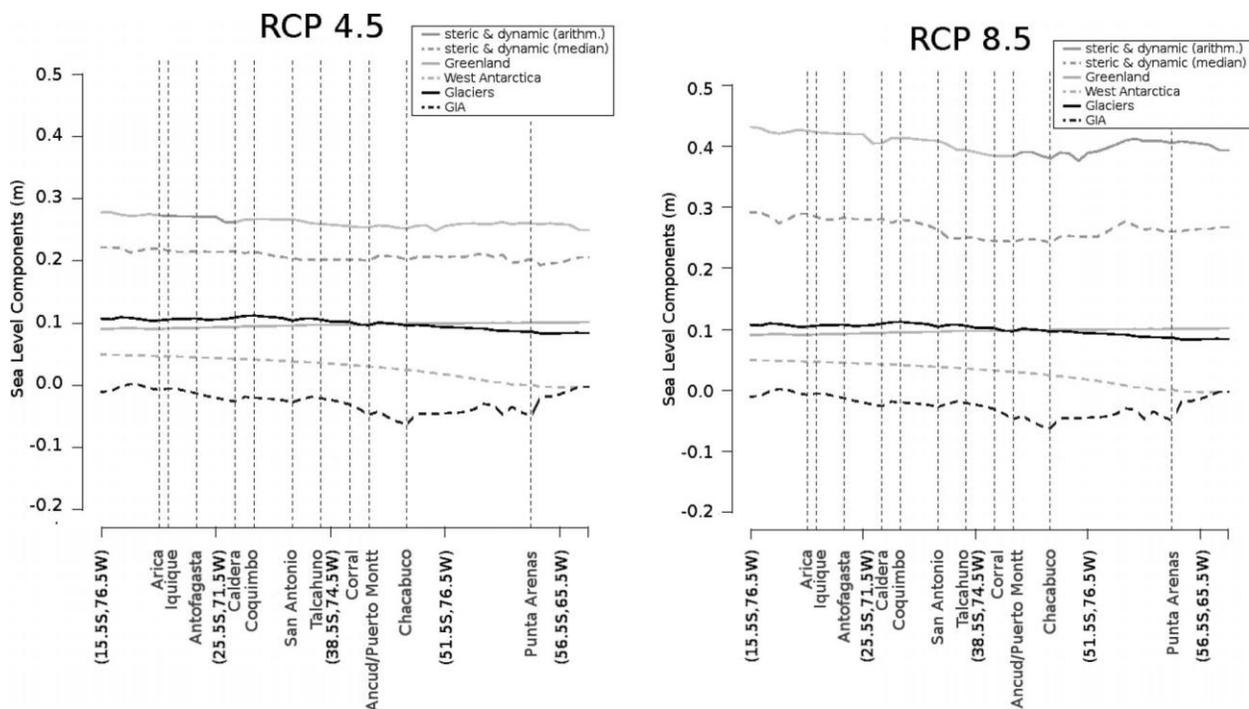
¹⁹ Esta subsidencia es comparable a 625 años de aumento del nivel del mar impulsado por el clima de acuerdo con las tendencias mundiales actuales de 3.2 [mm/año] entre 1993-2010 (Church et al., 2013).

3.2 PROYECCIONES

3.2.1 Revisión de estudios previos

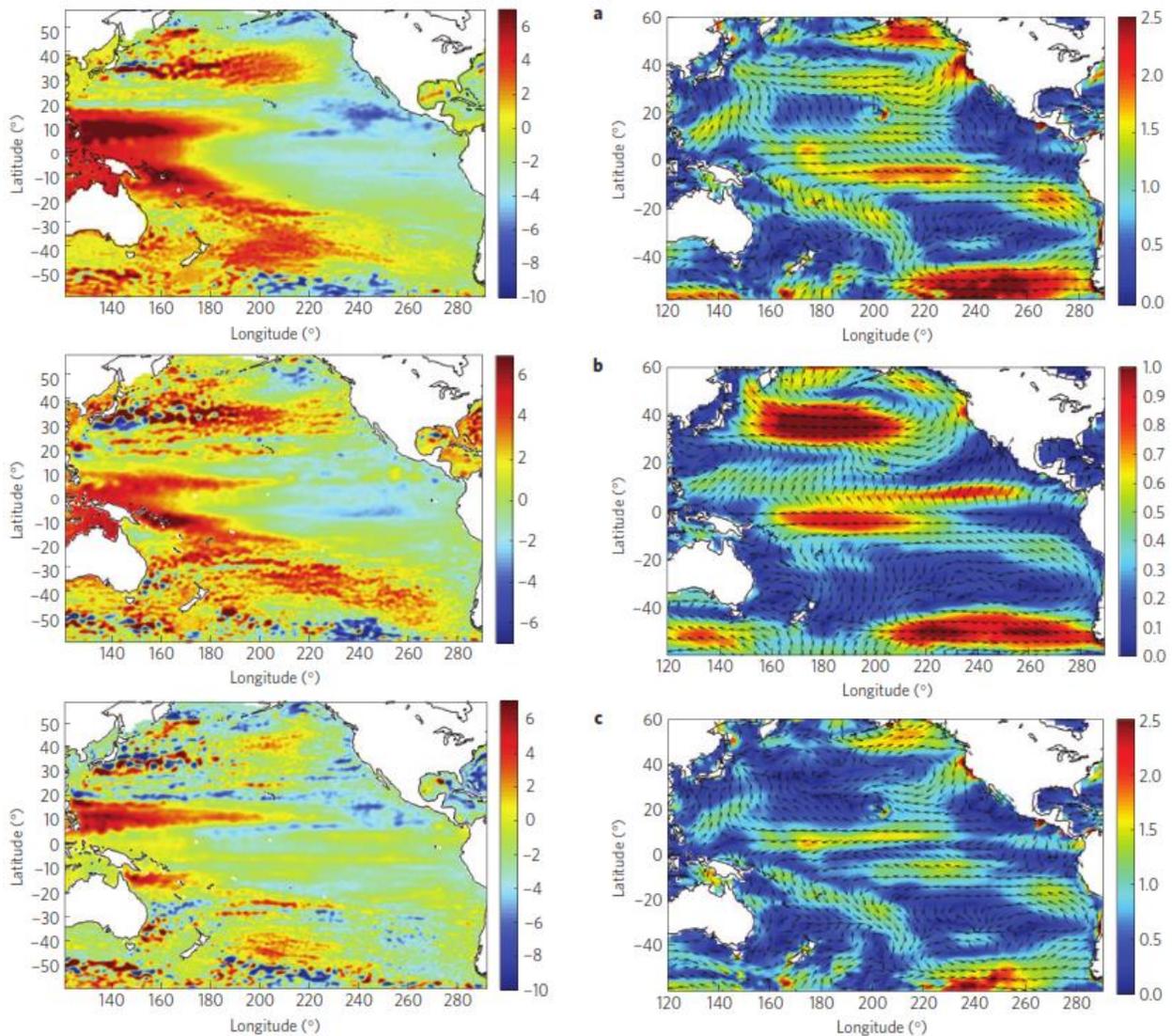
Existen escasos estudios que analicen los cambios del NMMR en Chile (e.g. Contreras et al. (2012); Albrecht & Shaffer, 2016; Montecino et al., 2017). Albrecht & Shaffer (2016), por ejemplo, utilizaron 17 modelos para estimar los cambios del nivel del mar a fines del siglo XXI con una resolución 1° bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. En su trabajo, encuentran que el ascenso total del nivel del mar a lo largo de la costa está en el rango de 34 a 52 [cm] para RCP4.5, y entre 46 y 74 [cm] para RCP8.5, dependiendo de la ubicación y del estimador (mediana/media) del componente estérico/dinámico considerado, el cual es la principal contribución en cada escenario. Sin embargo, la metodología de Albrecht & Shaffer (2016) es diferente al enfoque aplicado en el AR5 (Church et al., 2013a, 2013b), el cual incluyó un análisis más completo de los diferentes forzantes y el grado de incertidumbre en los estimadores. Todos los estimadores muestran una modesta y constante disminución de norte a sur en el nivel del mar (Figura 16). Las costas de Chile, en general, no se encontrarían significativamente afectadas por el nivel del mar, respecto a la importancia relativa de las marejadas. Sin embargo, sectores bajos de varias ciudades importantes y centros turísticos están cerca de ese nivel. Algunas de estas ciudades son Iquique, Antofagasta, Coquimbo, La Serena, Viña del Mar, Valparaíso, Talcahuano, Valdivia, Puerto Montt y Punta Arenas.

Figura 16: Cambios del nivel del mar, estimados por componentes para fines de siglo en la costa de Chile (Albert & Shaeffer, 2016).



En la misma línea, Hamlington et al. (2014) utilizando el modelo global AVISO, concluyen que para en el Pacífico Sur, la variabilidad climática interna a nivel interdecadal puede oscurecer la tendencia real del nivel del mar a nivel regional. El estudio estima una tendencia de aproximadamente 1 [mm/año] frente a las costas de Chile (Figura 17).

Figura 17: Estimaciones del nivel del mar realizadas por Hamlington et al. (2014). Izquierda: (a) Tendencia del nivel del mar (mm/año) en el Océano Pacífico a partir de datos AVISO (1993-2010), (b) Contribución de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), (c) Diferencia AVISO menos PDO. Derecha: (a) Tendencia del estrés del viento (mPa/año) en el Océano Pacífico a partir de datos ORA-S3 (1993-2010), (b) Contribución de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), (c) Diferencia ORA-S3 menos PDO.



3.2.2 Modelos utilizados en este estudio

En este estudio se utilizaron los resultados correspondientes al análisis de los mismos 21 modelos procesados para la preparación del AR5 (Church et al., 2013a, 2013b). Estos modelos simulan el ascenso medio del nivel del mar asociado a expansión térmica, junto con resultados del periodo preindustrial; este último, necesario para remover la expansión térmica causada por la deriva climática en las temperaturas del océano profundo. Esta deriva fue sustraída a través de un ajuste polinomial como función del tiempo, aplicado a las series de tiempo control de la expansión térmica (Church et al., 2013b). Los datos corresponden a altura relativa del nivel del mar (sea surface height, SSH), los cuales fueron usados para la construcción de las figuras del IPCC-AR5. Estos resultados representan el efecto de 10 forzantes geofísicos que influyen en los cambios a largo plazo de la altura relativa del nivel del mar:

- 5 componentes de hielo
 - Dinámica del hielo en Groenlandia
 - Balance superficial de hielo en Groenlandia
 - Dinámica del hielo en Antártica
 - Balance superficial de hielo en Antártica
 - Glaciares

- 3 componentes oceánicos
 - Altura relativa del nivel del mar
 - Anomalía global de la altura termostérica del nivel del mar
 - Efecto de barómetro invertido

- Almacenamiento de agua en tierra

- Ajuste isostático glacial (cambio del nivel del mar respecto a la tierra)

La presentación de los datos corresponde a una grilla de $1^\circ \times 1^\circ$, en un dominio espacial de -90°N a 90°N y 0°E a 360°E . El periodo de tiempo abarcado 94 años entre 2007 y 2100, con periodicidad anual²⁰. La información de estos modelos fue complementada con otros 11 obtenidos a partir de la plataforma del Proyecto de Inter-comparación de Modelos de Clima Acoplados²¹, fase 5 (CMIP5), del escenario RCP 8.5. La totalidad de los modelos del nivel del mar analizados se presentan en la Tabla 2 y su descripción se presenta en el Anexo 6.1.

²⁰ Esta data se puede acceder a través del link ftp://ftp-icdc.cen.uni-hamburg.de/ar5_sea_level_rise/.

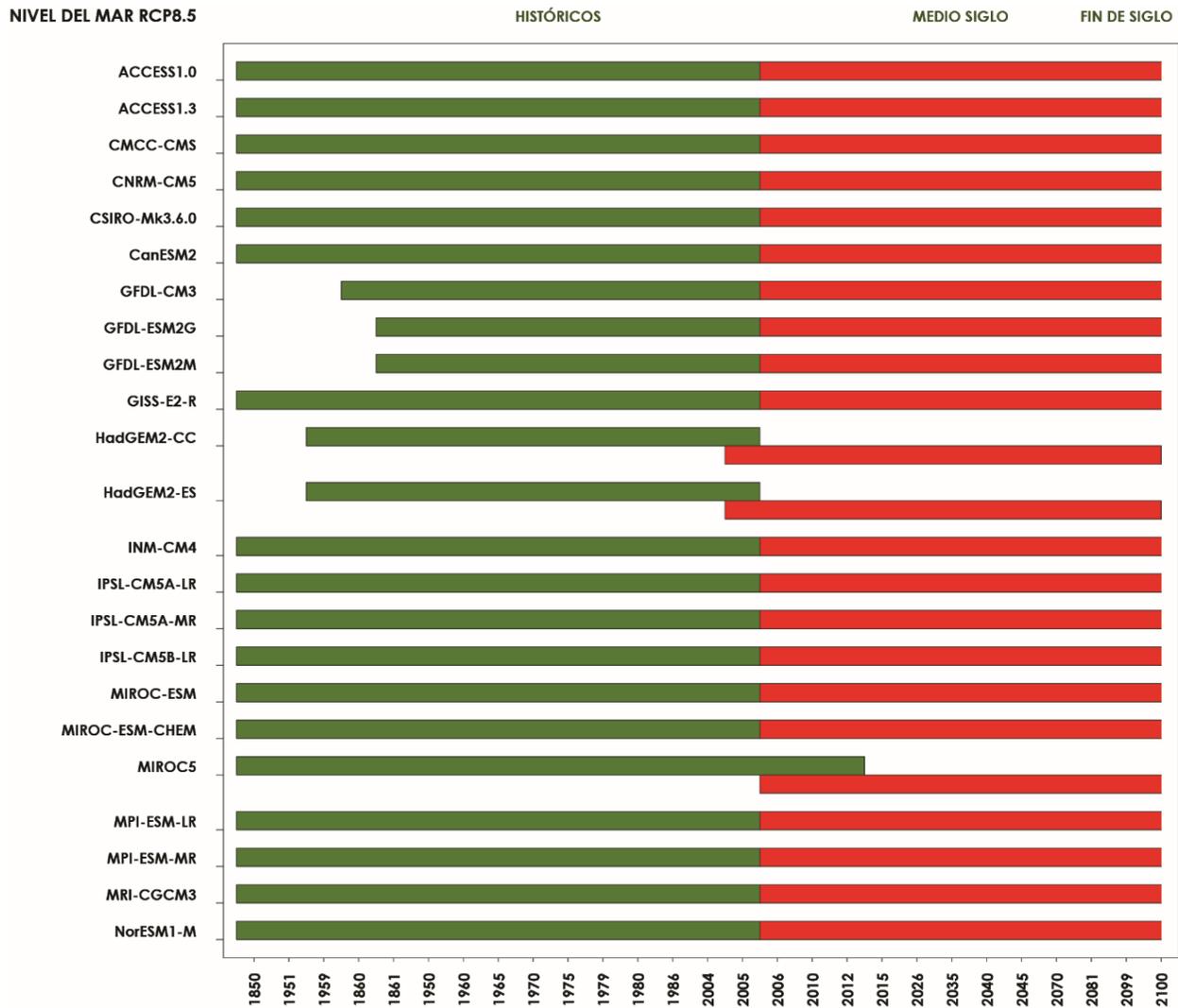
²¹ <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/>

Tabla 2: Modelos de nivel medio del mar utilizados en el estudio.

#	Nombre	1986-2005	RPC 8.5	País	Link
01	ACCESS 1.0	✓	✓	Australia	https://confluence.csiro.au/display/ACCESS
02	ACCESS 3.0	✓	✓		
03	CMCC-CESM	✓	✓	Italia	www.cmcc.it/models/cmcc-cm
04	CMCC- CM	✓	✓		
05	CMCC-CMS	✓	✓		
06	CNRM-CM5	✓	✓	Francia	http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article126&lang=en
07	CSIRO-MI3.6.0	Sin data	✓	Australia	https://confluence.csiro.au/public/CSIROMk360
08	CanESM2	Sin data	✓	Canadá	www.ec.gc.ca/ccmac-cccma/default.asp?lang=En&n=1A3B7DF1-1&wbdisable=true
09	FGOALS G2	Sin data	✓	China	www.lasg.ac.cn/fgoals/index2.asp
10	FGOALS S2.0	Sin data	✓		www.lasg.ac.cn/fgoals/index2.asp
11	GFDL CM3	✓	✓	EEUU	www.gfdl.noaa.gov/earth-system-model
12	GFDL ESM2-G	✓	✓		
13	GFDL ESM2-M	✓	✓		
14	GISS-E2 R	Sin data	✓	EEUU	https://data.giss.nasa.gov/modelE/ar5/
15	GISS-E2 R-CC	Sin data	✓		
16	HadGEM2 CC	Sin data	✓	Falta	https://portal.enes.org/models/earthsystem-models/metoffice-hadley-centre/hadgem2-es
17	HadGEM2 ES	Sin data	✓		
18	INM-CM4	✓	✓	Rusia	https://link.springer.com/content/pdf/10.1134%2FS000143381004002X.pdf
19	IPSL-CM5 A-LR	✓	✓	Francia	https://portal.enes.org/models/earthsystem-models/ipsl/ipslesm
20	IPSL-CM5 A-MR	✓	✓		
21	IPSL-CM5 B-LR	✓	✓		
22	MIROC ESM	✓	✓	Japón	www.geosci-model-dev.net/4/845/2011/gmd-4-845-2011.html
23	MIROC ESM-CHEM	✓	✓		
24	MIROC 5	✓	✓		
25	MPI-ESM-LR	✓	✓	Alemania	www.mpimet.mpg.de/en/science/models/mpi-esm/
26	MPI-ESM-MR	✓	✓		
27	MRI CGCM3	✓	✓	Japón	www.mri-jma.go.jp/Publish/Technical/DATA/VOL_64/index_en.html
28	MRI ESM1	✓	✓		
29	NorESM1 M	Sin data	✓	Noruega	www.geosci-model-dev.net/6/687/2013/gmd-6-687-2013.html
30	NorESM1 ME	Sin data	✓		
31	BCC CSM1	Sin data	✓	China	www.stevenphipps.com/publications/wu2014_j_meteor_res.pdf
32	BCC CSM1m	Sin data	✓		

Cabe notar que, a diferencia de los modelos de oleaje (Figura 32), los modelos de nivel del mar cubren rangos bastante más amplios y sin lagunas temporales. La Figura 18 muestra la disponibilidad histórica y futura de algunos de los modelos utilizados en este estudio. Debido a esta disparidad, se escogen los escenarios histórico (1985-2004) y futuro (2026-2045) de forma de tener estadística coincidente entre oleaje y nivel del mar.

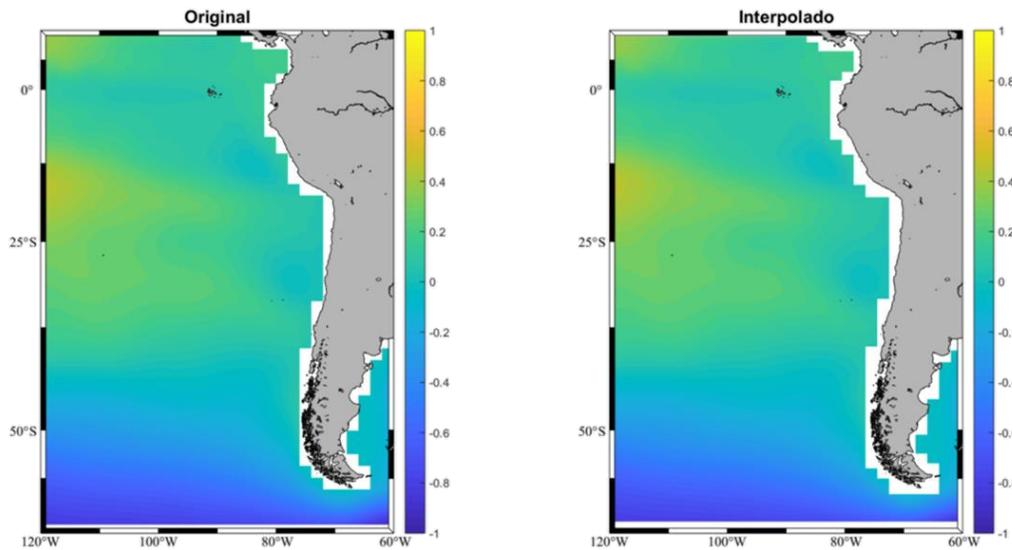
Figura 18: Modelos de nivel del mar para el período histórico (en verde), medio siglo y fin de siglo (rojo). Para el NMM, los modelos de predicción son continuos.



3.2.3 Metodología

Los datos están en formato NetCDF (Network Common Data Form), que permite el intercambio y manipulación entre usuarios. Para el procesamiento se diseñaron rutinas en Matlab, con el fin de explorar las dimensiones de cada archivo y variable, así como fusionar en una sola matriz aquellos resultados separados en intervalos decadales o en quinquenios. Se definió un dominio de trabajo (120°W-60°W; 10°N-60°S) y se obtuvieron matrices uniformes con interpolación espacial a 0.5° x 0.5°. Un ejemplo del dominio de interés y la interpolación se muestra en la Figura 19.

Figura 19: Dominio del estudio y ejemplo de interpolación a 0.5° a partir de los datos originales de un modelo.



Utilizando los píxeles de 0.5° x 0.5° más próximos a Chile continental, se procedió a una segunda interpolación lineal, dividiendo cada lado de píxel en 10 segmentos, para obtener píxeles de 0.05° x 0.05°. Debido a las diferencias en la curvatura de la tierra, esta segmentación se traduce en la resolución informada en la Tabla 3, que es cercana a los 5 [km] solicitados en los términos de referencia. Para Rapa Nui y el Archipiélago de Juan Fernández se replica la metodología, tomando los píxeles de 0.5° x 0.5° donde estos territorios insulares se encuentran.

Tabla 3: Tamaño pixeles finales de acuerdo a la latitud para Chile continental.

Latitud	Km	Pixel
59 - 60	111,7949295	5,0816
58 - 59	111,8038177	5,0820
57 - 58	111,8128891	5,0824
56 - 57	111,8221283	5,0828
55 - 56	111,8315277	5,0833
54 - 55	111,8410721	5,0837
53 - 54	111,8507614	5,0841
52 - 53	111,8605804	5,0846
51 - 52	111,8705139	5,0850
50 - 51	111,8805466	5,0855
49 - 50	111,8906784	5,0859
48 - 49	111,9008942	5,0864
47 - 48	111,9111786	5,0869
46 - 47	111,9215240	5,0873
45 - 46	111,9319077	5,0878
44 - 45	111,9423294	5,0883
43 - 44	111,9527664	5,0888
42 - 43	111,9632187	5,0892
41 - 42	111,9736633	5,0897
40 - 41	111,9840851	5,0902
39 - 40	111,9944763	5,0907
38 - 39	112,0048294	5,0911
37 - 38	112,0151215	5,0916
36 - 37	112,0253448	5,0921
35 - 36	112,0354767	5,0925
34 - 35	112,0455170	5,0930
33 - 34	112,0554504	5,0934
32 - 33	112,0652542	5,0939
31 - 32	112,0749283	5,0943
30 - 31	112,0844498	5,0947
29 - 30	112,0938110	5,0952
28 - 29	112,1029968	5,0956
27 - 28	112,1119995	5,0960
26 - 27	112,1208038	5,0964
25 - 26	112,1293869	5,0968
24 - 25	112,1377563	5,0972
23 - 24	112,1458893	5,0975
22 - 23	112,1537781	5,0979
21 - 22	112,1614075	5,0982
20 - 21	112,1687698	5,0986
19 - 20	112,1758499	5,0989
18 - 19	112,1826477	5,0992
17 - 18	112,1891479	5,0995
16 - 17	112,1953354	5,0998
15 - 16	112,2012177	5,1001
14 - 15	112,2067642	5,1003
13 - 14	112,2119827	5,1005
12 - 13	112,2168579	5,1008
11 - 12	112,2213898	5,1010
10 - 11	112,2255707	5,1012

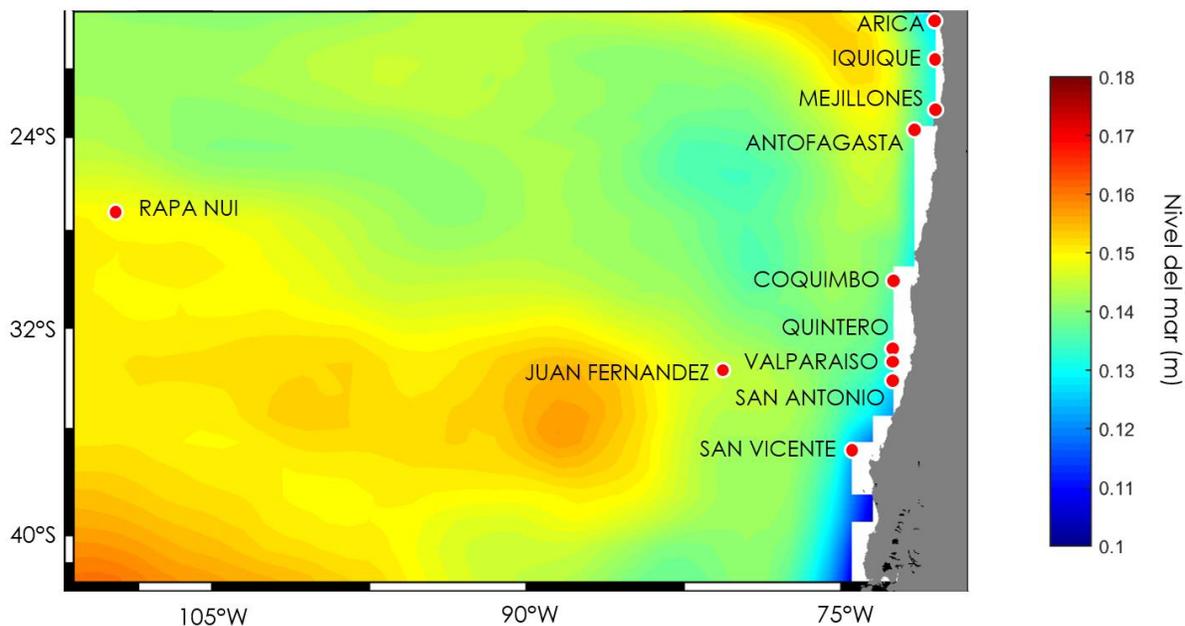
3.2.4 Resultados

Los resultados se presentan en los diversos formatos, dependiendo del uso que se le da en los diferentes análisis de vulnerabilidad y riesgo.

- Para el análisis de cota de inundación (capítulo 5), humedales y caletas se calcula la diferencia entre el período histórico y la proyección cada 0.5° en un transecto latitudinal frente al litoral de la costa de Chile, entre los 18°S (Arica) y el Canal Chacao, la cual es interpolada cada 5 [km].
- Para los puertos y playas se extraen los datos de nivel del mar en los nodos más cercanos en los cuales se efectúa la proyección (incluyendo también la proyección hasta 2100).

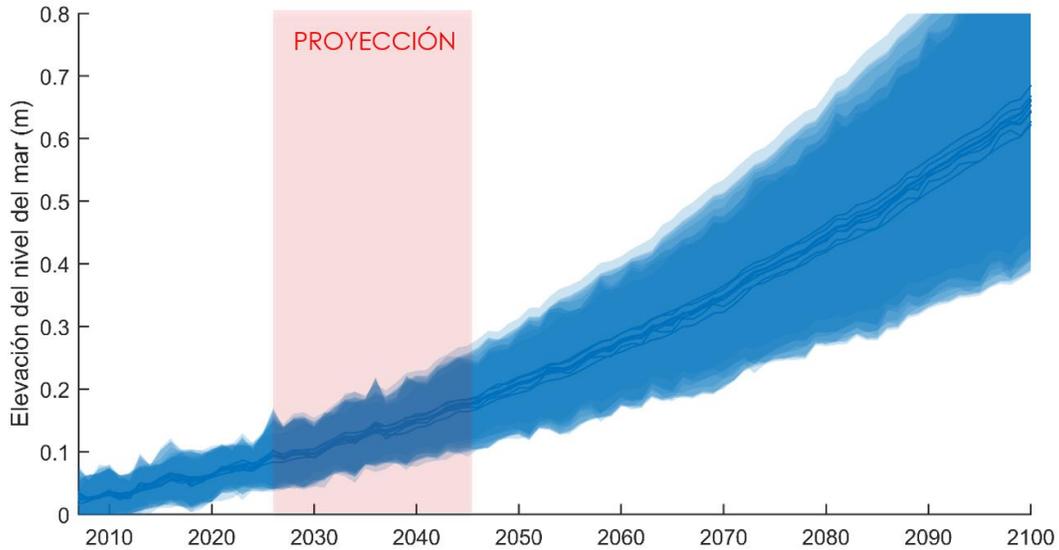
En la Figura 20 se muestra el mapa de distribución de la mediana (a partir de los 21 modelos del AR5) de las proyecciones del cambio del nivel del mar correspondiente al periodo 2026-2045. Se observa un gradiente latitudinal moderado, con valores en la mediana que van de 0.14 [m] en la zona norte, a 0.10 [m], hacia el sur de los 36°S, lo cual estaría asociado al efecto isostático de la región glaciaria en el sur de Chile.

Figura 20: Incremento del nivel del mar respecto entre la mediana de la proyección (2026-2045) respecto de la mediana del período histórico (1986-2005). Los puntos rojos corresponden a los nodos más cercanos a los puertos en los cuales se efectúa la proyección.



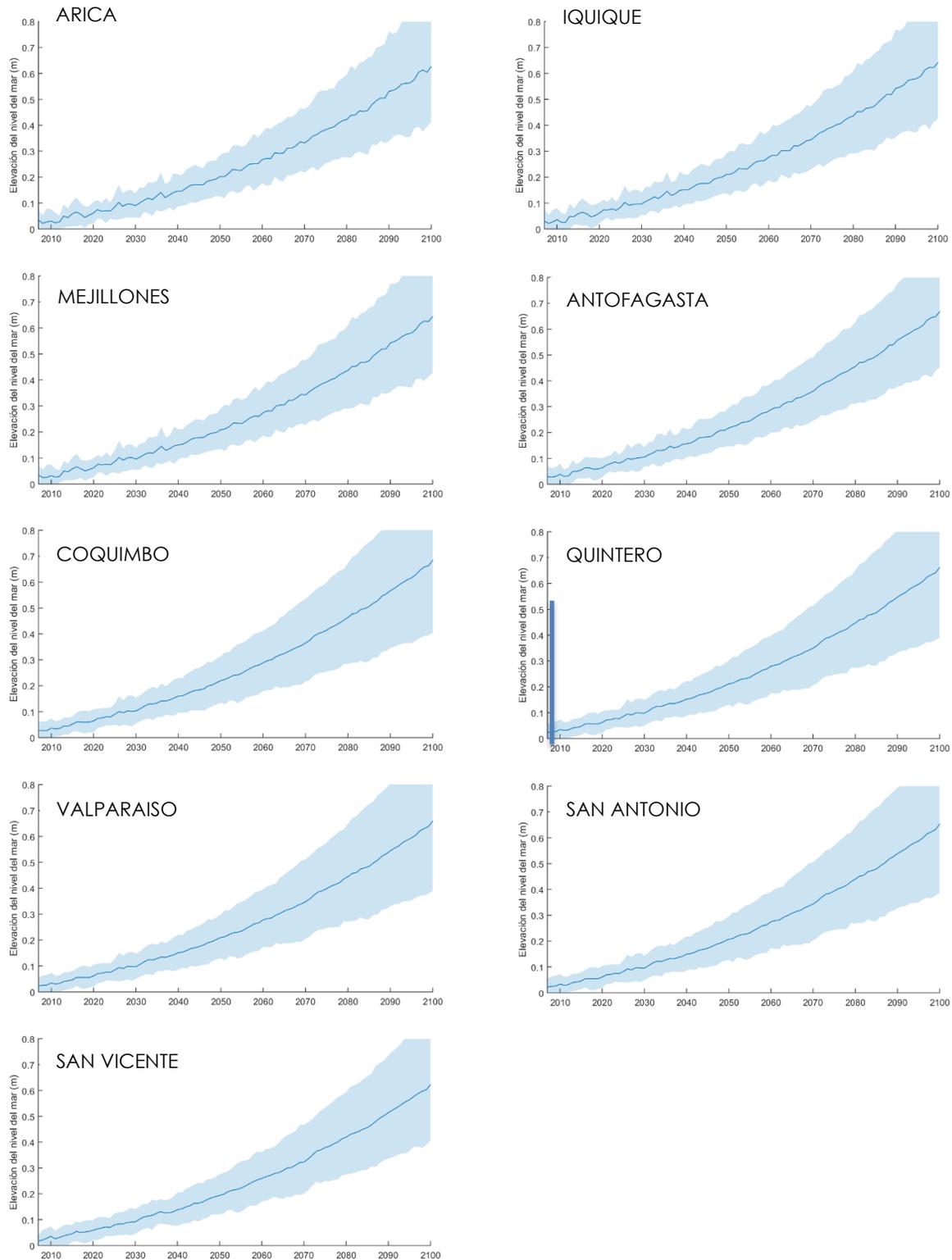
En la Figura 21 se presentan las proyecciones del cambio del nivel del mar, correspondientes al periodo 2010-2100, las cuales fueron calculadas en los nodos más cercanos a los principales puertos entre 18°S y 37°S, indicados en la Figura 20. La magnitud del ascenso en la proyección (2026-2045) fluctúa entre 0.15 y 0.18 [m] y el rango alcanzan del orden de ± 0.10 [m] a lo largo de Chile.

Figura 21: Valores de elevación del nivel del mar respecto al promedio 1986-2005 en [m], a partir de 21 modelos del CMIP5 (AR5). Las líneas corresponden a los puertos de Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio y San Vicente, junto con sus respectivas bandas de error. Se indica en un recuadro la ventana temporal a partir de la cual se estimó la mediana del periodo 2026-2045.



Al comparar los cambios del nivel relativo del mar respecto de la situación histórica para los 21 modelos para puertos seleccionados a lo largo de la costa de Chile (Figura 22), se observa un patrón similar y consistente a lo largo de la costa de Chile. Las proyecciones entre el periodo actual y la ventana 2026-2045 exhiben una tendencia aproximadamente lineal, la cual incrementa la tasa de aumento hacia la segunda mitad del siglo XXI. Estos resultados son consistentes con Slangen (2014) y Yan (2012). Cabe señalar que el trabajo de Aubrecht & Shaeffer (2016), enfocado también en las costas de Chile, no sigue precisamente la metodología de los trabajos mencionados, por lo que no es estrictamente comparable a los resultados de este estudio.

Figura 22: Proyecciones de elevación del nivel del mar respecto al promedio 1986-2005 en [m], a partir de 21 modelos del CMIP5 (AR5). Las líneas corresponden a la mediana y el celeste las bandas de error.



3.2.5 Discusión

En esta sección se revisaron los datos de modelos correspondientes al AR5, complementados con otros del CMIP5, luego de hacer una interpolación y representación de la proyección para nueve puertos representativos a lo largo de Chile.

Se observa un ascenso de entre 0.18 y 0.2 [m] en el nivel del mar para la proyección (2026-2045), con un gradiente latitudinal que disminuye de norte a sur. Esto es coherente con lo señalado por Albrecht & Shaffer (2016), aunque ambos estudios no son metodológicamente comparables. Los rangos de incertidumbre inter-modelos esperados para la proyección, son del orden de 0.1 [m].

Se recomienda ampliar el ámbito temporal de futuros estudios a la ventana 2070-2100, por cuanto es en este periodo (en 50 años más) donde se observarán los cambios más dramáticos en el ascenso del nivel del mar. Esta extensión temporal del estudio debiera realizarse en cuanto estén disponibles los resultados revisados del CMIP6, el cual debería entregar resultados mejorados de los modelos climáticos globales (GCM). Se recomienda asimismo incluir en futuros estudios a los escenarios RCP4.5 y RCP6.0, lo cual permitiría contar con diferentes escenarios de la evolución futura del nivel del mar.

Se hace necesario incluir en un nuevo estudio una evaluación en mayor profundidad de las proyecciones del nivel relativo del mar frente al aspecto sísmico.

3.3 REFERENCIAS

Albrecht, F., & Shaffer, G. (2016). Regional Sea-Level Change along the Chilean Coast in the 21st Century. *Journal of Coastal Research*, 32(6), 1322–1332. <http://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00192>.

Bentsen, M., Bethke, I., Debernard, J.B., Iversen, T., Kirkevåg, A., Seland, Ø., Drange, H., Roelandt, C., Seierstad, I.A., Hoose, C., Kristjánsson, J.E., 2013. The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate. *Geosci. Model Dev.* 6, 687–720. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-687-2013>

Bi, D., Dix, M., Marsland, S.J., O'Farrell, S., Rashid, H.A., Uotila, P., Hirst, A.C., Kowalczyk, E.A., Golebiewski, M., Sullivan, A., Yan, H., Hannah, N., Franklin, C.P., Sun, Z., Vohralik, P., Watterson, I., Zhou, X., Fiedler, R., Collier, M., Ma, Y., Noonan, J.M., Stevens, L.L., Uhe, P., Zhu, H., Griffies, S.M., Hill, R.K., Harris, C., Puri, K.D., 2014. The ACCESS coupled model: description, control climate and evaluation. *Aust. Meteorol. Oceanogr. J.* 63, 41–64.

Castilla, J.C. (1988). Earthquake-caused coastal uplift and its effects on rocky intertidal kelp communities. *Science* 242:440-443

CEPAL (2015). Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe. Dinámicas, tendencias y variabilidad climática. 265 p. Disponible en <https://www.cepal.org/es/publicaciones/3955-efectos-cambio-climatico-la-costa-america-latina-caribe-dinamicas-tendencias>

Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013: Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013: Sea Level Change Supplementary Material. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)].

Chylek, P., Li, J., Dubey, M.K., Wang, M., Lesins, G., 2011. Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM2. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 11, 22893–22907. <https://doi.org/10.5194/acpd-11-22893-2011>

Collier, M.A., Jeffrey, S.J., Rotstayn, L., Wong, K.-H., Dravitzki, S.M., Moeseneder, C., Hamalainenb, C., Syktus, J.I., Suppiaha, R., Antonyd, J., Zeind, A. El, Atif, M., 2011. The CSIRO-Mk3.6.0 Atmosphere-Ocean GCM: participation in CMIP5 and data publication, in: 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia, 12–16 December 2011. pp. 2691–2697.

Contreras, M., Winckler, P., y Molina, M. (2012). Implicancias de la variación del nivel medio del mar por cambio climático en obras de ingeniería costera de Chile. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*. Volumen 124, Número 2, pp. 53-66. (Incluido en *Revista Chilena de Ingeniería* N°466).

Contreras-López M, Torres R & Cevallos J (2017). "Tendencias del Nivel Medio del Mar en el litoral del Pacífico Sur Oriental" En Botello A, Villanueva S, Gutiérrez J y Rojas JL (eds.) *Vulnerabilidad de las zonas costeras de Latinoamérica al cambio climático*. Editorial Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) - Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) - Universidad Autónoma de Campeche (UAC), 165-176.

Delworth, T.L., Broccoli, A.J., Rosati, A., Stouffer, R.J., Balaji, V., Beesley, J.A., Cooke, W.F., Dixon, K.W., Dunne, J., Dunne, K.A., Durachta, J.W., Findell, K.L., Ginoux, P., Gnanadesikan, A., Gordon, C.T., Griffies, S.M., Gudgel, R., Harrison, M.J., Held, I.M., Hemler, R.S., Horowitz, L.W., Klein, S.A., Knutson, T.R., Kushner, P.J., Langenhorst, A.R., Lee, H.-C., Lin, S.-J., Lu, J., Malyshev, S.L., Milly, P.C.D., Ramaswamy, V., Russell, J., Schwarzkopf, M.D., Shevliakova, E., Sirutis, J.J., Spelman, M.J., Stern, W.F., Winton, M., Wittenberg, A.T., Wyman, B., Zeng, F., Zhang, R., 2006. GFDL's CM2 Global Coupled Climate Models. Part

I: Formulation and Simulation Characteristics. *J. Clim.* 19, 643–674. <https://doi.org/10.1175/JCLI3629.1>

Donner, L.J., Wyman, B.L., Hemler, R.S., Horowitz, L.W., Ming, Y., Zhao, M., Golaz, J.-C., Ginoux, P., Lin, S.-J., Schwarzkopf, M.D., Austin, J., Alaka, G., Cooke, W.F., Delworth, T.L., Freidenreich, S.M., Gordon, C.T., Griffies, S.M., Held, I.M., Hurlin, W.J., Klein, S.A., Knutson, T.R., Langenhorst, A.R., Lee, H.-C., Lin, Y., Magi, B.I., Malyshev, S.L., Milly, P.C.D., Naik, V., Nath, M.J., Pincus, R., Ploshay, J.J., Ramaswamy, V., Seman, C.J., Shevliakova, E., Sirutis, J.J., Stern, W.F., Stouffer, R.J., Wilson, R.J., Winton, M., Wittenberg, A.T., Zeng, F., 2011. The Dynamical Core, Physical Parameterizations, and Basic Simulation Characteristics of the Atmospheric Component AM3 of the GFDL Global Coupled Model CM3. *J. Clim.* 24, 3484–3519. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3955.1>

Dufresne, J.L., Foujols, M.A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benschila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., de Noblet, N., Duvel, J.P., Ethé, C., Fairhead, L., Fichefet, T., Flavoni, S., Friedlingstein, P., Grandpeix, J.Y., Guez, L., Guilyardi, E., Hauglustaine, D., Hourdin, F., Idelkadi, A., Ghattas, J., Joussaume, S., Kageyama, M., Krinner, G., Labetoulle, S., Lahellec, A., Lefebvre, M.P., Lefevre, F., Levy, C., Li, Z.X., Lloyd, J., Lott, F., Madec, G., Mancip, M., Marchand, M., Masson, S., Meurdesoif, Y., Mignot, J., Musat, I., Parouty, S., Polcher, J., Rio, C., Schulz, M., Swingedouw, D., Szopa, S., Talandier, C., Terray, P., Viovy, N., Vuichard, N., 2013. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5, *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>

Dunne, J.P., John, J.G., Adcroft, A.J., Griffies, S.M., Hallberg, R.W., Shevliakova, E., Stouffer, R.J., Cooke, W., Dunne, K.A., Harrison, M.J., Krasting, J.P., Malyshev, S.L., Milly, P.C.D., Philipps, P.J., Sentman, L.T., Samuels, B.L., Spelman, M.J., Winton, M., Wittenberg, A.T., Zadeh, N., 2012. GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *J. Clim.* 25, 6646–6665. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00560.1>

Dunne, J.P., John, J.G., Shevliakova, E., Stouffer, R.J., Krasting, J.P., Malyshev, S.L., Milly, P.C.D., Sentman, L.T., Adcroft, A.J., Cooke, W., Dunne, K.A., Griffies, S.M., Hallberg, R.W., Harrison, M.J., Levy, H., Wittenberg, A.T., Phillips, P.J., Zadeh, N., 2013. GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part II: Carbon System Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *J. Clim.* 26, 2247–2267. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00150.1>

Farías, M., Vargas, G., Tassara, A., Carretier, S., Baize, S., Melnick, D. & Bataille, K. (2010). Land-level changes produced by the Mw 8.8 2010 Chilean earthquake. *Science* 329(5994): 916-916.

Fernandes, R., & Leblanc, S. G. (2005). Parametric (modified least squares) and non-parametric (Theil–Sen) linear regressions for predicting biophysical parameters in the presence of measurement errors. *Remote Sensing of Environment*, 95(3), 303-316.

Giesecke, A., A. Gómez, I. Leschiutta, E. Migliorini & L. Rodríguez, 2004. The CERESIS earthquake catalogue and database of the Andean region: background, characteristics and examples of use. *Annals of Geophysics*, 47(2/3): 421–435.

Giorgetta, M.A., Jungclaus, J., Reick, C.H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H.-D., Ilyina, T., Kinne, S., Kornblueh, L., Matei, D., Mauritsen, T., Mikolajewicz, U., Mueller, W., Notz, D., Pithan, F., Raddatz, T., Rast, S., Redler, R., Roeckner, E., Schmidt, H., Schnur, R., Segsneider, J., Six, K.D., Stockhause, M., Timmreck, C., Wegner, J., Widmann, H., Wieners, K.-H., Claussen, M., Marotzke, J., Stevens, B., 2013. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 5, 572–597. <https://doi.org/10.1002/jame.20038>

Gordon, H., Farrell, S.O., Collier, M., Dix, M., Rotstayn, L., Kowalczyk, E., Hirst, T., Watterson, I., 2010. The CSIRO Mk3.5 Climate Model., CAWCR Technical Report No. 021.

Griffies, S.M., Winton, M., Donner, L.J., Horowitz, L.W., Downes, S.M., Farneti, R., Gnanadesikan, A., Hurlin, W.J., Lee, H.C., Liang, Z., Palter, J.B., Samuels, B.L., Wittenberg, A.T., Wyman, B.L., Yin, J., Zadeh, N., 2011. The GFDL CM3 coupled climate model: Characteristics of the ocean and sea ice simulations. *J. Clim.* 24, 3520–3544. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3964.1>

Hamlington, B. D., Strassburg, M. W., Leben, R. R., Han, W., Nerem, R. S., & Kim, K. Y. (2014). Uncovering an anthropogenic sea-level rise signal in the Pacific Ocean. *Nature Climate Change*, 4(9), 782–785. <http://doi.org/10.1038/nclimate2307>.

Iversen, T., Seierstad, I.A., Kirkevåg, A., Drange, H., Debernard, J.B., Kristjansson, J.E., Bethke, I., Medhaug, I., Seland, Ø., Bentsen, M., Sand, M., 2013. The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 2: Climate response and scenario projections. *Geosci. Model Dev.* 6, 389–415. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-389-2013>

Li, L., Lin, P., Yu, Y., Wang, B., Zhou, T., Liu, L., Liu, J., Bao, Q., Xu, S., Huang, W., Xia, K., Pu, Y., Dong, L., Shen, S., Liu, Y., Hu, N., Liu, M., Sun, W., Shi, X., Zheng, W., Wu, B., Song, M., Liu, H., Zhang, X., Wu, G., Xue, W., Huang, X., Yang, G., Song, Z., Qiao, F., 2013. The flexible global ocean-atmosphere-land system model, Grid-point Version 2: FGOALS-g2. *Adv. Atmos. Sci.* 30, 543–560. <https://doi.org/10.1007/s00376-012-2140-6>

Martin, G.M., Bellouin, N., Collins, W.J., Culverwell, I.D., Halloran, P.R., Hardiman, S.C., Hinton, T.J., Jones, C.D., McDonald, R.E., McLaren, A.J., O'Connor, F.M., Roberts, M.J., Rodriguez, J.M., Woodward, S., Best, M.J., Brooks, M.E., Brown, A.R., Butchart, N., Dearden, C., Derbyshire, S.H., Dharssi, I., Doutriaux-Boucher, M., Edwards, J.M., Falloon, P.D., Gedney, N., Gray, L.J., Hewitt, H.T., Hobson, M., Huddleston, M.R., Hughes, J., Ineson, S., Ingram, W.J., James, P.M., Johns, T.C., Johnson, C.E., Jones, A., Jones, C.P., Joshi, M.M., Keen, A.B., Liddicoat, S., Lock, A.P., Maidens, A. V., Manners, J.C., Milton, S.F., Rae, J.G.L., Ridley, J.K., Sellar, A., Senior, C.A., Totterdell, I.J., Verhoef, A., Vidale, P.L., Wiltshire, A., 2011. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geosci. Model Dev.* 4, 723–757. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-723-2011>

Miller, R.L., Schmidt, G.A., Nazarenko, L.S., Tausnev, N., Bauer, S.E., Del Genio, A.D., Kelley, M., Lo, K.K., Ruedy, R., Shindell, D.T., Aleinov, I., Bauer, M., Bleck, R., Canuto, V., Chen, Y.-H., Cheng, Y., Clune, T.L., Faluvegi, G., Hansen, J.E., Healy, R.J., Kiang, N.Y., Koch, D., Lacis, A.A., LeGrande, A.N., Lerner, J., Menon, S., Oinas, V., Pérez García-Pando, C., Perlwitz, J.P., Puma, M.J., Rind, D., Romanou, A., Russell, G.L., Sato, M., Sun, S., Tsigaridis, K., Unger, N., Voulgarakis, A., Yao, M.-S., Zhang, J., 2014. CMIP5 historical simulations (1850-2012) with GISS ModelE2. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 6, 441–477. <https://doi.org/10.1002/2013MS000266>

Montecino, H. D., Ferreira, V. G., Cuevas, A., Cabrera, L. C., Báez, J. C. S., & De Freitas, S. R. (2017). Vertical deformation and sea level changes in the coast of Chile by satellite altimetry and tide gauges. *International Journal of Remote Sensing*, 38(24), 7551-7565.

University of Hamburg, Hamburg, Germany. 2019. Regional sea level data from IPCC AR5 distributed in netCDF format by the Integrated Climate Data Center (ICDC, icdc.cen.uni-hamburg.de).

