

Informe  
Proyecto  
Arclim

# Hidrología

**ARCLIM**  
Atlas de Riesgo Climático  
Chile



## Equipo realizador:

---

### Ximena Vargas

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

### Pablo Mendoza

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

### Franco Ricchetti

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

### Catalina Jerez

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Santiago, Chile, 2020.



### Este informe debe citarse de la siguiente manera:

Vargas, X.; Ricchetti, F.; Jerez, C. & Mendoza, P., 2020. Informe Proyecto ARCLim: Hidrología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile coordinado por Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y Centro de Cambio Global UC para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Santiago.

## Preparado para:



ARCLim es un proyecto del Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile, Financiado por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania.

## Coordinado por:



Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR]2  
ANID/FONDAP/15110009



Centro Interdisciplinario de Cambio Global UC  
de la Pontificia Universidad Católica de Chile

## Desarrollado por:



Informe  
Proyecto  
Arclim

# Hidrología

**ARCLIM**  
Atlas de Riesgo Climático  
Chile



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

Pág.		Pág.	
<b>2</b>	<b>1. Resumen Ejecutivo</b>	<b>30</b>	3.2.4 Riesgo en inundaciones por desbordes de ríos.
<b>5</b>	<b>2. Introducción</b>	<b>31</b>	3.3 Sequías hidrológicas.
6	2.1 Objetivos.	<b>32</b>	3.3.1 Amenaza en sequías hidrológicas.
6	2.2 Alcance.	<b>34</b>	3.3.2 Exposición en sequías hidrológicas.
6	2.3 Nociones básicas de hidrología.	<b>35</b>	3.3.3 Vulnerabilidad en sequías hidrológicas.
<b>9</b>	<b>3. Metodología</b>	<b>37</b>	3.3.4 Riesgo en sequías hidrológicas.
9	3.1 Inundaciones urbanas.	<b>38</b>	3.4 Similitudes y diferencias con wp: Asentamientos Humanos.
11	3.1.1 Amenaza en inundaciones urbanas.	<b>38</b>	3.4.1 Inundaciones.
15	3.1.2 Exposición en inundaciones urbanas.	<b>39</b>	3.4.2 Sequías.
16	3.1.3 Vulnerabilidad en inundaciones urbanas.	<b>41</b>	<b>4. Conclusiones</b>
19	3.1.4 Riesgo en inundaciones urbanas.	<b>41</b>	4.1 Inundaciones urbanas: Resiliencia, adaptabilidad y brechas para desarrollo futuro.
21	3.2 Inundaciones por desbordes de ríos.	<b>42</b>	4.2 Inundaciones por desbordes de ríos: Resiliencia, adaptabilidad y brechas para desarrollo futuro.
22	3.2.1 Amenaza en inundaciones por desbordes de ríos.	<b>43</b>	4.3 Sequías Hidrológicas: Resiliencia, adaptabilidad y brechas para desarrollo futuro.
24	3.2.2 Exposición en inundaciones por desbordes de ríos.		
27	3.2.3 Vulnerabilidad en inundaciones por desbordes de ríos.		

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Pág.</b>		<b>Pág.</b>	
<b>7</b>	<b>Figura 1.</b> Conceptualización del ciclo del agua.	<b>25</b>	<b>Figura 12.</b> Representación gráfica de obras hidráulicas contenidas en buffer de 2 km.
<b>10</b>	<b>Figura 2.</b> Cadena de impacto: Inundaciones urbanas.	<b>27</b>	<b>Figura 13.</b> Mapa de Exposición.
<b>12</b>	<b>Figura 3.</b> Análisis de componentes principales – Modelación de falla de colectores de aguas lluvia para T=5, 10 y 20 años.	<b>29</b>	<b>Figura 14.</b> Imágenes Street View para determinación de la escala cualitativa de Vulnerabilidad.
<b>12</b>	<b>Figura 4.</b> Validación cruzada del modelo de falla de colectores de aguas lluvias para T=5, 10 y 20 años.	<b>29</b>	<b>Figura 15.</b> Mapas de Vulnerabilidad para T=25, 50 y 100 años.
<b>13</b>	<b>Figura 5.</b> Resultados del modelo de RLM: Falla de colectores de aguas lluvia (T=5, 10 y 20 años).	<b>30</b>	<b>Figura 16.</b> Mapas de Riesgo para T=25, 50 y 100 años.
<b>14</b>	<b>Figura 6.</b> Mapas de Amenaza para T=5, 10, y 20 años.	<b>32</b>	<b>Figura 17.</b> Ejemplo de tributación de puntos de aforos controlados y modelados.
<b>16</b>	<b>Figura 7.</b> Mapa de Exposición.	<b>35</b>	<b>Figura 18.</b> Mapas de Amenaza para condiciones de sequía severa, muy severa y combinada.
<b>19</b>	<b>Figura 8.</b> Mapa de Vulnerabilidad.	<b>36</b>	<b>Figura 19.</b> Mapa de Exposición.
<b>20</b>	<b>Figura 9.</b> Mapas de Riesgo para T=5, 10 y 20 años.	<b>36</b>	<b>Figura 20.</b> Mapa de Vulnerabilidad.
<b>23</b>	<b>Figura 10.</b> Esquema de cambio en los caudales y periodos de retorno, situación presente y futura.	<b>38</b>	<b>Figura 21.</b> Mapas de Riesgo para condiciones de sequía severa, muy severa y combinada.
<b>24</b>	<b>Figura 11.</b> Mapas de Amenaza para T=25, 50 y 100 años.		