Reguero, B.G., Losada, I.J., Díaz-Simal, P., Méndez, F.J., Beck, M.W. (2015). Effects of Climate Change on Exposure to Coastal Flooding in Latin America and the Caribbean. *PLoS ONE* 10(7): e0133409. doi:10.1371/journal.pone.0133409

Rotstayn, L.D., Jeffrey, S.J., Collier, M.A., Dravitzki, S.M., Hirst, A.C., Syktus, J.I., Wong, K.K., 2012. Aerosol- and greenhouse gas-induced changes in summer rainfall and circulation in the Australasian region: A study using single-forcing climate simulations. *Atmos. Chem. Phys.* 12, 6377–6404. <https://doi.org/10.5194/acp-12-6377-2012>

Schmidt, G.A., Kelley, M., Nazarenko, L., Ruedy, R., Russell, G.L., Aleinov, I., Bauer, M., Bauer, S.E., Bhat, M.K., Bleck, R., Canuto, V., Chen, Y.-H., Cheng, Y., Clune, T.L., Del Genio, A., de Fainchtein, R., Faluvegi, G., Hansen, J.E., Healy, R.J., Kiang, N.Y., Koch, D., Lacis, A.A., LeGrande, A.N., Lerner, J., Lo, K.K., Matthews, E.E., Menon, S., Miller, R.L., Oinas, V., Olosa, A.O., Perlwitz, J.P., Puma, M.J., Putman, W.M., Rind, D., Romanou, A., Sato, M., Shindell, D.T., Sun, S., Syed, R.A., Tausnev, N., Tsigaridis, K., Unger, N., Voulgarakis, A., Yao, M.-S., Zhang, J., 2014. Configuration and assessment of the GISS ModelE2 contributions to the CMIP5 archive. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 6, 141–184. <https://doi.org/10.1002/2013MS000265>

Scoccimarro, E., Gualdi, S., Bellucci, A., Sanna, A., Fogli, P.G., Manzini, E., Vichi, M., Oddo, P., Navarra, A., 2011. Effects of Tropical Cyclones on Ocean Heat Transport in a High-Resolution Coupled General Circulation Model. *J. Clim.* 24, 4368–4384. <https://doi.org/10.1175/2011jcli4104.1>

Sen, P (1968). Estimated of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *J Am Stat Assoc* 39:1379-1389

SHOA (1992). Glosario de mareas y corrientes. SHOA Pub. 3013.

SHOA (2018). Tablas de marea de la costa de chile 2018. SHOA Pub. 3009.

Silva, R., Martínez, M. L., Hesp, P. A., Catalan, P., Osorio, A. F., Martell, R., Fossati, M., Miot da Silva, G., Mariño-Tapia, I.,

Pereira, P., Cienguegos, R., Klein, A., and Govaere, G. (2014). Present and future challenges of coastal erosion in Latin America. *Journal of Coastal Research*, 71(sp1), 1-16.

Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger Jr, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal engineering*, 53(7), 573-588.

Theil, H. (1950), "A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. I, II, III", *Nederl. Akad. Wetensch., Proc.*, 53: 386–392, 521–525, 1397–1412.

Tjiputra, J.F., Roelandt, C., Bentsen, M., Lawrence, D.M., Lorentzen, T., Schwinger, J., Seland, Ø., Heinze, C., 2013. Evaluation of the carbon cycle components in the Norwegian Earth System Model (NorESM). *Geosci. Model Dev.* 6, 301–325. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-301-2013>

Tongwen, W.U., Lianchun, S., Weiping, L.I., Zaizhi, W., Hua, Z., Xiaoge, X.I.N., Yanwu, Z., Li, Z., Jianglong, L., Fanghua, W.U., Yiming, L.I.U., Fang, Z., Xueli, S.H.I., Min, C.H.U., Jie, Z., Yongjie, F., Fang, W., Yixiong, L.U., Xiangwen, L.I.U., Min, W.E.I., Qianxia, L.I.U., Wenyan, Z., Min, D., Qiqeng, Z., Jinjun, J.I., Li, L., Mingyu, Z., 2014. An Overview of BCC Climate System Model Development and. *J. Meteorological Res.* 28, 34–56. <https://doi.org/10.1007/s13351-014-3041-7>.Supported

Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Méliá, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maconnave, E., Moine, M.P., Planton, S., Saint-Martin, D., Szopa, S., Tyteca, S., Alkama, R., Belamari, S., Braun, A., Coquart, L., Chauvin, F., 2013. The CNRM-CM5.1 global climate model: Description and basic evaluation. *Clim. Dyn.* 40, 2091–2121. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y>

Volodin, E.M., Dianskii, N.A., Gusev, A. V., 2010. Simulating present-day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 46, 414–431. <https://doi.org/10.1134/s000143381004002x>

Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., Kimoto, M., 2010. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *J. Clim.* 23, 6312–6335. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1>

Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., Kawase, H., Abe, M., Yokohata, T., Ise, T., Sato, H., Kato, E., Takata, K., Emori, S., Kawamiya, M., 2011. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geosci. Model Dev.* 4, 845–872. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011>

Wilcox, R. (2001). *Fundamentals of Modern Statistical Methods: Substantially Improving Power and Accuracy*. Springer Science and Business Media.

Yukimoto, S., Adachi, Y., Hosaka, M., Sakami, T., Yoshimura, H., Hirabara, M., Tanaka, T.Y., Shindo, E., Tsujino, H., Deushi, M., Mizuta, R., Yabu, S., Obata, A., Nakano, H., Koshiro, T., Ose, T., Kitoh, A., 2012. A New Global Climate Model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 -Model Description and Basic Performance. *J. Meteorol. Soc. Japan* 90A, 23–64. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2012-a02>

Yukimoto, S., Yoshimura, H., Hosaka, M., Sakami, T., Tsujino, H., Hirabara, M., Tanaka, T.Y., Deushi, M., Obata, A., Nakano, H., Adachi, Y., Shindo, E., Yabu, S., Ose, T., Kitoh, A., 2011. Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) - Model Description. *Tech. Rep. Meteorol. Res. Institute, Meteorol. Res. Institute, Japan* 64, 83 pp.

4 ESTUDIO DE OLEAJE

En este capítulo se efectúa un análisis histórico y se generan proyecciones del oleaje en el borde costero de Chile continental e insular, considerando el escenario de emisiones RCP 8.5 del IPCC. El análisis histórico se efectúa en 19 nodos numéricos cada 2° (19°S-55°S) obtenidos del Atlas de Oleaje (Beyá et al., 2016) entre 1980 y 2015. Para cuantificar las condiciones futuras del oleaje (2026-2045) se usan 2 modelos climáticos globales (en adelante GCMs) como forzantes de viento para generar campos de oleaje en aguas profundas. Así, este informe de avance cumple con el objetivo de evaluar el clima de oleaje global histórico y futuro en aguas profundas, el que será complementado en futuras etapas del proyecto con más proyecciones en aguas profundas y resultados en la costa.

4.1 REVISIÓN DE ESTUDIOS SIMILARES

Se efectuó una revisión bibliográfica preliminar a partir de la cual se seleccionaron 15 publicaciones científicas que contienen información sobre predicciones del oleaje y otras variables significativas frente a Chile, como el viento. Las referencias consultadas, en orden cronológico, son las siguientes:

- Camus, P., Losada, I. J., Izaguirre, C., Espejo, A., Menéndez, M., & Pérez, J. (2017). Statistical wave climate projections for coastal impact assessments. *Earth's Future*, 5(9), 918-933.
- Casas-Prat, M., Wang, X. L., & Swart, N. (2018). CMIP5-based global wave climate projections including the entire Arctic Ocean. *Ocean Modelling*, 123, 66-85.
- CEPAL, N. (2015). Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: dinámicas, tendencias y variabilidad climática.
- Cofré, C., & Beyá, J. (2016). Proyecciones y tendencias en el clima de oleaje en las costas chilenas bajo escenarios de cambio climático. VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. San Antonio, 26.
- Cofré, C. (2018). Cambios esperados en el clima de oleaje de Chile para el siglo XXI. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
- Dobrynin, M., Murawsky, J., & Yang, S. (2012). Evolution of the global wind wave climate in CMIP5 experiments. *Geophysical Research Letters*, 39(18).
- Fan, Y., Lin, S. J., Griffies, S. M., & Hemer, M. A. (2014). Simulated global swell and wind-sea climate and their responses to anthropogenic climate change at the end of the twenty-first century. *Journal of Climate*, 27(10), 3516-3536.
- Hemer, M. A., Katzfey, J., & Trenham, C. E. (2013). Global dynamical projections of surface ocean wave climate for a future high greenhouse gas emission scenario. *Ocean Modelling*, 70, 221-245.
- Hemer, M. A., Fan, Y., Mori, N., Semedo, A., & Wang, X. L. (2013). Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble. *Nature climate change*, 3(5), 471.

- Mentaschi, L., Vousdoukas, M. I., Voukouvalas, E., Dosio, A., & Feyen, L. (2017). Global changes of extreme coastal wave energy fluxes triggered by intensified teleconnection patterns. *Geophysical Research Letters*, 44(5), 2416-2426
- Molina, M. (2011). Estudio no estacionario de clima medio de oleaje en la costa central de Chile. Memoria del proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico, Universidad de Valparaíso, Chile.
- Mori, N., Yasuda, T., Mase, H., Tom, T., & Oku, Y. (2010). Projection of extreme wave climate change under global warming. *Hydrological Research Letters*, 4, 15-19
- Mori, N., Shimura, T., Yasuda, T., & Mase, H. (2013). Multi-model climate projections of ocean surface variables under different climate scenarios—Future change of waves, sea level and wind. *Ocean Engineering*, 71, 122-129.
- Perez, J., Menendez, M., & Losada, I. J. (2017). GOW2: A global wave hindcast for coastal applications. *Coastal Engineering*, 124, 1-11.
- Semedo, A., Weisse, R., Behrens, A., Sterl, A., Bengtsson, L., & Günther, H. (2012). Projection of global wave climate change toward the end of the twenty-first century. *Journal of Climate*, 26(21), 8269-8288.
- Stocker, T. (Ed.). (2014). *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Cabe notar que en este informe 1 se incluye el análisis de los modelos históricos y de predicción de oleaje; su análisis y comparación con estos estudios se materializará en el Informe 3. De todos los estudios disponibles, solo los siguientes tienen en predicciones en la ventana de proyección contemplada en este estudio (2026-2045) para el escenario RCP 8.5:

- Cofré y Beyá (2016)
- Cofré et al. (2018)
- Dobrynin et al. (2012)
- Mentaschi et al. (2017)
- Stocker et al. (2014)

Los estudios de Cofré y Beyá (2016) y Cofré et al. (2018) no presentan mapas bidimensionales con las variables en cuestión, razón por la cual son analizados en función del formato disponible. El estudio de Dobrynin et al. (2012) efectúa un análisis a nivel del Pacífico sur, sin ofrecer información específica frente a las costas de Chile. El estudio de Mentaschi et al. (2017) analiza el flujo de energía extremo del oleaje, magnitud derivada que no es directamente comparable con las variables analizadas en este estudio (i.e altura significativa y período). El estudio de Stocker et al. (2014) no proporciona mapas comparables con este estudio.

Los restantes estudios presentan predicciones para fin de siglo (Camus et al., 2017; Casas-Prat et al., 2018) o están basados en los escenarios SRES²² (Fan et al., 2014; Hemer et al., 2013a; Hemer et

²² Special Reports on Emission Scenarios: escenarios usados en el tercer informe de evaluación del IPCC.

al., 2013b; Mori et al., 2013; Mori et al., 2010; Semedo et al., 2012; CEPAL, 2013). El estudio de Molina (2011) corresponde a una memoria de título donde no se efectúan proyecciones de clima de oleaje mediante escenarios de cambio climático. Aun cuando los resultados de CEPAL (2013) se basan en los escenarios SRES, se utilizarán de referencia.

Tabla 4: Variables relevantes obtenidas a partir de los estudios revisados.

VARIABLE	VIENTO		OLEAJE						COINCIDE?	
	Velocidad	Dirección	Altura significativa	Período	Dirección	Flujo energía extrema	Energía	Eventos extremos	Ventana temporal	RCP 8.5
AUTOR	U	Dir _u	Hs	T	Dir	WEF	E	N		
Camus et al. (2017)			✓	✓	✓				No	Sí
Casas-Prat et al. (2018)	✓	✓	✓	✓	✓				No	Sí
Cofré y Beyá (2016)			✓	✓	✓			✓	Sí	Sí
Cofré et al. (2018)			✓	✓	✓			✓	Sí	Sí
Dobrynin et al. (2012)	✓	✓	✓						Sí	Sí
Fan et al. (2014)	✓	✓	✓		✓		✓		Sí	SRES
Hemer et al. (2013a)			✓						No	SRES
Hemer et al. (2013b)			✓	✓	✓				No	SRES
Mentaschi et al. (2017)						✓			Sí	Sí
Mori et al. (2013)			✓	✓	✓				No	SRES
Mori et al. (2010)	✓	✓	✓						Parcial	SRES
Molina (2011)			✓	✓	✓				Parcial	No
Semedo et al. (2012)	✓	✓	✓	✓					No	SRES
Stocker et al. (2014)			✓	✓	✓				Sí	Sí
CEPAL (2016)	✓	✓	✓					✓	Sí	SRES

Tabla 5: Algunos detalles de los estudios de predicción de oleaje revisados.

Autor	Modelo utilizado	Escenario	Temperatura superficial del mar	Nivel medio del mar	Nivel total del mar	Velocidad del viento	Altura significativa	Periodo oleaje	Dirección oleaje	Flujo energía extrema	Energía del oleaje	Ventana temporal	Resolución temporal	Resolución espacial frente a Chile	Dominio
			SST	MSL	TWL	U	Hs	T	Dir	WEF	E				
Camus et al. (2017)	30 modelos CMIP5 GCM	RCP 4.5 RCP 8.5			✓		✓	✓	✓			1975-2004 2070-2100	Media anual Media estacional	0.25°	Global
Casas-Prat et al. (2018)	WWIII BCC-CSM1-1 MIROC5 GFDL-ESM2M EC-EARTH	RCP 8.5				✓	✓	✓	✓			1979 2081-2100		100 Km	Global
Cofré y Beyá (2016)	ACCESS1.0 BCC-CSM1.1 CNRM-CM5 GFDL-CM3 HadGEM2-ES INM-CM4 MIROC5 MRI-CMCG3	RCP 4.5 RCP 8.5					✓	✓	✓			1979-2015 2026-2045 2071-2100	Media anual Media interanual	1.0°	80°N – 80°S
Cofré et al. (2018)	ACCESS1.0 BCC-CSM1.1 CNRM-CM5 GFDL-CM3 HadGEM2-ES INM-CM4 MIROC5 MRI-CMCG3	RCP 4.5 RCP 8.5					✓	✓	✓			1980-2005 2026-2045 2081-2100	Media anual Media estacional	1.0°	80°N – 80°S
Dobrynin et al. (2012)	WAM EC-Earth	RCP 4.5 RCP 8.5				✓	✓					1850-1950 1950-2010 2010-2100		1.0°	

Autor	Modelo utilizado	Escenario	Temperatura superficial del mar	Nivel medio del mar	Nivel total del mar	Velocidad del viento	Altura significativa	Período oleaje	Dirección oleaje	Flujo energía extrema	Energía del oleaje	Ventana temporal	Resolución temporal	Resolución espacial frente a Chile	Dominio
			SST	MSL	TWL	U	Hs	T	Dir	WEF	E				
Fan et al. (2014)	WWIII GFDL CM2.1 HadCM3 ECHAM5 CMIP3 (ENS18)	(SRES) A1B	✓			✓	✓		✓		✓	1981-2009 2000-2100	Media estacional	0.5°	72°N-Antártica
Hemer et al. (2013a)	WWIII ECHAM 5 CSIROMk3.	(SRES) A2					✓					1979-2009 2070-2099	Media anual Media estacional	1.0°	80°N – 80°S
Hemer et al. (2013b)	Hemer et al. (2012) (Abrev.: HEA12): ECHAM5 CSIRO Mk3.5 Mori et al. (2010) (Abrev.: MEA10): 23 modelos CMIP3 Fan et al (2012) (Abrev.: FEA12): 18 modelos CMIP3 GFDL-CM2.1 Semedo et al. (2012) (Abrev.: SEA12): HadCM3 ECHAM4 Wang y Swail (2006) (Abrev.: WS06): HadCM3 ECHAM4 3 conjuntos CGCM2	HEA12: A2 MEA10: A1B FEA12: A1B SEA12: A1B WS06: A2, B2 y IS92a					✓	✓	✓			HEA12: 1979-2009 2070-2099 MEA10: 1979-2005 2075-2099 FEA12: 1979-2009 2070-2099 SEA12: 1059 -1990 2059-2100 WS06:1979-2009 2070-2099	Media anual Media estacional	HEA12: 1.0° MEA10: 1.25° SEA12: 0.5° FEA12: 0.5°	Global

Autor	Modelo utilizado	Escenario	Temperatura superficial del mar	Nivel medio del mar	Nivel total del mar	Velocidad del viento	Altura significativa	Período oleaje	Dirección oleaje	Flujo energía extrema	Energía del oleaje	Ventana temporal	Resolución temporal	Resolución espacial frente a Chile	Dominio
			SST	MSL	TWL	U	Hs	T	Dir	WEF	E				
Mentaschi et al. (2017)	WWIII 6 modelos CMIP5	RCP 8.5								✓		1970-2100		1.5°	80°N – 80°S
Mori et al. (2013)	CMIP3 AR4 MRI-AGCM3.1S MRI- AGCM3.2S	(SRES) A1B A2 B1	✓	✓		✓	✓					1979-2003 2075-2099	Media mensual	20 km (MRI- AGCM3.1S y 3.2) 100-500 Km (CMIP3)	
Molina (2011)	WAM ERA-40	Extraploación					✓	✓	✓			1985-2006 2031	Media mensual	2.0°	31°S 35°S 37°S 39°S
Semedo et al. (2012)	WAM GCM ECHAM5	(SRES) A1B				✓	✓	✓				1959 - 1990 2069 - 2100	Media anual Media estacional	0.5°	80°N –78°S
Stocker et al. (2013)	39 modelos CMIP5 24 modelos CMIP3	RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 6.0 RCP 8.5		✓			✓	✓	✓			1986-2005 2026-2045 2081-2100	Media estacional		Global
CEPAL (2016)	CSIRO Mareógrafos UHSLC NCEP – GODAS NCEP – NCAR ERSSTv3 – NOAA NCEP – NCAR NCEP – NCAR GOW – IHC GOS - IHC	Escenarios de emisiones (IE-EE): familias A1F1, A1T, A1B, A2, B1 y B2.	✓	✓		✓	✓ Hs mensual Hs0.127 Eventos extremos					1950-2001 1993-2009 1980-2009 1948-2011 1950-2009 1948-2009 1948-2009 1948-2010 1948-2010 2010-2070 2010-2040 2040-2070 2040 2050 2070		1° 1° 1° x 0.333° 2.5° 2° 1.875° X 1.9° 2.5° 0.25° y 0.5° 0.25°	65°S – 65°N 65°S – 65°N 75°S – 65°N Global Global Global Global Global Global

4.1.1 Predicciones de oleaje (CEPAL, 2013)

El análisis histórico de CEPAL (2013) se basa en datos satelitales de CSIRO, boyas NOAA y el modelo GOW-IHC con resolución de 0.25° en el Caribe y 0.5° a nivel global. Para las proyecciones se utilizan dos técnicas: i) extrapolación de tendencias a partir de modelos estadísticos que tienen en cuenta la variación de largo plazo de cada variable y su incertidumbre y ii) modelos de regresión que correlacionan la variable con diversos índices climáticos. Los horizontes temporales de las proyecciones son 2010 – 2070, 2010 – 2040 y 2040 – 2070.

Figura 23: Esquema del eje del tiempo y metodología utilizada en cada horizonte temporal



El estudio presenta, entre otras variables, la altura significativa superada 12 horas al año (Hs12), la altura significativa media mensual y el número de eventos extremos de oleaje anual. En las costas de Chile, el análisis se resume en los siguientes puntos.

- La **altura significativa superada 12 horas al año** (Figura 24a) presenta una nula en el norte, ligeramente negativa en el centro (-0.006 m/año) y ligeramente positiva en las zonas sur y austral ($+0.006$ m/año).
- La **altura significativa media mensual** (Figura 24b) muestra un aumento en todo el país, con valores en torno a $+0.002$ a $+0.003$ m/año en las zonas norte, centro y sur, y $+0.010$ m/año en la zona austral.
- La tendencia anual del **número de eventos extremos de oleaje**²³ (Figura 25) es prácticamente nula en el norte, centro y sur del país. En la zona austral se observa un aumento de hasta 1 (cm/año) en la altura significativa.
- La **altura significativa asociada de un período de retorno**²⁴ **de 50 años y 500 años** se muestra en la Figura 26. En la Tabla 6 se observa que las alturas que en 2010 presentaban un período de retorno de 50 años, hacia 2040 serán más recurrente en Arica (34 años), Valparaíso (42 años) y Concepción (42 años), en tanto que para la zona austral lo serán levemente menos recurrentes (52 años en Isla Taggart).

²³ Los eventos extremos de oleaje se definen en CEPAL (2013) realizando análisis de extremos, basado en el método de máximos mensuales. Se calcularon periodos de retorno de 50, 100, 250 y 500 años. El informe presenta también el parámetro de forma (Weibull, Frechet y Gumbel) obtenido para la función generalizada de extremos (GEV).

²⁴ El período de retorno se define como el intervalo de tiempo promedio en que el valor de una variable es superada. Por ejemplo, si una altura significativa de $H_s = 5$ [m] tiene un período de retorno de 75 años, significa que, en promedio, dicho valor será superado al menos una vez durante dicho intervalo.

Tabla 6: Evolución del periodo de retorno de 50 años de altura significativa en varios puntos de estudio.

Ubicación	Latitud	Longitud	2010	2040	2070
Arica	-18.38	-70.45°	50	34.29	23.86
Valparaíso	-32.96	-71.63°	50	41.70	34.73
Concepción	-36.83	-73.09°	50	41.94	35.25
I. Taggart	-49.45	-75.58°	50	52.49	55.02

Figura 24: Tendencia anual de la altura significativa superada 12 horas al año (a) y altura significativa media mensual (b) para el período 2010 – 2070. Unidades en (m/año).

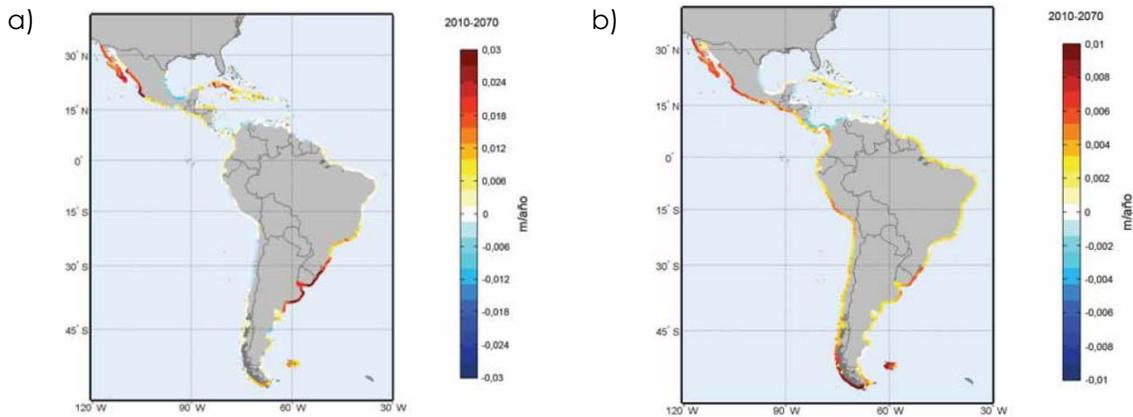


Figura 25: Tendencia anual de los extremos del oleaje para el período 2010–2040. Unidades en (cm/año).

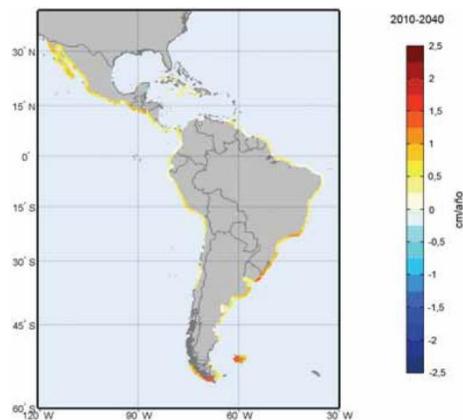
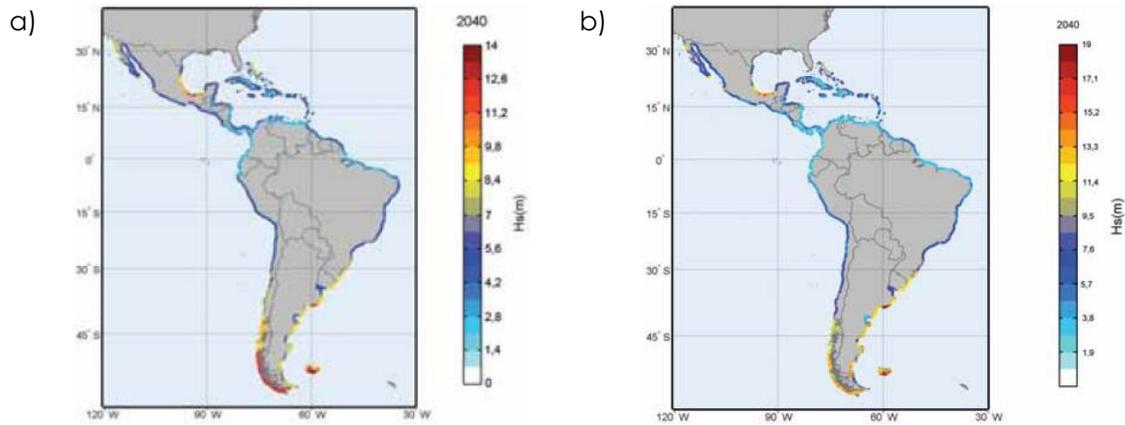


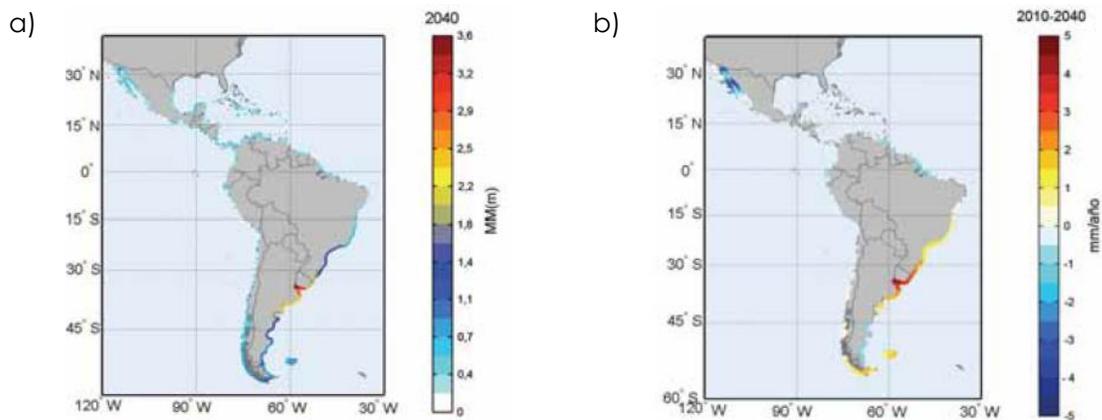
Figura 26: Altura significativa asociada a un periodo de retorno $Tr = 50$ años (a) y $Tr = 500$ años (b) en el año horizonte 2040. Unidades en (m).



4.1.2 Predicciones de marea meteorológica (CEPAL, 2013)

El análisis histórico de CEPAL (2013) se basa en el modelo GOS-IHC con resolución de 0.25° entre 1948 – 2010. La Figura 24 muestra la marea meteorológica asociada a un periodo de retorno de 50 años en 2040 y la tendencia en los extremos de marea meteorológica en 2010-2040.

Figura 27: a) Marea meteorológica asociada a un periodo de retorno de 50 años en el año 2040. Unidades en (m). b) Tendencia anual de largo plazo en los extremos de marea meteorológica en 2010-2040. Unidades en (m/año).



4.2 ANÁLISIS HISTÓRICO DEL IMPACTO DE MAREJADAS

A la fecha, se ha demostrado de manera incipiente que el cambio climático ha alterado la frecuencia e intensidad de las marejadas en las costas del país (Martínez et al., 2018). Para evaluar la evolución del fenómeno, se realizó una compilación de fuentes indexadas e información gris sobre impactos, la que se complementó con estadísticas del clima de olas disponibles en el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al. 2016). La caracterización de los impactos asociados a las marejadas se basa en los siguientes trabajos:

- Beyá J., Álvarez M., Gallardo A., Hidalgo H., Aguirre C., Valdivia J., Parra C., Méndez L., Contreras C., Winckler P., & Molina M. (2016) Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. ISBN: 978-956-368-194-9. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso.
- Brito, J. L. (2009). Catástrofes históricas naturales y causadas por el Hombre ocurridas en el territorio de San Antonio entre 1556 y el 2008.
- Campos, R. (2016). Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile. Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico, Universidad de Valparaíso²⁵.
- Hernández R. & Hormidas H. (1926). Las obras marítimas de Valparaíso y el puerto de San Antonio. La Concesión de Quintero. Estudio histórico sobre un gravísimo problema regional a la vez que nacional – con ilustraciones y dibujos hechos especialmente (1900-1926). Imprenta Victoria.
- Moraga, B. (2018). Análisis estadístico de la recurrencia de marejadas y tormentas en la región de Valparaíso: correlaciones con el cambio climático antropogénico. Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Estadístico, Universidad de Playa Ancha.
- Ortega L., Araya P., Salas V. & Rojas S. 100 años de la construcción del puerto de Valparaíso historia y legado. (2014). Editorial Catarsis Creativa. 139 pp.

Asimismo, se revisaron diversas fuentes de prensa, páginas web, información disponible en servicios como la ONEMI y el MOP. Para completar los años 2016 y 2017, se recurrió a los certificados de cierre de puertos, informados por las Capitanías de Puerto de la Armada.

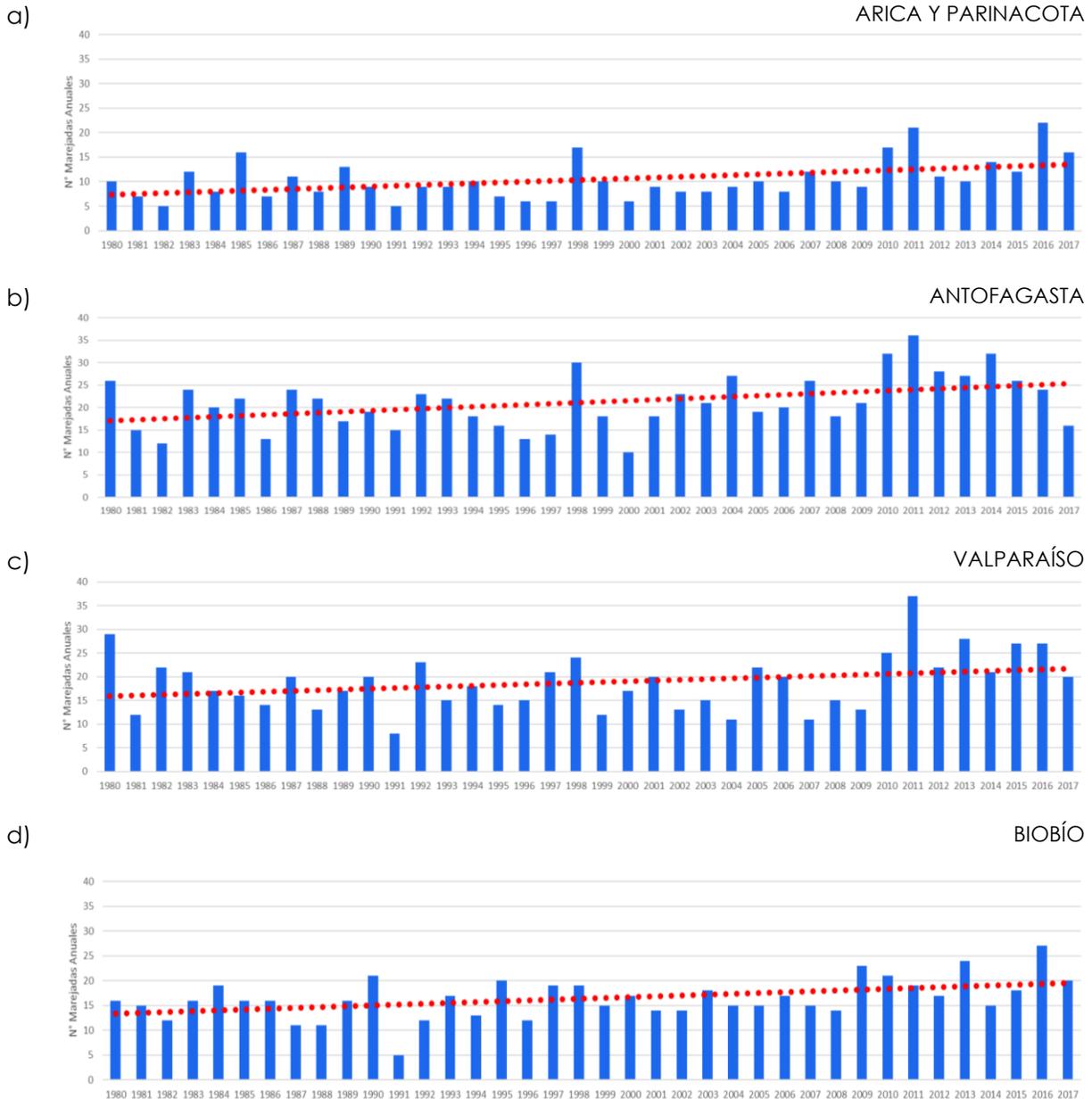
La información se estructuró en una base de datos desagregada por comunas²⁶. Para contar el número de marejadas, se consideraron aquellos sucesos con al menos 1 día de separación temporal (una marejada puede durar más de 1 día) y 1 región de separación espacial (en 1 día puede ocurrir más de 1 marejada a lo largo del extenso litoral del país). Con estos criterios se identificaron 2257 días entre enero de 1975 y diciembre de 2017 (14% del tiempo) en que alguna comuna del país fue afectada por una marejada. Al agregar comunas y regiones colindantes,

²⁵ Para fechas anteriores al año 2000, se revisaron los archivos de periódicos impresos en la Biblioteca Nacional de Chile (Santiago) y Biblioteca Santiago Severín (Valparaíso) hasta el año 1979. Para fechas entre 2000 y 2015 se revisaron diversos periódicos electrónicos (El Mercurio, La Tercera y Radio Biobío), recopilando información sobre los efectos de las marejadas. Para eventos más recientes, se revisó información gráfica y audiovisual de otras fuentes en internet.

²⁶ En Chile existen 100 comunas costeras continentales.

se concluye que los eventos alcanzan a 866. A modo de ejemplo, en la Figura 28 se muestran las series de tiempo anuales del número de marejadas para las regiones de: a) Arica y Parinacota, b) Antofagasta, c) Valparaíso y d) Biobío. Cabe notar que este análisis extiende en forma sustantiva el realizado por Campos-Caba et al. (2015), quienes identificaron 117 eventos de marejadas con algún tipo de efecto en las costas chilenas entre 1924 y 2015.

Figura 28: Series de tiempo anuales y tendencia lineal ajustada para el número de marejadas por región entre 1980 y 2017 para las regiones de a) Arica y Parinacota, b) Antofagasta, c) Valparaíso y d) Biobío. Fuente: Elaboración a partir de diversas fuentes.



Lamentablemente y salvo excepciones (Campos et al., 2015; Winckler et al., 2017) no existen estudios detallados del costo de los daños asociados a las marejadas. Campos et al. (2015), por ejemplo, estima en \$6.830 millones los daños por marejadas identificados para el año 2015. Al comparar esto con la inversión realizada por la Dirección de Obras Portuarias para el año 2014, la cual es cercana a \$56.000 millones (DOP-MOP, 2014), se obtiene que los daños generados corresponden a un 12%.

4.3 ANÁLISIS HISTÓRICO DE OLAJE

El análisis histórico se divide en un análisis del clima medio de oleaje y en un análisis de casos extremos; ambos en aguas profundas. Las variables analizadas en el clima medio son la altura significativa H_s , el período peak T_p y la dirección media θ_m . La variable analizada para el clima extremo corresponde al número de eventos anuales que sobrepasan cierto umbral en la altura significativa.

Chile no tiene una red permanente de boyas de olas mar adentro (Martínez et al., 2018) y los pocos registros disponibles son escasos en tiempo y espacio. En consecuencia, la evolución experimentada por el clima de oleaje se basa en estadísticas de 35 años disponibles en el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016). El Atlas se generó con el modelo Wavewatch III y contempla, entre otros productos, de series de tiempo de altura significativa, período peak y dirección media en puntos espaciados latitudinalmente cada 2° frente a la costa chilena, cada 3 horas entre 1980 y 2015. De acuerdo a Beyá et al. (2017), el hindcast fue calibrado y validado localmente con varias misiones satelitales (H_s) y los pocos registros de boya disponibles (H_s , T_p y θ_p). La mejor configuración de modelo correspondió a la configuración de Ardhuin et al. (2010) para vientos de la base de datos ERA-Interim, después de incluir la corrección de errores sistemáticos.

4.3.1 Análisis de clima medio

El análisis se basa en el cálculo de tendencias anuales históricas a largo plazo de datos que cubren entre 18° y 55° en el territorio continental de Chile. Para evaluar la variabilidad espacial a lo largo de 4200 [km] de costas, se analizan hindcasts de oleaje cada 2° de latitud. El análisis ignora la variabilidad climática asociada a, por ejemplo, ENSO (Reguero et al., 2015). Al igual que para el nivel medio del mar, las tendencias lineales para las series de tiempo de altura significativa, período peak y dirección media se calcularon mediante el estimador no paramétrico propuesto por Theil-Sen (Theil, 1950; Sen, 1968), con una banda de confianza del 95% para cuantificar la incertidumbre.

Este análisis corresponde al primer cómputo exhaustivo sobre las tendencias latitudinales en todo el país. El cálculo amplía los estudios de Molina et al. (2011), quien analizó 20 años cubriendo de 1985 a 2006 para 4 estaciones en Chile Central, de Martínez et al. (2018), quien se centró en 59 años de datos retroactivos en alta mar en Valparaíso entre 1957 y 2016 y de Lucero et al. (2017), estudio que no cubre suficientes años para explicar los impactos del cambio climático (series de

22 años) y cubre únicamente entre 33°S y 42°S. Izaguirre et al. (2013), por otro lado, estudiaron los cambios (sólo) en alturas de ola utilizando una base de datos de reanálisis forzada con vientos NCEP/NCAR entre 1980 y 2008.

4.3.1.1 Tendencias históricas en la altura significativa

Las tendencias anuales en los parámetros estadísticos del clima del oleaje se muestran en la Figura 29. Las alturas significativas muestran un aumento en el rango de 0.003 y 0.011 [m/año] en todo el país, siendo espacialmente estables al norte de 47°S y aumentando de manera importante hacia el sur (Figura 29, izquierda). Este rango equivale a un aumento de casi 0.1 [m] en el norte y 0.4 [m] entre 1980 y 2015, que es sustancial en comparación con las alturas significativas promedio anuales de 2 a 4 [m] que se registran en el país (Beyá et al., 2016). En otras palabras, el cambio en la altura significativa ha aumentado entre 10% y 20% dentro en los 36 años analizados. Los intervalos de confianza del 95% son bastante grandes y comparables con la magnitud de la tendencia anual, y aumentan hacia el sur debido al incremento en la señal.

Estos resultados son consistentes con los encontrados por Molina et al. (2011), que calculó un aumento de 10 [cm] en la altura significativa y una desviación de 12° hacia el sur en la dirección en alta mar en base a los 20 años de los datos de las proyecciones retrospectivas para el centro de Chile; sus resultados demostraron ser sensibles a los eventos ENSO (tanto en su fase cálida: El Niño, como en su fase fría: La Niña).

4.3.1.2 Tendencias históricas en el período peak

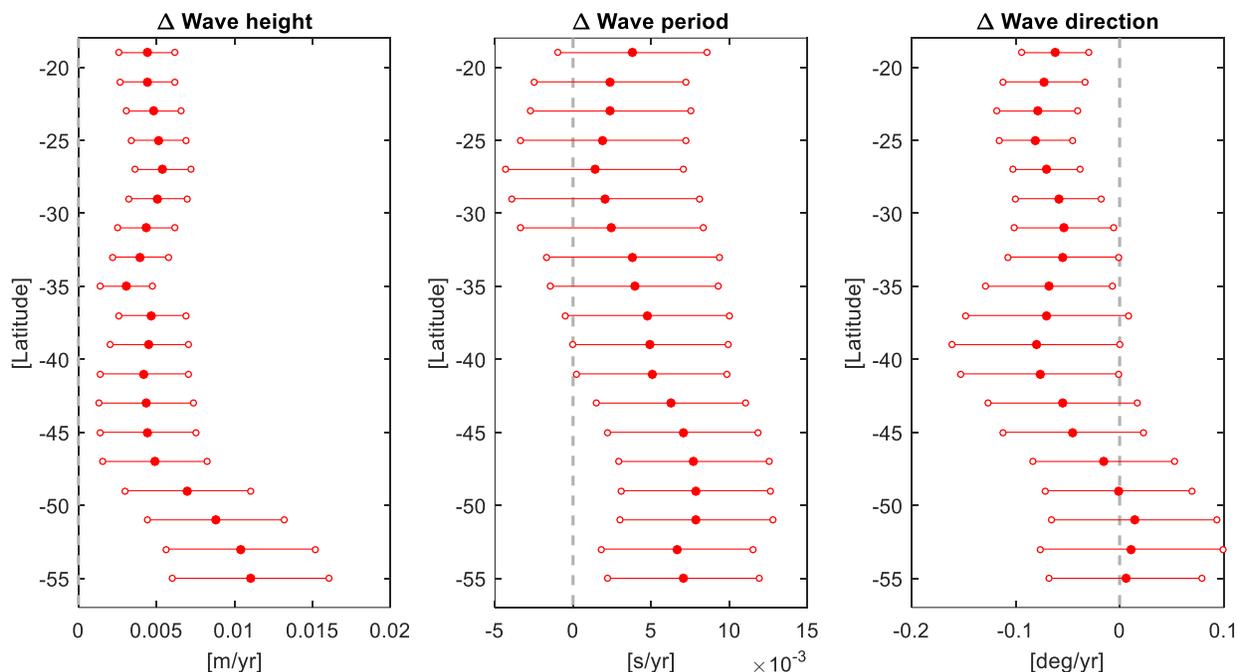
Los períodos peak muestran un aumento en el rango de 0.001 y 0.008 [s/año] en todo el país, siendo los cambios menores hacia el norte y máximos en el sur de la Patagonia (Figura 29, centro). Esto se traduce en un aumento en los períodos por debajo de 0.3 [s] entre 1980 y 2015, que es bastante pequeño (0.4% a 3.5%) en comparación con el rango típico de 8 a 10 [s] en las costas chilenas (Beyá et al., 2016) para el período analizado. Independientemente de las tendencias positivas entre 19°S y 37°S, los intervalos de confianza del 95% alcanzan valores negativos, por lo que cualquier conclusión es discutible en esta región. Al sur de los 39°S, los intervalos de confianza son siempre positivos.

4.3.1.3 Tendencias históricas en la dirección media

La Figura 29 (derecha) representa un giro al sur del orden de 0.1°/año en la dirección del oleaje entre 19°S y 41°S, que es equivalente a 3.5° entre 1980 y 2015. Entre 43°S y 49°S la tendencia media sigue siendo negativo, pero el intervalo de confianza abarca tanto valores positivos como negativos. Las estaciones entre 51°S y 55°S muestran un ligero giro al norte en la dirección del oleaje, pero su valor se ve eclipsado por los intervalos de confianza relativamente grandes.

En síntesis, en las últimas décadas se observa un cambio hacia el sur en la dirección de las olas en alta mar entre la estación más al norte a 19° y 47°S. Este cambio podría atribuirse a la deriva hacia el sur del anticiclón del Pacífico (Schneider et al., 2017). Este giro al sur del oleaje en aguas profundas podría tener consecuencias en playas arenosas relativamente largas y abiertas.

Figura 29: Tasa de variación anual de la altura significativa (izquierda), período peak (centro) y dirección media (derecha) en 19 nudos numéricos cada 2° entre 19°S y 55°S, obtenidos del Atlas de Oleaje (Beyá et al., 2017) entre 1980 y 2015. En todos los trazados, los puntos rojos representan la media, mientras que los intervalos de confianza del 95% se muestran en barras y círculos horizontales.



Diversos autores han estudiado los cambios que experimentan las playas frente a variaciones de los parámetros estadísticos de las olas debido al cambio climático. Aunque los estudios de erosión costera existentes en Chile son escasos, el cambio en la dirección del oleaje podría explicar la rotación en sentido antihorario de la costa sufrida por Playa los Marineros, una unidad sedimentológica relativamente larga ubicada en la bahía de Valparaíso (Martínez et al., 2018). Recientemente se han observado, asimismo, pérdidas de arenas en playas ubicadas al sur de bahías (e.g. Algarrobo, Pichilemu, Cartagena) que podrían atribuirse al giro en la dirección del oleaje. Este resultado, sin embargo, está lejos de ser concluyente pues estos cambios podrían ser generados por otras causas, como los movimientos cosmicos o los ciclos ENOS. Para dilucidar esto se requiere de un estudio exhaustivo de la erosión costera.

4.3.2 Análisis de extremo

El método del peak sobre el umbral se usó para estimar la cantidad de eventos de oleaje extremos por año (Silva, 2005). El umbral se estableció en un valor en el que la altura significativa superó el doble de la desviación estándar de la media aritmética por año, para evitar el sesgo asociado a las tendencias interanuales (Martínez et al., 2018). El método de mínimos cuadrados se utilizó para calcular la tendencia y la incertidumbre de la pendiente se calculó con un 95% de confianza.

La cantidad de eventos extremos por año en 19 nudos numéricos cada 2° entre 19°S y 55°S entre 1980 y 2015 se muestra en la Figura 30, mientras que la Figura 31 ilustra la tasa anual de cambio de esta cantidad, derivada de la primera. El análisis indica que existe un aumento generalizado en la frecuencia de eventos extremos en todo el país. Las tasas positivas varían entre 0.1 a 0.3 [eventos/año], que son equivalentes a aproximadamente 4 a 12 eventos más en la actualidad en comparación con los años ochenta.

Figura 30: Número de eventos extremos en 19 nudos numéricos cada 2° entre 19°S y 55°S (izquierda) y para 19°S, 29°S, 39°S, 49°S y 55°S (derecha), obtenidos de data del Atlas de Oleaje (Beyá et al., 2017).

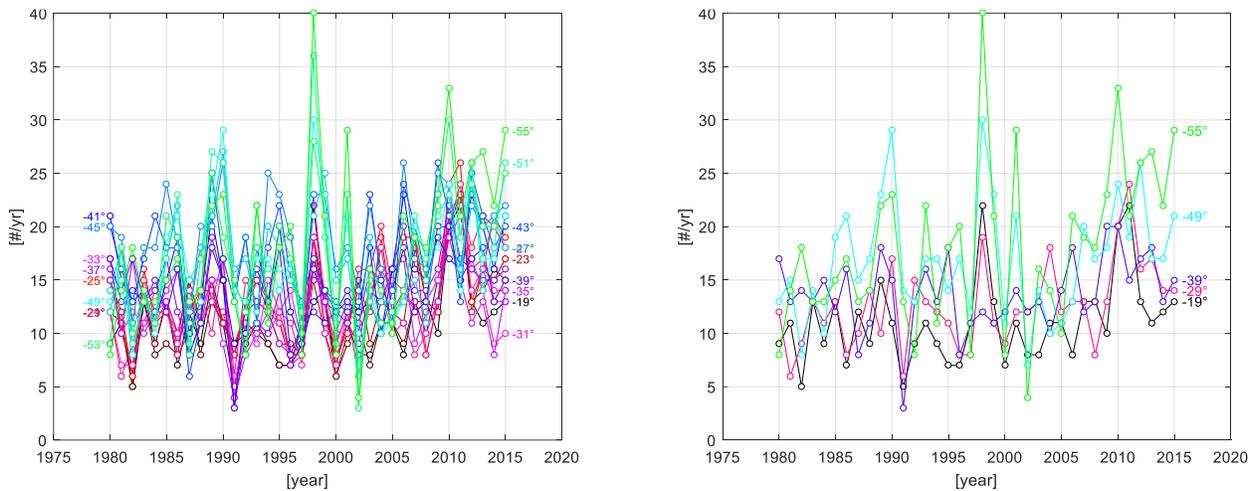
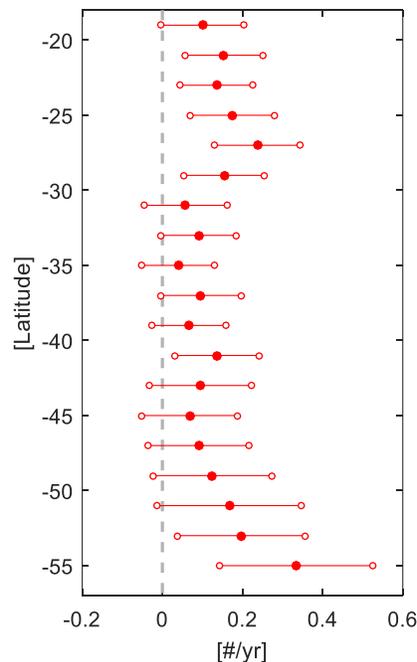


Figura 31: Tasa de variación anual del número de eventos extremos por año. Los puntos rojos representan la media y los intervalos de confianza del 95% se muestran en barras y círculos blancos.



Los resultados del aumento en la frecuencia de eventos extremos son consistentes con los escasos estudios disponibles. Martínez et al. (2017) encontraron un incremento de +0.32 (eventos/año) en un conjunto de datos de 58 años que cubre 1958 a 2016 en Valparaíso mientras que el presente estudio muestra un incremento menor de +0.11 (eventos/año) entre 1980-2015. Sin embargo, ambas cifras son estadísticamente significativas. Sus diferencias se explican porque se utilizan diferentes fuentes indirectas para estimar el número de eventos extremos, al no contar con un registro permanente de oleaje de larga data a lo largo del litoral nacional.

Dado que el criterio de umbral utilizado para seleccionar eventos extremos se basa únicamente en la altura de ola significativa, no coincide con algunos relatos de daños para algunos eventos (Campos-Caba, 2016) que se omitieron en nuestro recuento. Un análisis completo del clima extremo en la costa depende también del período y dirección del oleaje, así como los procesos físicos inducidos por la morfología y batimetría costera de cada sitio (Mediavilla y Sepúlveda, 2016; Lucero et al., 2017).

Por otra parte, la evidencia local de los eventos que ocurrieron antes de 1979, detallada por Campos-Caba (2016), consiste en descripciones cualitativas de los periódicos y los informes técnicos. Otros estudios deberían considerar la correlación de dichas descripciones con los hindcasts de ondas que cubren un lapso mayor, como ERA-20C, que abarca desde 1900 a 2009 (Poli et al., 2016).

4.4 PROYECCIONES

Los escenarios futuros de marejadas se pueden elaborar mediante:

- El forzamiento de modelos de oleaje con vientos disponibles en otros GCMs.
- El análisis de modelos de oleaje generados por otros grupos.
- El análisis de estudios previos.

La disponibilidad de los modelos de vientos y oleaje se presenta en la Figura 32 y Figura 33, respectivamente, tanto para el período histórico y las proyecciones a medio y fin de siglo. En la Figura 34 se ilustra la disponibilidad de otros estudios de oleaje para el período histórico y proyecciones.

Figura 32: Disponibilidad de modelos de viento para el período histórico y proyecciones.

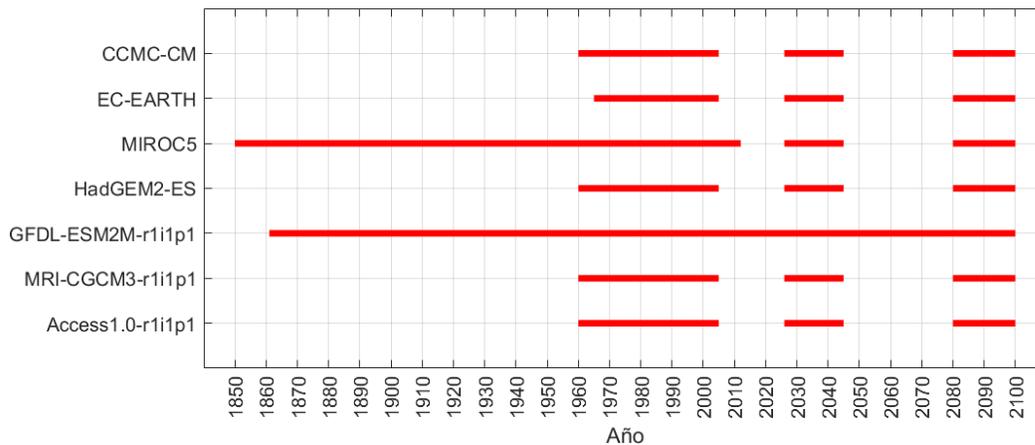


Figura 33: Disponibilidad de modelos de oleaje para el período histórico y proyecciones.

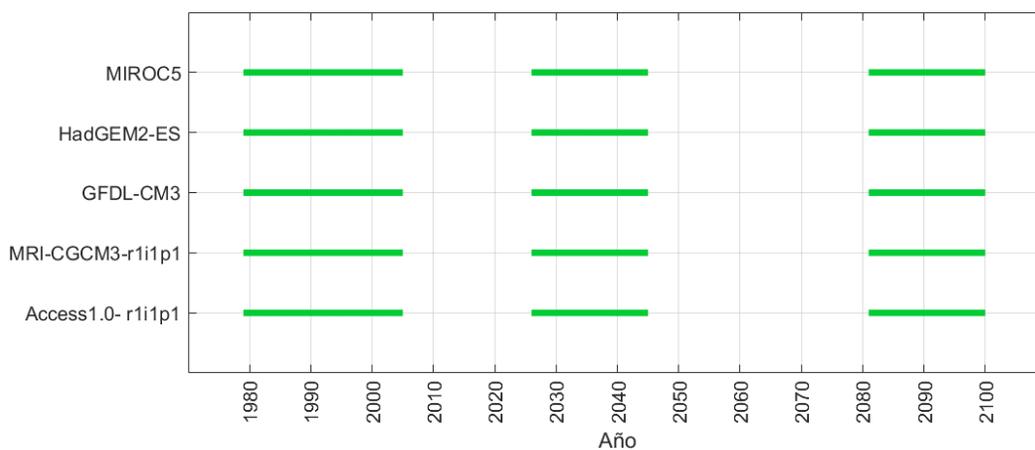
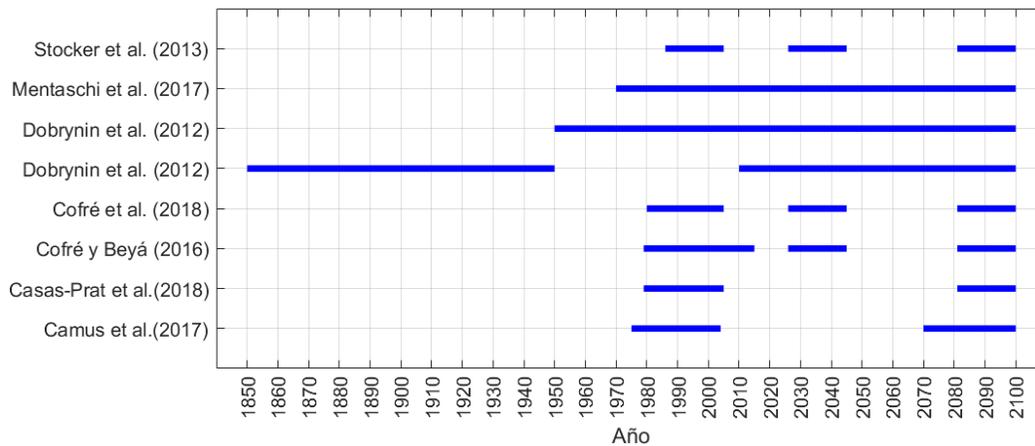


Figura 34: Disponibilidad de otros estudios de oleaje para el período histórico y proyecciones.



Cada una de estas aproximaciones tiene ventajas y desventajas:

- La ventaja de utilizar campos de vientos disponibles en otros GCM's (Figura 32, arriba) es que se puede parametrizar el modelo de oleaje optimizando su desempeño del oleaje frente a Chile. Como antecedente, en el Atlas de Oleaje para Chile (Beyá et al., 2006) se utilizó el modelo numérico WAVEWATCH III (Tolman et al. 2014) con las parametrizaciones físicas de Arduin et al. (2010), de modo de ajustar localmente las estadísticas de oleaje disponibles en varias misiones satelitales (H_s) y los pocos registros de boya disponibles (H_s , T_p y θ_p). Por otra parte, el hecho de generar el modelo de oleaje otorga flexibilidad en la definición del dominio, discretización temporal y espacial con que se quieren los resultados. La desventaja de usar esta aproximación es el costo computacional que implica su pre-proceso, proceso y post-proceso.
- Los modelos de oleaje generados por otros grupos (Figura 32, centro) pueden tener comportamientos deficientes en las costas de Chile, puesto que en calibración y validación no se han utilizado en forma intensiva datos satelitales y boyas locales. Beyá et al. (2017), por ejemplo, comparó varias bases de datos con los datos generados para el Atlas de Oleaje de Chile, demostrando que las bases de datos que contemplaron estadísticas locales de oleaje provenientes de satélites y boyas tuvieron el mejor desempeño. Esta aproximación tiene la ventaja de eliminar el proceso (no se necesita correr un modelo) y reducir el pre-proceso (no se necesita preparar archivos de entrada). Se cuenta, no obstante, con menos grados de libertad para desplegar los resultados.
- Estudios desarrollados de autores (Figura 32, abajo) tienen la limitación de que la data de oleaje no está disponible y su análisis está restringido a la forma de presentación.

Para efectos de este estudio, se generarán 6 modelos de oleaje generados por viento (Figura 32, arriba), lo que serán comparados con 5 modelos de oleaje disponibles (Figura 32, centro).

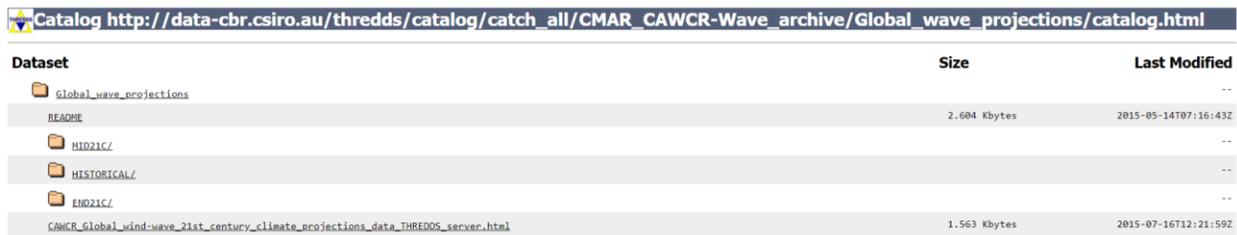
4.4.1 Metodología

4.4.1.1 Selección de modelos

Para cuantificar las condiciones futuras del oleaje (2026-2045) se consideraron 6 forzantes de viento disponibles en diferentes modelos globales de clima (Global Climate Models, o GCM's), las cuales fueron escogidas a partir de los siguientes criterios:

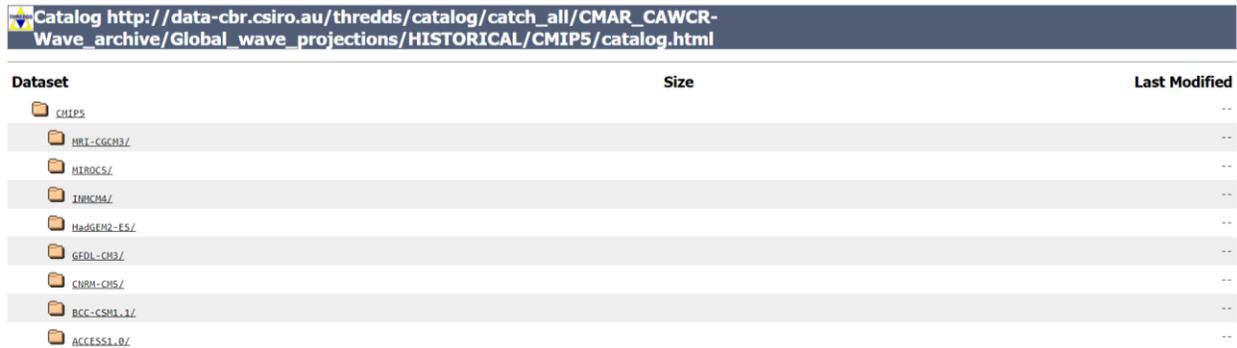
- Buen performance de los campos de oleaje generados por dichos campos de viento frente a las costas de Chile, según es mostrado por Hemer y Trenham (2016).
- Disponibilidad de la estadística para las ventanas de tiempo histórica (1985-2004) y futura (2026-2045).
- Continuidad de la estadística (sin gaps) para ambos períodos.
- Comportamiento coherente de los campos de viento (sin outliers o gradientes poco realistas en el Océano).
- Modelos pertenecientes al CMIP5²⁷ (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5), por tratarse de los más recientes a la fecha de este informe.
- Alta resolución en relación con otros modelos.

²⁷ El link a CMIP5 y CMIP3 es: http://data-cbr.csiro.au/thredds/catalog/catch_all/CMAR_CAWCR-Wave_archive/Global_wave_projections/catalog.html. El depósito tiene la siguiente estructura:



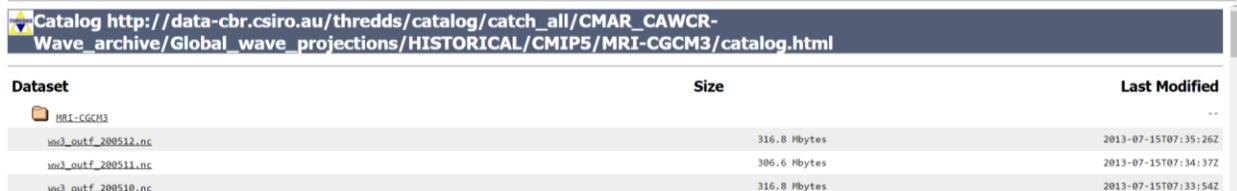
Catalog http://data-cbr.csiro.au/thredds/catalog/catch_all/CMAR_CAWCR-Wave_archive/Global_wave_projections/catalog.html

Dataset	Size	Last Modified
Global_wave_projections		--
README	2.604 Kbytes	2015-05-14T07:16:43Z
MID21C/		--
HISTORICAL/		--
END21C/		--
CAWCR_Global_wind-wave_21st_century_climate_projections_data_THREDDS_server.html	1.563 Kbytes	2015-07-16T12:21:59Z



Catalog http://data-cbr.csiro.au/thredds/catalog/catch_all/CMAR_CAWCR-Wave_archive/Global_wave_projections/HISTORICAL/CMIP5/catalog.html

Dataset	Size	Last Modified
CMIP5		--
MRI-CGCM3/		--
MIROC5/		--
INMCM4/		--
HadGEM2-ES/		--
GFDL-CM3/		--
CNRM-CM5/		--
BCC-CSM1.1/		--
ACCESS1.0/		--



Catalog http://data-cbr.csiro.au/thredds/catalog/catch_all/CMAR_CAWCR-Wave_archive/Global_wave_projections/HISTORICAL/CMIP5/MRI-CGCM3/catalog.html

Dataset	Size	Last Modified
MRI-CGCM3		--
vnc2_outf_200512.nc	316.8 Hbytes	2013-07-15T07:35:26Z
vnc2_outf_200511.nc	306.6 Hbytes	2013-07-15T07:34:37Z
vnc2_outf_200510.nc	316.8 Hbytes	2013-07-15T07:33:54Z

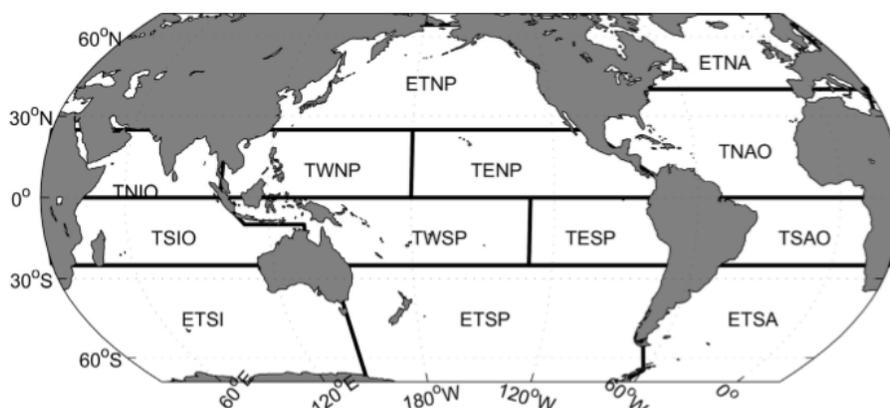
En relación con el primer criterio, Hemer et al. (2015) generaron 10 modelos de oleaje a partir de campos de viento globales de resolución temporal de 3 horas y del área de cobertura de hielo disponibles en diferentes GCM (Tabla 7). De estos, 8 modelos pertenecen a CMIP5 y 2 al CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 3). Estos últimos fueron sometidos a un “downscaling”. Asimismo, usan 3 promedios “ensemble means” obtenidos como combinación de los 10 modelos anteriores. El forzamiento de oleaje fue realizado con el modelo Wavewatch III v3.14 (Tolman, 2009), con resolución espacial de 1° x 1° entre las latitudes 80°S-80°N, para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. La división de los océanos en 13 subdominios definidos en Alves (2006;Figura 35).

Para la selección de los mejores modelos de viento a utilizar en este estudio, se consideraron solamente los modelos GCM pertenecientes al CMIP5 (del 1 al 8) y se consideraron las regiones oceánicas ETSP y TESP pues cubren las costas de Chile. Se ponderaron los índices basados en la métrica M y en la matriz de errores relativos (estadígrafos) desarrolladas por Hemer et al. (2015) para cada región oceánica. Luego se sumaron las 2 ponderaciones asociadas a cada métrica y a cada porción, permitiendo así obtener un score global.

Tabla 7. Modelos GCM verificados por Hemer et al. (2015).

ID	Full model name	Model	CMIP phase	Atm Resolution Lon x Lat
1	Australian Community Climate and Earth System Simulator 1.0	ACCESS1.0	5	1.88 x 1.25
2	Beijing Climate Centre, Climate System Model, 1-1	BCC-CSM1.1	5	2.8 x 2.8
3	Centre National de Recherches Meteorologiques Coupled Global Climate Model, version 5	CNRM-CM5	5	1.4 x 1.4
4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Earth System Model 2M	GFDL-ESM2M	5	2.5 x 2.0
5	Hadley Centre Global Environmental Model 2, Earth System	HadGEM2-ES	5	1.88 x 1.25
6	Institute of Numerical Mathematics Coupled Model, version 4.0	INMCM4	5	2.0 x 1.5
7	Model for Interdisciplinary Research on Climate, version 5	MIROC5	5	1.4 x 1.4
8	Meteorological Research Institute Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model, version 3	MRI-CGCM3	5	1.1 x 1.1
9	ECMWF Hamburg climate model, version 5, dynamically downscaled using CCAM	CMIP3-CCAM-ECHAM5	3	0.5 x 0.5
10	CSIRO Mk3.5 general circulation, version 3.5, dynamically downscaled using CCAM	CMIP3-CCAM-CSIROmk3.5	3	0.5 x 0.5
11	Ensemble mean of CMIP-5 simulations (models 1-8)	CMIP5-EM	-	-
12	Ensemble mean of CMIP3-CCAM simulations (models 9-10)	CMIP3-CCAM-EM	-	-
13	Ensemble mean of all simulations (models 1-10)	EM	-	-

Figura 35. Subdivisión global de los GCM. Cada subdominio representa una región en particular en la cual se evaluará el desempeño de un GCM mediante 2 métricas específicas.



En la Tabla 8 se presentan los GCM rankeados de mejor a peor. De la base de datos se verificó que los modelos GFDL y INMCM4 tenían gaps y los modelos BCC y CNMR no estaban disponibles, razón por la cual fueron descartados. Se utilizaron, en consecuencia, los modelos HadGEM2, MRI, ACCESS 1.0 y MIROC 5. Adicionalmente, se incluyeron los modelos EC-EARTH, por ser abordados ampliamente en la literatura, y el modelo CCMC, por tener alta resolución. El modelo VRES (incluido en la propuesta), fue descartado porque los formatos y peso de los archivos hicieron imposible su descarga y utilización.

Tabla 8. GCM asociados al proyecto CMIP5. Se demarca en azul los que se evaluarán.

GCM – CMIP5	(a) Métrica M	(b) Estadígrafos	Suma (a) + (b)	Disponible
GFDL	0.85	1.27	2.12	No
HadGEM2	1.00	1.09	2.09	Sí
MRI-CGM	1.00	1.09	2.09	Sí
ACCESS 1.0	0.92	0.64	1.56	Sí
INMCM4	0.46	0.73	1.19	No
MIROC 5	0.86	0.27	1.12	Sí
BCC	0.54	0.55	1.08	No
CNMR	0.00	0.00	0.00	No

En la Tabla 9 se presentan las características y la resolución de los modelos de viento obtenidos de los GCMs. De dichos modelos se descargó²⁸ data de viento superficial a 10 [m] de altura, con una resolución de 3 horas y concentraciones de hielo marino (*sea-ice concentration*) a una resolución diaria.

Tabla 9: Modelos GCM - CMIP5 aplicados en este estudio.

Modelo	Centro de modelado	Resolución [°lat x °lon]	Periodo histórico	Proyección RCP85
MRI-CGM	Meteorological Research Institute, Japón	1.12148 x 1.125	1985-2004	2026-2045
ACCESS 1.0	CSIRO-BOM , Australia	1.25 x 1.875	1985-2004	2026-2045
EC-EARTH	EC-EARTH, Europa	1.1215 x 1.25	1985-2004	2026-2045
CCMC	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici Climate	0.75 x 0.75	1985-2004	2026-2045
MIROC5	JAMSTEC, Japón	1.4 x 1.4	1985-2004	2026-2045
HADGEM2-ES	MOHC, Reino Unido	1.25 x 1.875	1985-2004	2026-2045

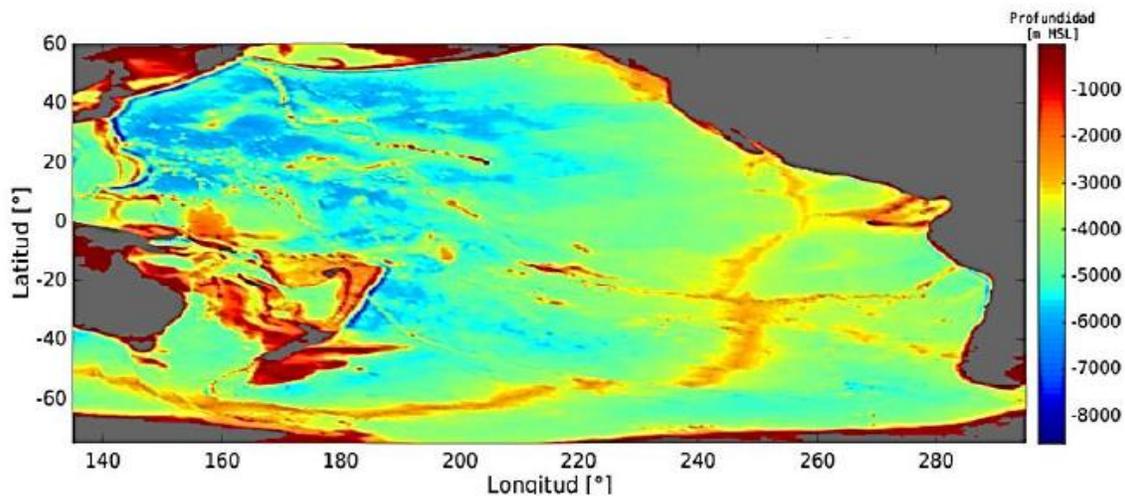
²⁸ La data se descargó del servidor de dicho proyecto. <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>

4.4.1.2 Errores sistemáticos de los GCM

Debido a que en la costa de Chile no se cuenta con mediciones de oleaje de larga data, se generó un *benchmark* estadísticamente representativo para verificar tanto la validez de cada GCM como del ensemble mean. Para ello, se elaboró una base de datos (hindcast) de clima de oleaje en aguas profundas a escala global, denominada en adelante como CFSR_{CCG}. Para ello se utilizó como forzante prescrita desde el reanálisis CFSR (Saha et al., 2010) desarrollado por la NOAA²⁹.

Tanto el benchmark como el clima de oleaje histórico-futuro fueron simulados forzando el modelo numérico WAVEWATCH III (Tolman et al. 2014). Dicho modelo fue aplicado sobre una malla con cobertura íntegra del océano Pacífico (135°E a 65°W y 75°S a 60°N), con una resolución espacial de 1° tanto en latitud como longitud. Para considerar el bloqueo parcial de energía debido a la presencia de islas, el mallado fue construido sobre la base de los algoritmos de Chawla et al. (2008). El dominio numérico se presenta en la Figura 36.

Figura 36. Dominio numérico del modelo de oleaje.



La información batimétrica fue obtenida de la base de datos ETOPO2v2 (NGDC, 2006) y consiste en datos batimétricos dispuestos en una grilla regular de 2 x 2 minutos. La línea de costa se extrajo de la base de datos GHHS8V8 (Wessel & Smith, 1996). Para el mallado espectral se consideraron periodos entre 1 y 26 [s.] La frecuencia mínima y máxima del espectro se configuraron en $f_{\min} = 0.0373$ [Hz] y $f_{\max} = 0.78$ [Hz], y se utilizó un factor de incremento en las frecuencias de $\gamma = 1,1$. Con ello los espectros contienen 32 bins en frecuencia y 24 bins en dirección (15° de resolución). El crecimiento y disipación de oleaje fue simulado considerando las parametrizaciones físicas de Ardhuin et al. (2010), las cuales son implementadas en el modelo mediante el paquete físico ST4. Las interacciones no lineales por cuádrupletas fueron calculadas mediante el método DIA (Hasselmann et al. 1985). Más información sobre la metodología, parametrizaciones físicas y calibración del modelo de oleaje se puede consultar en Beyá et al. (2016) y Esparza (2017).

²⁹ National Oceanic and Atmospheric Administration

Cabe mencionar que debido a la limitación de almacenamiento, solo se guardaron espectros cada 2° de latitud (Figura 37) e información mallada cada 3 horas correspondiente a altura significativa espectral (H_s), el periodo peak (T_p), el periodo medio energético (T_{m01}), dirección peak (θ_p), la dirección media (θ_m) y flujo energético (C_{GE}). Los resultados son expuestos y analizados considerando las siguientes representaciones:

- Análisis espacial: se analizan sesgos para verificar la capacidad de los GCMs de representar el clima de oleaje histórico y cambios futuro en el océano Pacífico. Este análisis se desarrolla para percentiles 50 y 99 de la altura significativa como el periodo peak (Anexo 6.2).
- Análisis puntual-latitudinal: se analizan sesgos y cambios futuros para el percentil 50 y 99, considerando los parámetros de resumen de oleaje (H_s , T_{m01} y θ_m) en la costa de Chile.
- Análisis multianual de percentiles 50 y 99 para zonas críticas e insulares de Chile

Los datos analizados en este informe no incluyen ajustes ni correcciones de sesgos a posteriori.

Figura 37. Nodos de salida del modelo de oleaje.



4.4.2 Resultados del análisis de clima medio

4.4.2.1 Oleaje en aguas profundas

Los campos bidimensionales de viento a 10 [m] sobre el nivel del mar y los parámetros de altura significativa, período medio y dirección media se presentan en la Figura 38 a la Figura 47 para el período histórico (1985-2004), la proyección (2026-2045) y para la diferencia entre ambos. Se muestra el percentil 50% y 99% como ejemplo del clima medio y el percentil 99% como un ejemplo de un oleaje más intenso (pero no necesariamente extremo). Cabe notar que para este estudio se transfirió toda la estadística y por tanto se cuenta (pero no se presenta) con curvas de excedencia de todos estos parámetros en aguas profundas a la cuadra de los 9 puertos en análisis. La Tabla 10 presenta un resumen de las tendencias identificadas en cada una de estas variables.

Tabla 10: Resumen de diferencias de parámetros de viento y oleaje entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) frente a Chile.

Parámetro	Percentil %	Zona Norte 19°S – 32°S	Zona Centro 32°S – 37°S	Zona Sur 37°S – 44°S	Zona Austral 44°S - 55°S
Viento	50	Aumento	Disminución	Disminución	Variable
	90	Aumento	Disminución	Disminución	Aumento
Altura significativa	50	-	-	-	Aumento
	90	Aumento	-	Aumento	Aumento
Período medio	50	Disminución	Aumento	Aumento	Aumento
	90	Aumento	Aumento	Aumento	Aumento
Dirección media	50	-	Giro al sur	Giro al sur	-



Figura 38: Campos de magnitud de viento a 10 metros sobre el nivel del mar para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para los percentiles 50% y 99% para toda la cuenca del Pacífico.

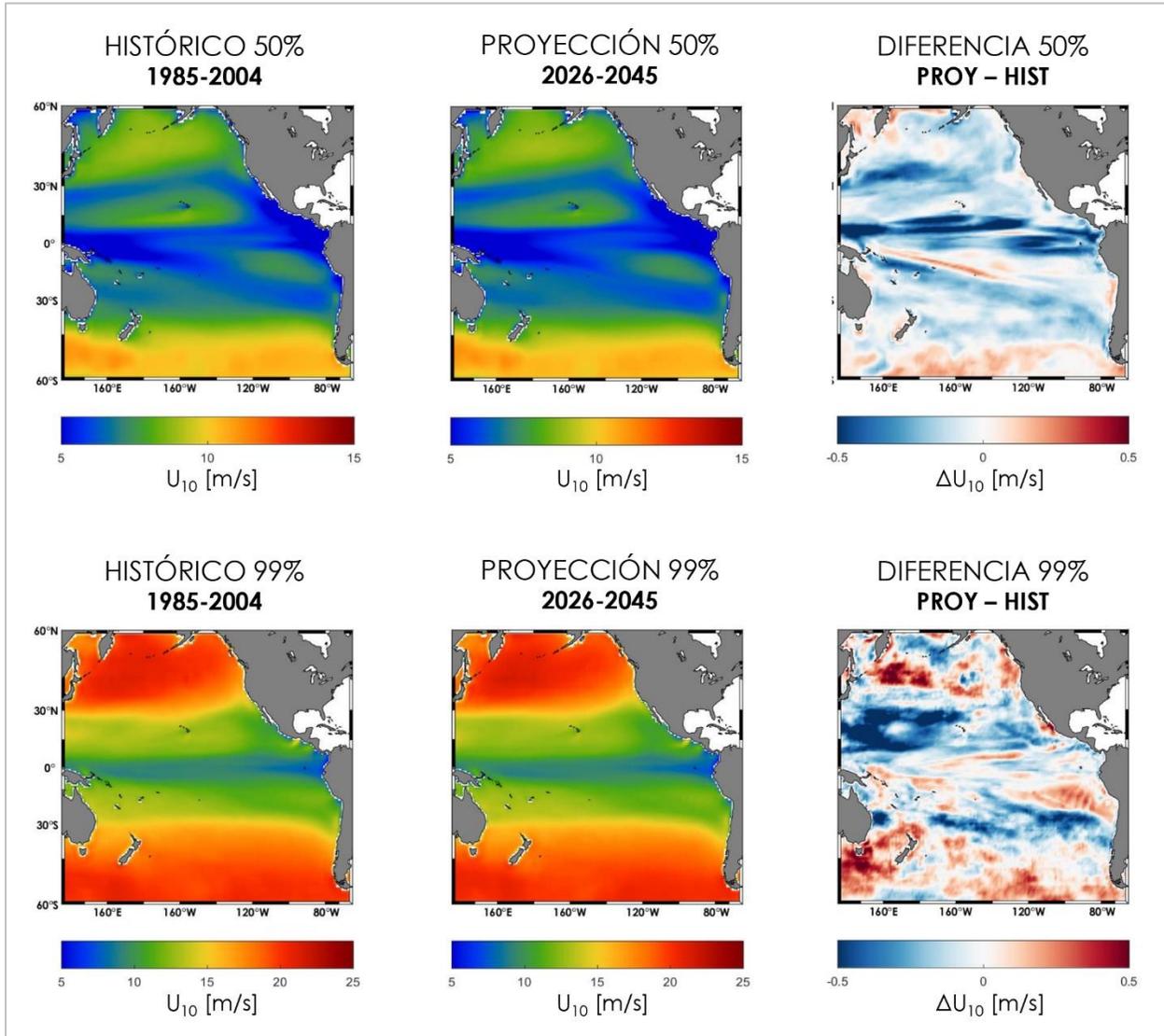


Figura 39: Campos de magnitud de viento a 10 metros sobre el nivel del mar para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 50% frente a Chile.

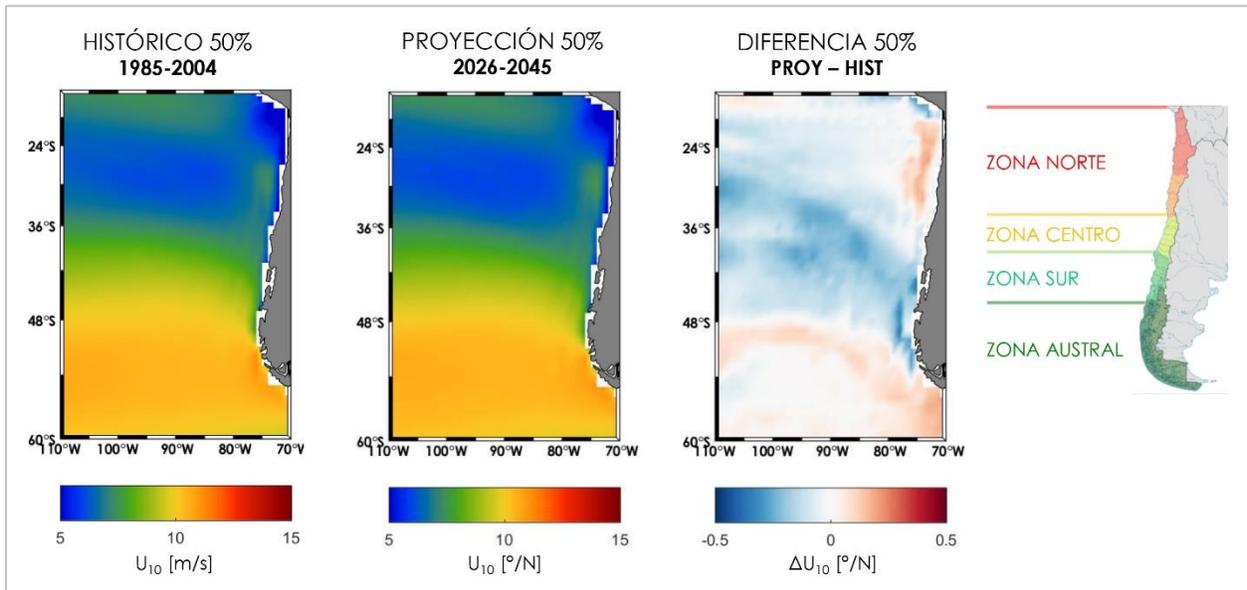


Figura 40: Campos de magnitud de viento a 10 metros sobre el nivel del mar para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 99% frente a Chile.

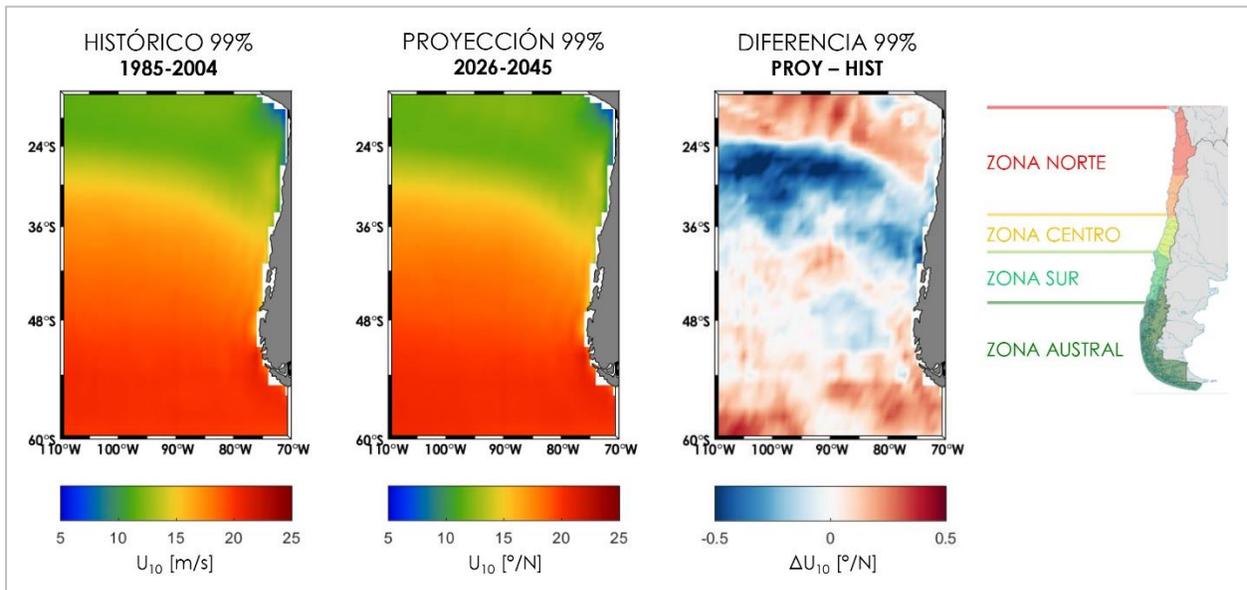


Figura 41: Campos de altura significativa de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para los percentiles 50% y 99% para toda la cuenca del Pacífico.

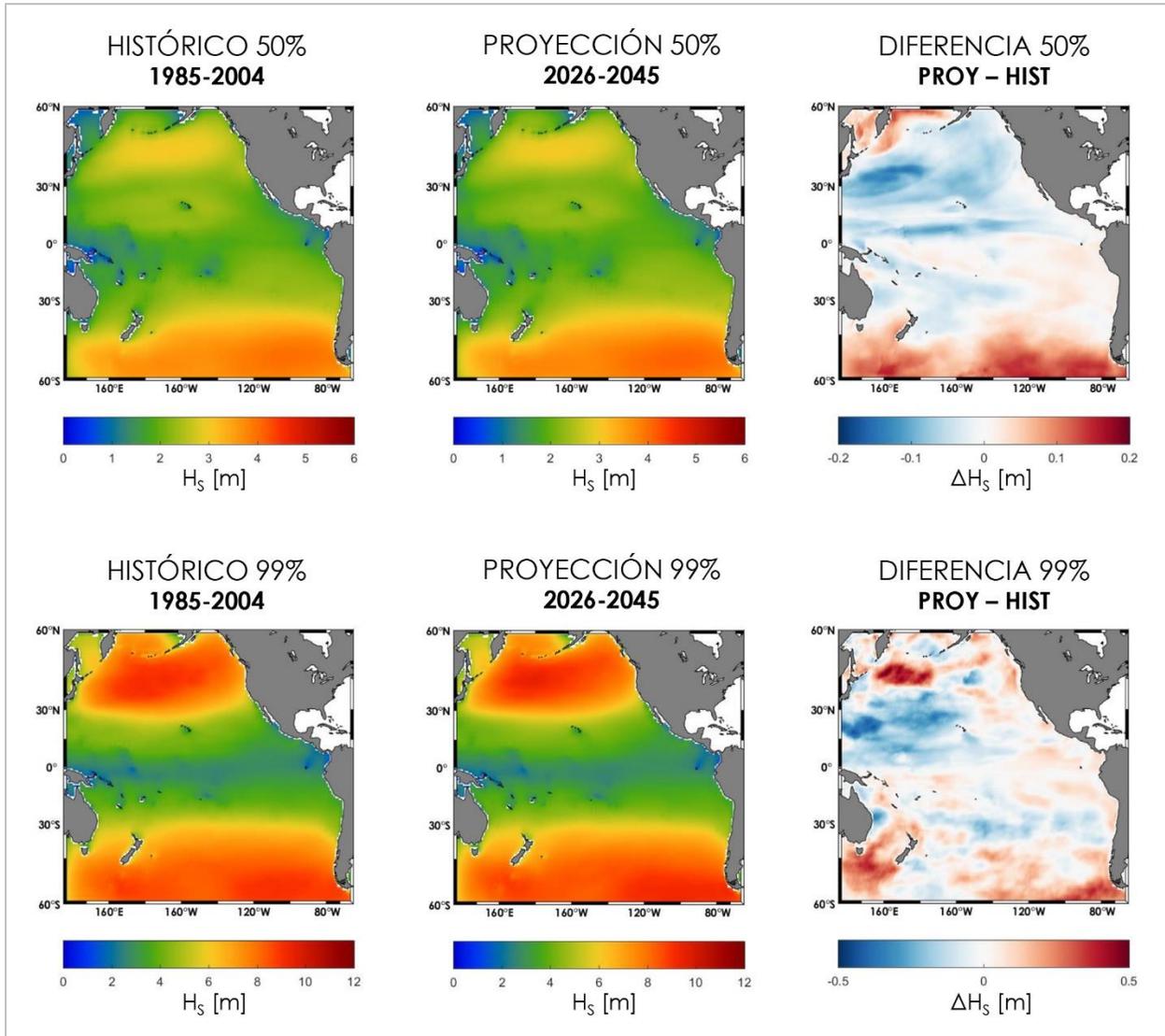


Figura 42: Campos de altura significativa de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 50% frente a Chile.

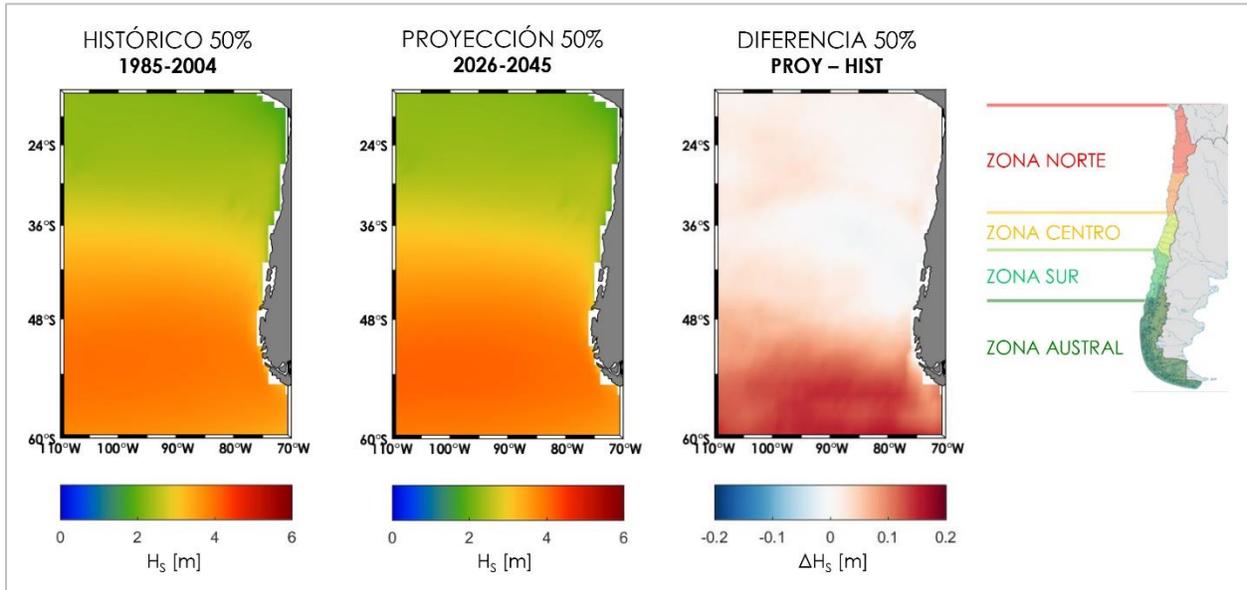


Figura 43: Campos de altura significativa de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 99% frente a Chile.

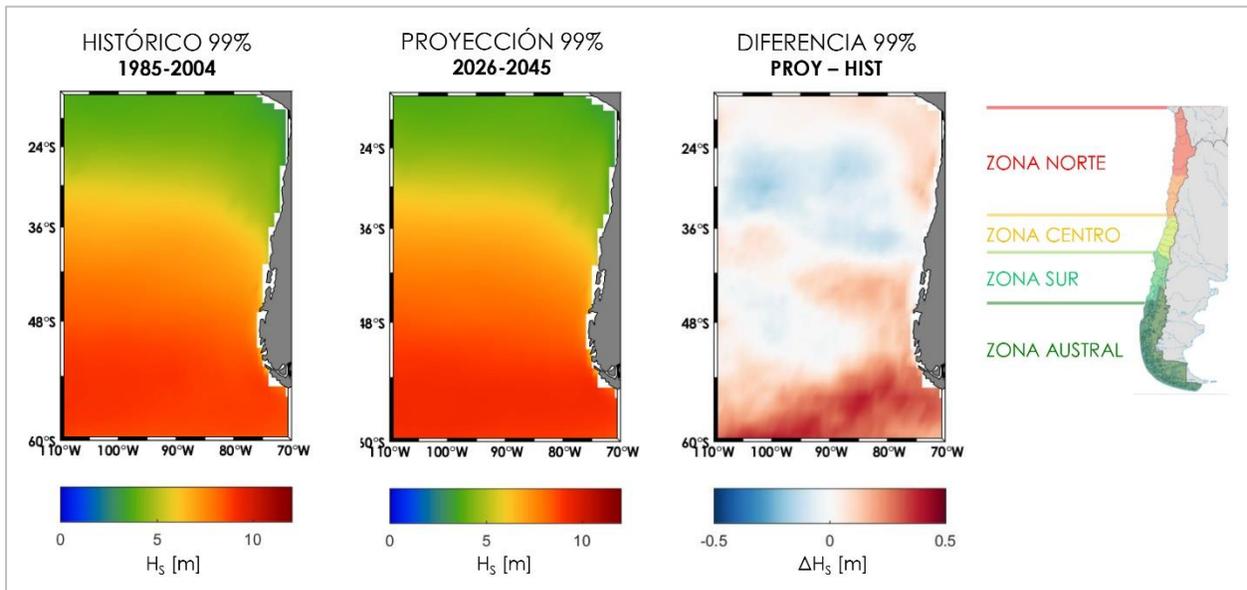


Figura 44: Campos de período medio de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para los percentiles 50% y 99% para toda la cuenca del Pacífico.

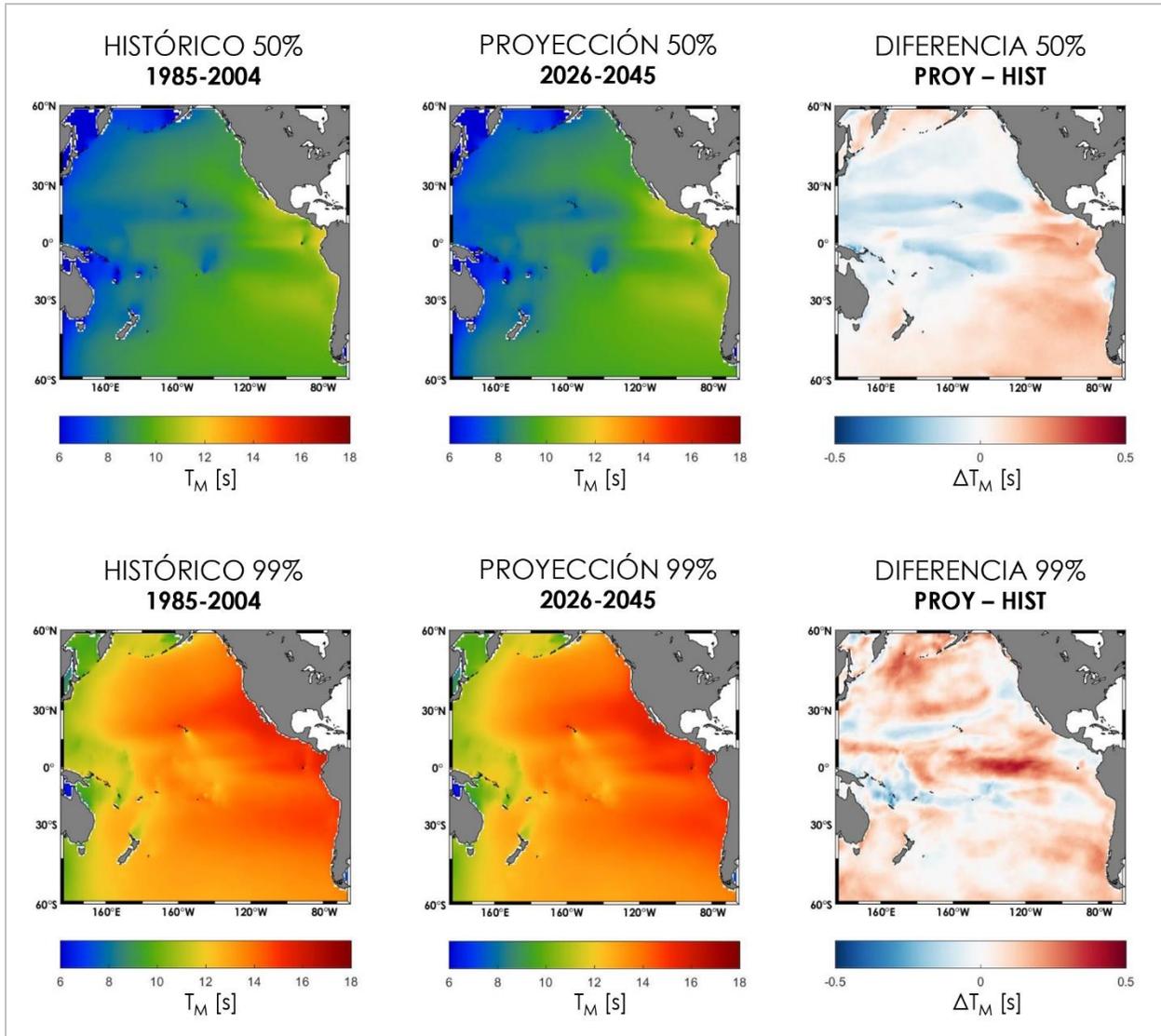


Figura 45: Campos de período medio de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 50% frente a Chile.