# ÍNDICE DE TABLAS

**Pág.**

- 13** **Tabla 1.**  
Matriz de contingencia para determinación de la Amenaza.
- 17** **Tabla 2.**  
Materialidad de la techumbre de viviendas.
- 17** **Tabla 3.**  
Materialidad de paredes exteriores de viviendas.
- 17** **Tabla 4.**  
Matriz de Riesgo.
- 17** **Tabla 5.**  
Calidad y magnitud de servicios críticos.
- 26** **Tabla 6.**  
Peso de importancia otorgados a bocatomas y centrales hidroeléctricas.
- 28** **Tabla 7.**  
Periodo de retorno de infraestructura crítica.





# 1

# RESUMEN EJECUTIVO

El cambio climático ha instaurado nuevos desafíos para el estudio de cuencas. Durante las últimas décadas, se han realizado números estudios que demuestran que el cambio climático está generando impactos negativos sobre los recursos hídricos del planeta y que están asociados al aumento de la temperatura media de la tierra.

Además, se ha corroborado que existe un aumento en la frecuencia y magnitud de eventos extremos, tales como: tormentas, inundaciones, tornados, olas de calor o de frío y sequías, entre otros. Sin embargo, existe una vasta gama de efectos adversos aún no explorados y/o estudiados, ya que perturbaciones en el clima pueden afectar de forma evidente, pero desigual, a toda la atmósfera terrestre y a los sistemas de la biósfera. En consecuencia, existen zonas vulnerables en todo el planeta, las que ven afectados sus recursos hídricos y, por ende, tienden a presentar problemas de escasez, distribución y almacenamiento, lo que, finalmente, se puede traducir en problemas económicos. De esta forma, el cambio climático es un fenómeno que conlleva consecuencias ambientales, sociales y económicas.

Las zonas más afectadas suelen ser aquellas de mayor Vulnerabilidad y Exposición, en donde las características demográficas —y de desarrollo local— acentúan los efectos adversos del cambio climático. En particular, los asentamientos de estas comunidades se encuentran económicamente en desventaja y, por lo tanto, carecen de la infraestructura adecuada para soportar y/o adaptarse a eventos hidrometeorológicos extremos.

Este Informe busca analizar y reportar el comportamiento proyectado por modelos de cambio climático, asociado a distintos tipos de eventos hidrológicos extremos en el territorio chileno, en dos periodos. Con ello, se busca evaluar sus efectos adversos, así como constatar los posibles Riesgos futuros a los que se podría enfrentar la población chilena. Para ello, se han considerado eventos extremos producidos por episodios de precipitación extrema, específicamente inundaciones urbanas y por desbordes de ríos, además de la evaluación de sequías hidrológicas.

Los eventos de precipitación extrema se relacionan de forma directa con la intensidad de una tormenta de llu-



via. Grandes intensidades de precipitación reflejan una gran cantidad de precipitación líquida caída en un corto periodo. De esta forma, las inundaciones urbanas son provocadas por lluvias de gran intensidad, producto de las cuales los sistemas de recolección de aguas no logran evacuarla a los cauces receptores, debido a la saturación que experimenta el sistema. Por otro lado, las inundaciones por desbordes de ríos son generadas por precipitaciones extremas, las que aumentan los caudales en esteros y ríos, incrementando la altura de escurrimiento del cauce y, en consecuencia, causando desbordes y/o anegaciones de áreas cercanas a centros urbanos que colindan con los ríos. La evaluación de este tipo de eventos extremos se centró en el análisis de falla del sistema de colectores urbanos de aguas lluvia, debido a precipitaciones asociadas a periodos de retorno entre 5 y 20 años, y el análisis de la magnitud de posibles crecidas que puedan experimentar los ríos de Chile, en el caso de inundaciones urbanas por desbordes de ríos.

En contraposición a las inundaciones se encuentran los eventos extremos de sequías, las que pueden ser diferenciadas según la variable hidrometeorológica que se ve alterada por una anomalía climática. Se distinguen tres tipos: i) sequías meteorológicas, evidenciadas por una falta en la precipitación, que afecta las entradas de agua que percibe una cuenca hidrográfica, ii) sequías hidrológicas, referidas a las disminuciones de almacenamientos y flujos de agua superficiales y sub-superficiales en la cuenca y iii) sequías agrícolas, que se relacionan con el déficit en la humedad del suelo, es decir, los almacenamientos internos no son suficientes para el desarrollo de plantas y cultivos. Este estudio considera la evaluación de sequías hidrológicas, donde la principal variable de interés son los

caudales medios diarios, asociados a una probabilidad de excedencia de 95%; y los valores medios anuales, asociados a probabilidades de 85 y 95%.