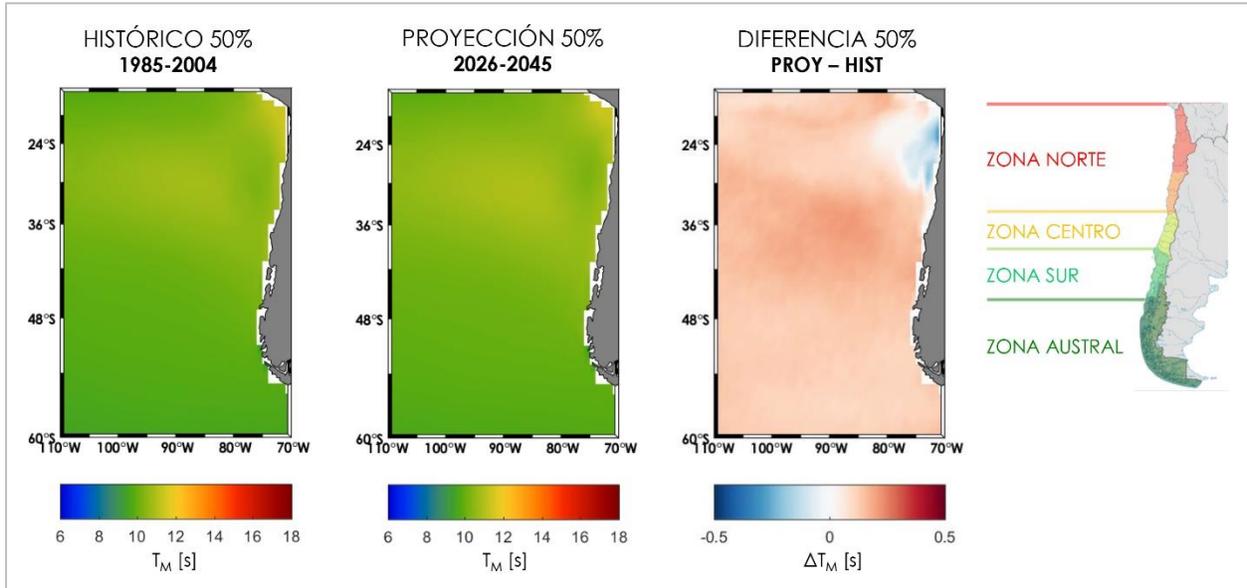


Figura 46: Campos de período medio de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 99% frente a Chile.

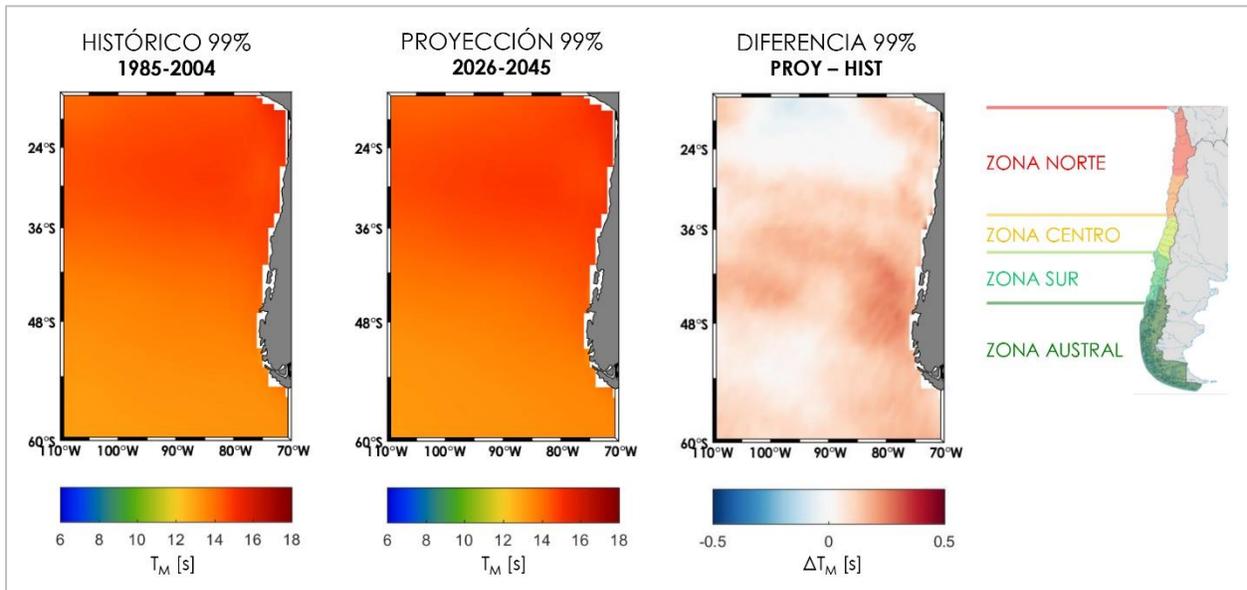
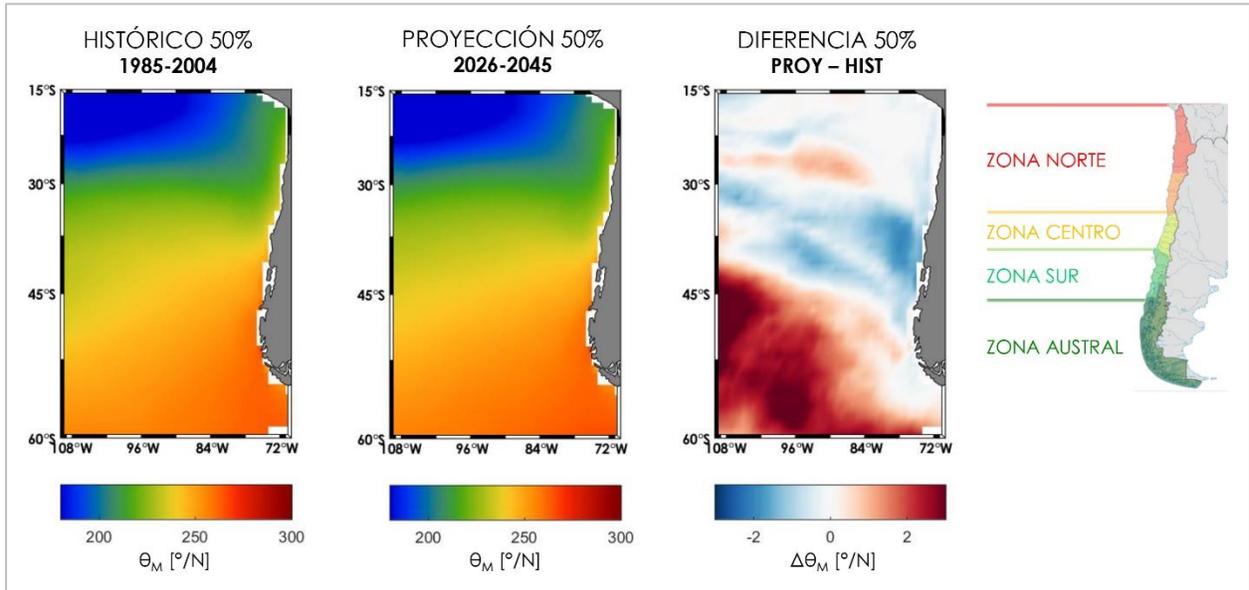


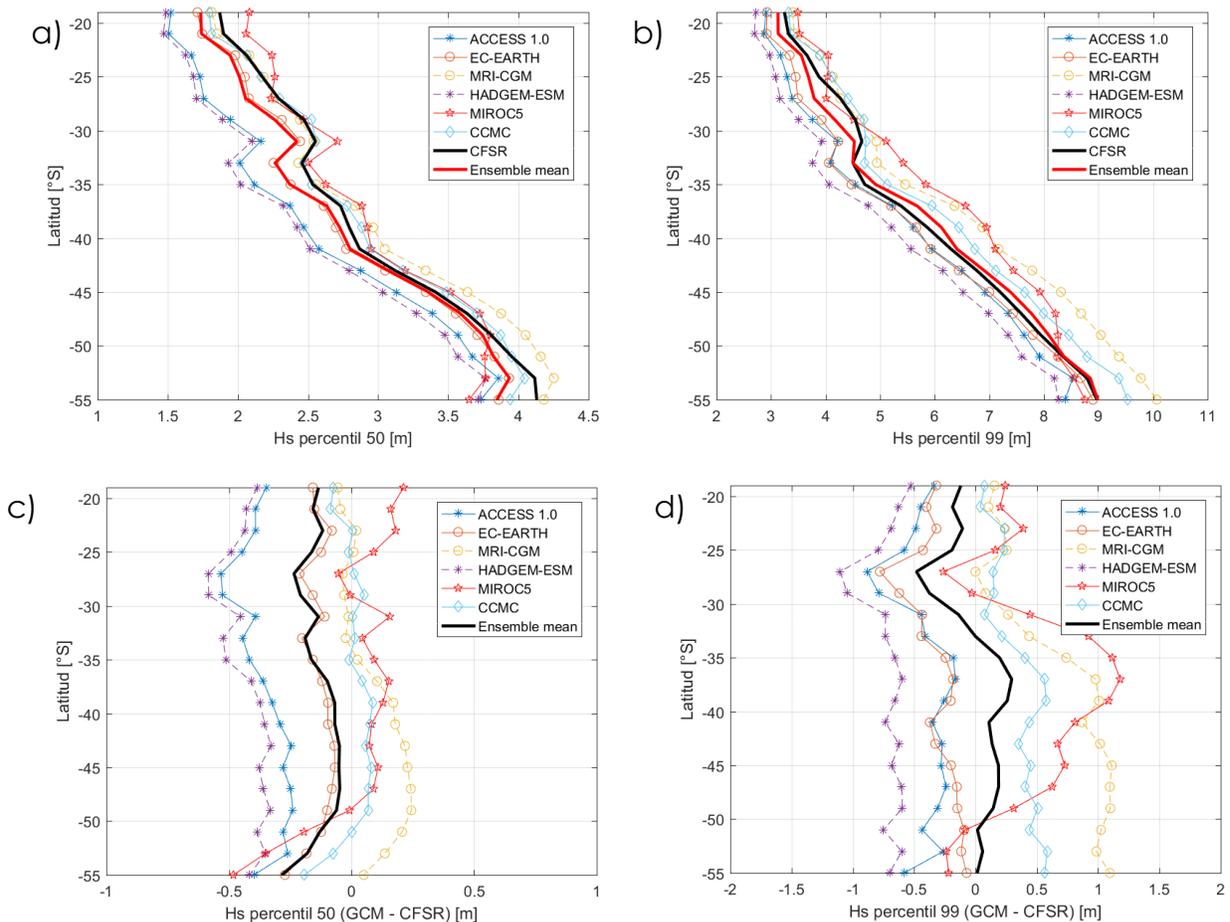
Figura 47: Campos de dirección media de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 50% frente a Chile.



4.4.2.2 Análisis puntual del oleaje en el periodo histórico (1980-2004)

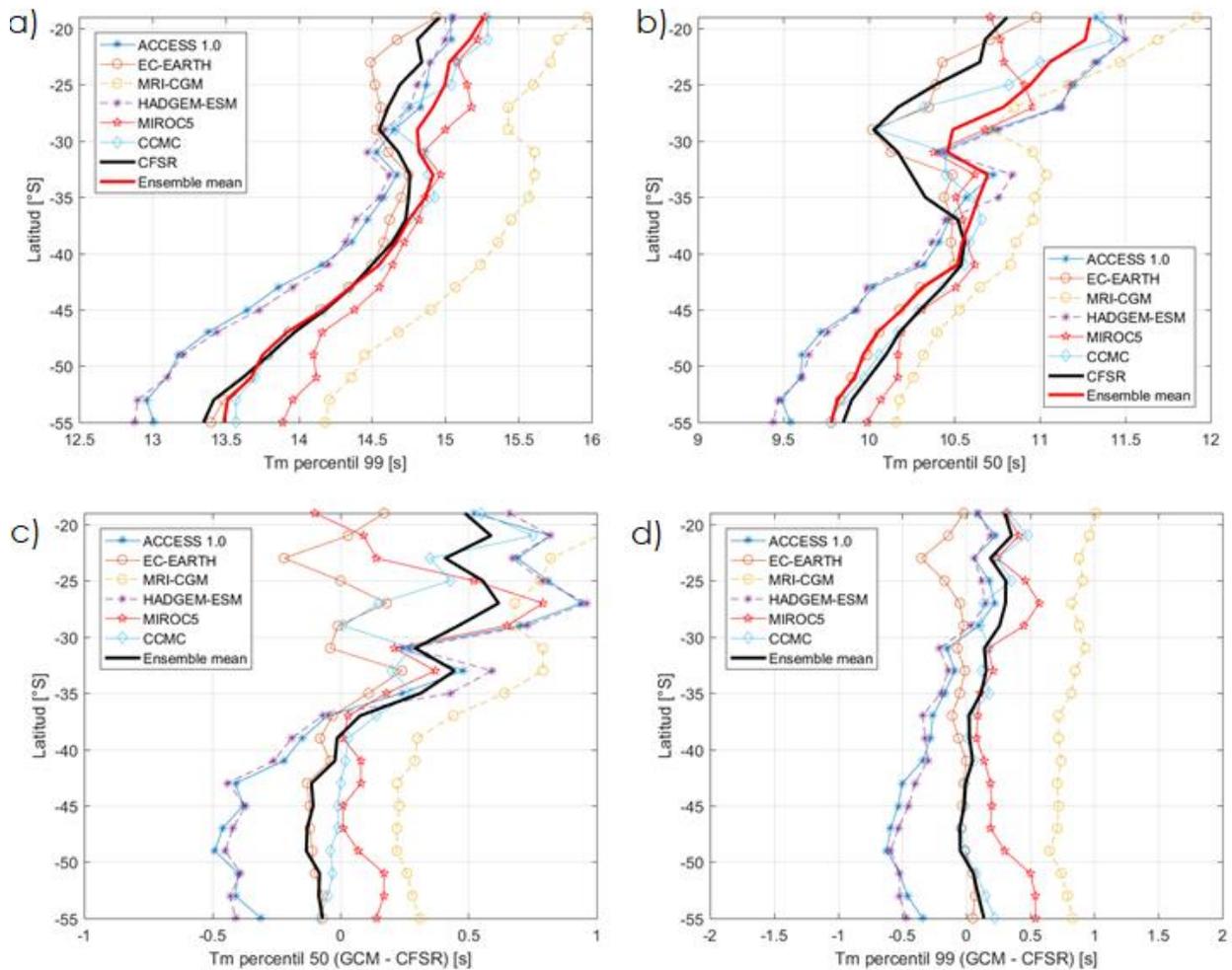
En la Figura 48 se presenta una comparación latitudinal entre alturas significativas y periodos medios para el periodo histórico del GCM y el reanálisis de oleaje CFSR-CCG. En cuanto a las alturas significativas asociadas al percentil 50, se observa que puede haber diferencias de hasta más de 1 [m] en la zona norte de Chile. Sin embargo, hacia el sur dicha diferencia disminuye: Entre los 40 y 50°S las diferencias más extremas entre GCM son de $\sim 0,5$ [m]. Además el ensemble mean del percentil 50 y el reanálisis presentan alturas significativas prácticamente idénticas. Para el percentil 99, se observa una fuerte dispersión entre los diferentes GCM en toda la costa de Chile. Las sobrestimaciones son producidas por los modelos MRI-CGM y el MIROC5, donde se observan sesgos positivos por sobre los 0.5 [m] en las alturas significativas. Las subestimaciones en este percentil vienen dadas por los modelos HADGEM y el ACCESS 1.0, con sesgos de 0.3 a 0.5 [m] en la altura significativa, prácticamente constantes en toda la costa de Chile. A pesar de lo anterior, el ensemble mean de la altura significativa oscila en torno a 0 [m], con leves sobrestimaciones en la zona sur de Chile y pequeñas subestimaciones en la zona norte.

Figura 48: Comparación latitudinal del GCM vs reanálisis CFSR (a) Alturas significativas asociadas al percentil 50. (b) Alturas significativas asociadas al percentil 99. (c) Diferencias entre alturas significativas percentil 50. (d) Diferencias entre alturas significativas percentil 99.



En la Figura 49 se presenta la variación latitudinal del periodo medio en el percentil 50 y 99, respectivamente. Para el percentil 50 (figuras a y c) se observa una fuerte dispersión, con diferencias de ~ 1 [s] que se despliegan en forma homogénea en la costa de Chile. El modelo MRI-CGM presenta periodos medios más largos en comparación los demás modelos, con diferencias que pueden llegar hasta los 1.5 s. Otro punto importante es el ensemble mean tiene una diferencia prácticamente nula respecto del benchmark en el sur y una diferencia de ~ 0.5 [s] en el norte de Chile, posiblemente influenciada por la contribución de periodos largos aportados por el modelo MRI-GCM. El percentil 99 presenta diferencias similares a las del percentil 50. No obstante, el ensemble mean mantiene su valor oscilando en torno a 0 en toda la costa de Chile.

Figura 49. Comparación latitudinal del GCM vs reanálisis CFSR (a) Periodos medios asociadas al percentil 50. (b) Periodos medios asociadas al percentil 99. (c) Diferencias entre periodos medios percentil 50. (d) Diferencias entre periodos medios percentil 99.



En conclusión se demuestra que el ensemble mean a nivel latitudinal es el que menores errores presenta cuando se contrasta con una base de datos benchmark reanalizada.

4.4.2.3 Cambios en percentil 50%

Magnitud del viento

En la Figura 50 se presenta la diferencia entre la magnitud de viento futura menos la histórica para el percentil 50. Se observa que la totalidad de los GCM analizados (así como el ensemble mean) coinciden en un aumento en la magnitud del viento en la zona norte y sur de Chile y una disminución en la zona central de Chile. Los aumentos oscilan en torno a 0.1 a 0.5 [m/s] y las disminuciones entre 0.1 y 0.2 [m/s] dependiendo de cada modelo analizado. Las variaciones positivas y negativas se extienden prácticamente por toda la zona subtropical y por el cinturón de vientos del oeste de la cuenca del océano Pacífico sur, por lo que puede llegar a potencialmente afectar la circulación oceánica (la cual no es analizada en este proyecto). Cabe destacar que el modelo MIROC5 es el que pronostica mayores intensidades en las proyecciones a medio siglo (2026-2045). En la zona norte y sur de Chile se proyectan cambios positivos de aproximadamente 0.3 y 0.5 [m/s] respectivamente y disminuciones en la zona centro son de 0.2 [m/s].

Altura significativa del oleaje

En cuanto a las alturas significativas del oleaje asociadas al percentil 50 (Figura 51), las simulaciones indican que los mayores aumentos se concentran en las altas latitudes (entre 50°S y 60°S) donde se evidencian cambios positivos de entre 10 y 20 [cm] aproximadamente. En la costa chilena, prácticamente la totalidad de las simulaciones coinciden en que no se presentarán cambios relevantes a medio siglo. No obstante, cabe destacar que el modelo HADGEM pronostica una disminución en la altura significativa en torno a 10 [cm] en la zona centro y sur de Chile y un aumento en torno a 20 [cm] en las altas latitudes.

Período medio del oleaje

En cuanto al periodo medio asociado al percentil 50 (Figura 52) se observa que los cambios no sobrepasan los 0.5 [s] en todos los modelos analizados. En particular, en las costas de Chile, las simulaciones indican cambios muy leves (aumentos en el periodo medio inferiores a 0.5 s).

Dirección media del oleaje

En la Figura 53 se presentan los cambios direccionales del oleaje en las costas de Chile continental e insular. Del total de 6 modelos, 4 indican la dirección media del oleaje tenderá a girar hacia el sur en sentido levógiro³⁰ (ACCESS 1.0, MIROC5, EC-EARTH y CCMC), 1 modelo presenta cambios nulos (MRI-CGM) y 1 modelo indica un giro hacia el norte, o dextrógiro, en las direcciones medias³¹ (HADGEM-ESM). El ensemble mean presenta ligeros cambios levógiros en la dirección media de la zona central de Chile y cambios nulos en la zona norte.

³⁰ Contra de las manecillas del reloj.

³¹ A favor de las manecillas del reloj.

Figura 50: Diferencia entre la velocidad del viento proyectado (2026-2045) e histórico (1985-2004) asociado al percentil 50. (a) ACCESS 1.0 (b) MRI-CGM (c) HADGEM2-ESM (d) ECEARTH (e) EC-EARTH (f) MIROC5 (e) CCMC (g) Ensemble Mean. Los valores positivos (rojos) indican un aumento a futuro.

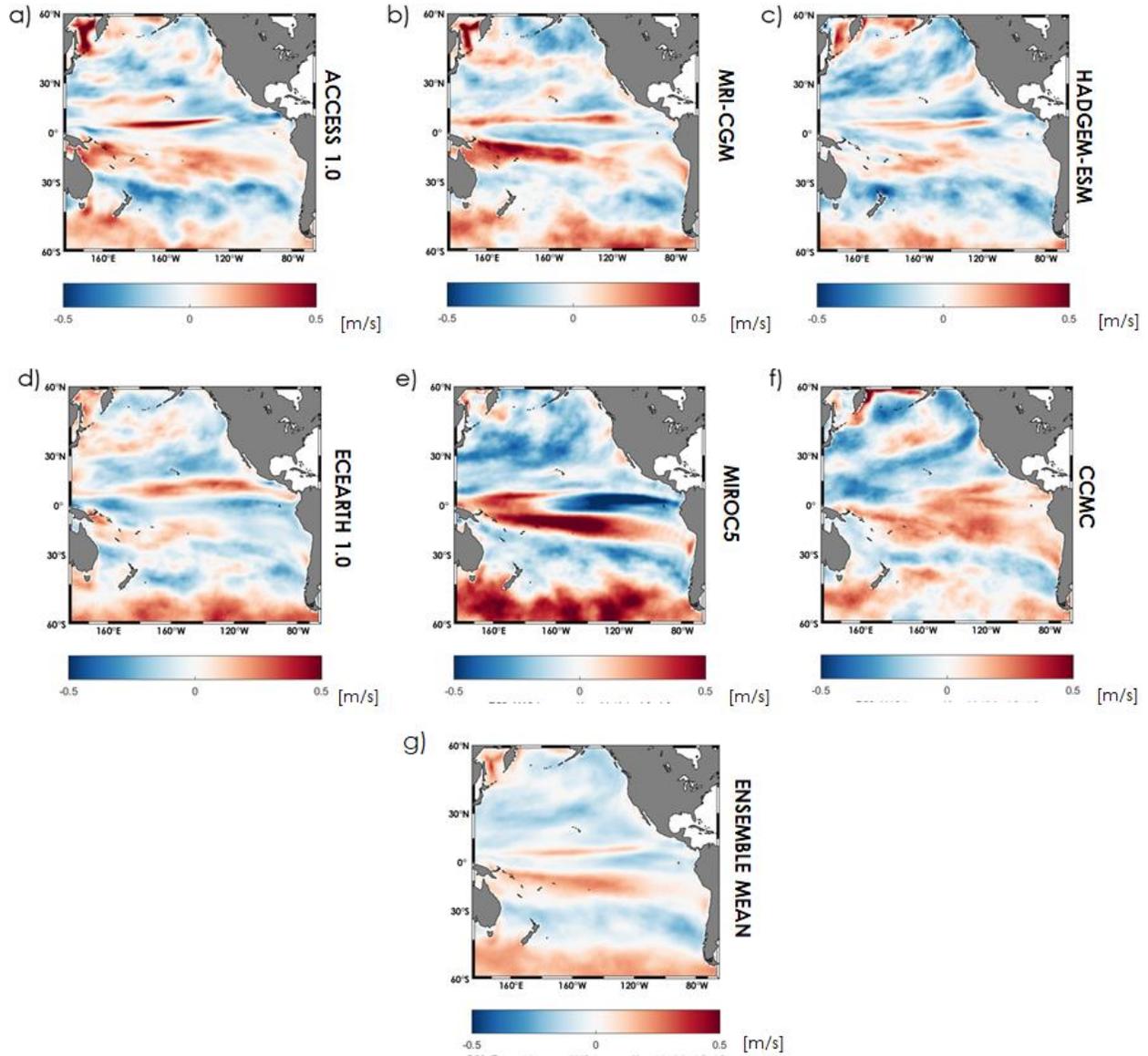


Figura 51: Diferencia entre la altura significativa proyectada (2026-2045) e histórica (1985-2004) asociada al percentil 50. a) ACCESS 1.0 2004 b) MRI-CGM3 2004. c) ACCESS 1.0 2026 d) MRI-CGM3 2026 e) ACCESS 1.0 2045 f) MRI-CGM3 2045. Los valores positivos indican una sobrestimación del modelo GCM. Los valores positivos (rojos) indican un aumento a futuro.

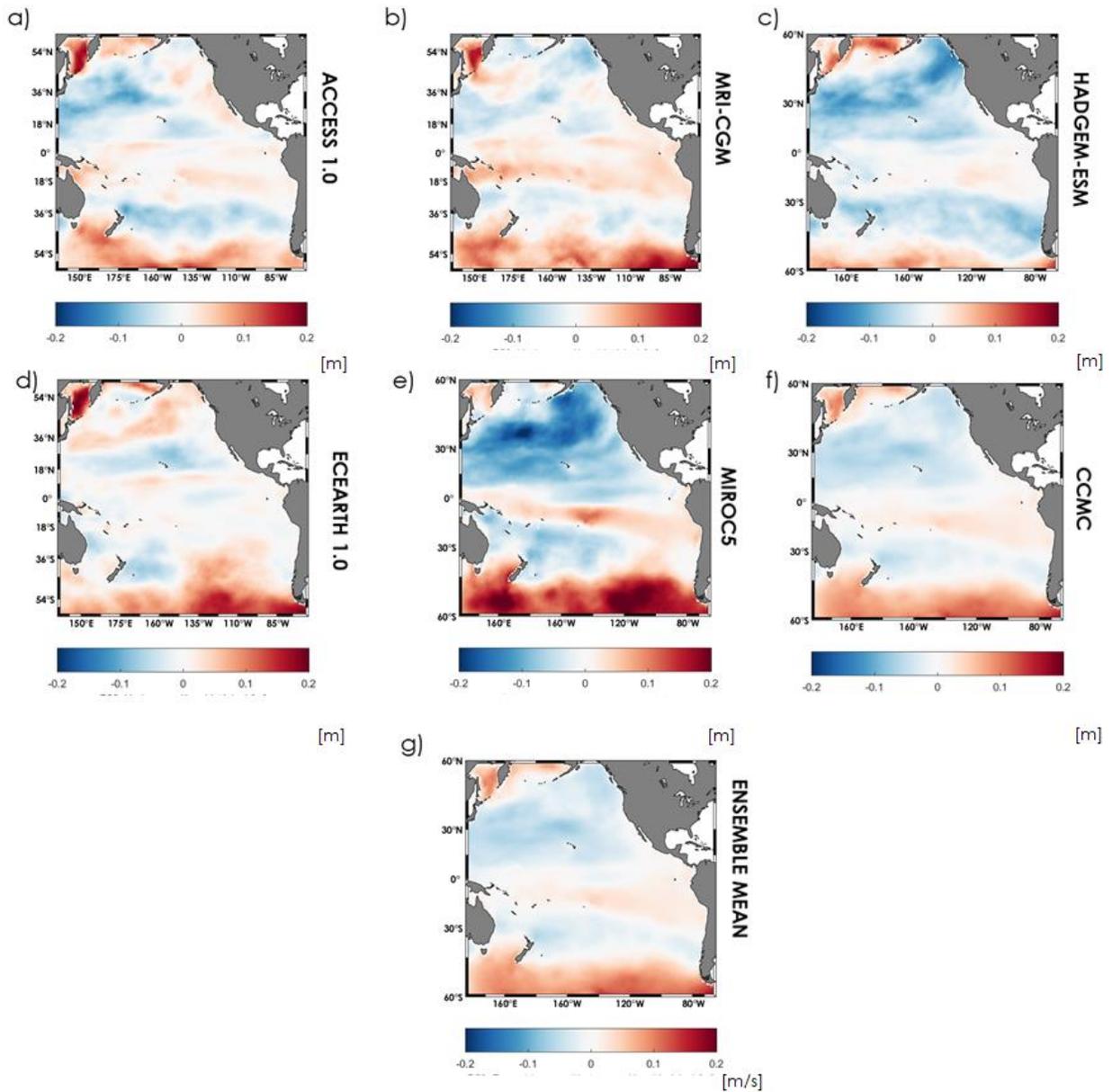


Figura 52: Diferencia entre el periodo medio proyectado (2026-2045) e histórico (1985-2004) asociado al percentil 50. a) ACCESS 1.0 2004 b) MRI-CGM3 2004. c) ACCESS 1.0 2026 d) MRI-CGM3 2026 e) ACCESS 1.0 2045 f) MRI-CGM3 2045. Los valores positivos (rojos) indican un aumento a futuro.

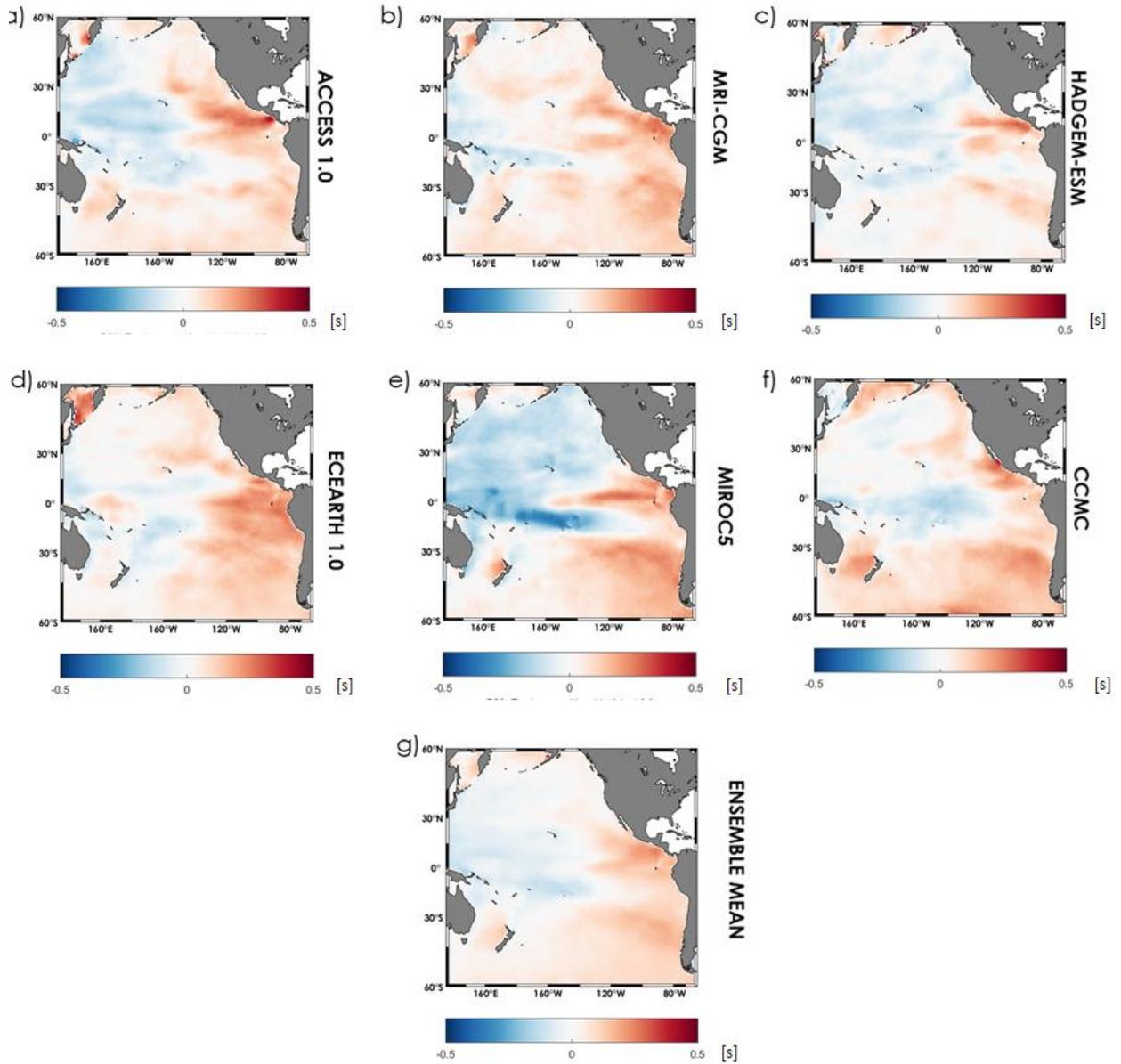
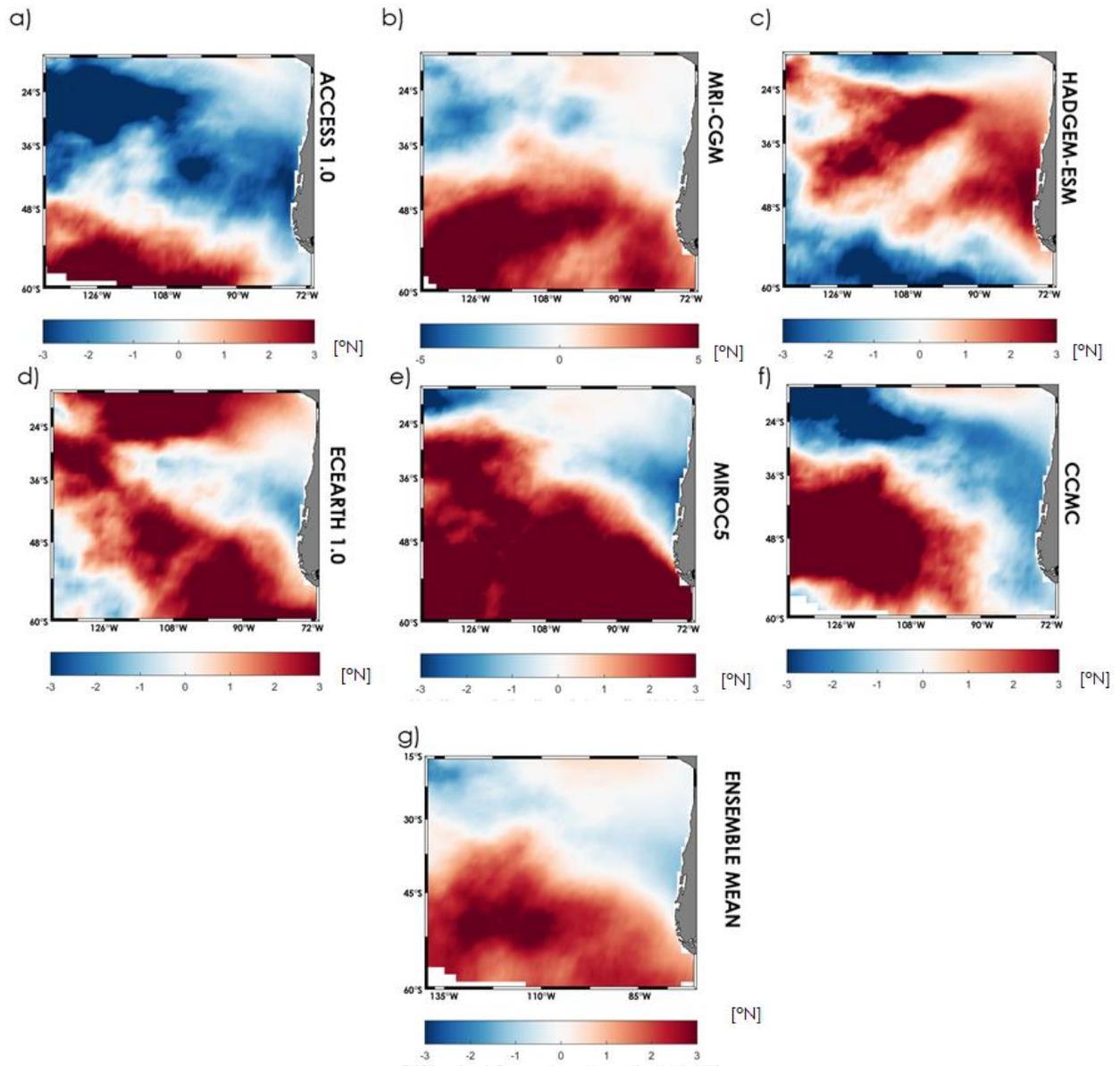


Figura 53: Diferencia entre la dirección media promedio proyectada (2026-2045) e histórica (1985-2004). (a) ACCESS 1.0 (b) MRI-CGM (c) HADGEM2-ESM (d) ECEARTH 1.0 (e) EC-EARTH (f) MIROC5 (e) CCMC (g) Ensemble Mean. Los valores positivos (rojos) indican variaciones positivas.



4.4.2.4 Cambios en el percentil 99%

Magnitud del viento

En la Figura 54 se ilustran las diferencias de la velocidad del viento superficial entre la proyección y el período histórico. Se observa que la totalidad de los modelos coinciden en un aumento en la magnitud del viento en la zona norte y sur de Chile de entre 0.1 y 0.5 [m/s] y una disminución en la zona central de Chile entre 0.3 y 0.5 [m/s]. La excepción a este patrón se observa en el modelo MIROC5, el cual proyecta una disminución entre la zona norte y centro-sur de Chile de ~0.5 [m/s]. Adicionalmente, este último modelo proyecta los cambios más intensos, pronosticando un aumento de ~0.5 [m/s] en las latitudes 50°S a 60°S, el cual se extiende longitudinalmente mar adentro. El ensemble mean reproduce el mismo patrón de cambios, es decir, un aumento en la zona norte y sur de Chile con magnitudes en torno a 0.2 [m/s] y una disminución en la zona centro con magnitudes de ~0.5 [m/s]

Altura significativa del oleaje

En la Figura 55 se presentan los cambios proyectados para la altura significativa. Se observa que todos los modelos exhiben un aumento entre 20 y 50 [cm] en las latitudes 50°S a 60°S. En la zona centro de Chile no es clara la tendencia, ya que 4 modelos (ACCESS 1.0, HADGEM, MRI y MIROC5) exhiben ligeras disminuciones de ~10 [cm] y 4 modelos (CCMC y EC-EARTH) pronostican aumentos entre 10 y 20 [cm]. Este patrón se traduce en que ensemble mean presente variaciones prácticamente nulas en las alturas significativas para la zona centro y norte de Chile. Sin embargo, en latitudes entre 50°S y 60°S, el ensemble mean es más concluyente, proyectando aumento de entre 20 y 30 [cm].

Período medio del oleaje

En la Figura 56 se muestran las variaciones proyectadas para el periodo medio. En la costa de Chile, la totalidad de modelos (incluyendo el ensemble mean) coinciden en un aumento inferior a 0.5 [s] en el periodo medio. El cambio más abrupto lo brinda el modelo MIROC5, proyectando diferencias que sobrepasan los 0.5 [s] en el país. El único modelo que exhibe un patrón diferente es el EC-EARTH, el cual pronostica ligeros aumentos inferiores a 0.5 [s] en el Pacífico Norte, variaciones nulas en el norte de Chile y ligeros cambios positivos en la zona sur.

Figura 54: Diferencia entre la velocidad del viento proyectada (2026-2045) e histórica (1985-2004) para el percentil 99. (a) ACCESS 1.0 (b) MRI-CGM (c) HADGEM2-ESM (d) ECEARTH (e) EC-EARTH (f) MIROC5 (e) CCMC (g) Ensemble Mean. Los valores positivos (rojos) indican un incremento.

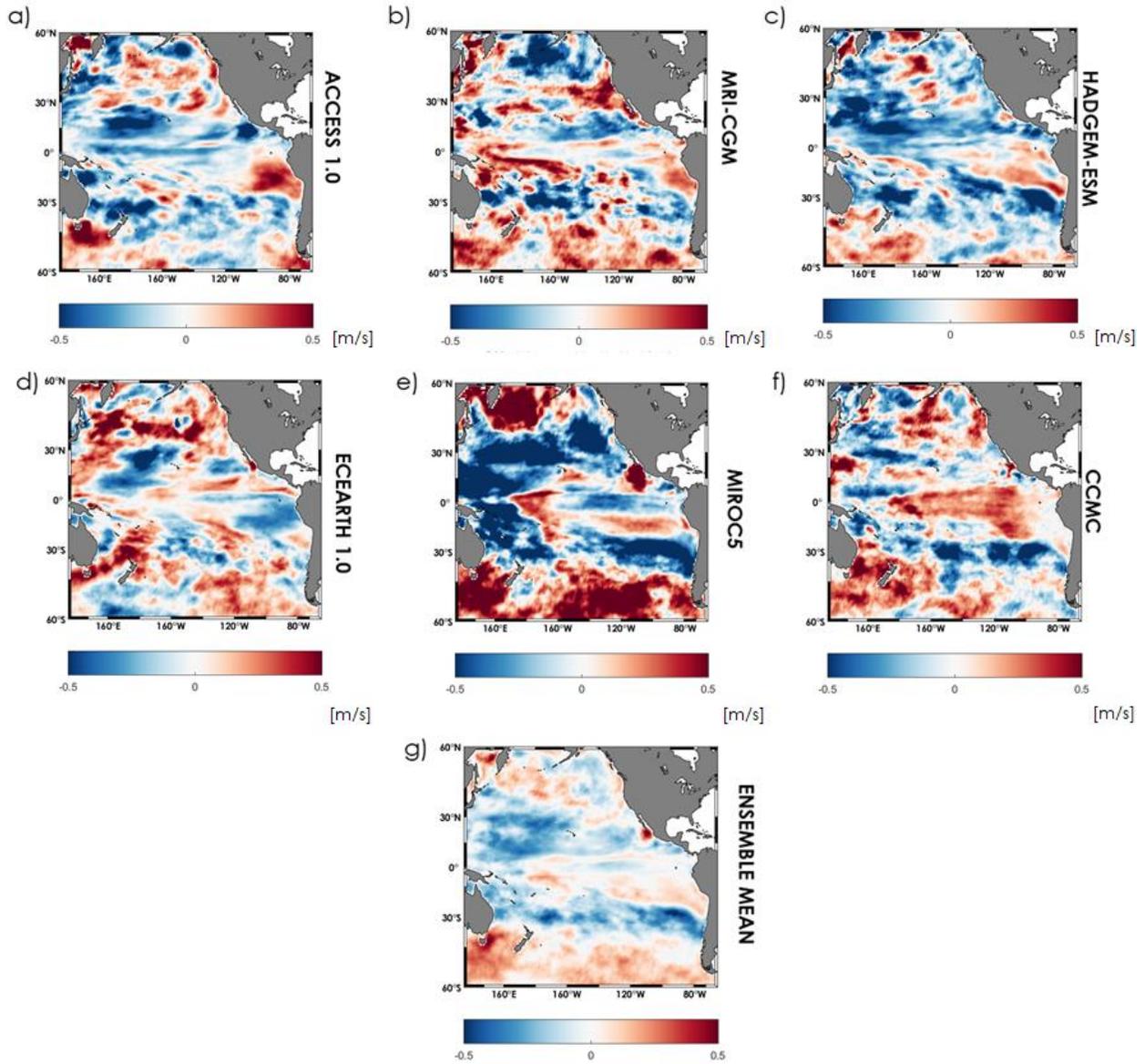


Figura 55: Diferencia entre la altura significativa proyectada (2026-2045) e histórica para el percentil 99. (a) ACCESS 1.0 (b) MRI-CGM (c) HADGEM2-ESM (d) ECEARTH (e) EC-EARTH (f) MIROC5 (e) CCMC (g) Ensemble Mean. Los valores positivos (rojos) indican variaciones positivas.

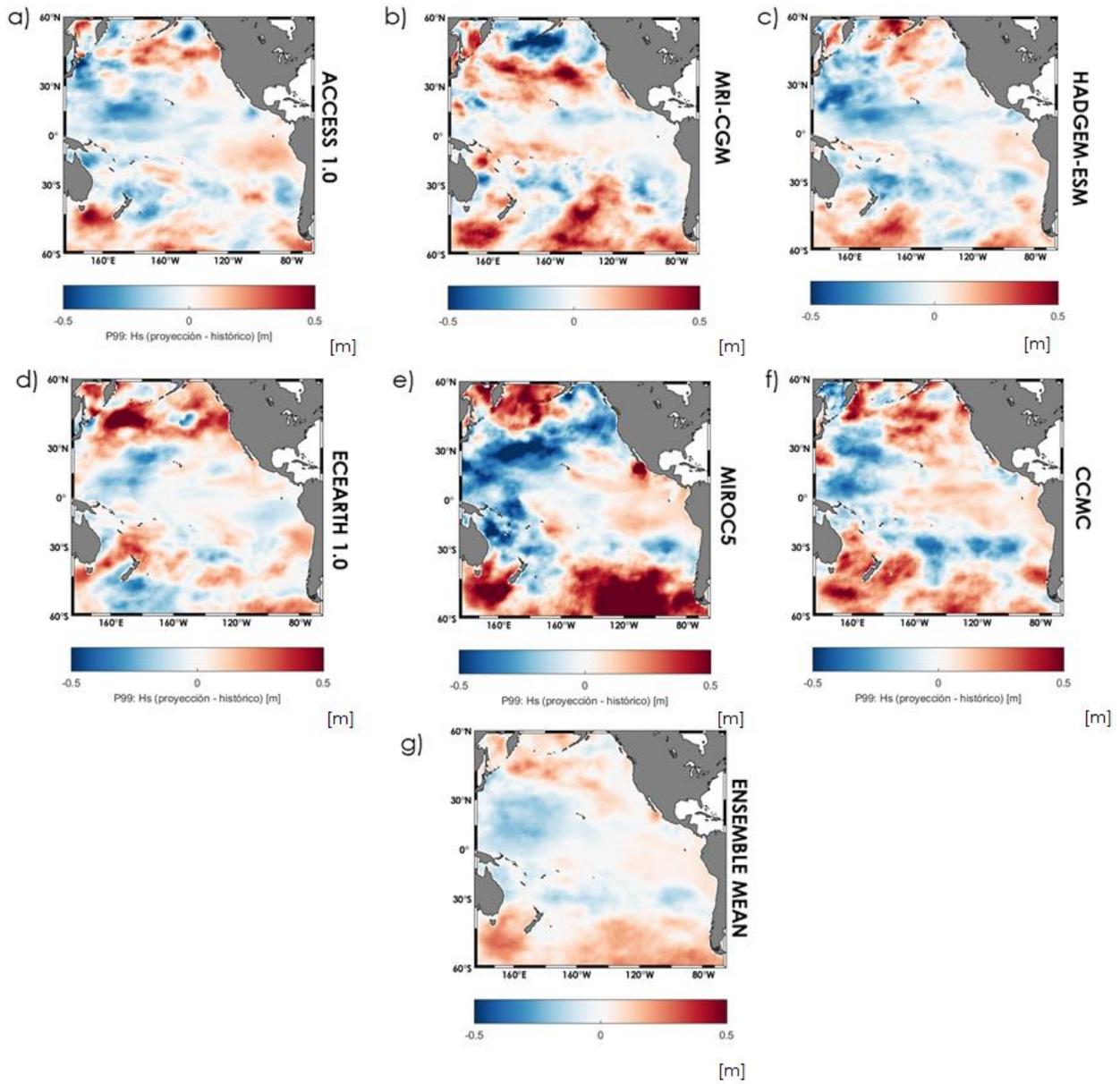
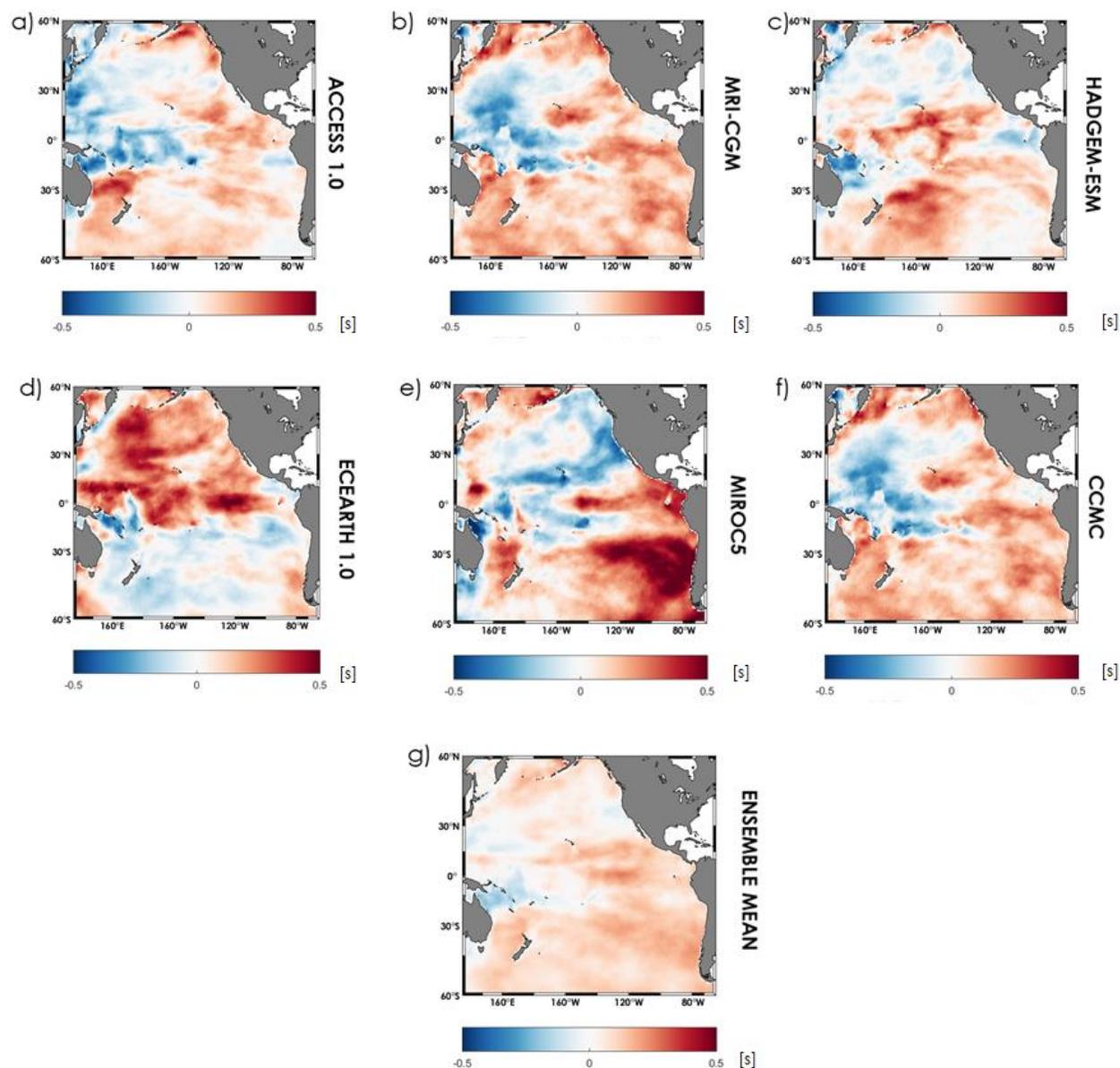


Figura 56: Diferencia entre el periodo medio proyectado (2026-2045) e histórico para el percentil 99. (a) ACCESS 1.0 (b) MRI-CGM (c) HADGEM2-ESM (d) ECEARTH 1.0 (e) EC-EARTH (f) MIROC5 (g) CCMC (g) Ensemble Mean. Los valores positivos (rojos) indican variaciones positivas.



4.4.2.5 Análisis puntual de cambios en el clima medio (percentil 50%) y extremo (percentil 99%)

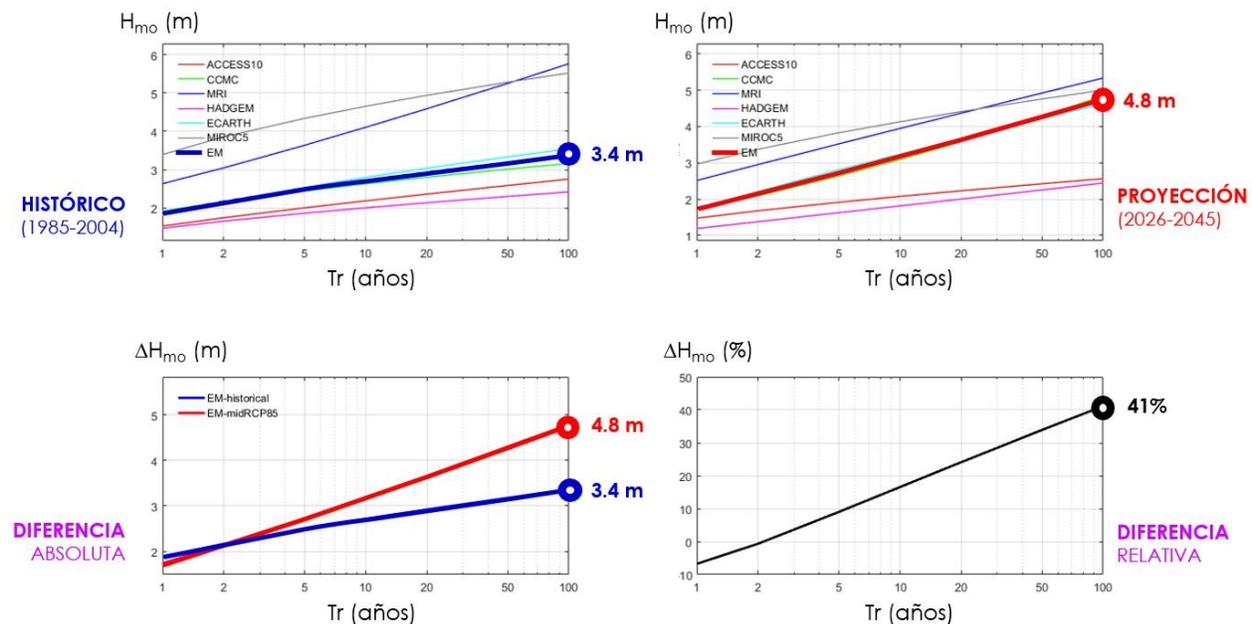
En el Anexo 6.2 se efectúa un análisis de las series de tiempo de Mejillones, Valparaíso y Talcahuano (nodos fuera de la bahía de Concepción). Un análisis similar se efectúa para Rapa Nui y el Archipiélago Juan Fernández, cuyos resultados se presentan en el Volumen 8 “Vulnerabilidad y riesgos en islas oceánicas”, que forma parte de este estudio.

4.4.3 Resultados del análisis de clima extremo

Para profundizar en el comportamiento de las grandes marejadas, se efectúa un análisis de valores extremos para las alturas significativas del oleaje frente a los principales puertos de Chile. Este análisis ha sido desarrollado en detalle en el Volumen 5: Vulnerabilidad y riesgo en puertos y aquí solo se muestran resultados en forma somera. El análisis de valores extremos –muy convencional para el diseño de obras de infraestructura- se efectúa a partir de una selección de valores extremos para el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045).

En la Figura 57 se presenta, a modo de ejemplo, un análisis de valores extremos de altura significativa obtenido a partir de seis modelos de oleaje, incluyendo la mediana entre los modelos, frente al puerto de Valparaíso. De la mera inspección de estos resultados, se observa que la altura significativa de los eventos extremos será mayor en la proyección aumentando. Por ejemplo, para un período de retorno de 100 años, el análisis entrega una altura de $H_{mo} = 3.4$ [m] para el período histórico y $H_{mo} = 4.8$ [m] para la proyección, lo que representa un aumento de $\Delta H_{mo} = 1.4$ [m], equivalente a un incremento de 41% en dicha variable. Este incremento puede tener consecuencias significativas en aquellas obras diseñadas en forma convencional (bajo el supuesto de condiciones estacionarias).

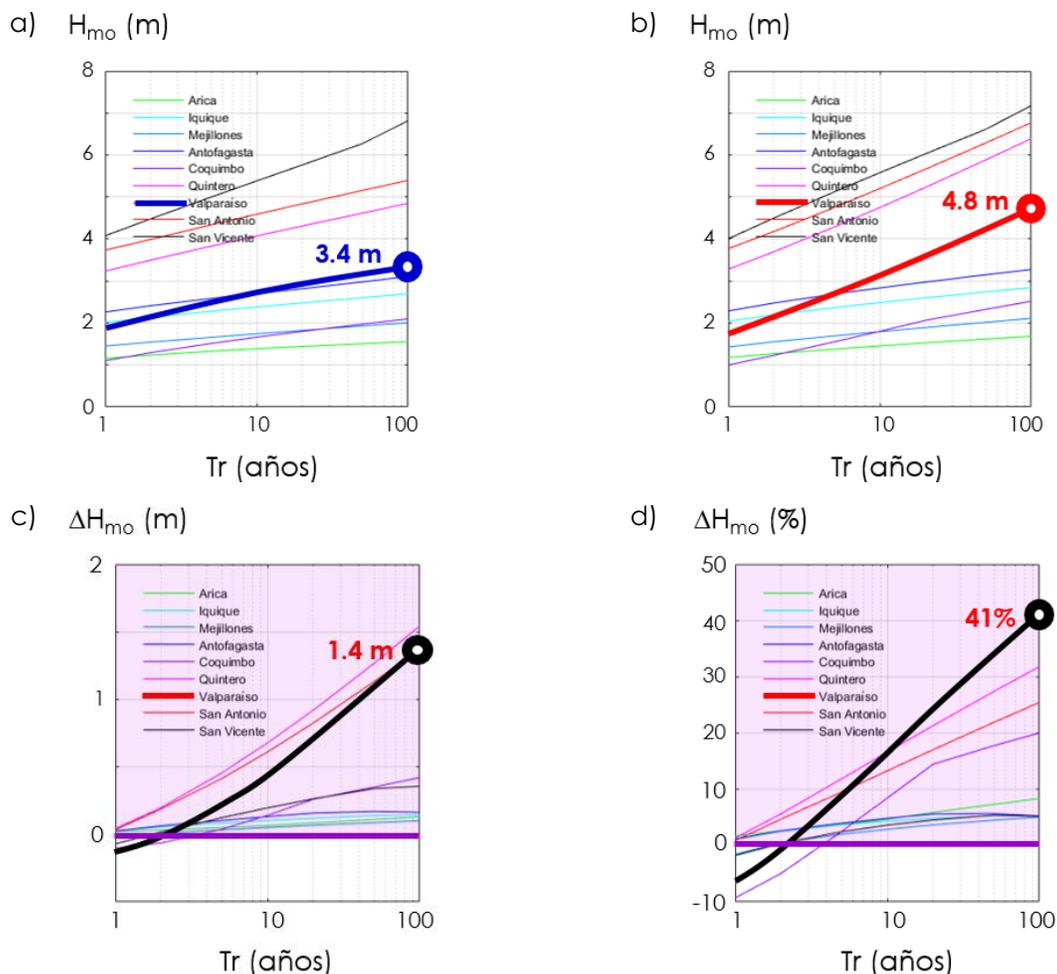
Figura 57: Valores extremos de altura significativa obtenida como la mediana de las curvas de valores extremos obtenidos a partir de seis modelos de oleaje en Valparaíso para el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045). Abajo se muestra la diferencia absoluta y la diferencia relativa entre las medianas.



El caso de Valparaíso, no obstante, es el más crítico de los puertos analizados. En la Figura 58 se presenta el mismo análisis para los puertos de Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio y San Vicente. De la mera inspección de estos resultados, se observa que, para períodos de retorno superiores a 5 años, la altura significativa de los eventos

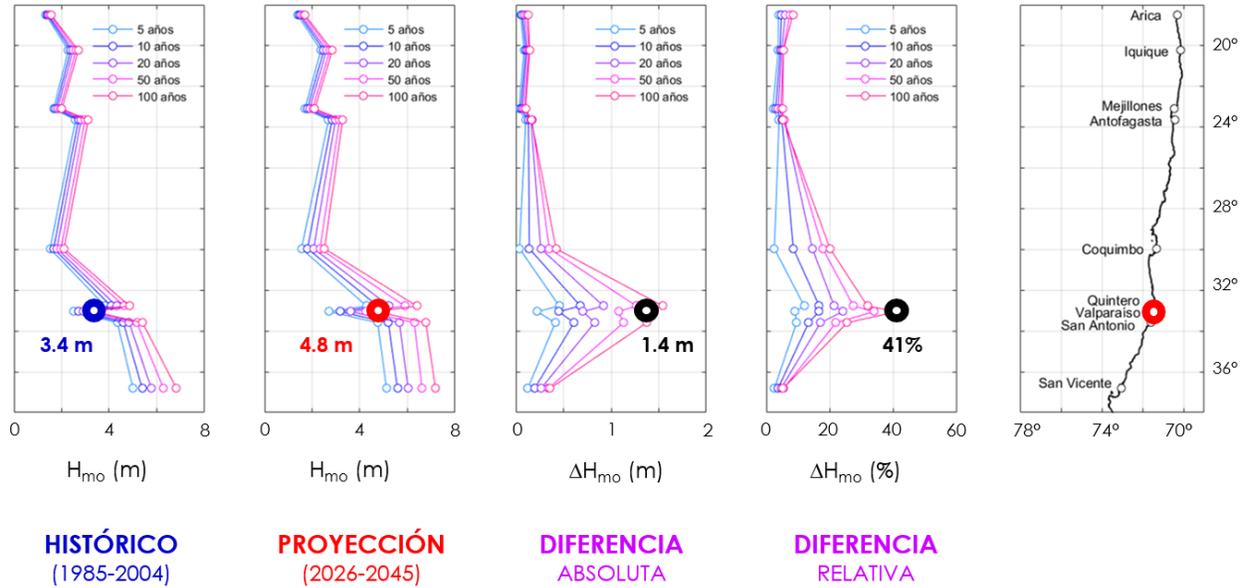
extremos será mayor en la proyección para los 9 puertos analizados. Por ejemplo, para un período de retorno de 100 años, se espera un incremento porcentual de en 8% en Arica, 41% en Valparaíso y 6% en San Vicente.

Figura 58: Análisis de valores extremos de altura significativa obtenida como la mediana de seis modelos de oleaje para a) el período histórico (1985-2004) y b) la proyección (2026-2045) frente a los 9 puertos analizados. Líneas más gruesas corresponden al análisis en Valparaíso presentado en la Figura 57. c) presenta la diferencia absoluta y b) la diferencia relativa entre los valores obtenidos para el período histórico y la proyección.



La Figura 59 muestra los resultados de altura significativa distribuidos de manera latitudinal para períodos de retorno superiores a 5 años. Se observa que en todos los casos existe un aumento de la altura significativa extrema, pero dicho aumento es mucho más significativo en la zona central (Coquimbo, Quintero, Valparaíso y San Antonio). Hacia el norte y sur, el aumento no es tan importante. Estos resultados están afectos a las condiciones locales de cada puerto y no pueden generalizarse a toda la costa de Chile. No obstante, el hecho de que en la zona central exista una tendencia generalizada de aumento significativo puede asociarse, a modo de hipótesis con cambios en el sistema climático a gran escala.

Figura 59: Análisis de valores extremos de altura significativa obtenida como la mediana de seis modelos de oleaje frente a los 9 puertos analizados, expresadas en términos latitudinales. Los círculos gruesos corresponden al análisis en Valparaíso presentado en la Figura 57. Se presenta la altura para el período histórico (1985-2004), la proyección (2026-2045), la diferencia absoluta y la diferencia relativa entre los valores obtenidos para el período histórico y la proyección.



Desde la perspectiva de la gestión de la infraestructura, las autoridades portuarias deberían establecer planes de mantenimiento y reparación de obras de atraque y abrigo que serán dañadas con más frecuencia en la medida que avance el siglo.

4.4.4 Conclusiones y recomendaciones

La Figura 60 resume los cambios entre el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045) que exhiben el viento y el oleaje para el clima medio (percentil 50%) y para eventos intensos pero no extremos (percentil 50%) en el Océano Pacífico. A partir de esta figura se analizan los cambios según zona geográfica (norte, centro, sur y austral), según se indica en la Tabla 10. En general, se observa que el comportamiento de estas variables no es uniforme a lo largo de la costa continental de Chile, dada la gran extensión geográfica que cubre en sentido latitudinal, cortando varios climas oceánicos y terrestres.

En general, el viento tenderá a aumentar en la zona norte y a disminuir en las zonas centro y sur. La zona austral presentará cambios muy variables. La implicancia del viento local en la generación de oleaje es relativa, pues su comportamiento depende de la transferencia de energía en todo el Océano Pacífico. En casos extremos como el temporal del 8 de agosto de 2015 (Winckler et al., 2017), no obstante, los vientos locales han resultado determinantes en las características de las marejadas. Dado que este estudio se focaliza en el clima medio y no se analizan casos como el de la referida marejada, se recomienda en futuros estudios analizar los vientos extremos.

En lo relativo a oleaje, la altura significativa asociada al clima medio (50%) y aquella que caracteriza eventos intensos pero no extremos (99%) tiende a experimentar cambios menores en todo el territorio, salvo por el extremo austral. El período medio aumenta en todas las costas y la dirección del oleaje presenta un giro moderado al sur atribuible a la migración al sur del Anticiclón Permanente del Pacífico Sur (Schneider, 2017) que se asocia a un desplazamiento también al sur de la zona de generación del oleaje.

La baja resolución de los modelos globales utilizados en este estudio frente a las costas de Chile (y en general, de todos los modelos disponibles) no permite la caracterización de las zonas de generación de oleaje en alta resolución, sobre todo en marejadas de origen local. En futuros estudios se debieran extender las modelaciones regionales de alta resolución sobre el territorio de Chile hacia el Océano Pacífico. Un ejemplo es la modelación global a alta resolución variable VRES-Andes³² que usa las últimas versiones del modelo atmosférico (CAM) y de superficie (CLM). El proyecto realizó una modelación de alta resolución (~14 km) en la región de los Andes Sudamericanos (Figura 61) que se encuentra en proceso de publicación. El proyecto contempló una modelación histórica (1986-2015), futuro cercano RCP 8.5 (2031-2060), y futuro lejano RCP 8.5 (2071-2100). Desafortunadamente, durante este estudio, el modelo fue corrido sin almacenar los datos de viento para el escenario y períodos requeridos por el Ministerio del Medio Ambiente.

³² El proyecto VRES-Andes ha sido desarrollada por el Centro de Cambio Global UC en conjunto con el Lawrence Berkeley National Laboratory, el National Center for Atmospheric Research (NCAR), el Massachusetts Institute of Technology, y la Universidad de California Davis.

Figura 60: Cambios entre el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045) para la magnitud de viento, la altura significativa, periodo y dirección media para los percentiles 50% y 99%, según zona geográfica (norte, centro, sur y austral).

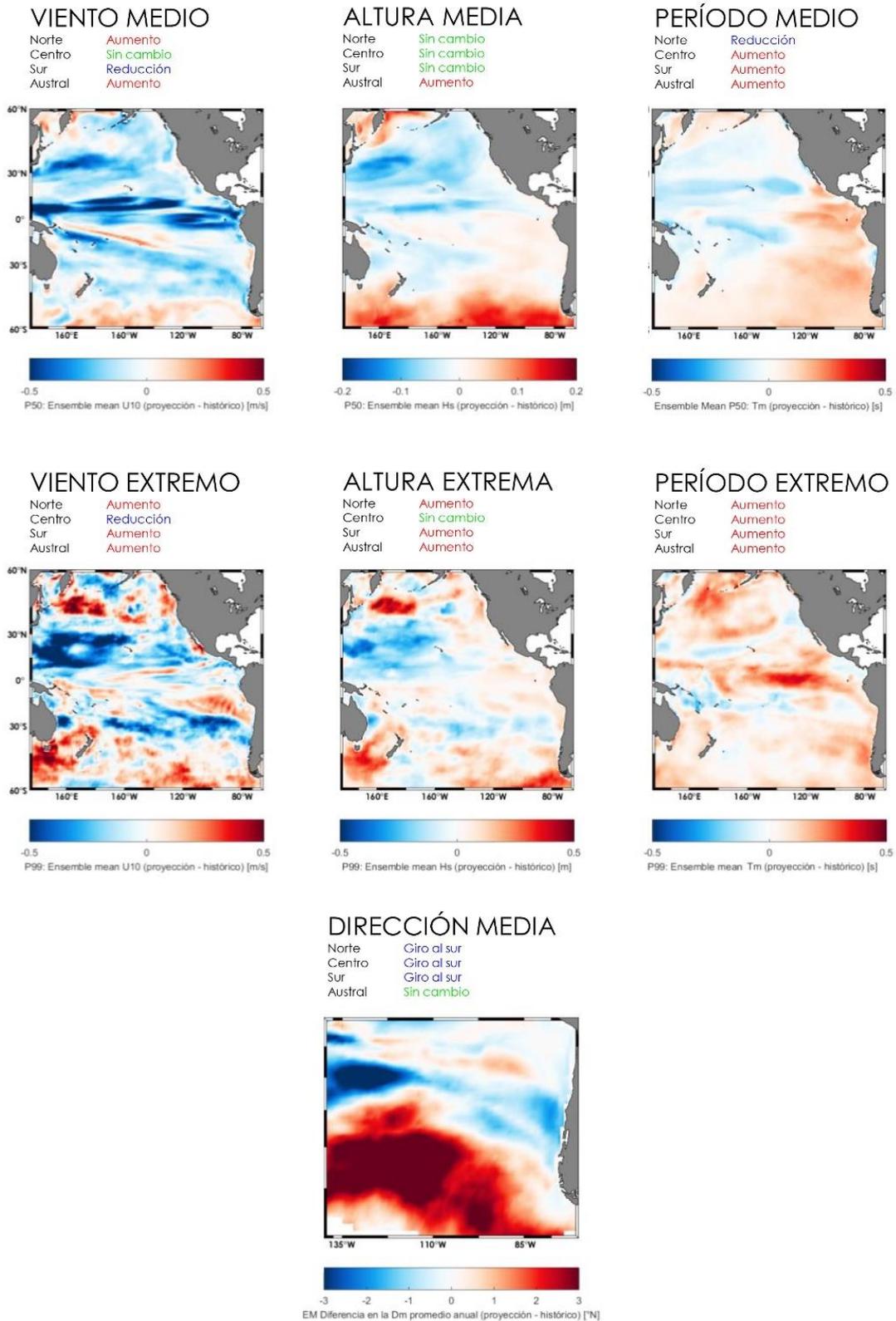
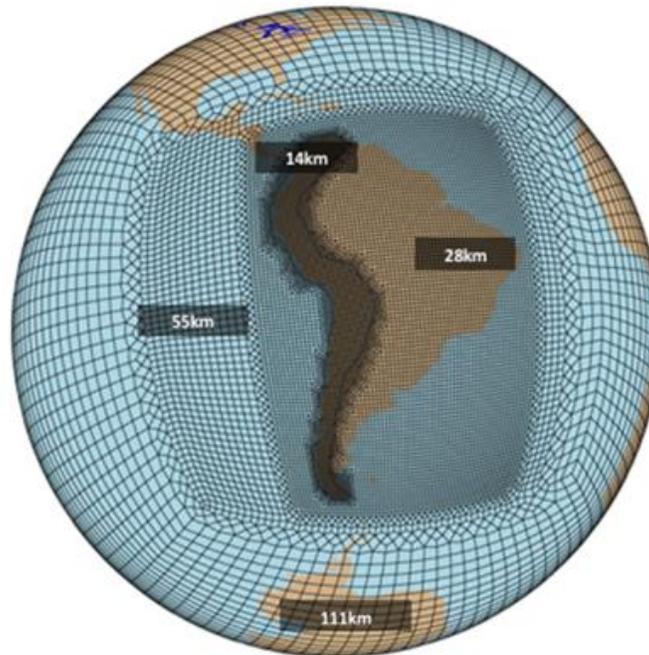


Figura 61: Grilla de resolución variable para la modelación de alta resolución disponible en la región de los Andes Sudamericanos (proyecto VRES-Andes).



Fuente: Elaboración propia.

4.5 REFERENCIAS

Ardhuin, F., Rogers, E., Babanin, A., Filipot, J. F., Magne, R., Roland, A., Collard, F. (2010). Semiempirical Dissipation Source Functions for Ocean Waves. Part I: Definition, Calibration, and Validation. *Journal of Physical Oceanography*. Vol 40., 1918-1941.

Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., Aguirre, C., Valdivia, J., Parra, C., Méndez, L., Contreras, C., Winckler, P. Y Molina, M. (2016). Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. Valparaíso: Universidad de Valparaíso.

Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H. Y Winckler, P. (2017). Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database. *Ocean Modelling*, N° 116, p 16–32.

Campos, R. (2016). Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile. Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico, Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile. 136pp.

Chawla, A., & Tolman, H. (2008). Obstruction grid for spectral wave models. *Ocean Modelling* 22, 12–25.

Esparza, C. (2017). Calibración y validación del modelo numérico WAVEWATCH III en la simulación de marejadas del 3/7/2013 y 8/8/2015. Valparaíso: Universidad de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Oceánica.

Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J., & Barnett, T. (1985). Computation and parametrization of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum .Part II: Parametrization of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *Journal of Physical Oceanography* Vol. 15, 1378-1391.

Hemer, M. A., & Trenham, C. E. (2016). Evaluation of a CMIP5 derived dynamical global wind wave climate model ensemble. *Ocean Modelling*, 103, 190-203.

- Izaguirre, C., Méndez, F. J., Espejo, A., Losada, I. J., & Reguero, B. G. (2013). Extreme wave climate changes in Central-South America. *Climatic change*, 119(2), 277-290. DOI 10.1007/s10584-013-0712-9
- Lucero, F., Catalán, P. A., Ossandón, Á., Beyá, J., Puelma, A., & Zamorano, L. (2017). Wave energy assessment in the central-south coast of Chile. *Renewable Energy*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.076>.
- Martínez, C., Contreras-López, M., Winckler, P., Hidalgo, H., Godoy, E. Y Agredano, R. (2018). Coastal erosion in central Chile: A new hazard?, *Ocean & Coastal Management*, 156: 141-155.
- Mediavilla, D., Sepúlveda, H. Nearshore assessment of wave energy resources in central Chile (2009e2010), *Renew. Energy* 90 (2016) 136-144.
- Molina, M., Contreras, M., Winckler, P., Salinas S., y Reyes, M. (2011) Consideraciones sobre las Variaciones de Mediano y Largo Plazo del Oleaje en el Diseño de Obras Marítimas en Chile Central. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*. Volumen 123, Número 3, pp. 77-88. (Incluido en Revista Chilena de Ingeniería N°464).
- National Geophysical Data Center (2006). 2-minute Gridded Global Relief Data (ETOPO2) v2. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5J1012Q .
- Poli, P., Hans Hersbach, And Dick P. Dee, Adrian J. Simmons, Frédéric Vitart, Patrick Laloyaux, David G. H. Tan, Carole Peubey, Jean-Noël Thépaut, Yannick Trémolet, Elías V. Hólm, Massimo Bonavita, Lars Isaksen, And Michael Fisher (2016). ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0556.1
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., . . . Treadon , R. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *American Meteorology Society J. Climate*, 19, <http://dx.doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>.
- Schneider W, Donoso D, Garcés-Vargas J, Escribano R. 2017. Water-column cooling and sea surface salinity increase in the upwelling region off central-south Chile driven by a poleward displacement of the South Pacific High. *Prog Oceanogr* 151: 38-48. doi: 10.1016/j.pocean.2016.11.004.
- Sen, P (1968). Estimated of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *J Am Stat Assoc* 39:1379-1389
- Silva, R. (2005). Análisis y descripción estadística del oleaje. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie de Docencia N°49.
- Theil, H. (1950), "A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. I, II, III", *Nederl. Akad. Wetensch., Proc.*, 53: 386–392, 521–525, 1397–1412.
- Tolman, H. (2014). User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18. Environmental Modeling Center Marine Modeling and Analysis Branch.
- Wessel, P., & Smith, W. (1996). A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database. *Journal of Geophysical Research* 101, doi: 10.1029/96JB00104. issn: 0148-0227.

5 ESTUDIO DE COTA DE INUNDACIÓN

La cota de inundación se puede descomponer como la contribución de las siguientes dinámicas:

- Cambio del nivel medio del mar de largo plazo
- Marea astronómica
- Marea meteorológica
- Setup de oleaje (magnitud promediada en el período)
- Runup de oleaje (magnitud instantánea)
- Ondas infragravitatorias
- Tsunamis
- Cambios verticales del terreno
- Efecto de los caudales efluentes en ríos

En este estudio no se incluye la contribución de las ondas infragravitatorias, los tsunamis, los cambios verticales del terreno y el efecto de los caudales efluentes. Se asume asimismo que la topobatimetría es constante.

5.1 METODOLOGÍA

Con ello, la cota de inundación histórica (C) respecto al Nivel de Reducción de Sondas³³ (NRS) se define como (Figura 62, abajo)

$$C = Z_A + Z_M + Z_W + R_W \quad |_{1985-2004}$$

Donde todos los términos de la derecha se calcular para el período histórico. La cota de inundación futura (Figura 62, arriba), por su parte, se calcula con la expresión:

$$C = \Delta Z_{NMM} + Z_A + Z_M + Z_W + R_W \quad |_{2026-2045}$$

Donde:

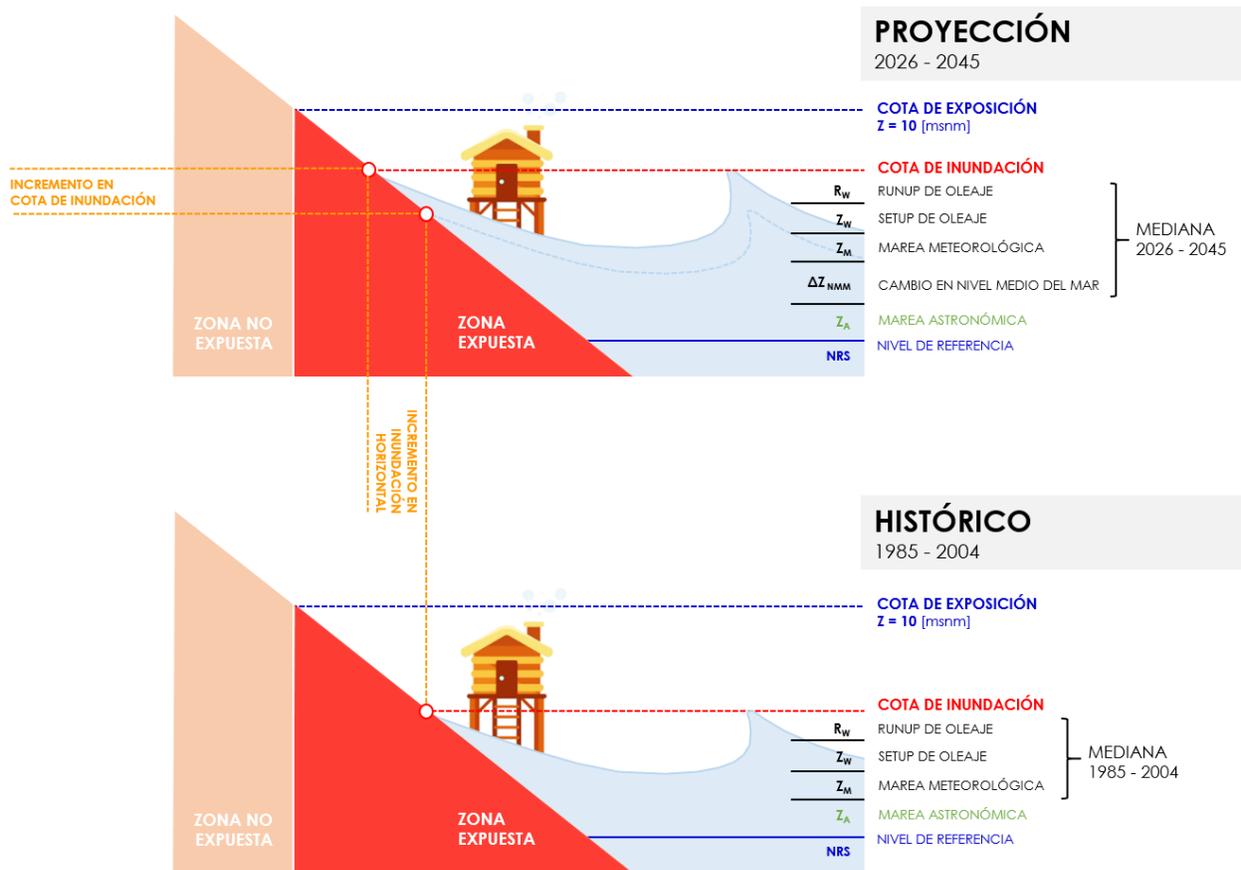
ΔZ_{NMM} Diferencia entre el Nivel Medio del Mar para la proyección ($Z_{NMM\ 2026-2045}$) y el período histórico ($Z_{NMM\ 1985-2004}$). Este valor se obtiene a partir de los cálculos efectuados en este Informe. Para efectos de este estudio, esta diferencia se obtiene interpolando los valores latitudinalmente cada 5 [km].

Z_A Semiamplitud de la marea astronómica.

Z_M Marea meteorológica (*storm surge*) producto de la acción combinada de cambios en la presión atmosférica y el viento.

³³ El Nivel de Reducción de Sondas (NRS) se define en Chile como el nivel más bajo que alcanza la marea estando la luna en perigeo, durante una sicigia. Con los cambios en el Nivel Medio del Mar (NMM), esta referencia puede cambiar.

Figura 62: Definición de componentes utilizadas para el cálculo de la cota de inundación.



Z_W Sobreelevación por oleaje (wave setup) producto de los cambios espaciales de momentum que experimenta el oleaje en las inmediaciones de la rotura. A diferencia del runup y por definición, el wave setup es una magnitud promediada en el período.

R_W Runup de oleaje producto del ascenso instantáneo del oleaje en la costa. Este valor tiene una distribución estadística dentro de un estado de mar³⁴. Para efectos de este estudio, se utiliza el $R_W^{2\%}$, que corresponde al valor que es excedido el 2% del tiempo en un estado de mar.

Para efectos de este estudio, el runup y el setup de oleaje se calculan mediante la fórmula de Stockdon (2006) a partir de los datos de oleaje en aguas profundas, propagados a la costa en forma simplificada considerando los efectos de refracción y asomeramiento. La propagación se efectúa cada 5 [km] considerando la Teoría Lineal del Oleaje y la Ley de Snell. La propagación se efectúa para la altura significativa asociada al percentil 99%, con coeficientes de agitación generados con el período medio y dirección media asociada al percentil 50%.

³⁴ Se define un estado de mar como el intervalo de tiempo durante el cual es posible asumir que las propiedades estadísticas del oleaje son estacionarias.

5.2 TRANSFORMACIÓN DE OLAJE

Dependiendo del sistema analizado, la transformación de las propiedades del oleaje desde aguas profundas a la costa se efectúa mediante una metodología simplificada de baja resolución pero gran cobertura y una transferencia espectral de alta calidad a puntos discretos. La metodología simplificada se utiliza para el análisis de:

- Sistemas humanos y naturales
- Caletas
- Humedales

Y considera los efectos de asomeramiento (shoaling) y refracción (Figura 63) para un oleaje regular. La transferencia espectral, que además de estos procesos permite calcular la difracción en oleaje irregular, se utiliza en el análisis de:

- 35 playas
- 9 puertos

Ambas metodologías se describen a continuación.

Figura 63: Procesos costeros que experimenta el oleaje al sentir el fondo (Adaptado de Svendsen, 2006).



5.2.1 Transformación mediante metodología simplificada

A medida que el oleaje se aproxima a la costa comienza sentir el fondo, experimentando una serie de procesos costeros entre los que destacan el asomeramiento (*shoaling*), la refracción, la difracción, la reflexión y la rotura (Figura 63). Debido a estos procesos, el oleaje experimenta variaciones en la altura del oleaje y en la dirección de propagación. En esta sección presentamos una metodología simplificada de transformación de oleaje que considera los procesos de asomeramiento y refracción que experimenta el tren de olas entre la condición de aguas profundas (imperturbada por el fondo) y los 20 [m] de profundidad, en nodos ubicados cada 5 [km] en sentido latitudinal.

El procedimiento de cálculo consiste en transformar la altura significativa, período y dirección de oleaje en aguas profundas (H_0, T, θ_0) a una profundidad de 20 [m] (H_{20m}, T, θ_{20m}), arbitrariamente escogida pero estimada adecuada como para caracterizar el oleaje costero. Para ello, se asume oleaje regular, teoría lineal del oleaje y la Ley de Snell para la refracción. Así, la altura del oleaje a 20 [m] de profundidad se calcula mediante la expresión:

$$H_{20m} = H_0 \times K_r \times K_s, \quad (1)$$

donde H_0 corresponde a la altura del oleaje en aguas profundas, K_r al coeficiente de refracción y K_s es el coeficiente de shoaling. El coeficiente de refracción se calcula mediante la expresión

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos(\theta_0)}{\cos(\theta_{20m})}}, \quad (2)$$

donde θ_0 es la dirección de oleaje en aguas profundas y θ_{20m} es la dirección a 20 [m] de profundidad (ambas definidas respecto de la ortogonal de la línea de costa), y que se relacionan mediante la Ley de Snell

$$\theta_{20m} = \arcsen\left\{\frac{L_{20m}}{L_0} \sen(\theta_0)\right\}, \quad (3)$$

la cual asume una batimetría recta y paralela. El coeficiente de shoaling se calcula mediante la expresión

$$K_s = 1/\sqrt{2n \times \tanh(kd)} \quad (4)$$

Donde $k = 2\pi/L$ corresponde al número de onda y

$$n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi d}{L} / \senh\left(\frac{4\pi d}{L}\right) \right] \quad (5)$$

La longitud de onda se calcula mediante la expresión:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right), \quad (6)$$

Donde $h = 20$ [m] y T es el período en aguas profundas, considerado constante durante la propagación. En resumen, el resultado de la propagación permite obtener la altura de ola H_{20m}

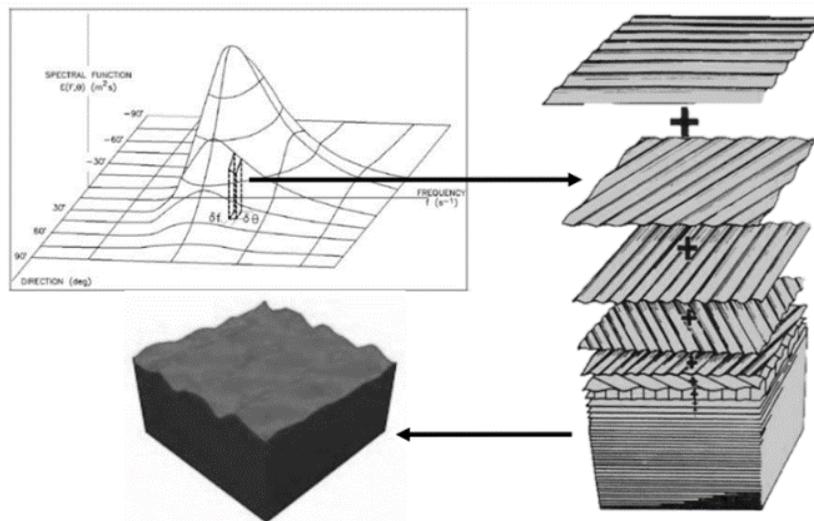
y la dirección del oleaje local θ_{20m} a una profundidad de 20 [m], asumiendo también que el período es el mismo en aguas profundas y aguas someras.

5.2.2 Transformación espectral de oleaje

Para estudiar el oleaje en las zonas portuarias, se transfirieron las series de tiempo de los estados de mar desde aguas profundas a los 9 puertos estatales para el período histórico y la proyección. Las series corresponden a espectros bidimensionales, cada 3 horas, de 1 hindcast forzado con vientos CFSR y los 6 GCM simulados en este estudio. Se utilizó el modelo numérico SWAN (Massey et al. 2011), el cual utiliza como dato de entrada los espectros irregulares de oleaje en aguas profundas sin necesidad de utilizar parametrizaciones en su distribución de frecuencias o direcciones. Dado el volumen de los datos de oleaje de aguas profundas³⁵, se optó por aplicar una técnica desarrollada por Massel (1989) e implementada y validada por Nicolau del Roure (2010) y Puelma (2015). Esta técnica consiste en la transformación de una serie de espectros sintéticos de altura unitaria ($H_{m0} = 1$ m)³⁶ cuyas características principales (período pico y dirección de incidencia en aguas profundas) abarcan el 100% de las componentes activas de los espectros de oleaje (Figura 64).

Como resultado del proceso de transferencia del oleaje, se obtiene una serie de tiempo en la boca de cada puerto, en la forma de espectros bidimensionales de oleaje. A partir de estos espectros se pueden calcular alturas espectrales H_{m0} , periodos y direcciones medias T_m del oleaje frente a los puertos. Esta técnica, denominada "transformación pseudo-espectral", se detalla a continuación.

Figura 64: Espectro bidimensional de oleaje. Fuente: Puelma (2015).



³⁵ La cantidad de datos es del orden de cientos de miles de estados de mar.

³⁶ Esta condición permite que el oleaje sea lineal en aguas profundas y mantenga su linealidad al ser propagado al sitio de estudio.

El método pseudo-espectral se basa en el supuesto de que la altura significativa espectral en la bocana de entrada de una dársena portuaria H_{local} se representa como la altura significativa en aguas profundas H_{ap} multiplicada por un coeficiente de agitación $K_a(T, \theta)$, el cual es dependiente del periodo T y la dirección de incidencia del oleaje θ .

$$H_{local} = H_{ap} \times K_a$$

Dicho supuesto es válido siempre y cuando el oleaje es lineal (Massel et al., 1989). De la definición de altura significativa espectral dada en la literatura (ej. Hothuijsen, 2007) la ecuación anterior se puede reescribir como:

$$4\sqrt{m_0}_{local} = 4\sqrt{m_0}_{ap} \times K_a$$

Donde m_0 es el momento de orden cero del espectro bidimensional $S(f, \theta)$, definido en términos de la frecuencia f y la dirección θ , el cual se define como:

$$m_0 = \int_0^{2\pi} \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f, \theta) df d\theta$$

Por lo cual la ecuación (1), puede reescribirse como:

$$\sqrt{\int_0^{2\pi} \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f, \theta) df d\theta}_{local} = \sqrt{\int_0^{2\pi} \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f, \theta) df d\theta}_{ap} \times K_a$$

o

$$\left\{ \int_0^{2\pi} \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f, \theta) df d\theta \right\}_{local} = \left\{ \int_0^{2\pi} \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f, \theta) df d\theta \right\}_{ap} \times K_a^2$$

La ecuación anterior se puede reescribir en términos diferenciales:

$$\{S(f, \theta)d\theta\}_{local} = \{S(f, \theta)d\theta\}_{ap} \times K_a^2$$

Finalmente, la expresión anterior se puede reescribir en términos diferenciales:

$$S(f, \theta) = K_a^2 * S(f, \theta) \frac{d\theta_{ap}}{d\theta_{local}}$$

El coeficiente $K_a(T, \theta)$ representa físicamente la variación porcentual del bin de energía que arriba al sector de interés, y el término

$$\frac{d\theta_{ap}}{d\theta_{local}}$$

representa la variación direccional del bin de energía local respecto al bin de energía del mismo espectro en aguas profundas.

El coeficiente de agitación $K_a(T, \theta)$ se puede generar por medio de funciones de transferencia lineales, a partir de la propagación de un conjunto de espectros sintéticos unitarios ($H_{m0} = 1 [m]$) representativos de las componentes energéticas activas del espectro de oleaje offshore que potencialmente pueden arribar al interior de los puntos de interés.

Para discretizar el espectro y generar la transformación de cada una de sus componentes, en este trabajo se utilizan un total de 96 espectros sintéticos unitarios del tipo JONSWAP (Hasselmann et al. 1973), abarcando periodos desde los 4 [s] hasta los 26 [s] discretizados cada 2 [s] y direcciones entre la 202.5° hasta la 360° discretizadas cada 22.5°.

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Cambio en el nivel absoluto medio del mar

Los cambios en el nivel absoluto medio del mar se obtienen del estudio efectuado en la sección 3.2. La magnitud del ascenso en la proyección (2026-2045) fluctúa entre 0.15 en el sur y 0.18 [m] en el norte, con un rango alcanzan del orden de ± 0.10 [m] a lo largo de Chile. En forma conservadora, se considera una aumento de 0.24 [m] en el norte y 0.20 [m] en Canal Chacao y que corresponde al valor correspondiente al final de la proyección, esto es 2025.

5.3.2 Marea astronómica

Dado que existe variabilidad en la magnitud de esta componente en el tiempo, en este estudio se utiliza en forma conservadora el máximo valor de la marea para cada puerto patrón³⁷. Luego, se interpolan estos valores latitudinalmente cada 5 [km].

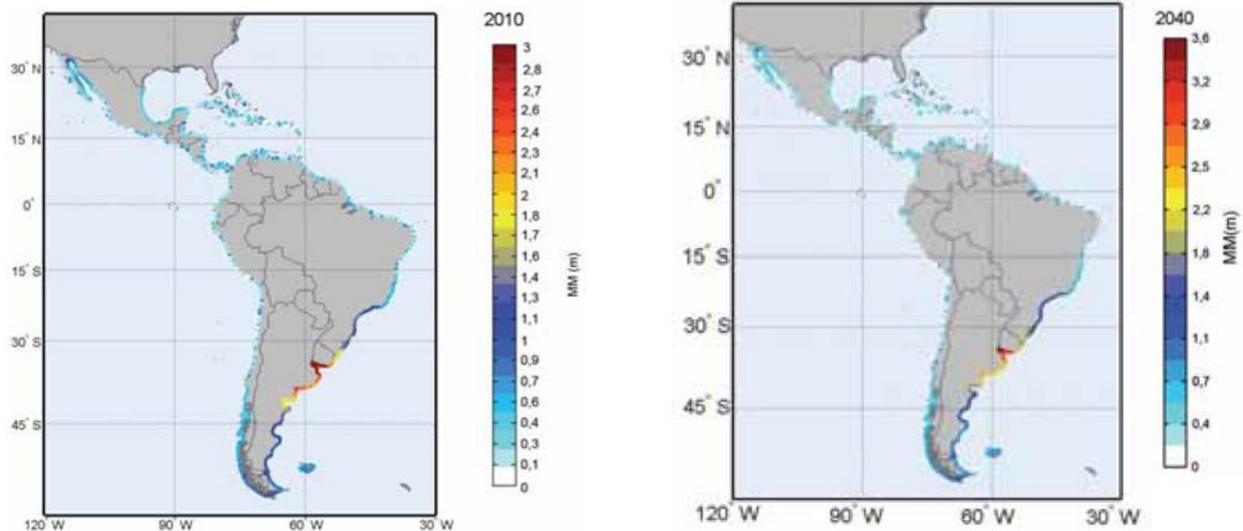
5.3.3 Marea meteorológica

Para efectos de este estudio se utiliza en marea meteorológica asociada a un periodo de retorno de 50 años en los años 2010 (como representativa del período histórico) y 2040 (como representativa de la proyección), obtenidos ambos set de valores de CEPAL (2015; Figura 65). Estos valores son interpolados latitudinalmente cada 5 [km].

Figura 65: Marea meteorológica de periodo de retorno 50 años en el año 2010 (izquierda) y 2040 (derecha),

³⁷ Este procedimiento simplifica también el cálculo puesto que el utilizar otros planos mareales implica digitalizar las tablas de marea y/o analizar los datos históricos del nivel del mar disponibles en el sitio (www.ioc-sealevelmonitoring.org), lo que no es posible dados los plazos acotados del estudio.

obtenidos de CEPAL (2015).



5.3.4 Runup y setup de oleaje

La Figura 66 muestra los cambios de las variables utilizadas para la propagación entre aguas profundas y los 20 [m] de profundidad. De la Figura 67 a la Figura 70 se muestran los resultados de la propagación del oleaje desde aguas profundas a los 20 [m] de profundidad, en sentido latitudinal, cada 5 [km]. En todas estas figuras, la primera fila corresponde al período histórico (1985-2004), la segunda a la proyección (2026-2045) y la tercera a la diferencia entre ambos (proyección – período histórico). Se presentan también los percentil 50% (izquierda) y percentil 99% (derecha) para ilustrar el clima medio y extremo de oleaje, respectivamente. Para efectos de la cota de inundación, sólo se utiliza este último.

5.3.5 Cota de inundación

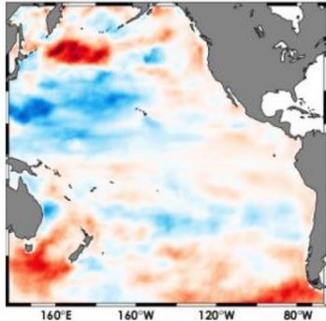
La Figura 71 muestra las componentes utilizadas para calcular cota de inundación entre Arica y el Canal Chacao para el período histórico y la proyección, además de la diferencia de cada componente entre ambos períodos período. La Figura 72 muestra la cota de inundación, junto a todas las componentes utilizadas en su cálculo. Se observa que valores mínimos de ~2.5 [m] NRS en el extremo norte a ~3.5 [m] NRS en el Canal Chacao para el escenario histórico y de entre ~2.8 [m] a ~3.8 [m] NRS para ambos extremos. El aumento de la cota de inundación abarca desde +0.23 a +0.29 [m] en los extremos sur y norte, respectivamente, y se debe principalmente al aumento del nivel del mar, cuyo aumento abarca desde +0.20 a +0.24 [m] para dichos extremos, respectivamente. La marea meteorológica y la contribución del oleaje, si bien son importantes en determinar la cota de inundación, no experimentan cambios sustantivos entre ambos períodos.

Figura 66: Cambios entre el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045) para la altura

significativa asociada al percentil 99% y el periodo medio y dirección media para el percentiles 50% utilizados en la propagación del oleaje, según zona geográfica (norte, centro, sur y austral).

ALTURA EXTREMA

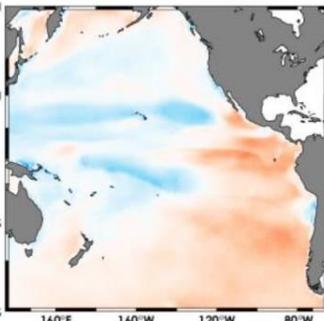
Norte Aumento
 Centro Sin cambio
 Sur Aumento
 Austral Aumento



0.5 0 0.5
 P99: Ensemble mean Hs (proyección - histórico) [m]

PERÍODO MEDIO

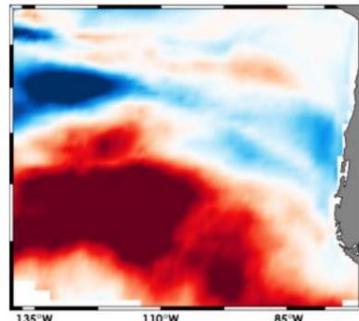
Norte Reducción
 Centro Aumento
 Sur Aumento
 Austral Aumento



-0.5 0 0.5
 Ensemble Mean P50: Tm (proyección - histórico) [s]

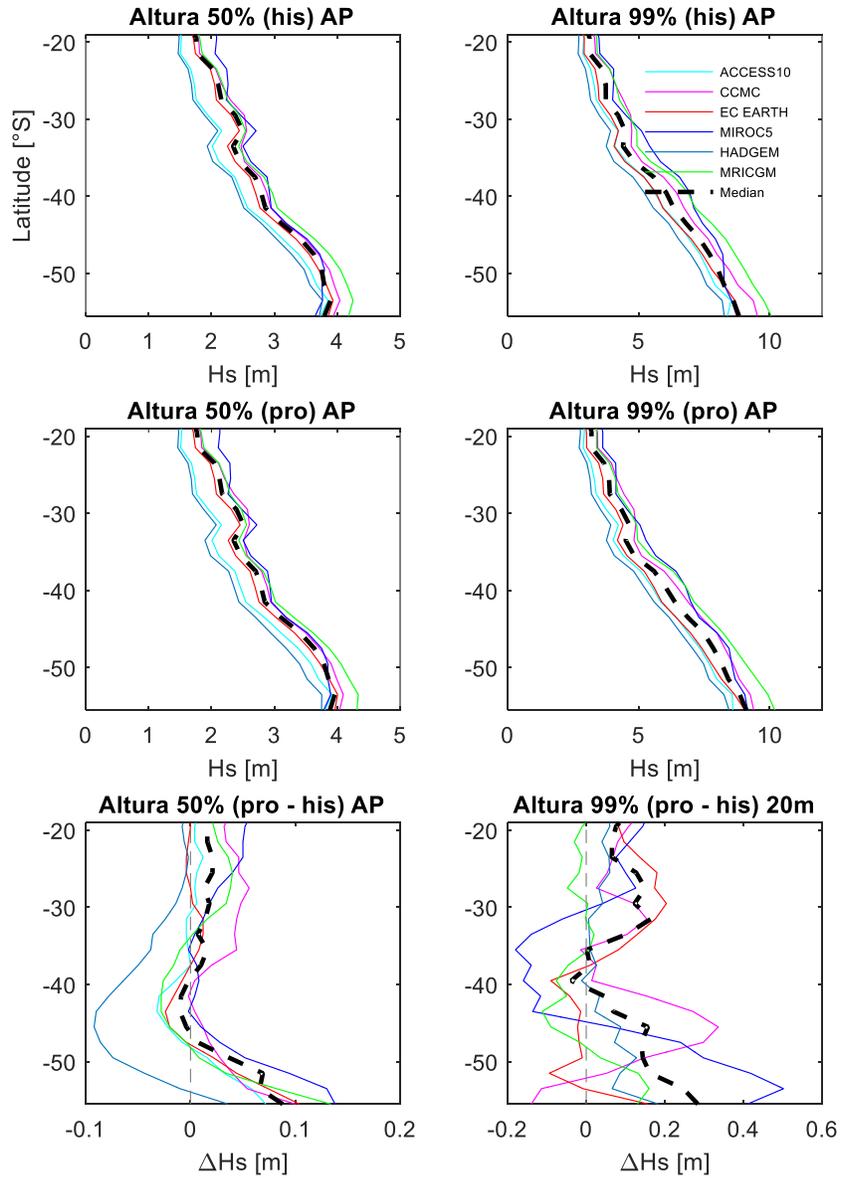
DIRECCIÓN MEDIA

Norte Giro al sur
 Centro Giro al sur
 Sur Giro al sur
 Austral Sin cambio



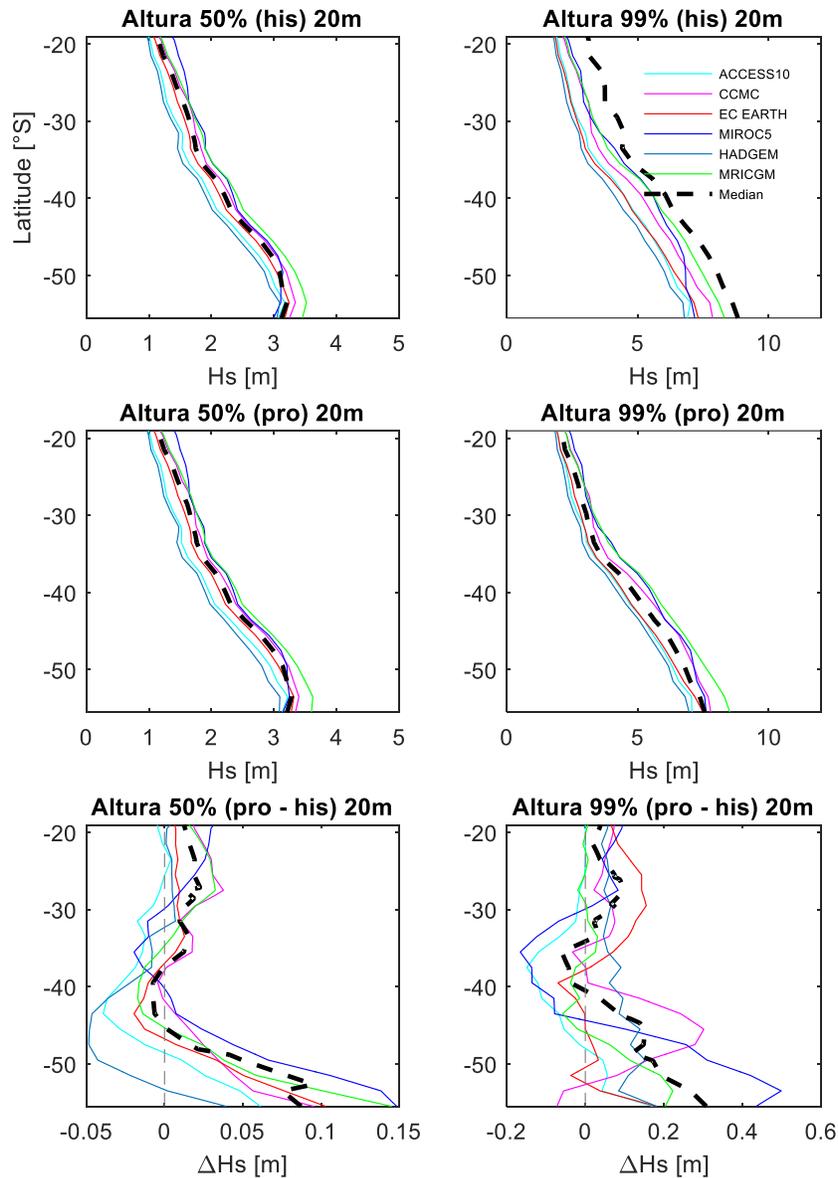
-3 -2 -1 0 1 2 3
 EM Diferencia en la Dm promedio anual (proyección - histórico) [°N]

Figura 67: Distribución latitudinal de percentil 50% (izquierda) y percentil 99% (derecha) de la altura significativa espectral en aguas profundas. La primera fila corresponde al período histórico (1985-2004), la segunda a la proyección (2026-2045) y la tercera a la diferencia entre ambos (proyección – período histórico). Se muestran los seis modelos utilizados y la mediana entre modelos en líneas punteadas³⁸.



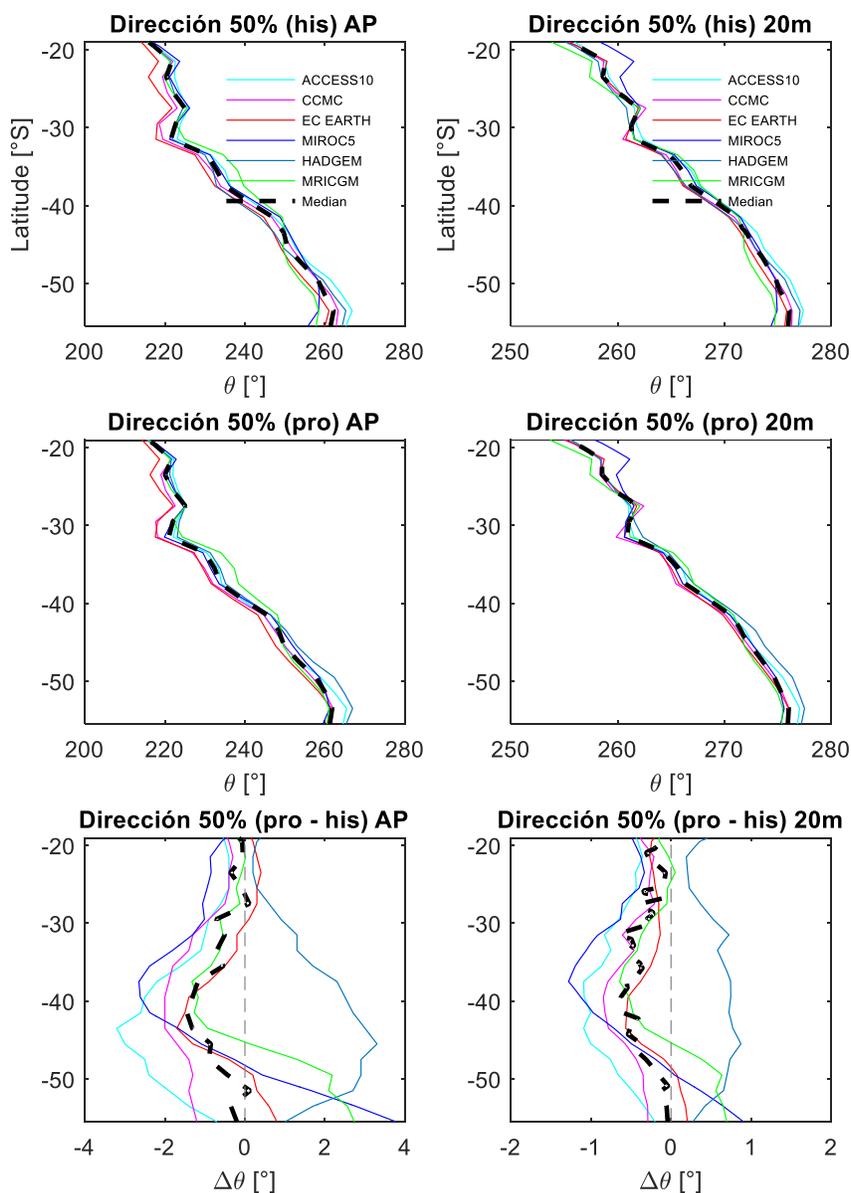
³⁸ En la tercera fila, la línea punteada se obtiene de la diferencia entre la mediana de la proyección (segunda fila) y la histórica. Las diferencias entre modelos se incluyen para efectos ilustrativos, pero no se usan en el cálculo.

Figura 68: Distribución latitudinal de percentil 50% (izquierda) y percentil 99% (derecha) de la altura significativa espectral a 20 metros de profundidad. La primera fila corresponde al período histórico (1985-2004), la segunda a la proyección (2026-2045) y la tercera a la diferencia entre ambos (proyección – período histórico). Se muestran los seis modelos utilizados y la mediana entre modelos en líneas punteadas³⁹.



³⁹ En la tercera fila, la línea punteada se obtiene de la diferencia entre la mediana de la proyección (segunda fila) y la histórica. Las diferencias entre modelos se incluyen para efectos ilustrativos, pero no se usan en el cálculo.

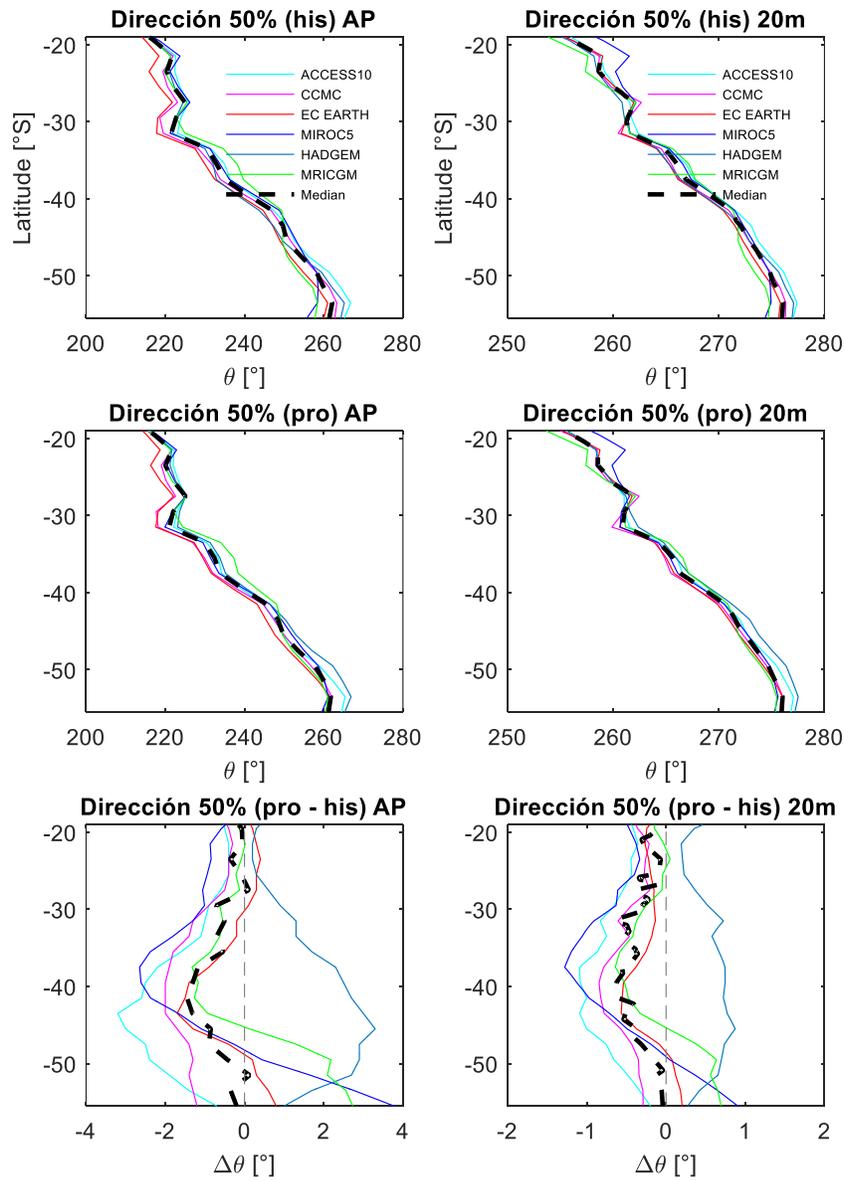
Figura 69: Distribución latitudinal de percentil 50% (izquierda) y percentil 99% (derecha) del período medio en aguas profundas⁴⁰. La primera fila corresponde al período histórico (1985-2004), la segunda a la proyección (2026-2045) y la tercera a la diferencia entre ambos (proyección – período histórico). Se muestran los seis modelos utilizados y la mediana entre modelos en líneas punteadas⁴¹.



⁴⁰ No se incluyen los datos del período medio a 20 m de profundidad, dado que, de acuerdo a la metodología utilizada, éstos no cambian. Incluso usando metodologías más sofisticadas (e.g. transferencia espectral de oleaje), los cambios son menores en la medida que no haya rotura o vientos locales muy intensos (de muy baja recurrencia) entre aguas profundas y aguas someras.

⁴¹ En la tercera fila, la línea punteada se obtiene de la diferencia entre la mediana de la proyección (segunda fila) y la histórica. Las diferencias entre modelos se incluyen para efectos ilustrativos, pero no se usan en el cálculo.

Figura 70: Distribución latitudinal de percentil 50% (izquierda) de la dirección media en aguas profundas (izquierda) y a 20 m (derecha). La primera fila corresponde al período histórico (1985-2004), la segunda a la proyección (2026-2045) y la tercera a la diferencia entre ambos (proyección – período histórico). Se muestran los seis modelos utilizados y la mediana entre modelos en líneas punteadas⁴².



⁴² En la tercera fila, la línea punteada se obtiene de la diferencia entre la mediana de la proyección (segunda fila) y la histórica. Las diferencias entre modelos se incluyen para efectos ilustrativos, pero no se usan en el cálculo.

Figura 71: Componentes utilizadas para calcular cota de inundación entre Arica y el Canal Chacao para el período histórico y la proyección (arriba). Diferencia de cada componente entre el período histórico y para la proyección.

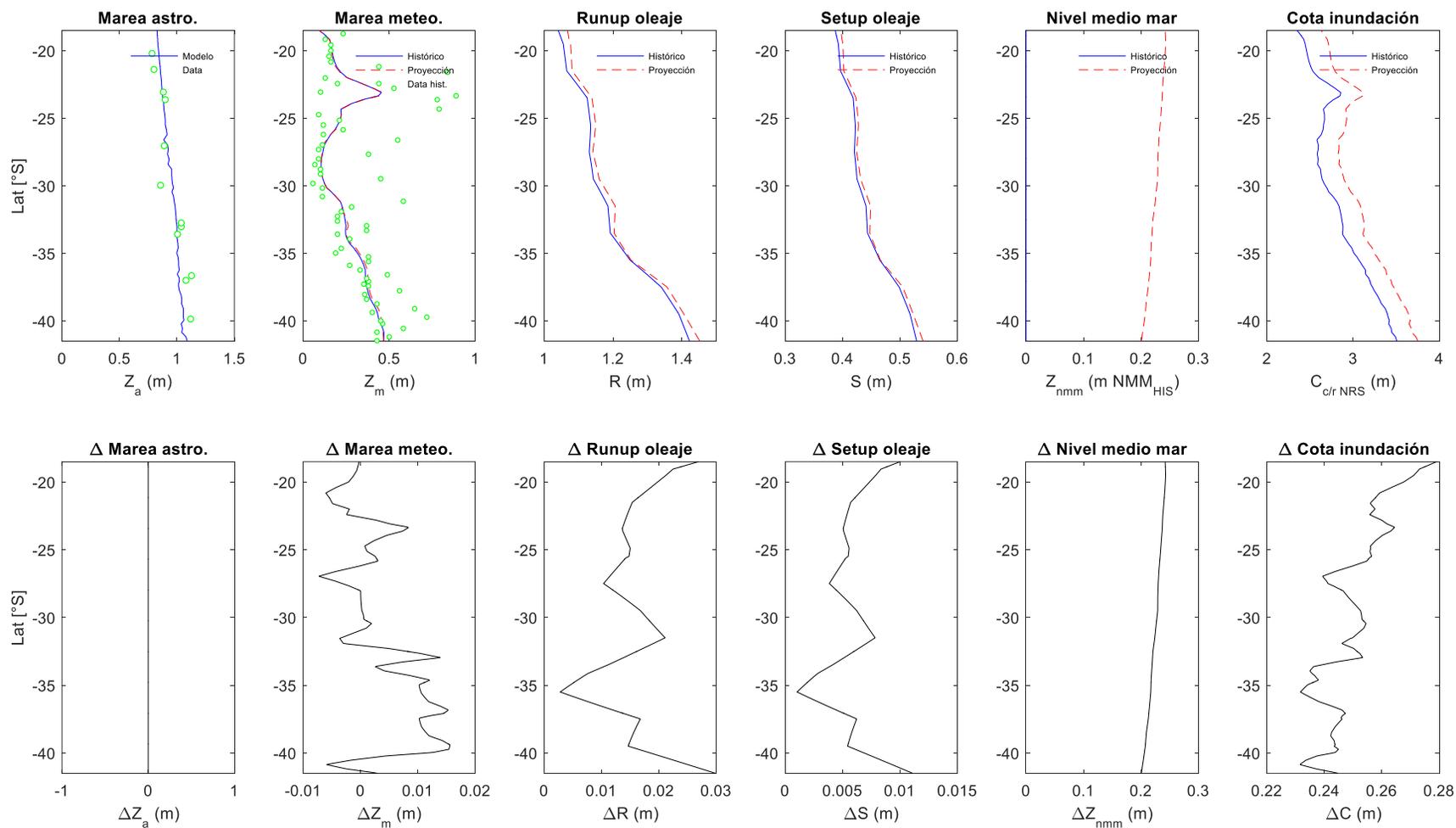
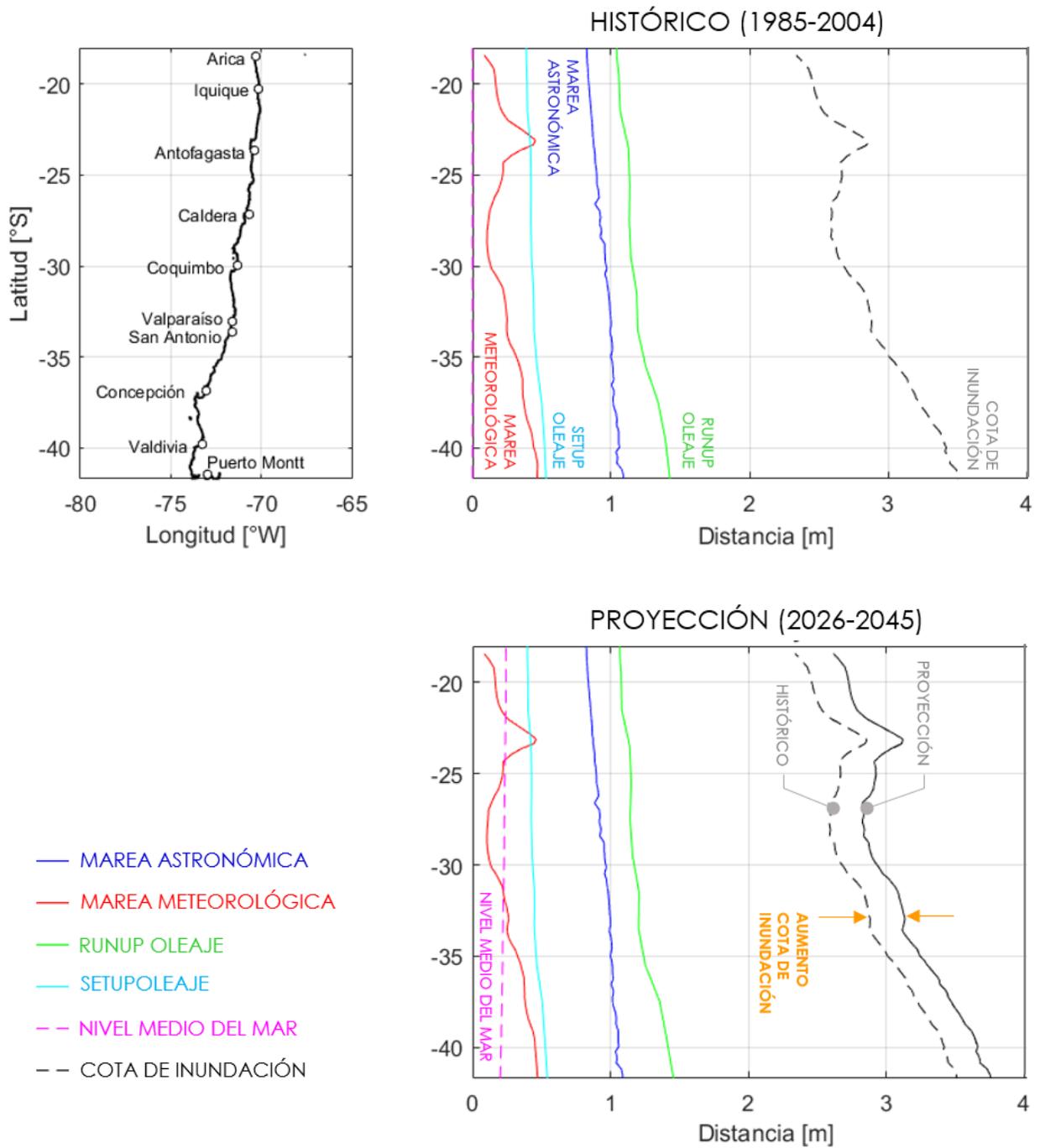


Figura 72: Cálculo de la cota de inundación entre Arica y el Canal Chacao para el período histórico (arriba) y para la proyección (abajo). En el panel de abajo se muestra también la cota de inundación histórica para facilitar la comparación entre ambos períodos.



5.3.6 Cartografía comunal del área vulnerable

La cartografía comunal del área vulnerable para las 44 comunas analizadas al cierre del informe se presenta en el Informe de vulnerabilidad. La escala utilizada no permite visualizar grandes cambios asociados al incremento máximo de 30 [cm] en la cota de inundación.

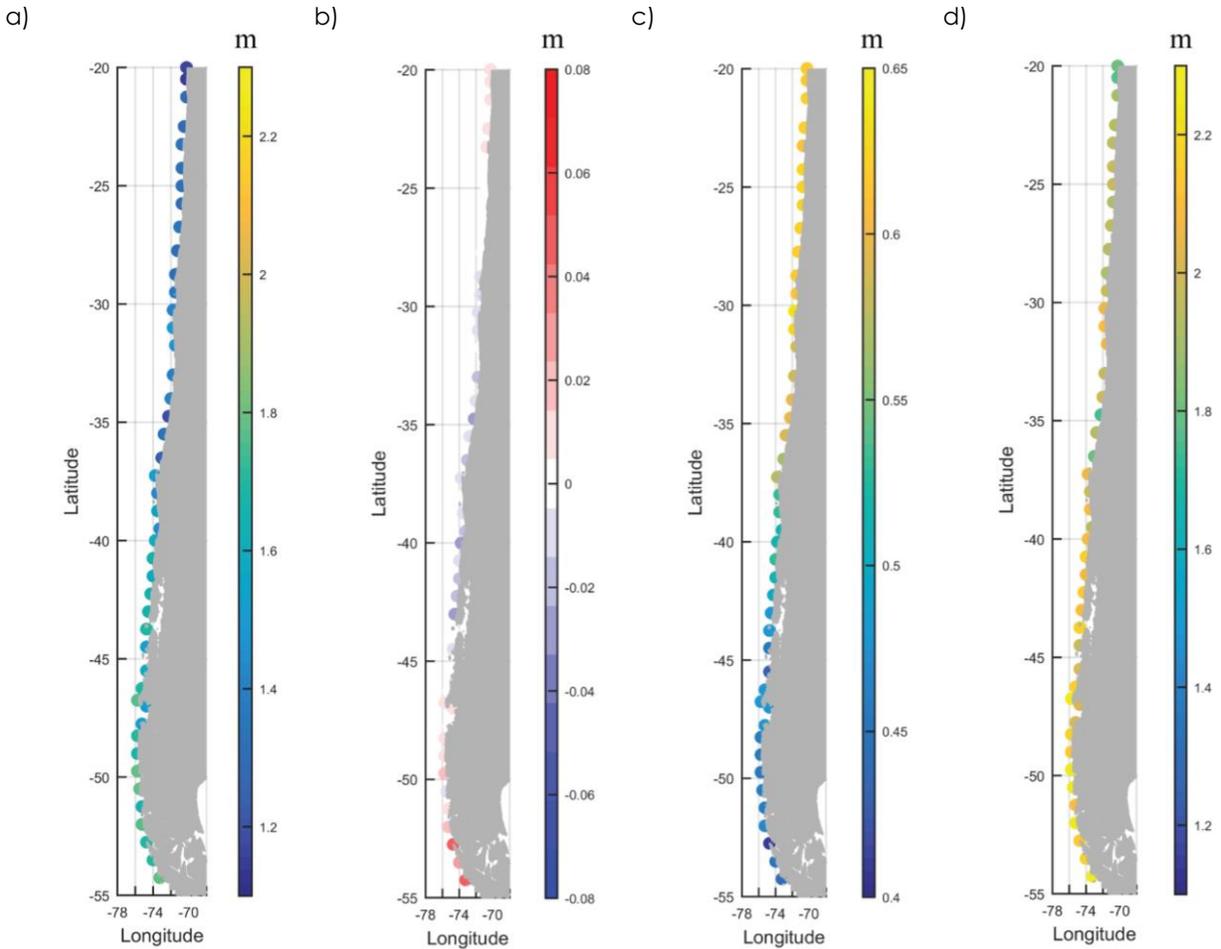
5.4 DISCUSIÓN

Dado que en este cálculo se utiliza en forma conservadora la pleamar máxima anual en cada puerto patrón y la marea meteorológica asociada a un período de retorno de 50 años, el utilizar el percentil 99% para la altura significativa corresponde a un valor conservador. Los resultados han sido efectuados en forma determinística, sin estimar la probabilidad de excedencia asociada a la cota de inundación. El cálculo tampoco contempla el análisis local de oleaje.

Existen escasos trabajos orientados a estimar la cota de inundación futura en las costas de nuestro país. El trabajo de Camus et al. (2017), del IH Cantabria⁴³, destaca por su prolijidad pero abarca sólo la proyección a fin de siglo (2070–2099).

⁴³ <https://www.ihcantabria.com/es/>

Figura 73: Cota de inundación estimada por Camus et al. (2017) en todo Chile para para el escenario RCP8.5. a) Cota de inundación⁴⁴ asociada al percentil 99 para el período histórico (1979–2005). b) Cambios asociados al oleaje y la marea meteorológica obtenidas de múltiples modelos, c) Aumento regional del nivel absoluto del mar (Slangen et al., 2014) proyectado a 2100. d) Cota de inundación proyectada (período 2070–2099) considerando oleaje, marea meteorológica y aumento del nivel del mar para el escenario RCP8.5.



⁴⁴ En Camus et al. (2017), esta variable se denomina *Total Water Level (TWL)*

6 ANEXOS

6.1 DETALLE DE MODELOS DE NIVEL DEL MAR

Tabla A1: Modelos utilizados en el proyecto

Observaciones.	Referencias	Interacción superficie Terrestre-atmósfera	Atmósfera	Océano	Hielo marino	Representación procesos climáticos
01 ACCESS1.0	Bi et al. 2013	Met Office Surface Exchange Scheme versión 2 (MOSES2) 9 tipos de superficie Fronda arbórea simplificada. Albedo prescrito para todas las superficies	HadGEM2 No hidrostático Completamente incompresible Representa las nubes indirectamente. Incluye gases efecto invernadero.	NOAA/GFDL MOM4p1 Aproximación de Boussinesq. Flujos de agua dulce. Variación de volumen y nivel del mar 360x300 y 20 niveles verticales. Hielo marino sobre la misma grilla	LANL CICE4.1. Cinco categorías de espesor de hielo y agua Albedo prescrito con valores estándar.	Mejor representación de ENSO
02 ACCESS1.3		CSIRO Community Atmosphere Biosphere Land Exchange versión 1.8 (CABLE1.8) 13 tipos de superficie. Fronda arbórea con procesos físicos y aerodinámicos. Albedo calculado para fronda arbórea.	Met Office Global Atmosphere (GA) 1.0. Representa las nubes con el esquema mejorado PC2.			
03 CMCC-CESM	Fogli et al. 2009 Scoccimarro et al. 2011	Incorpora dinámica del carbono. Modelo Surface Interactive Land VegetAtion (SILVA), que integra atmósfera, suelo y vegetación. Cuatro tipos funcionales de plantas.	Modelo ECHAM5. Coordenadas sigma o híbrida. 19 niveles verticales. 96 por 48 celdas horizontales (aproximadamente 3,75° de resolución).	Modelo OPA8.2/LIM/PELAGOS, que integra océano, hielo marino y biogeoquímica oceánica. Resolución horizontal: 2° x 2°.	Modelo OPA8.2/LIM/PELAGOS, que integra océano, hielo marino y biogeoquímica oceánica.	
04 CMCC-CM						
06 CNRM-CM5	Voltaire et al. 2013	Interaction between Soil Biosphere and Atmosphere (ISBA). Incorpora intercambio de energía y agua entre. Considera albedo y diferentes coberturas vegetales.	ARPEGE-Climat v5.2 1.4°, 31 niveles verticales. Incluye radiación onda corta y onda larga. Incluye absorción por vapor de agua y gases invernadero, y cinco tipos de aerosoles.	NEMO v3.2., 1° y 42 niveles. Esquema de turbulencia, mezcla inducida por marea y superficie libre.	GELATO v5. Incorporado en el modelo oceánico. Cuatro categorías de grosores de hielo, incorpora advección. Incorpora nieve. Representa derretimiento y variación de albedo.	Intercambios a través de Exchange Coefficients from Unified Multi-campaigns Estimates (ECUME). Considera absorción de radiación de onda corta.
07 CSIRO-Mk3.6.0	Collier et al 2011 Gordon et al 2010, 2012 Jeffrey et al 2013 Rotstayn et al 2010, 2012	13 tipos de superficie 9 tipos de suelo	18 niveles verticales	GFDL Modular Ocean Model (MOM), versión 2.2 31 niveles verticales	Calcula temperatura, densidades y grosores de la nieve, con tres categorías nieve. Incluye procesos de acumulación derretimiento y albedo.	

Observaciones.	Referencias	Interacción superficie Terrestre-atmósfera	Atmósfera	Océano	Hielo marino	Representación procesos climáticos
08 CanESM2	Merryfield et al 2013 Von Salzen et al 2013 Zahariev et al 2008	Canadian Terrestrial Ecosystem Model (CTEM). Incorpora fotosíntesis, respiración autótrófica y heterotrófica, mortalidad, cambios de uso de suelo, incendios y competencia entre tipos funcionales de plantas.	Canadian Atmospheric Global Climate Model (CanAM4). Resolución horizontal de 2,8°. 35 niveles verticales.	Basado en el modelo GFDL MOM v.1.1, con 40 niveles y una resolución de 1,41° lon. x 0,94° lat. Es un modelo <i>rigid-lid</i> que elimina fluctuaciones de alta frecuencia, como el oleaje. Incorpora absorción de radiación por clorofila.		Canadian Model of Ocean Carbon (CMOC).
09 FGOALS-G2	Hunke & Lipscomb 2010 Liu et al 2012 Li et al 2013a Li et al 2013b Oleson et al 2010	Community Land Model (CLM3). Incluye ciclo del carbono, dinámica vegetacional y trayectoria de ríos. Esquema de Tipos Funcionales de Plantas (TFP). Considera albedo y fisiología vegetacional.	Grid-point Atmospheric Model of IAP LASG versión 2 (GAMIL2) 2,8° de resolución horizontal; 26 niveles verticales. Conserva masa y energía. Considera microfísica y procesos de nubes.	LASG IAP Climate System Ocean Model versión 2 (LICOM2). 30 niveles verticales y 1°x1° resolución horizontal. Polo Norte se asume como tierra.	Community Ice Code (CICE4-LASG). Mejora el efecto de la salinidad del hielo marino. Calcula tasas locales de crecimiento de nieve y hielo. Caída de nieve y campos de velocidad y transporte.	Reproduce bien los monsoones del este asiático, precipitaciones y su ciclo estacional y los procesos de Oscilación de Madden Julian y ENSO.
10 FGOALS-S2.0			Spectral Atmospheric Model IAP/LASG (SAMIL)			
11 GFDL-CM3	Dellworth et al 2006 Donner et al 2011 Milly et al 2014 Griffies et al 2011	Modelo terrestre LM3 mejora la representación física del flujo de calor y agua a través de la superficie terrestre. Incorpora carbono y un componente de vegetación dinámico.	El modelo atmosférico, AM3, tiene 24 niveles verticales e incorpora convección de nubes y física de aerosoles. La resolución horizontal es de 200 km. Incluye enfriamiento antropogénico por interacción aerosoles-nubes.	Modular Ocean Model (MOM4p1). 50 niveles verticales y 1°x1° resolución horizontal (1/3° en el ecuador). Coordenada vertical z* (η, H, z).	Sea Ice Simulator (SIS). Tres niveles verticales: uno de nieve y dos de hielo. Cinco categorías de hielo marino. Mejor representación de albedo de hielo y nieve-hielo.	Buena habilidad para reproducir eventos ENSO
12 GFDL-ESM2G	Dellworth et al 2006 Dunne et al 2012 Dunne et al 2013		Resolución horizontal 2° latitud x 2.5° longitud. 24 niveles verticales.	Generalized Ocean Layer Dynamics (GOLD). Coordenada vertical basada en densidad. 1°x1° resolución horizontal (1/3° en el ecuador). Dos capas de mezcla y 59 niveles. Topografía basada en batimetría de alta resolución.		ENSO excesivamente débil. Representa mejor los cambios asociados a contenido de calor.

Observaciones.	Referencias	Interacción superficie Terrestre-atmósfera	Atmósfera	Océano	Hielo marino	Representación procesos climáticos
13 GFDL-ESM2M				Modular Ocean Model (MOM4p1). 50 niveles verticales y 1°x1° resolución horizontal (1/3° en el ecuador). Coordenada vertical z* (η , H, z). Topografía modificada y suavizada.		ENSO excesivamente intenso. Representa mejor los cambios asociados a circulación superficial y patrones de temperatura y salinidad superficial y altura del nivel del mar.
14 GISS-E2-R	Schmidt et al. 2006	No incorpora un Ciclo Interactivo del Carbono.	Usa el modelo atmosférico ModelE2 (Miller et al. 2014). La resolución horizontal del componente atmosférico es 2 x 2.5 latitud por longitud y una configuración vertical de 40 niveles. Incluye gases efecto invernadero y aerosoles.	Russell ocean model. 1°x1,25°, 32 niveles verticales. Coordenada vertical z* (η , H, z). Conserva masa, salinidad y calor.	Los procesos de hielo de lagos y marinos son considerados en conjunto, pero tomando en cuenta la salinidad en el caso del océano. La termodinámica del hielo permite la representación de salmuera.	Reproduce una circulación termohalina realista.
15 GISS-E2-R-CC	Schmidt et al. 2014 Miller et al. 2014 Russell et al. 1995	Incorpora un Ciclo Interactivo del Carbono. Incluye tres componentes: suelo, follaje y nieve. Diez tipos diferentes de vegetación.				Reproduce una circulación termohalina realista. Incorpora un Ciclo Interactivo de biogeoquímica oceánica.
16 HadGEM2-CC	Martin et al. 2011 Collins et al. 2011	Inclusión de un esquema de onda de gravedad no orográfico. Producción vapor de agua estratosférico a partir de oxidación de metano. Remoción del component de química estratosférica. Cinco tipos vegetacionales.	Resolución horizontal de N96 (~140km) y 50 niveles verticales.	Resolución horizontal de 1 grado, aumentando a 1/3 de grado hacia el Ecuador, y 40 niveles verticales. Biología oceánica y química de carbonatos incluyen limitación de crecimiento fitoplanctónica por micro y macro nutrientes y emisión de DMS a la atmósfera.		Buena representación de ENSO.
17 HadGEM2-ES		Cubierta y productividad vegetal mejor representadas. Cinco tipos vegetacionales	Resolución horizontal de N96 (~140km) y 60 niveles verticales.			
18 INM-CM4	Volodin et al. 2010 Volodin et al. 2013		Diferencias finitas, aproximación hidrostática. 2° x 1,5° en longitud y latitud, con 21 niveles sigma. Incluye radiación, convección y efectos orográficos.	1° x 0,5° en longitud y latitud, con 40 niveles sigma. Superficie libre. Reproduce ondas Kelvin y Rossby. Conservación de calor y sal.	Dinámica y termodinámica del hielo marino con reología viscoplástica.	Buena representación de ENSO.
19 IPSL-CM5A-LR	Dufresne et al. 2013 Hourdin et al. 2013a Hourdin et al. 2013b Krinner et al.	ORganizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystÉms (ORCHIDEE). Ciclos de energía y agua en suelo y vegetación, y ciclo de carbono terrestre.	Modelo Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMDZ). Resolución horizontal baja, de 1.875°x3.75°, con 39 niveles verticales. Coordenada vertical híbrida σ -p.	Componente oceánico basado en modelo NEMOv3.2-OPA (Nucleus for European Modelling of the Ocean). Resolución aproximada de 2° (aumentando a 0,5° hacia	Componente de hielo marino basado en modelo NEMOv3.2 y Louvain-la-Neuve Sea Ice Model, Version 2 (LIM2). Modelo de tres capas, almacenamiento de	Mejor representación de señal estacional durante ENSO.

Observaciones.	Referencias	Interacción superficie Terrestre-atmósfera	Atmósfera	Océano	Hielo marino	Representación procesos climáticos
20 IPSL-CM5A-MR	2005	Doce tipos funcionales de plantas.	Modelo Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMDZ). Resolución horizontal media, de 1.25°x2.5°, con 39 niveles verticales.	el ecuador) con 31 niveles verticales. Buena representación de procesos de doble difusión, celdas de Langmuir y ruptura de ondas superficiales.	calor. Albedo en función de temperatura y cobertura de hielo y nieve. Incluye ciclo de carbono oceánico, a través de PISCES (Pelagic Interaction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies)	
21 IPSL-CM5B-LR			Modelo Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMDZ). Resolución horizontal baja, de 1.875°x3.75°, con 39 niveles verticales. Parametrización física diferente, para efectos de testeo: capa de borde, convección profunda y procesos de nubes.			Mejor reproducibilidad de oscilaciones de Madden-Julian.
22 MIROC-ESM		Minimal Advanced Treatments of Surface Interaction and Runoff (MATSIRO). Predice temperatura y agua en seis capas de suelo, hasta 14 m. Una capa de follaje y tres capas de nieve. Modelo de vegetación SEIB-DGVM (Spatially Explicit Individual-Based Dynamic Global Vegetation Model).	MIROC-AGCM. Resolución horizontal: 2.8125° en latitud y longitud. Coordenada vertical híbrida σ -p (80 niveles).	CCSR Ocean Component Model (COCO). El espaciamiento longitudinal del modelo oceánico es de aproximadamente 1.4 grados, mientras que el espaciamiento latitudinal va de 1.7 grados en los polos a 0.5 grados en el ecuador, con 44 niveles verticales. Ecuaciones en sistema horizontal curvilíneo.		Describe bien las características de las masas de agua antártica intermedia y de fondo. Sin embargo, los vientos del Pacífico central y oeste son anómalos e intensos, acentuando la surgencia ecuatorial. La estacionalidad es bien reproducida.
23 MIROC-ESM-CHEM	Watanabe et al 2011		Incluye química atmosférica (modelo CHASER). Mejor reproducibilidad de estructura térmica vertical. Fotoquímica y gases efecto invernadero.			
24 MIROC5	Watanabe et al 2010	Minimal Advanced Treatments of Surface Interaction and Runoff (MATSIRO). Predice temperatura y agua en seis capas de suelo, hasta 14 m. Una capa de follaje y tres capas de nieve.	CCSR-NIES-Frontier Research Center for Global Change (FRCGC). Coordenada vertical híbrida σ -p (40 niveles). Resolución horizontal de aproximadamente 2.8125 grados en latitud y longitud y 80 niveles verticales	CCSR Ocean Component Model (COCO). El espaciamiento longitudinal del modelo oceánico es de aproximadamente 1.4 grados, mientras que el espaciamiento latitudinal va de 1.7 grados en los polos a 0.5 grados en el ecuador, con 49 niveles verticales. Ecuaciones en sistema horizontal curvilíneo.	Hielo marino representado a través del CCSR Ocean Component Model (COCO), tratado como un continuum 2D. Cinco categorías de hielo marino. Valores fijos de albedo. No considera penetración de la radiación en hielo o nieve.	El sesgo de SST es bajo en latitudes bajas, aunque algo alto en el Pacífico Norte y Océano Antártico. Buena representación de vientos alisios del Pacífico. Buena reproducción de la Oscilación Meridiana Atlántica y ENSO.

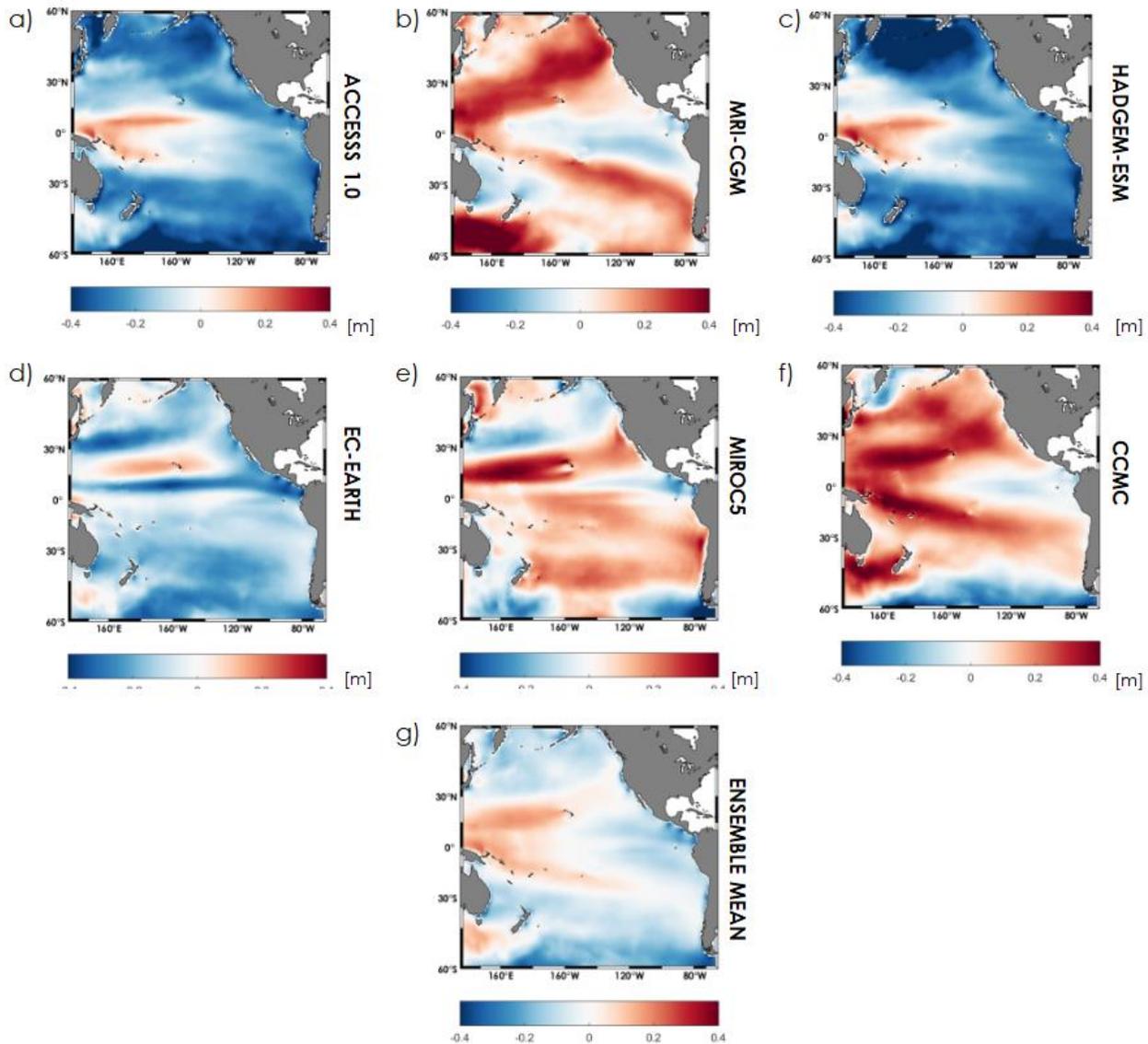
Observaciones.	Referencias	Interacción superficie Terrestre-atmósfera	Atmósfera	Océano	Hielo marino	Representación procesos climáticos
25 MPI-ESM-LR	Giorgetta et al. 2013 Stevens et al., 2013 Jungclaus et al., 2013	Modelo JSBACH. Dos clases de vegetación y dos clases de cobertura terrestre agrícola.	Modelo ECHAM6 Resolución horizontal de aproximadamente 1.5°. Coordenada vertical híbrida σ - p (47 niveles). Fotoquímica y gases efecto invernadero.	Modelo MPIOM. Resolución de 1.5° y 40 niveles z. Modelo de biogeoquímica oceánica HAMOCC5		Mejor reproducibilidad de oscilaciones de Madden-Julian. Buena reproducibilidad de ENSO.
26 MPI-ESM-MR			ECHAM6 Resolución horizontal de aproximadamente 1.5°. Coordenada vertical híbrida σ -p (95 niveles). Fotoquímica y gases efecto invernadero.	Modelo MPIOM. Resolución de 0.4° y 40 niveles z. Modelo de biogeoquímica oceánica HAMOCC5		Mejor reproducibilidad de oscilaciones de Madden-Julian. Buena reproducibilidad de ENSO. Permite representar los eddies.
27 MRI-CGCM3	Yukimoto et al 2011 Yukimoto et al 2012	Incorpora el modelo Hydrology, Atmosphere and Land (HAL), con tres submodelos: SiByl (vegetación), SNOWA (nieve), and SOILA (suelo).	Modelo MRI-AGCM3. Convección de cúmulos, esquema de alta precisión para radiación. Incorpora modelo de aerosoles MASINGAR mk-2 y modelo de química atmosférica MRI-CCM2. Resolución de aproximadamente 120 km, con 48 niveles en la vertical	Modelo océano-hielo MRI.COM3. Incorpora ciclo del carbono. Resolución horizontal de 1 grado en longitud y 0.5 grados en latitud y 50 niveles verticales	Modelo océano-hielo MRI.COM3. Resuelve variaciones de áreas, contenido de calor y espesor del hielo.	Reproduce aceptablemente la Circulación Meridional del Atlántico. El transporte de la Corriente Circumpolar Antártica es subestimado. Representa adecuadamente ENSO y la PDO.
28 MRI-ESM1		Incorpora ciclo del carbono.				
29 NorESM1-M	Bentsen et al. 2013 Iversen et al. 2013 Tijputra et al. 2013 Oleson et al 2010	Community Land Model (CLM4). Resolución de 2°. Incluye el modelo SNow, ICe, and Aerosol Radiative (SNICAR).	Modelo CAM4-Oslo. Resolución horizontal de 1,9° latitud x 2,5° longitud. Coordenada vertical híbrida σ -p (26 niveles). Incluye física de aerosoles y nubes.	Modelo basado en niveles de densidad, desarrollado en base al modelo MICOM. Conservación de masa (no Boussinesq). Conservación de vorticidad potencial y entropía. Resolución de 1°. Biogeoquímica oceánica basada en el modelo HAMBURG Ocean Carbon Cycle (HAMOCC).	Modelo CICE4. Resolución de 1°. Transferencia radiación onda corta, derretimiento de lentes de hielo y parametrización de aerosoles sobre nieve y hielo.	Buena conservación de propiedades del océano. Aceptable simulación de ENSO, SAM, NAM y Circulación Meridional del Atlántico.
30 NorESM1-ME		Modelamiento interactivo de carbono				
31 BCC CSM1	Wu et al 2010 Wu et al 2014 Oleson et al 2010	Modelo CLM3 y Atmosphere-Vegetation Interaction Model (AVIM). Fotosíntesis y respiración; intercambio de calor y humedad entre vegetación, suelo y atmósfera.	El componente atmosférico está basado en el modelo BCC-AGCM2.0 con 26 niveles verticales. Resolución baja (aproximadamente 2.8125°x2.8125°)	Modelo MOM4_L40, desarrollado por el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), con 40 niveles verticales. Resolución de 1°, aumentando a 1/3 hacia el ecuador. Incluye,	Sea Ice Simulator (SIS). Resolución de 1°. Tres capas verticales: una capa de nieve y dos capas de hielo.	Buena representación de clima promedio y ocurrencia de eventos extremos, así como oscilaciones de Madden-Julian y balance de carbono oceánico.

Observaciones.	Referencias	Interacción superficie Terrestre-atmósfera	Atmósfera	Océano	Hielo marino	Representación procesos climáticos
32 BCC CSM1m			Resolución moderada (aproximadamente 1.125°×1.125°). Incorpora convección de cúmulos, conservación de temperatura potencial.	advección, fricción horizontal, mezcla vertical y flujos de gravedad sobre topografía variable.		

6.2 ANÁLISIS DE SESGOS DE LOS MODELOS DE OLAJE

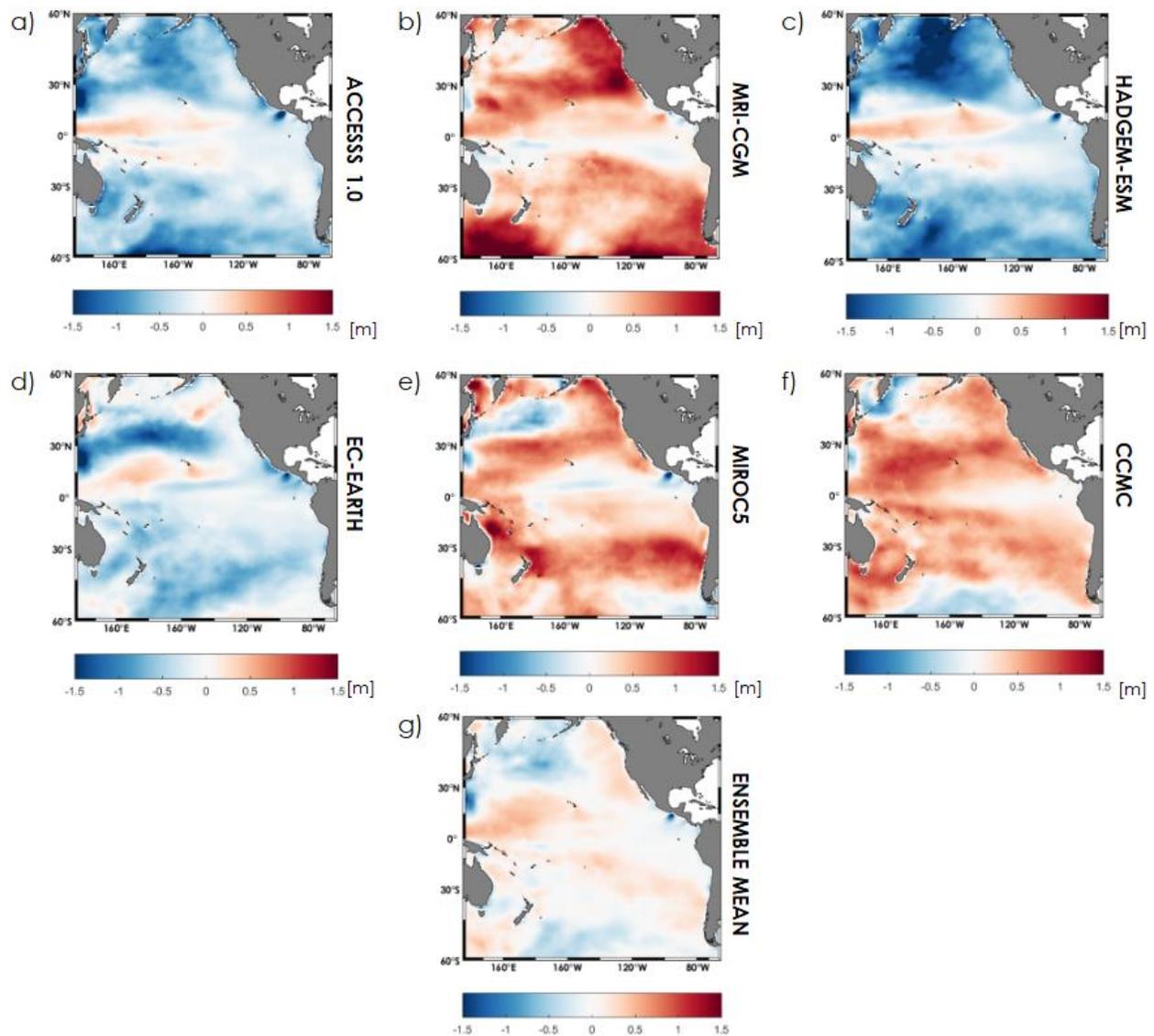
En la Figura A1 se presentan los sesgos para el percentil 50 de la altura significativa entre el periodo histórico de los GCMs y el reanálisis CFSR_{CCG}. Se observa que hay modelos que subestiman o sobrestiman este parámetro frente a la costa chilena. Los modelos que subestiman son el ACCESS1.0, HADGEM-ESM y EC-EARTH con sesgos negativos de 40, 40 y 10 [cm], respectivamente. Dado que todos los GCM fueron simulados bajo una misma configuración, se concluye que la subestimación proviene de los vientos superficiales prescritos desde el GCM. Situación inversa ocurre los modelos CCMC y MIROC5, que presentan sobrestimaciones de ~ 20 [cm] en la costa de Chile. Finalmente, el modelo MRI-CGM tiene un sesgo variable, ya que presenta una sobrestimación de ~ 50 [cm] en las latitudes medias y una subestimación de ~ 20 [cm] en la zona norte de Chile. El *ensemble mean* (sección 2.3) obtenido a partir de los GCM tiende a mejorar la respuesta del modelo de oleaje. En el percentil 50 se observan leves subestimaciones en torno que varían desde 10 a 20cm. Esta mejora se debe a que los diferentes errores sistémicos de los GCM se tienden a cancelar.

Figura A1. Sesgo de la altura significativa del GCM con respecto al reanálisis CFSR para el percentil 50: (a) ACCESS 1.0 (b) MRI-CGM (c) HADGEM2-ESM (d) ECEARTH (e) EC-EARTH (f) MIROC5 (g) CCMC (g) Ensemble Mean. Los valores positivos indican una sobrestimación del modelo GCM.



En la Figura A2 se presentan los sesgos asociados al percentil 99 de la estadística histórica para todos los GCM. Este percentil se asocia a una condición típica de marejadas. Se observa que las realizaciones de los modelos ACCESS 1.0 y HADGEM-ESM tienden a subestimar dicha condición de oleaje en torno a 0.5 a 1 [m], principalmente en la zona norte de Chile. El modelo EC-EARTH presenta un leve sesgo negativo de ~30 [cm] espaciado en forma homogénea por toda la costa del país. Situación inversa ocurre con los modelos MRI-CGM, MIROC5 Y CCMC ya que presentan un sesgo positivo que varía entre 30 y 50 [cm], siendo el primero el que más tiende a sobrestimar el percentil 99 de la altura significativa.

Figura A2. Sesgo de la altura significativa del GCM con respecto al reanálisis CFSR para el percentil 99: (a) ACCESS 1.0 (b) MRI-CGM (c) HADGEM2-ESM (d) ECEARTH (e) EC-EARTH (f) MIROC5 (g) CCMC (g) Ensemble Mean. Los valores positivos indican una sobrestimación del modelo GCM.



En la Figura A3 y A4 se presentan los sesgos asociados al periodo medio T_{0m1} en el percentil 50 y 99, respectivamente. Se observa que los modelos ACCESS 1.0 y HADGEM-ESM subestiman la variable para ambos percentiles en todo el océano, lo que refleja la evidente subestimación de los vientos superficiales. El modelo EC-EARTH presenta los menores sesgos frente a la costa de Chile para ambos percentiles. El modelo MRI-CGM3 presenta sesgos en torno a 1 [s] en el percentil 50 y 2 [s] en el percentil 99, lo que evidencia la sobrestimación de los vientos superficiales, (en las zonas de generación, el periodo medio es proporcional a la magnitud del vientos).

El *ensemble mean* mejora para ambos percentiles, ya que los sesgos positivos y negativos de los vientos de cada una de las realizaciones tienden a cancelarse.

Figura A3. Sesgo en el periodo medio del GCM con respecto al reanálisis CFSR para el percentil 50: (a) ACCESS 1.0 (b) MRI-CGM (c) HADGEM2-ESM (d) ECEARTH (e) EC-EARTH (f) MIROC5 (g) CCMC (g) Ensemble Mean. Los valores positivos indican una sobrestimación del modelo GCM.

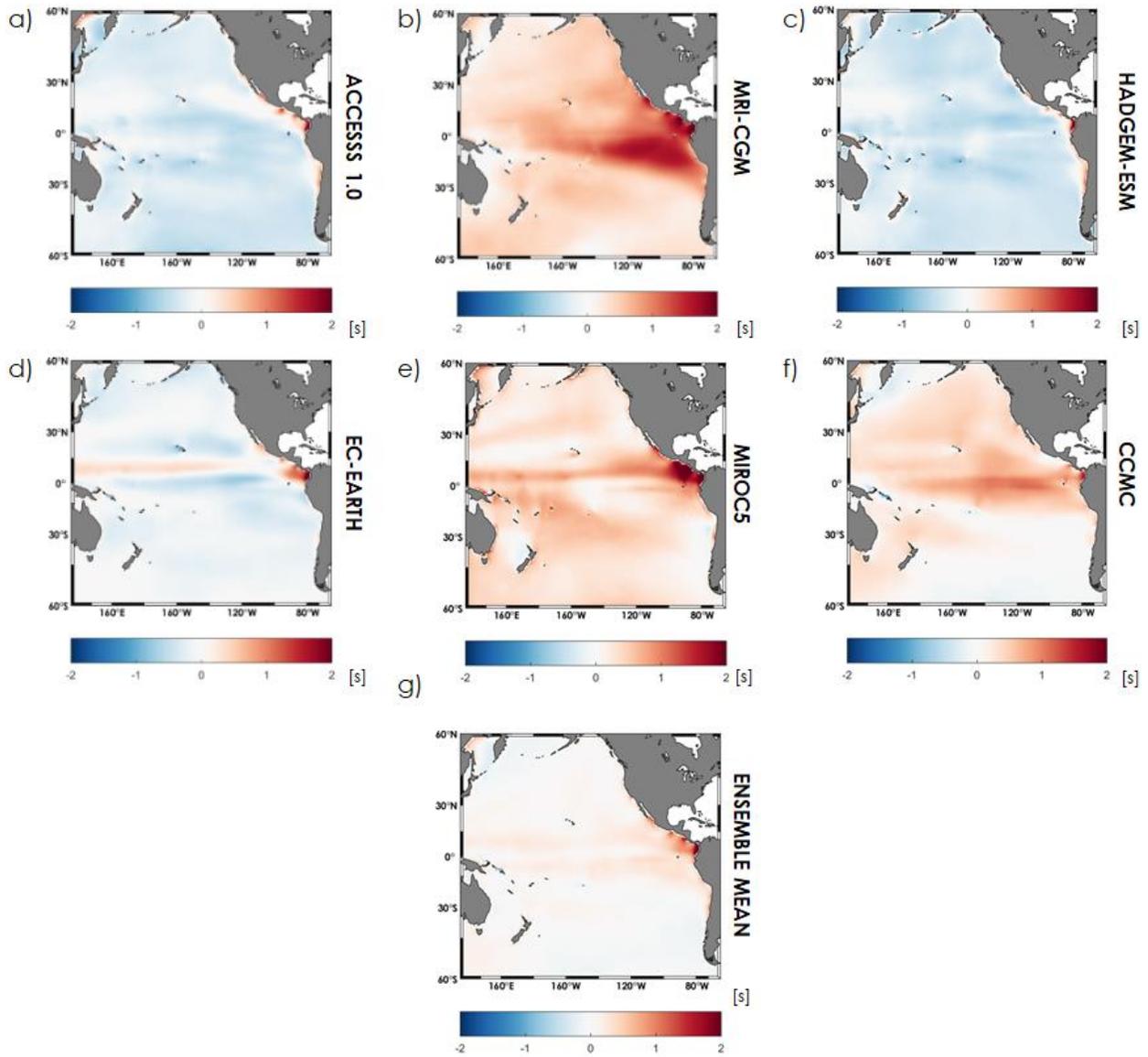
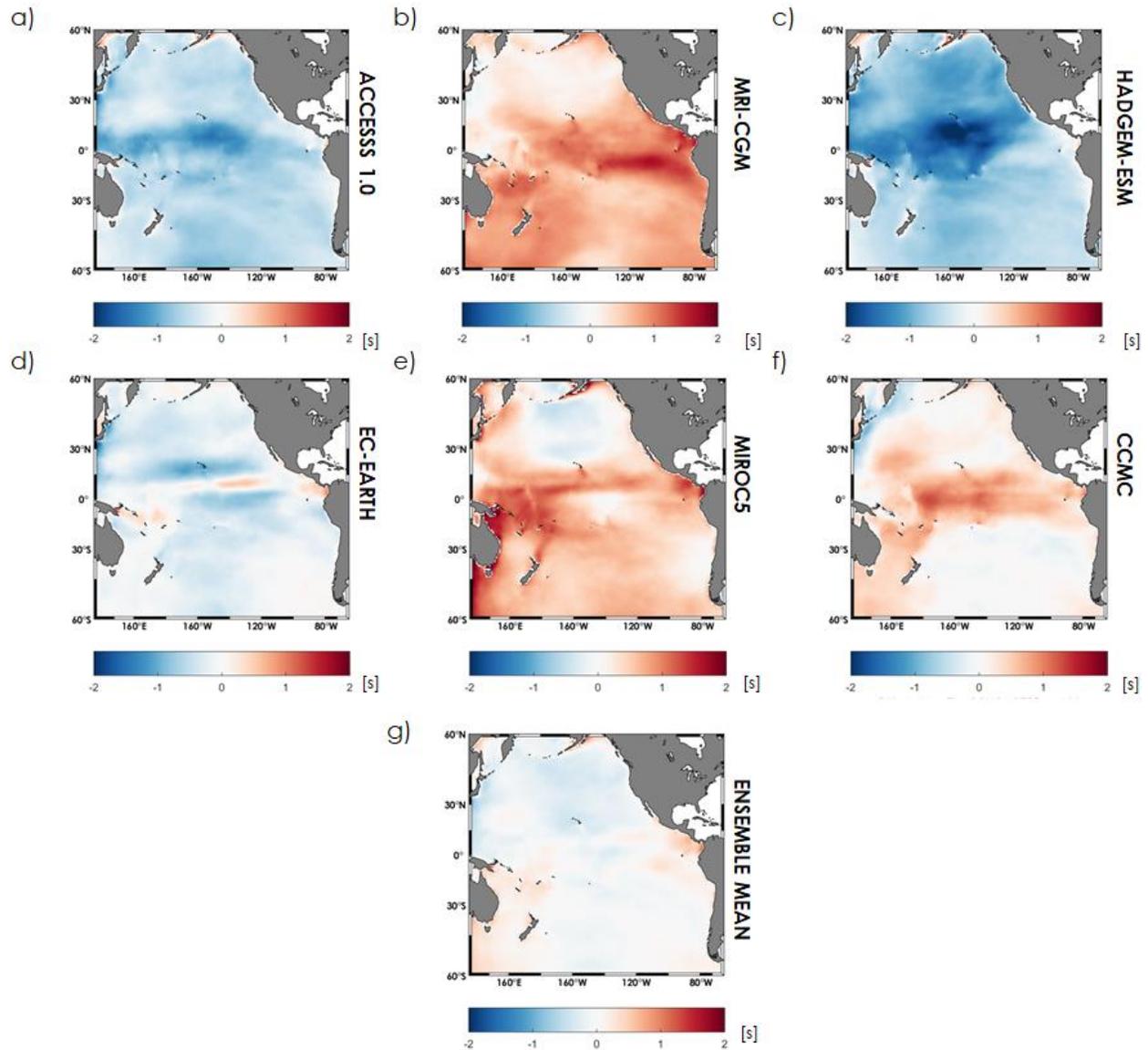


Figura A4. Sesgo en el periodo medio del GCM con respecto al reanálisis CFSR para el percentil 99: (a) ACCESS 1.0 (b) MRI-CGM (c) HADGEM2-ESM (d) ECEARTH (e) EC-EARTH (f) MIROC5 (e) CCMC (g) Ensemble Mean. Los valores positivos indican una sobrestimación del modelo GCM.



En conclusión, una realización aislada de un GCM no reproduce adecuadamente el clima de oleaje histórico. Sin embargo, en la medida que se van agregando más realizaciones de diferentes modelos, se robustece el ensemble mean y el sesgo se reduce considerablemente, lo que implica que dicho conjunto de datos obtenidos a partir de las medianas temporales y de modelos es un mejor estimador para las condiciones futuras del clima de oleaje.

6.3 ANÁLISIS PUNTUAL DE CAMBIOS EN EL CLIMA MEDIO

6.3.1 Mejillones

En las Figuras B1 a B4 se presenta la evolución interanual de los parámetros de oleaje en aguas profundas frente a Mejillones. De este análisis se concluye:

- En cuanto a las alturas significativas, todos los modelos presentan un percentil 50 que evoluciona en forma estable en el tiempo, sin presentar grandes alzas o descensos. Ahora bien, la curva del percentil 99 presenta tendencias que varían dependiendo del modelo y cuyos cambios no son concordantes entre sí. Por ejemplo, los modelos ACCESS 1.0 y MRI-CGM exhiben leves tendencias al alza, los modelos MIROC-5, HADGEM y CCMC presentan curvas que permanecen estables en el tiempo y el modelo EC-EARTH presenta tendencias a la baja.
- Los periodos medios no presentan grandes cambios tanto en el percentil 50 y 99 en todos los modelos analizados, a excepción del modelo ACCESS 1.0, que exhibe una leve tendencia al alza en el percentil 99.
- En cuanto a las direcciones medias, tres modelos exhiben un giro al sur (ACCESS 1.0, EC-EARTH y MIROC5), uno al norte (MRI-CGM) y dos no presentan una clara tendencia (CCMC y HADGEM).

Figura B1. Evolución interanual de la altura significativa para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Mejillones.

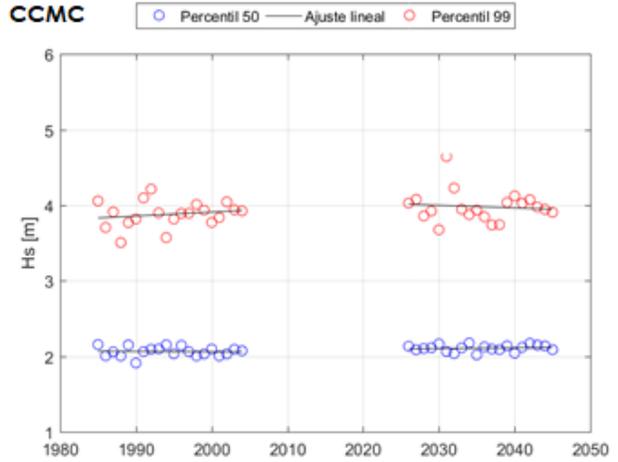
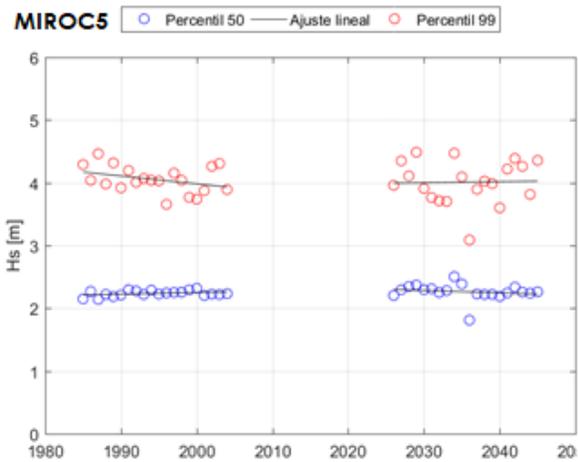
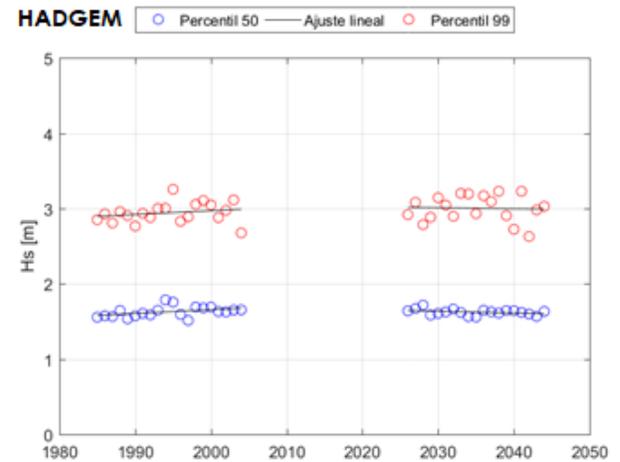
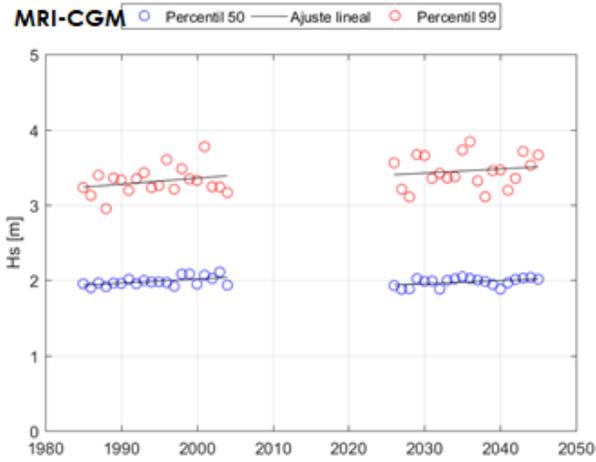
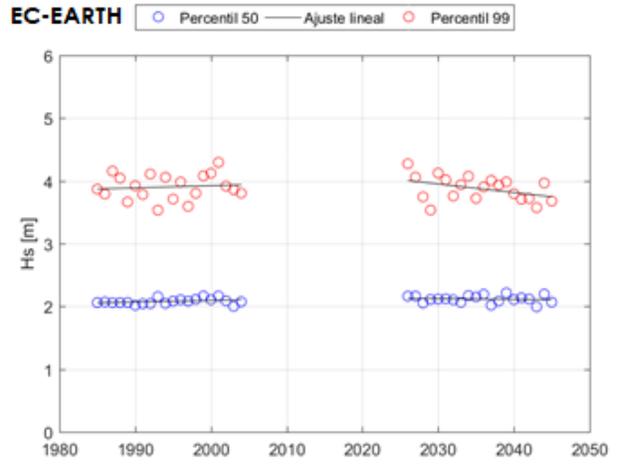
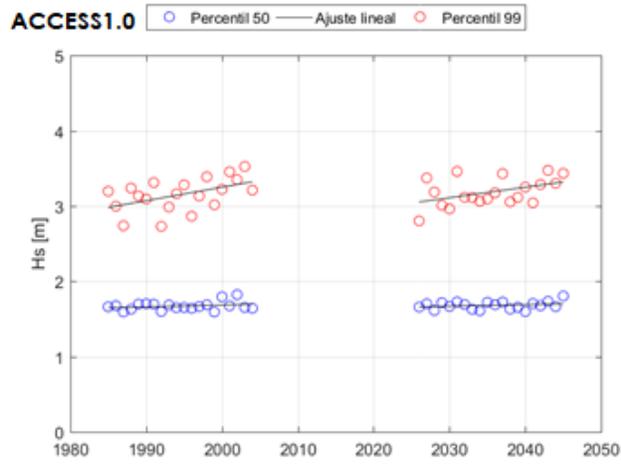


Figura B2. Evolución interanual del periodo medio para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Mejillones.

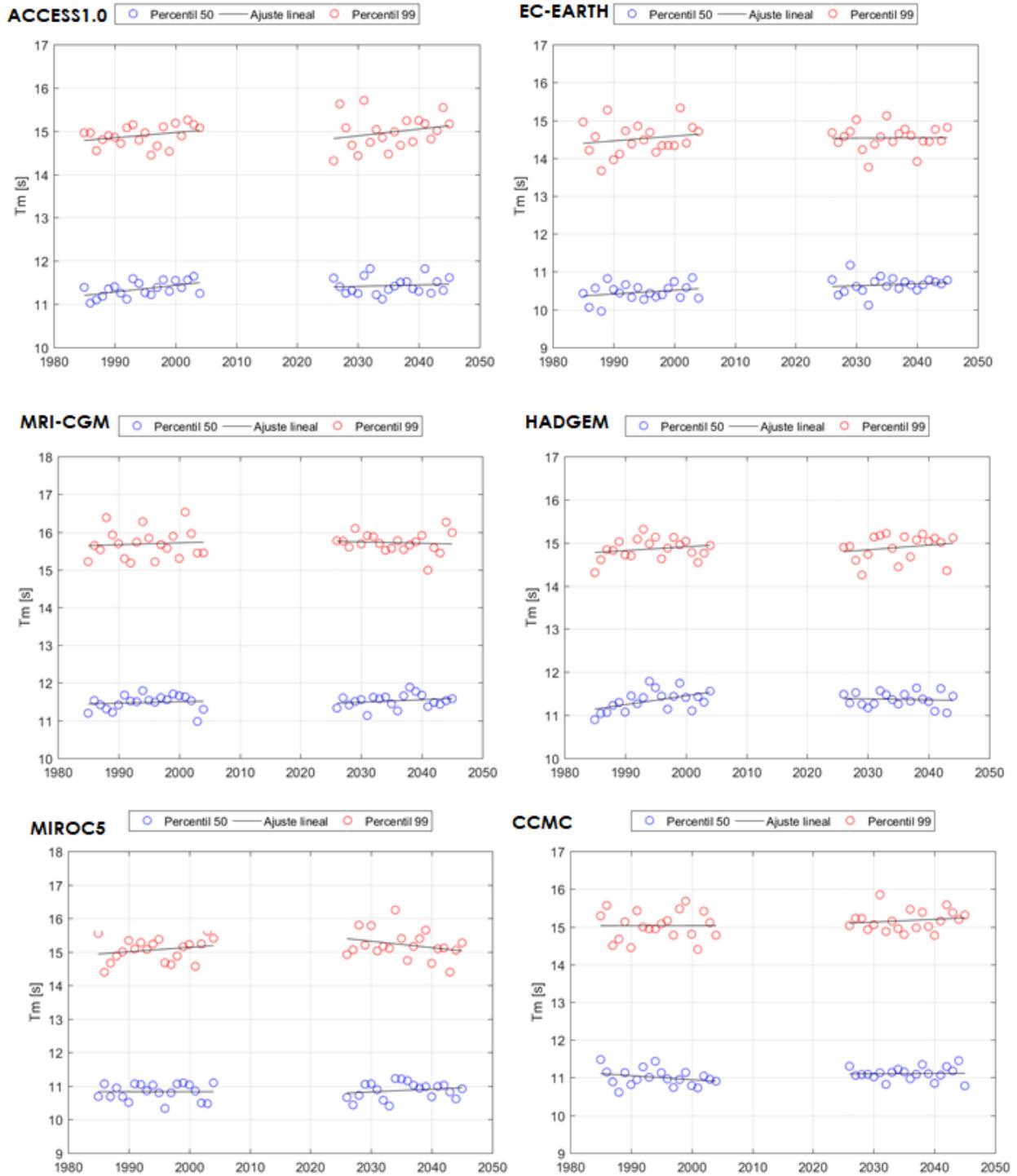


Figura B3. Evolución interanual de la dirección media para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Mejillones.

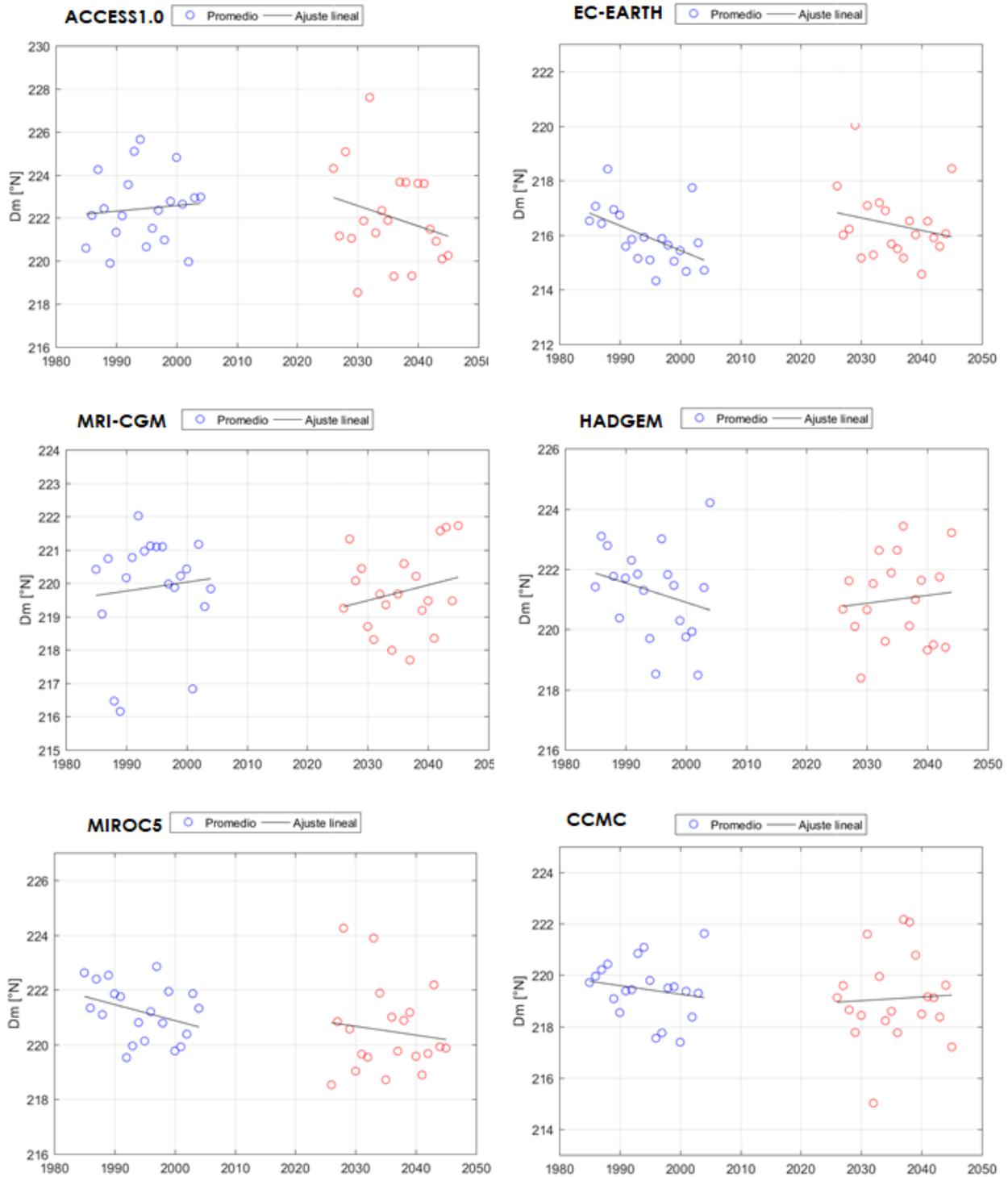
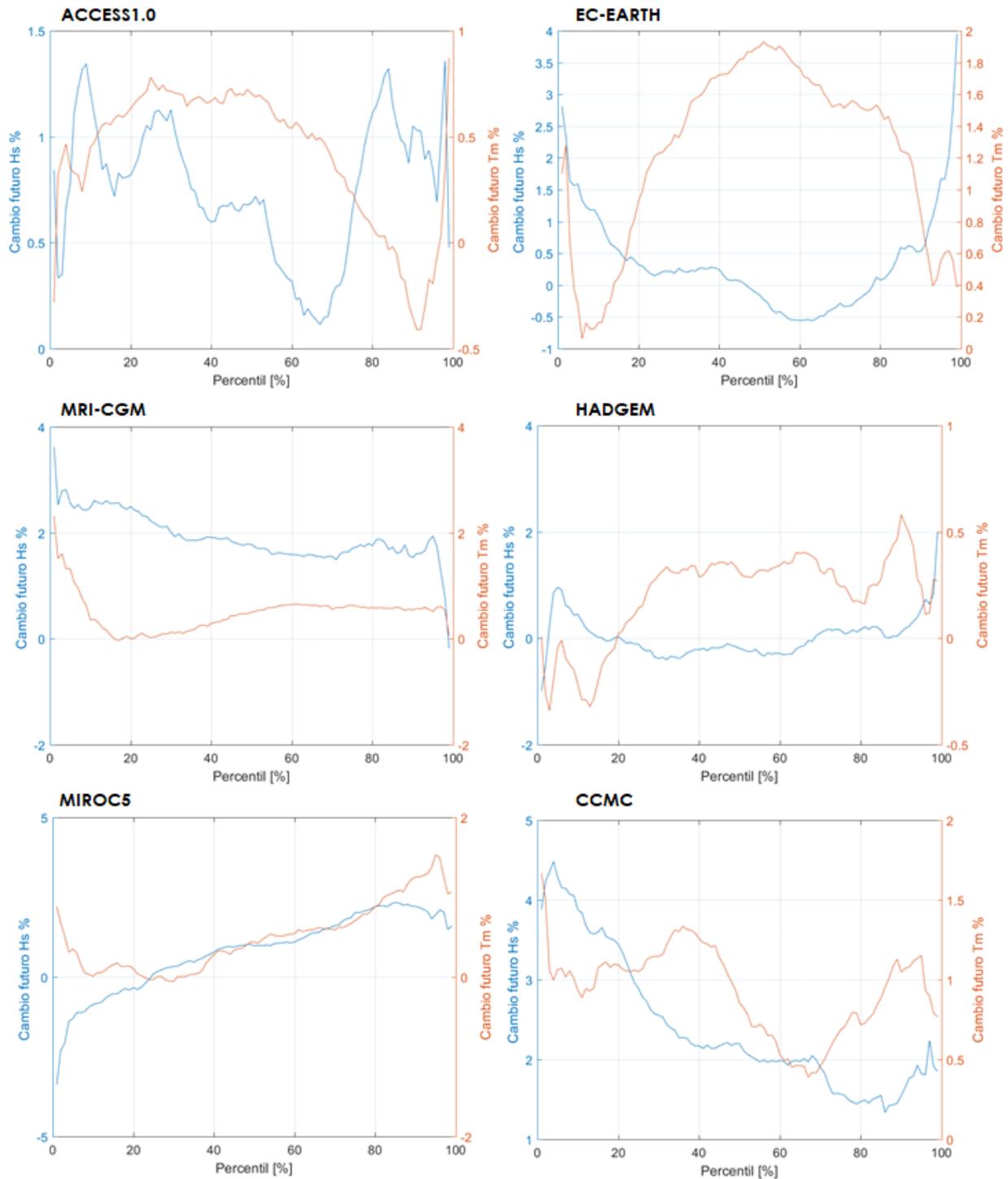


Figura B4. Variación porcentual del cambio en la altura significativa y periodo medio por percentil. Sector aguas profundas frente a Mejillones.



6.3.2 Valparaíso

En las Figuras B5 a B8 se presenta la evolución interanual de los parámetros de oleaje en aguas profundas frente a Valparaíso. De este análisis se concluye:

- En cuanto a las alturas significativas, se observa que todos los modelos analizados presentan un percentil 50 y 99 que evolución en forma estable en el tiempo, sin presentar grandes alzas o descensos tanto en el periodo histórico como en la proyección a medio siglo. La excepción solo se da en la curva asociada al percentil 99 del modelo MIROC5, el cual exhibe una tendencia a disminuir durante el periodo histórico y una estabilización durante todo el periodo de la proyección.
- En cuanto a los periodos medios, se evidencia un leve aumento en el percentil 99 del modelo MRI-CGM y un aumento en el periodo histórico del modelo MIROC5, el cual se estabiliza en la proyección.
- En cuanto a las direcciones medias, todos los modelos exhiben un giro hacia el sur en la incidencia del oleaje.

Figura B5. Evolución interanual de la altura significativa para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Valparaíso.

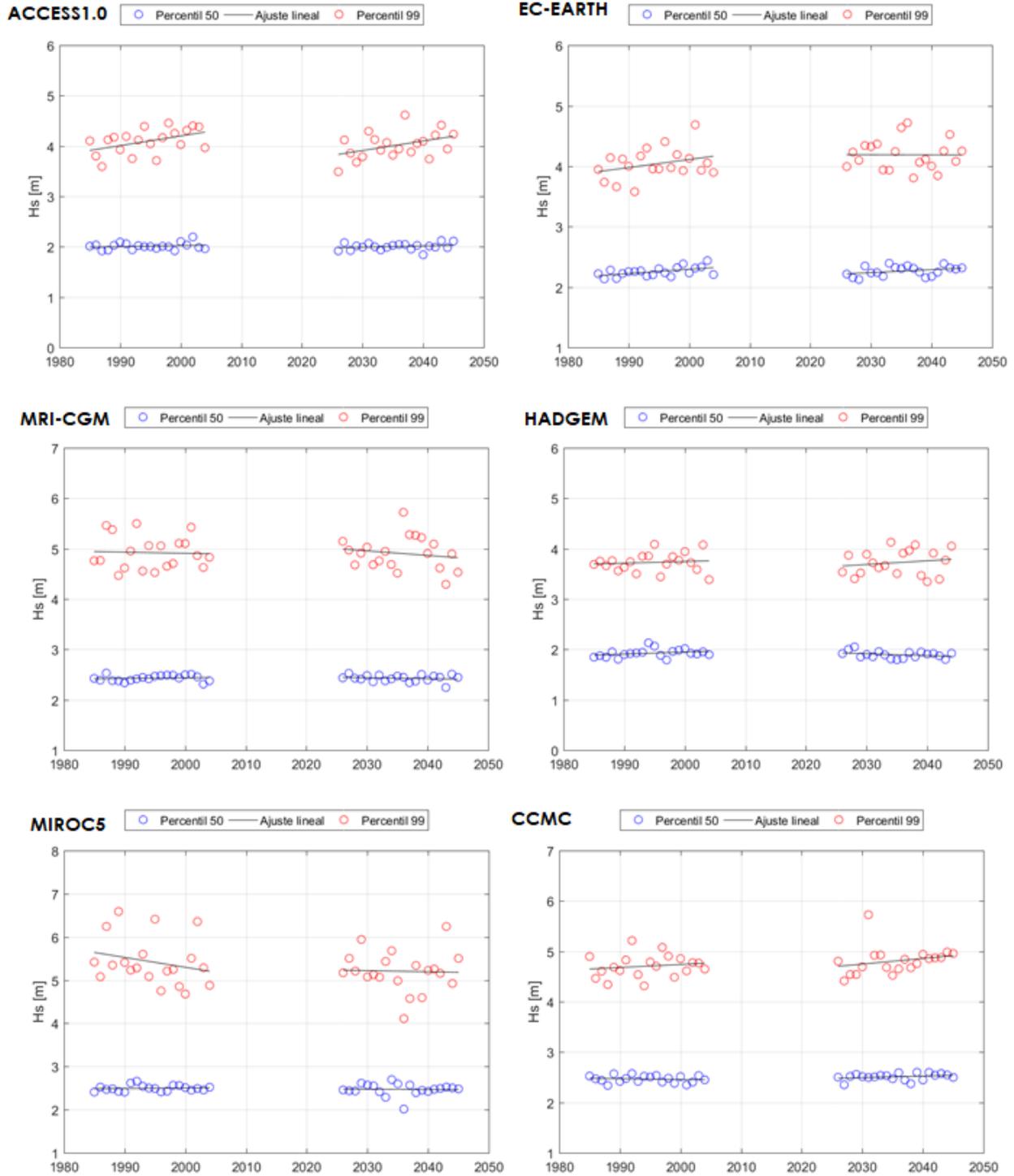


Figura B6. Evolución interanual del periodo medio para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Valparaíso.

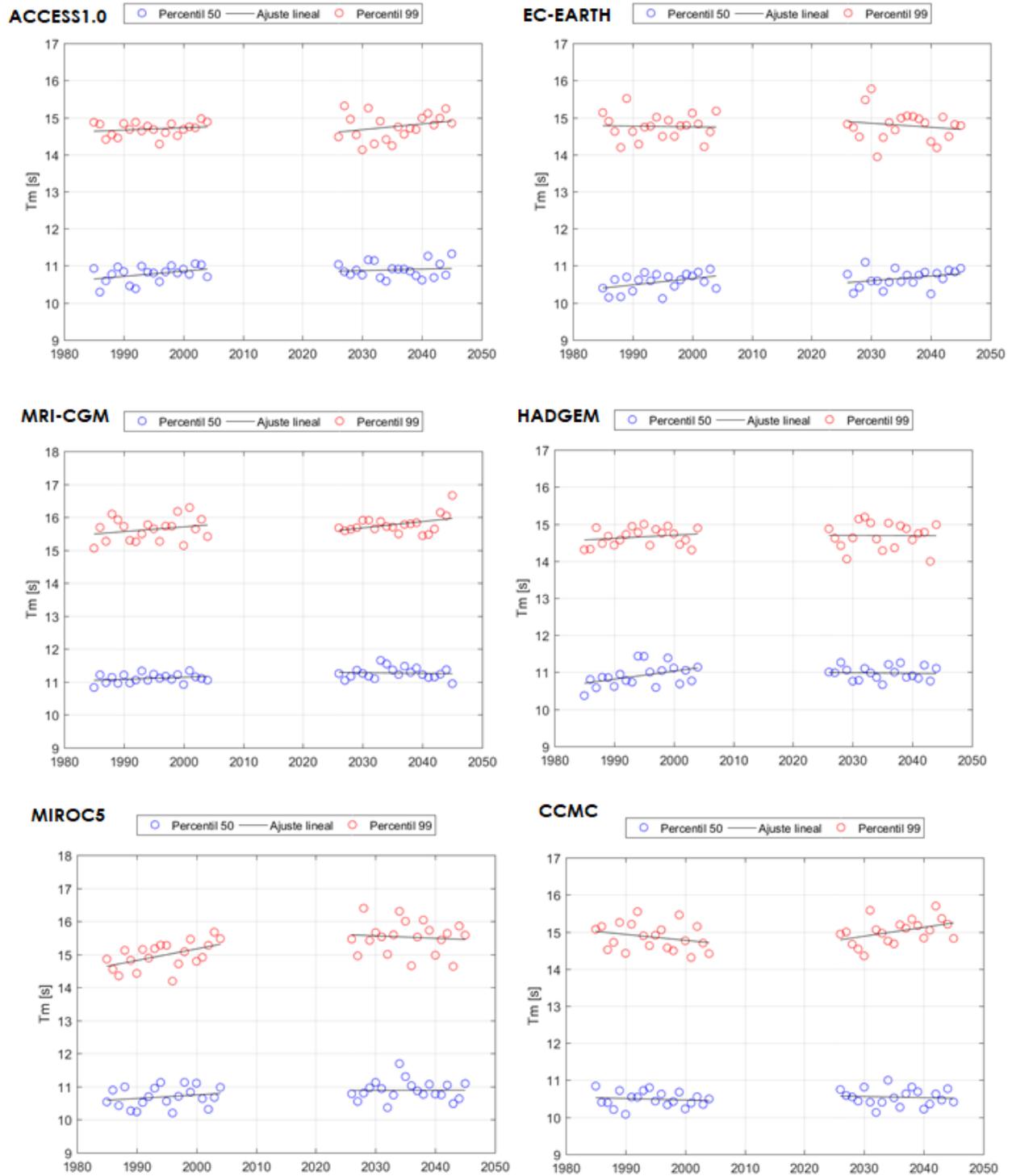


Figura B7. Evolución interanual de la dirección media para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Valparaíso.

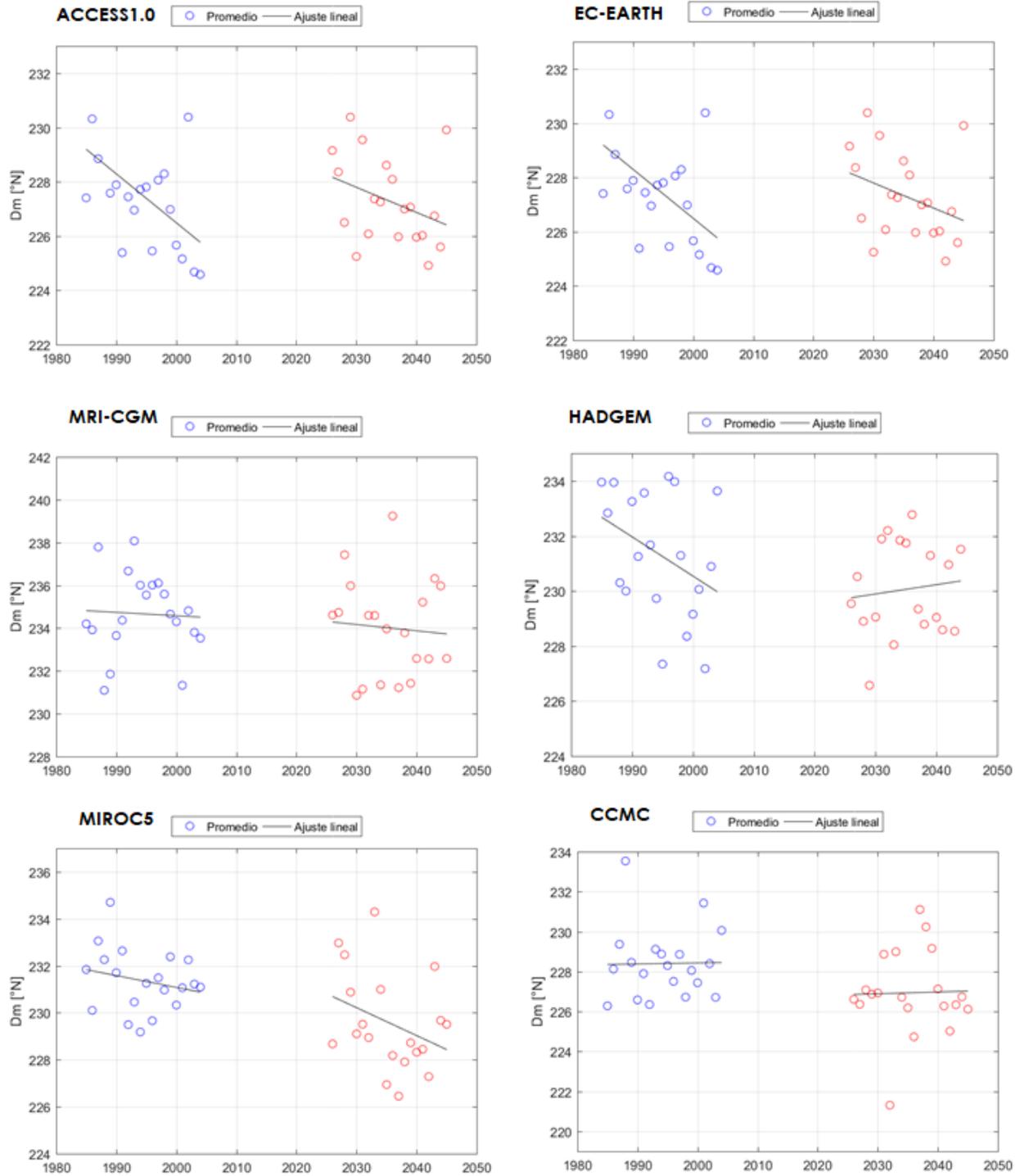
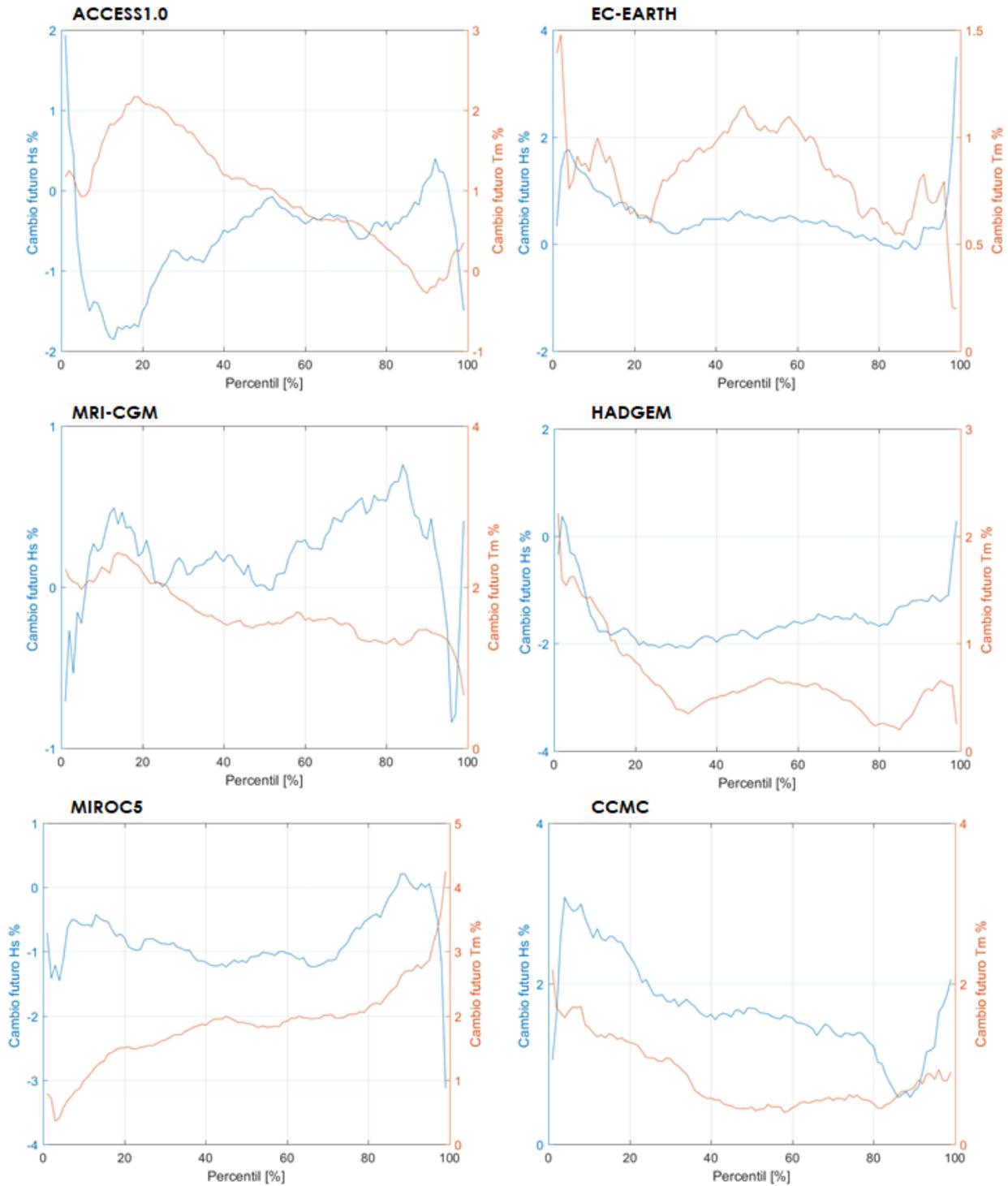


Figura B8. Variación porcentual del cambio en la altura significativa y periodo medio por percentil. Sector aguas profundas frente a Valparaíso.



6.3.3 Talcahuano

En las Figuras B9 a B12 se presenta la evolución interanual de los parámetros de oleaje en aguas profundas frente a Talcahuano. De este análisis se concluye:

- En las alturas significativas no se evidencian grandes cambios en el percentil 50. No obstante, el percentil 99 varía dependiendo del modelo, ya que uno pronostica una proyección al alza (ACCESS 1.0), cuatro modelos indican que las alturas permanecerán constantes (EC-EARTH, MRI, HADGEM y CCMC) y un modelo indica una proyección a la baja (MIROC5).
- Los periodos medios para los 2 percentiles analizados no exhiben una clara tendencia.
- Las direcciones medias exhiben un giro hacia el sur en todos los modelos analizados.

Figura B9. Evolución interanual de la altura significativa para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Talcahuano.

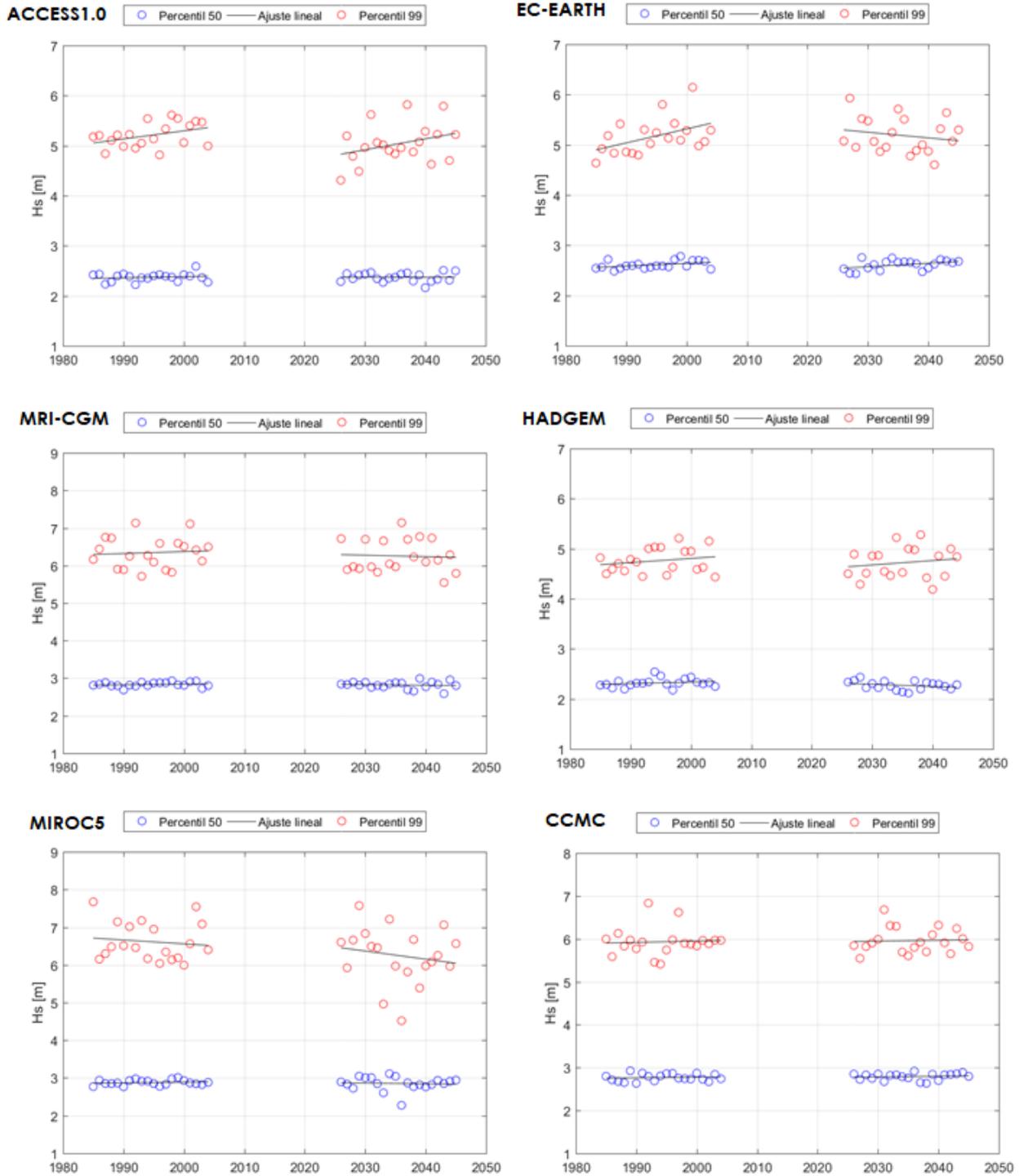


Figura B10. Evolución interanual del periodo medio para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Talcahuano.

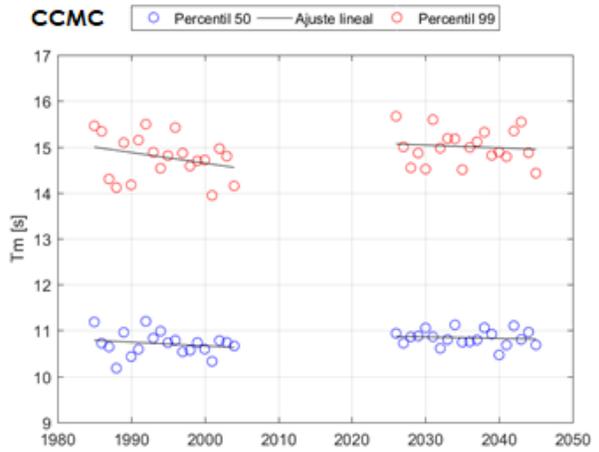
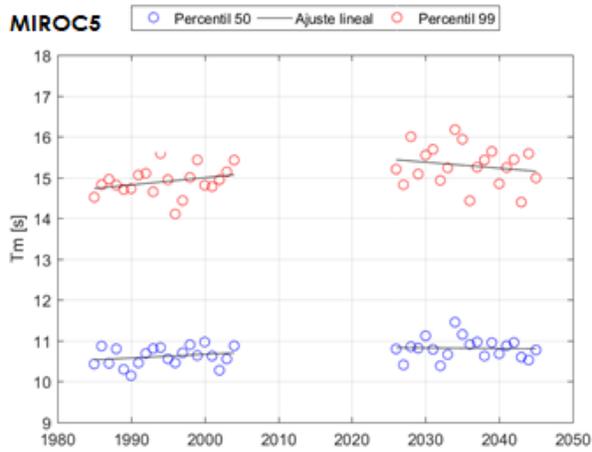
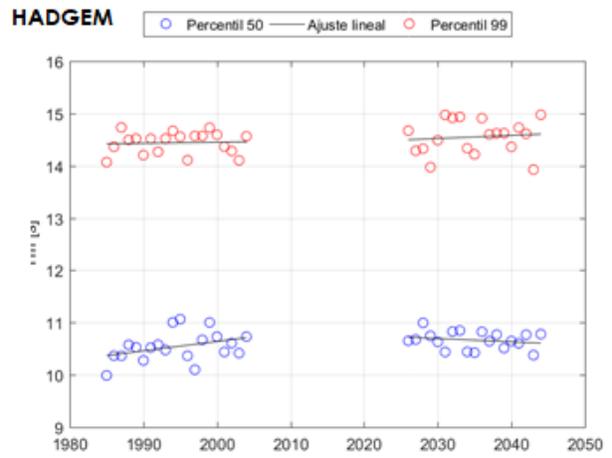
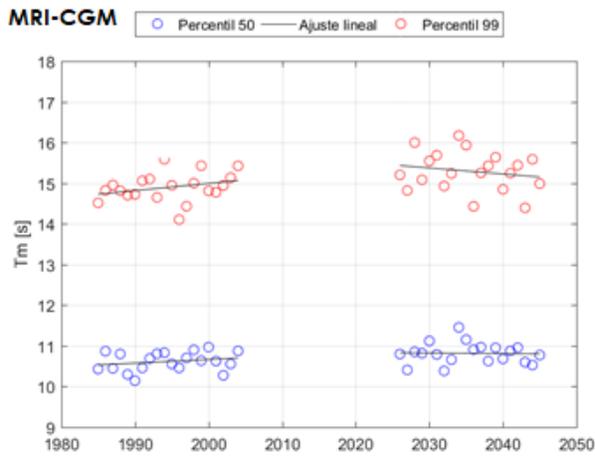
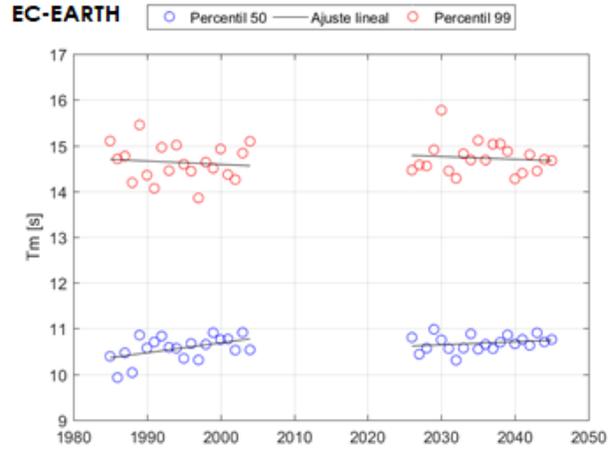
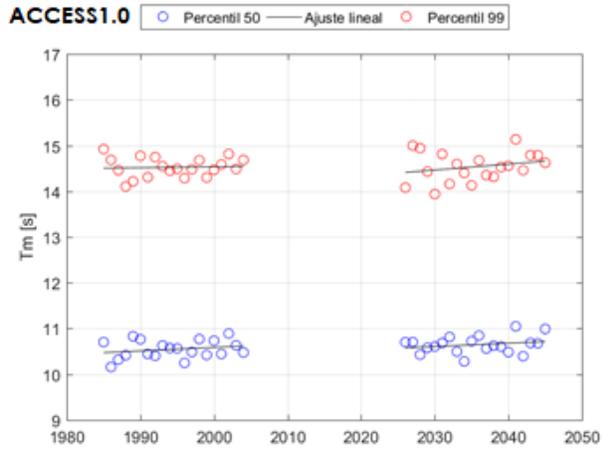


Figura B11. Evolución interanual de la dirección media para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Talcahuano.

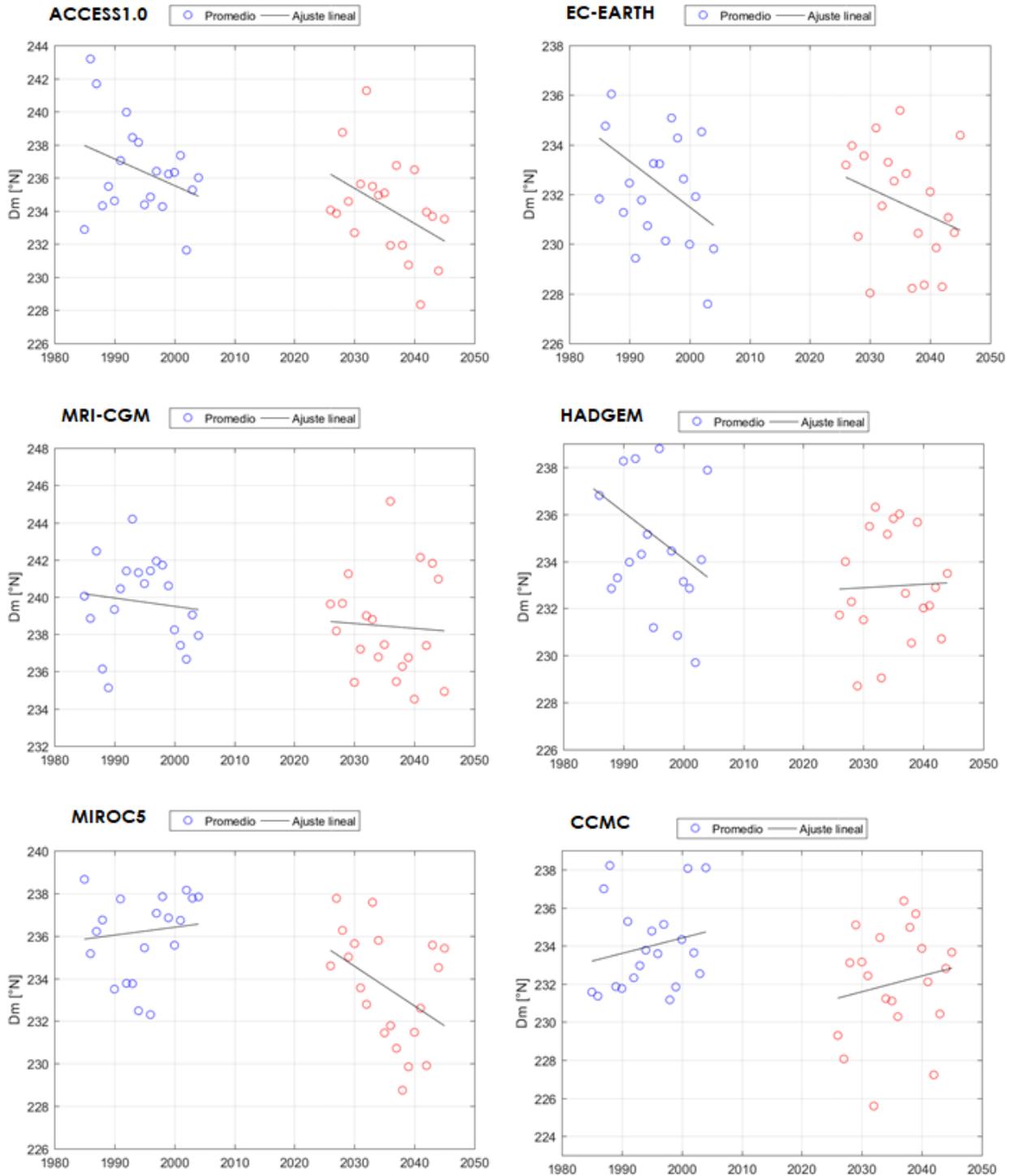
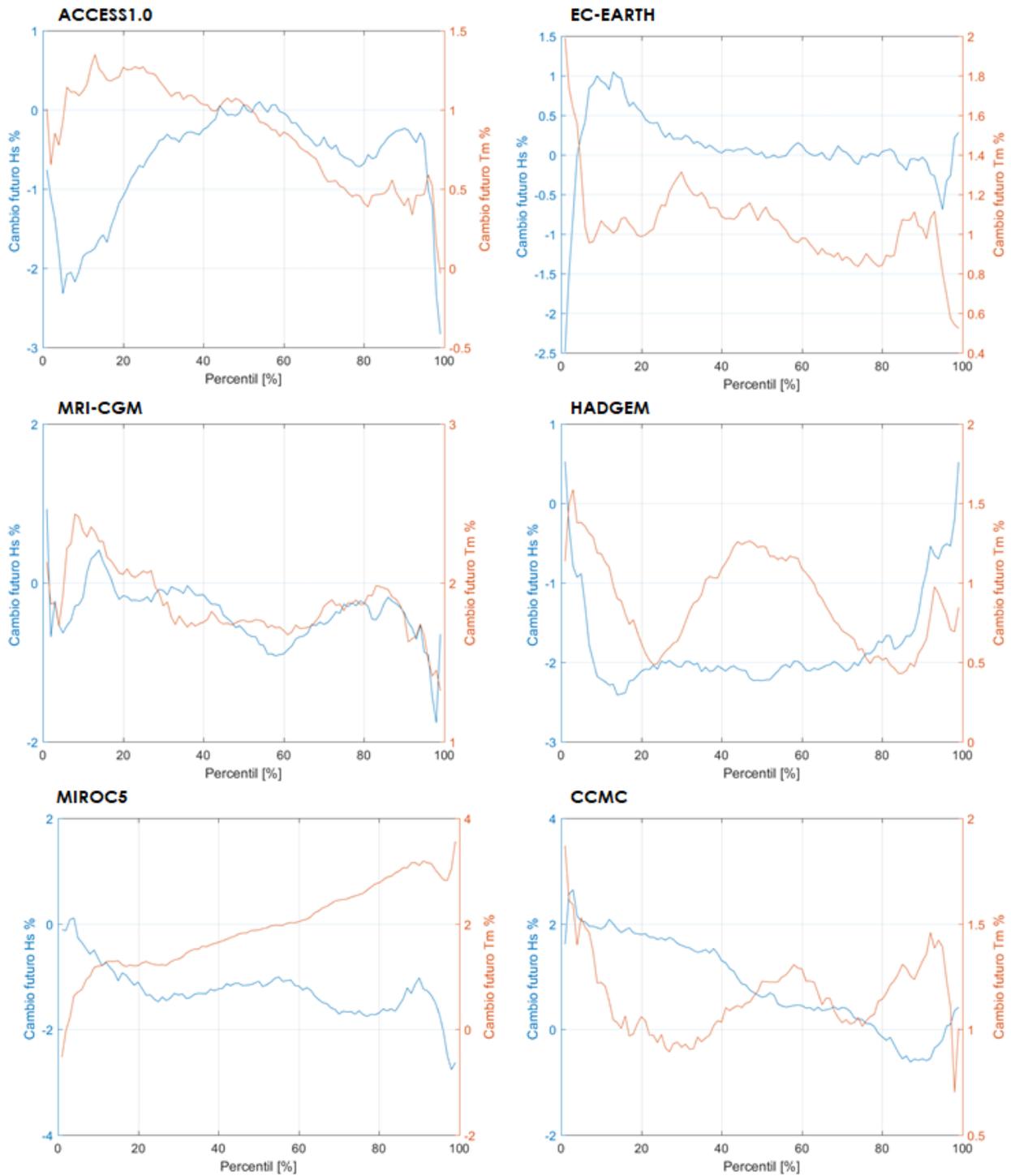


Figura B12. Variación porcentual del cambio en la altura significativa y periodo medio por percentil. Sector aguas profundas frente a Talcahuano.



6.3.4 Rapa Nui

En la En las Figuras B13 a B16 se presenta la evolución interanual de los parámetros de oleaje en aguas profundas frente a Rapa Nui. De este análisis se concluye:

- Para las alturas significativas se observa que el percentil 50 permanece estable en todos los modelos analizados. Sin embargo, la altura significativa asociada al percentil 99 presenta una leve tendencia a la disminución en tres modelos (MIROC5, MRI-CGM y CCMC), mientras que en los restantes modelos permanece constante en el tiempo.
- En cuanto a los periodos medios, se observan percentiles 50 constantes en el tiempo y leves aumentos en el percentil 99 en todos los modelos, con excepción del CCMC. Este modelo presenta una tendencia a la baja en el periodo histórico, la cual tiende a permanecer constante en la proyección.
- En cuanto a las direcciones medias, se observan giros hacia el sur en la totalidad de modelos con excepción de los modelos MIROC5 y HADGEM. En el primero, la dirección media tiende a permanecer constante y en el segundo el oleaje tiende a girar levemente hacia el norte.

Figura B13. Evolución interanual de la altura significativa para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Rapa Nui.

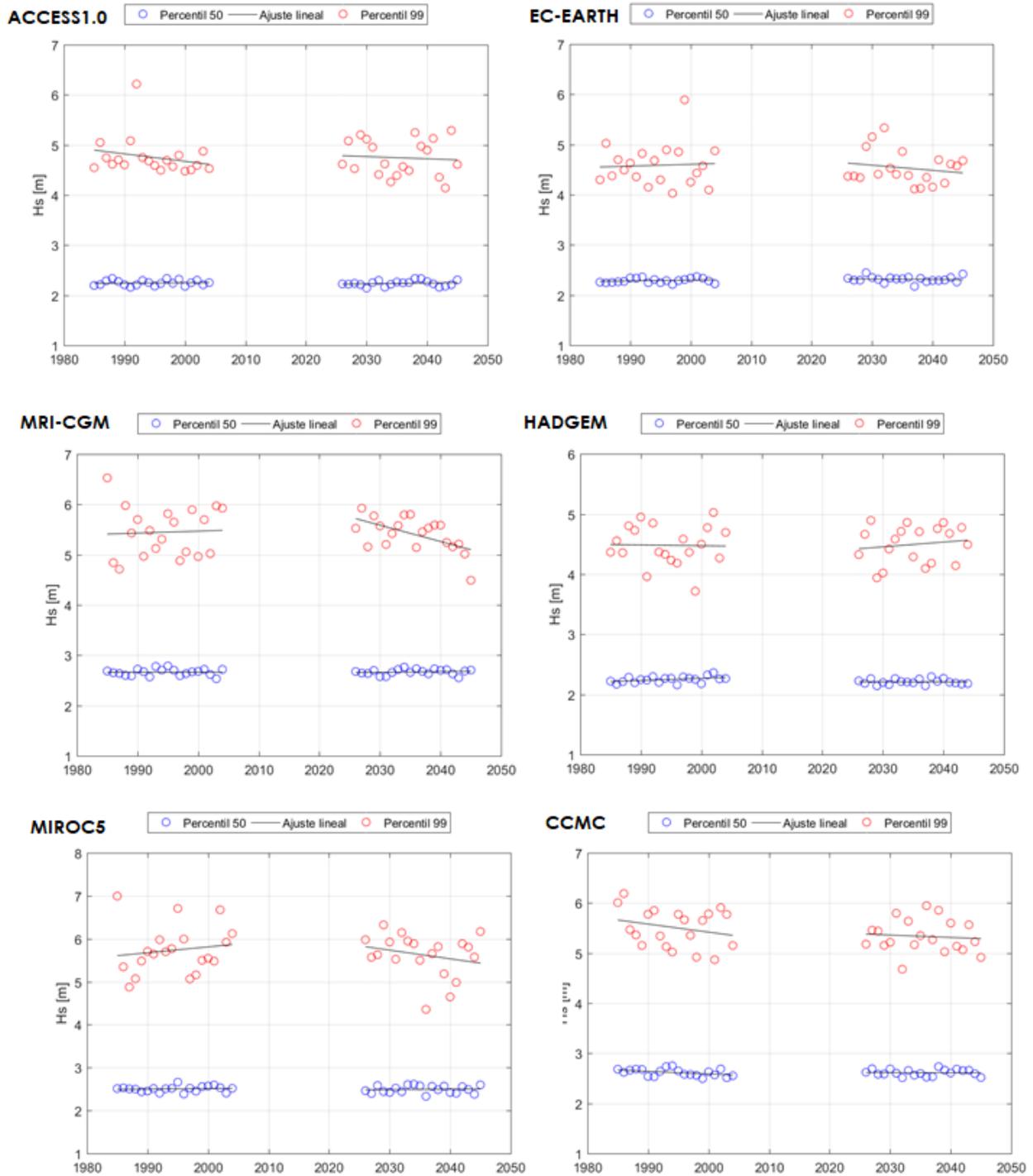


Figura B14. Evolución interanual del periodo medio para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Rapa Nui.

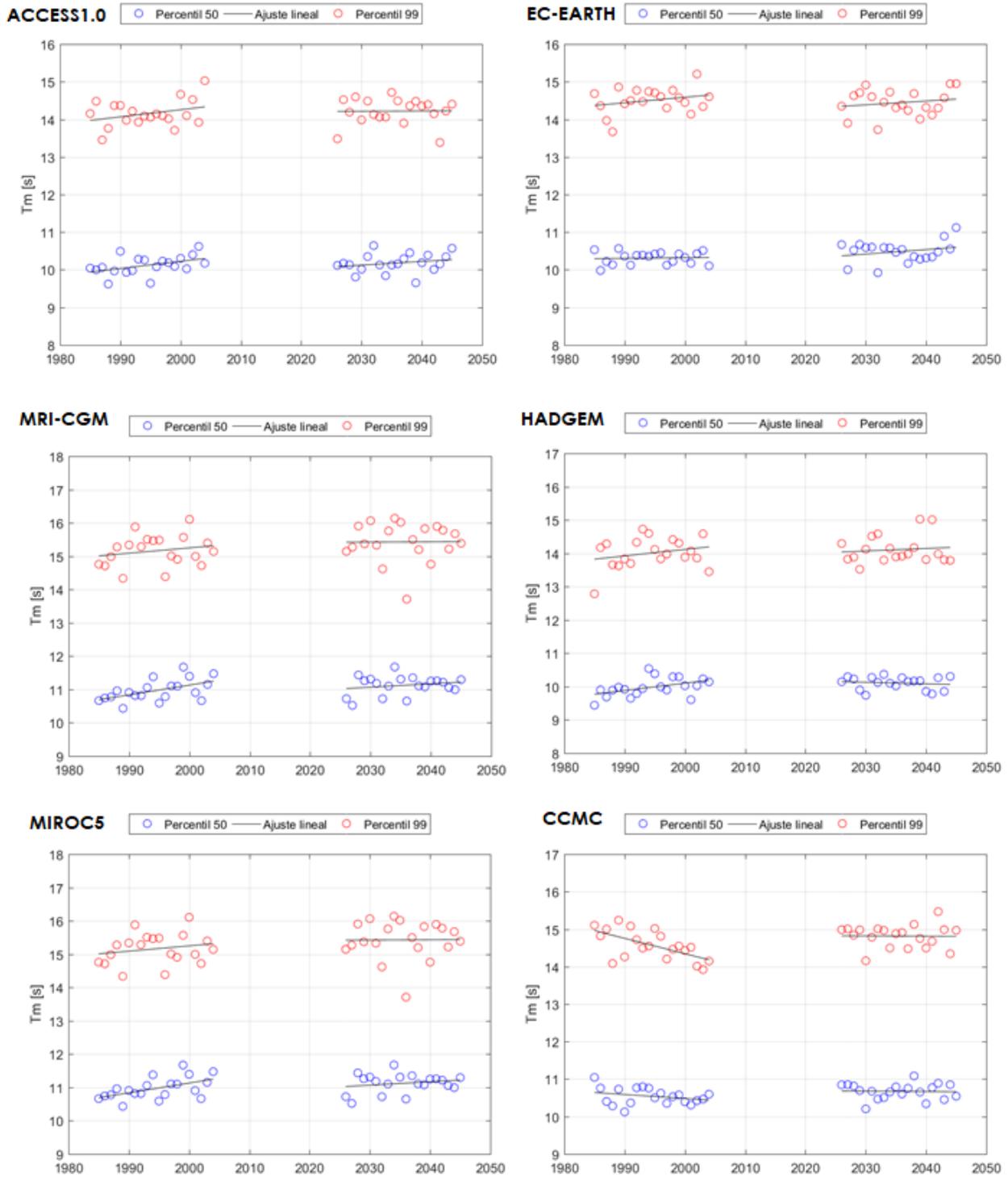


Figura B15. Evolución interanual de la dirección media para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Rapa Nui.

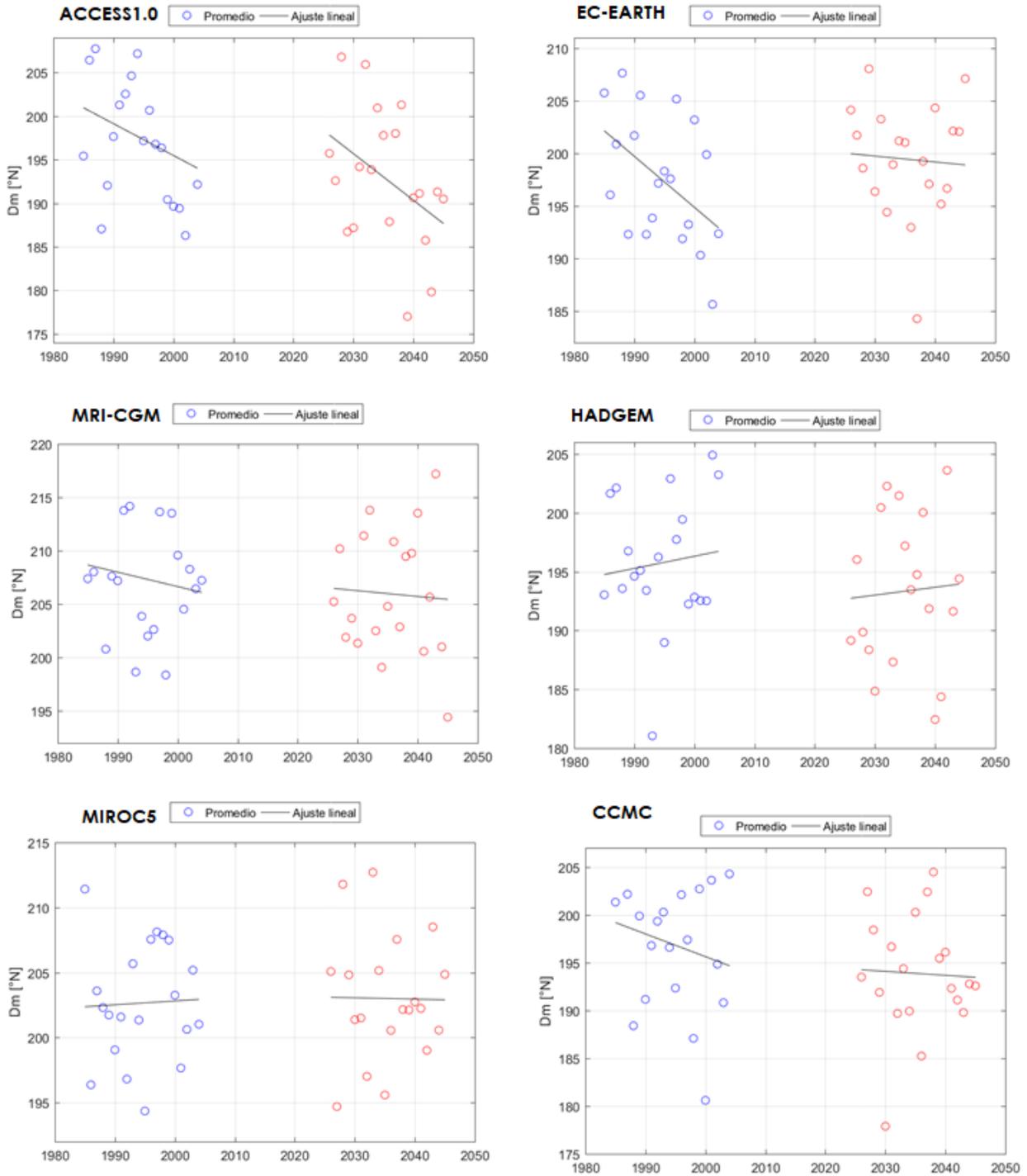
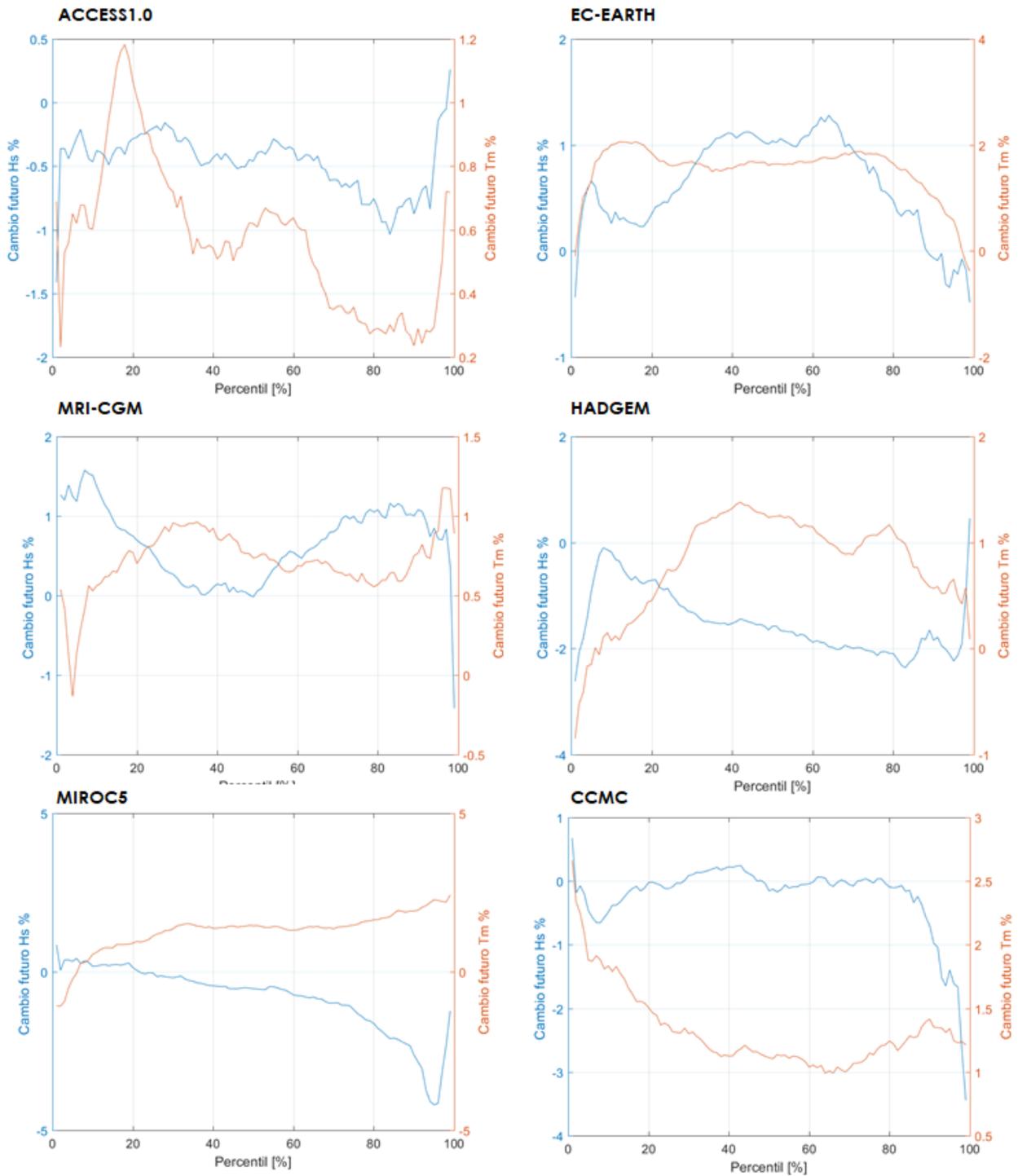


Figura B16. Variación porcentual del cambio en la altura significativa y periodo medio por percentil. Sector aguas profundas frente a Rapa Nui.



6.3.5 Isla Robinson Crusoe, Archipiélago Juan Fernández

En la En las Figuras B17 a B20 se presenta la evolución interanual de los parámetros de oleaje en aguas profundas frente a Isla Robinson Crusoe, Archipiélago Juan Fernández.

- En la altura significativa se observa que los percentiles 50 permanecen constantes en el tiempo, sin presentar variaciones significativas en el periodo proyectado. Por otra parte, el percentil 99 solo exhibe alzas en el modelo ACCESS 1.0. En los modelos EC-EARTH y MRI-CGM se evidencian alturas con tendencias a la baja en la proyección, no obstante, en los restantes modelos la situación futura permanece constante.
- Los periodos medios tienden a permanecer estables y sin grandes variaciones en el tiempo para ambos percentiles.
- El análisis direccional indica un giro hacia el sur en todos los modelos, con la excepción del CCMC, el cual presenta un leve giro hacia el norte.

Figura B17. Evolución interanual de la altura significativa para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Isla Robinson Crusoe, Archipiélago Juan Fernández.

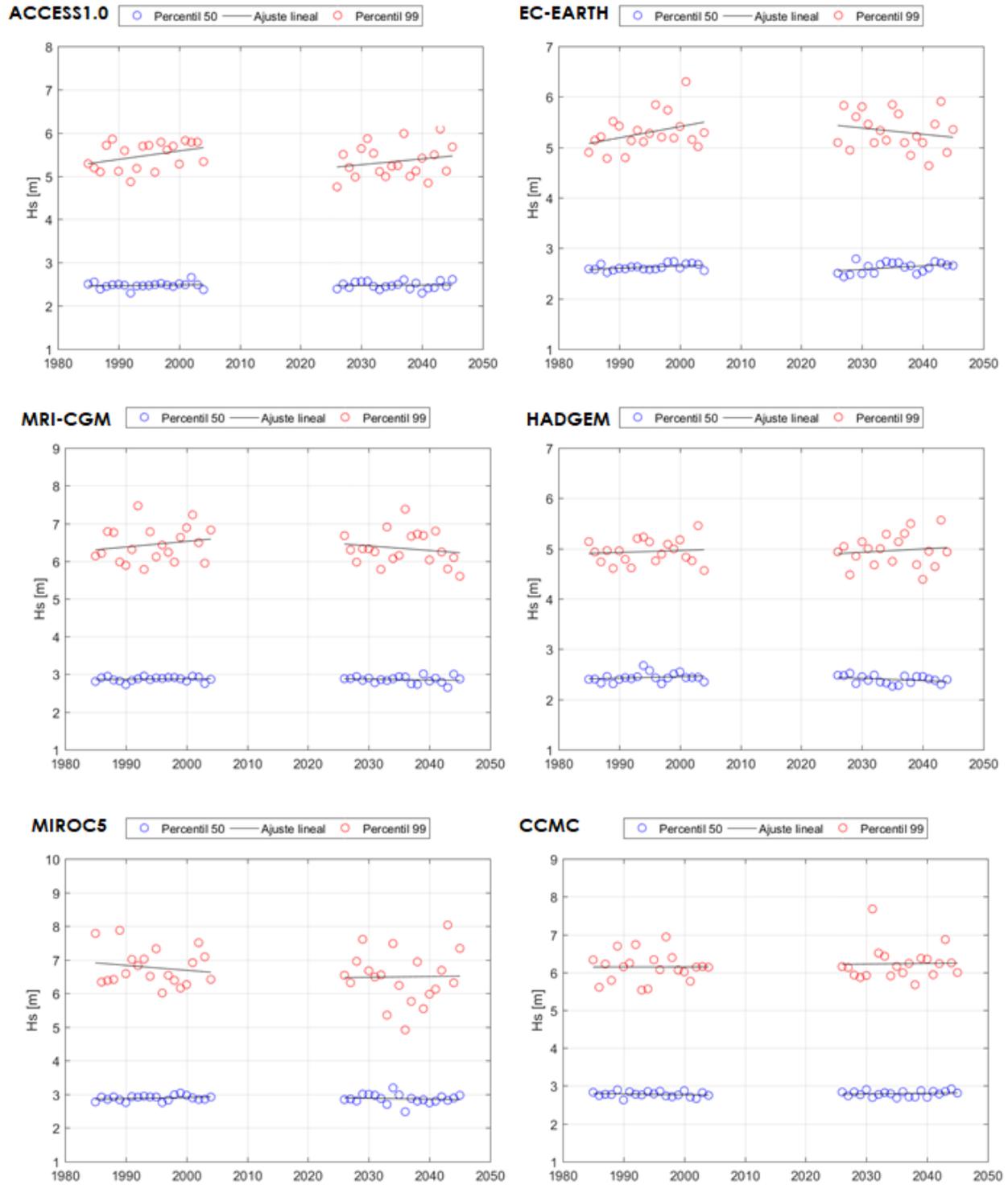


Figura B18. Evolución interanual del periodo medio para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Isla Robinson Crusoe, Archipiélago Juan Fernández.

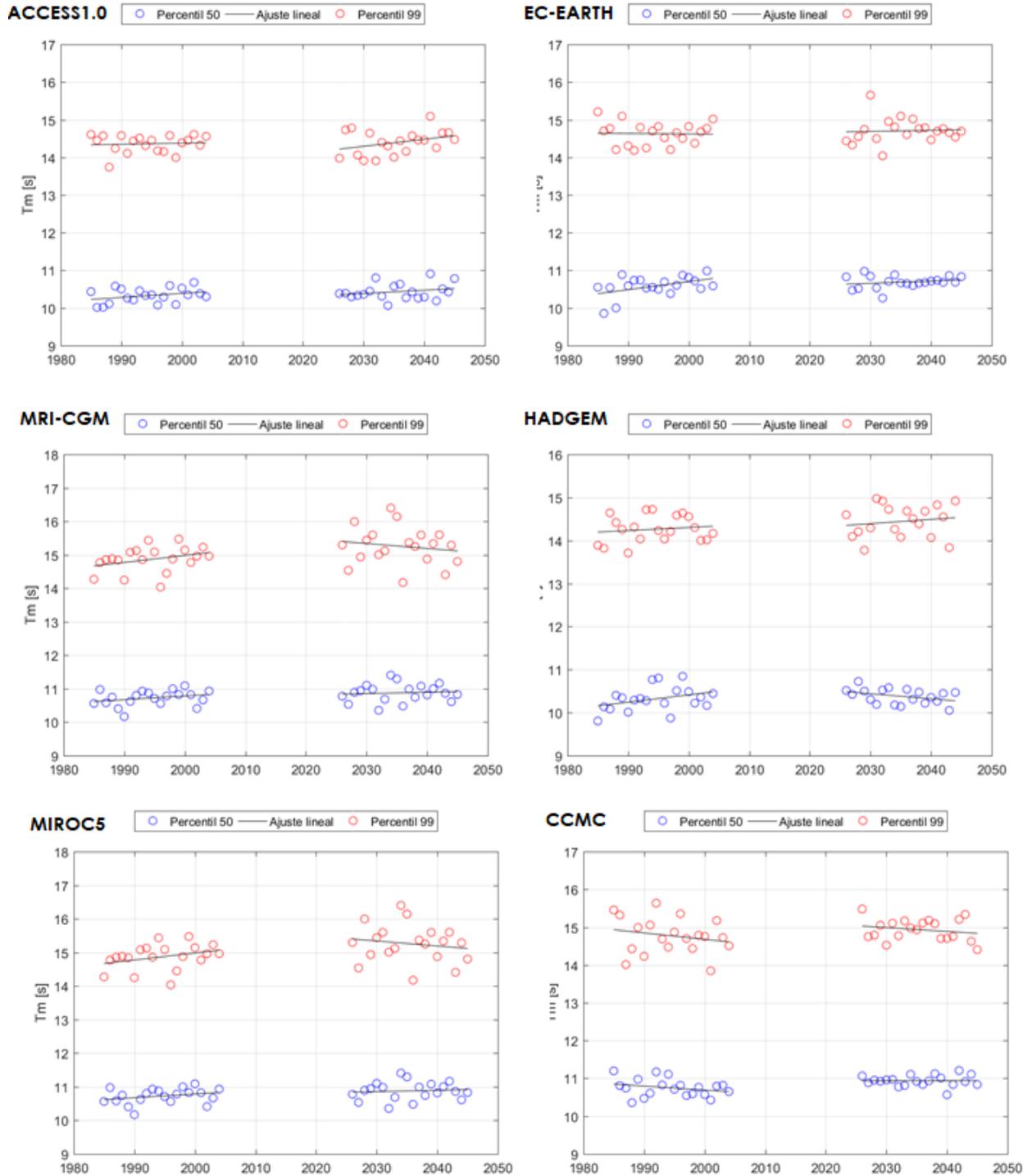


Figura B19. Evolución interanual de la dirección media para los diferentes GCM. Sector aguas profundas frente a Isla Robinson Crusoe, Archipiélago Juan Fernández.

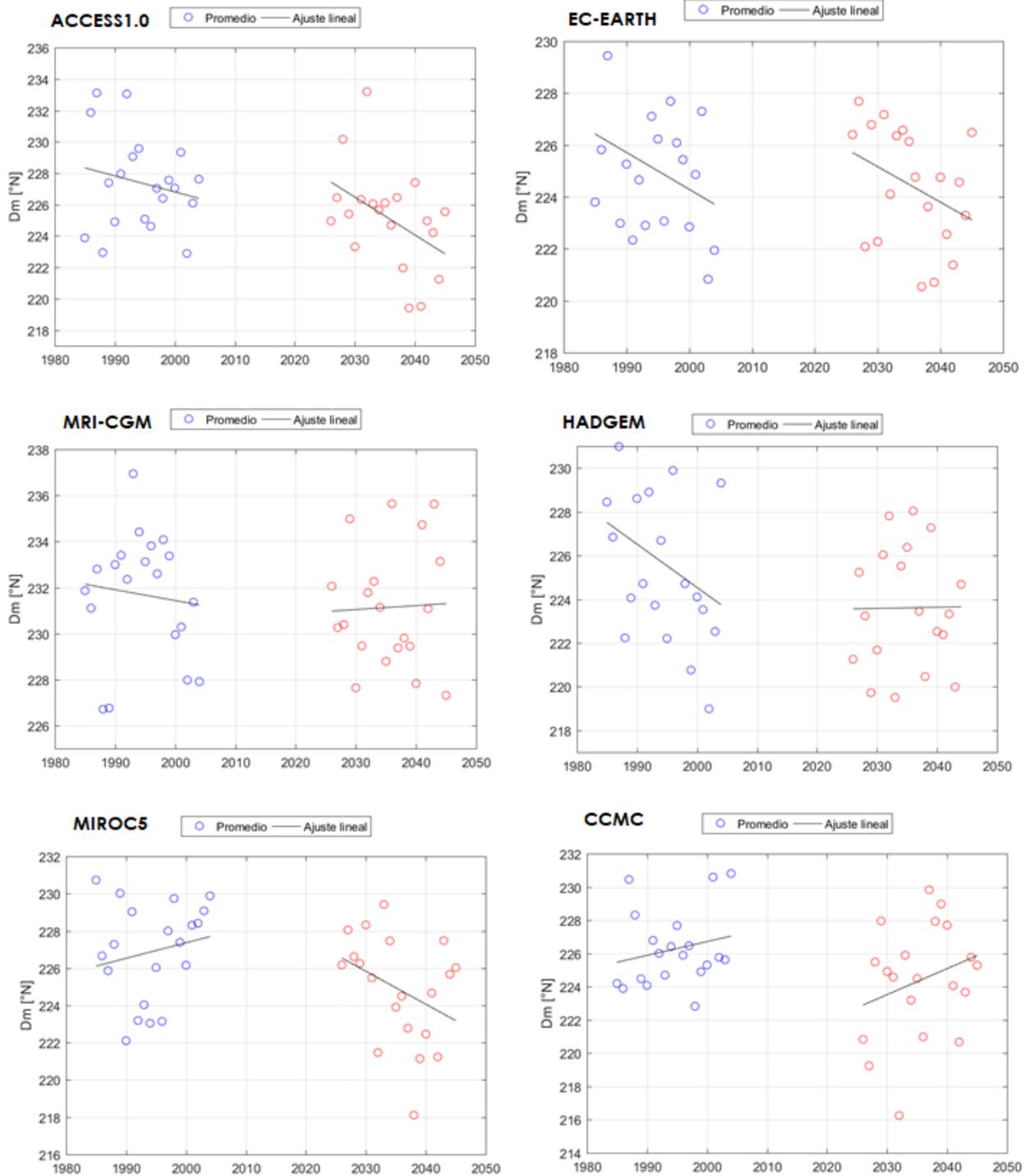


Figura B20. Variación porcentual del cambio en la altura significativa y periodo medio por percentil. Sector aguas profundas frente a Isla Robinson Crusoe, Archipiélago Juan Fernández.