Debido a que el estudio buscó evaluar el Riesgo de la población frente a distintos eventos extremos, se estudiaron las características sociales, económicas y geográficas de la población propensa a sufrir los efectos adversos relacionados al cambio climático. Para ello, se consideró un conjunto de características propias de cada comuna, centro urbano o ciudad analizada en el presente informe. Entre ellas se destaca la infraestructura crítica, incluyendo hospitales, centros educacionales y cuarteles de bomberos, como también la hidráulica, que considera bocatomas, centrales hidroeléctricas y plantas de tratamiento, entre otros. Adicionalmente, para el análisis de Riesgo, se evaluó la demografía de los sectores de interés.

Los principales resultados muestran una radicalización de la intensidad de los eventos extremos futuros proyectados por los modelos de cambio climático. En particular, indican que la magnitud de eventos de precipitación extrema aumentará en el futuro, y que las comunas y/o centros urbanos con mayor Riesgo son aquellas/os con una precaria y/o nula infraestructura capaz de portear el agua a los cauces receptores o mitigar los efectos de una crecida. Por lo tanto, se recomienda fortalecer la infraestructura hidráulica disponible para mitigar los efectos que desencadenan las precipitaciones extremas. En el caso de sequías hidrológicas, se observó que la zona centro-norte de Chile es la de mayor afectación, en donde se proyecta un aumento en la frecuencia de sequías como también una mayor severidad de estas.





# 2

## INTRO- DUCCIÓN

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2014) determinó, en su reporte asociado a la fase AR5, un aumento de la temperatura y una disminución de la precipitación en algunas zonas del mundo, dentro de las cuales Chile se encontraba incluida. Estudios globales, así como también locales desarrollados por centros de investigación, universidades y organismos de gobierno, han determinado que las cuencas del norte y centro-sur de Chile se verían fuertemente afectadas por el cambio climático, resaltando el efecto de los fenómenos extremos como inundaciones y sequías.

Con respecto a las inundaciones, se ha comprobado que los fenómenos de precipitaciones extremas han desencadenado eventos de crecidas más extremas en ríos. Esto, sumado al efecto de tormentas más cálidas que elevan la línea de nieves y, por ende, aumentan las áreas aportantes, generan mayores caudales de crecida. Este problema se ve agravado por el cambio del uso de suelos dentro de las cuencas, donde se ha reemplazado suelo natural por intervenciones de grandes ciudades, aumentando la impermeabilización del suelo y, por lo tanto, generando mayor escorrentía instantánea.

Estos mismos principios se ven replicados en las ciudades, desencadenando con ello inundaciones urbanas. Los fenómenos extremos han colapsado de igual forma la red de colectores existente, quedando en una condición vulnerable ante un eventual aumento en la magnitud y frecuencia de los fenómenos extremos en un futuro.

Por otro lado, el IPCC (2019) elaboró un informe especial, cuya conclusión sugería un aumento de la temperatura media anual, en la escala global, entre 0,8 y 1,2 °C con respecto a los niveles preindustriales. En este informe, se indica que es probable que, en los próximos 30 años, este nivel de calentamiento se incremente a 1,5 °C, acentuando aún más las condiciones de sequía, tanto meteorológicas como hidrológicas.

El efecto relevante en las cuencas de Chile es una disminución de las precipitaciones anuales y un aumento de la evapotranspiración, generando una disminución de los caudales medios anuales y un aumento en la frecuencia de las sequías. Estos resultados han sido avalados por la Actualización del Balance Hídrico Nacional 2018, publicado por DGA (2018, 2019 y 2020), en



el que se incluyen proyecciones de Cambio Climático. El presente documento expone los lineamientos utilizados para el desarrollo de los mapas de Riesgo del Cambio Climático, asociados a la disciplina de ciencias hidrológicas. En este sentido, se estudian fenómenos extremos de hidrología, como lo son las inundaciones y las sequías.

## 2.1 OBJETIVOS

---

El objetivo general del estudio fue determinar el Riesgo hidrológico asociado a inundaciones y sequías, esperándose un cambio en la magnitud de estos fenómenos extremos en el futuro, producto del Cambio Climático.

Como objetivos secundarios, se reconocen:

- 1) Evaluar el Riesgo hidrológico en eventos de precipitaciones extremas, desencadenantes de inundaciones urbanas.
- 2) Evaluar el Riesgo hidrológico en eventos de precipitaciones extremas, desencadenantes de inundaciones por desborde de ríos.
- 3) Evaluar el Riesgo hidrológico por sequías, analizando el cambio en los caudales de alta probabilidad de excedencia y la modificación en la frecuencia de los fenómenos de sequía.

## 2.2 ALCANCE

---

El presente estudio buscó desarrollar mapas de Riesgo hidrológico en tres ejes principales, asociados a fenómenos hidrológicos extremos, como lo son las inundaciones y sequías.

Para el caso de inundaciones urbanas, se estudiaron las 40 ciudades más pobladas del país, según los datos del

Censo 2017, y se analizó la red de colectores de aguas lluvias, declarada en los Planes Maestros de Aguas Lluvias. Para el caso de las inundaciones por desborde de ríos, se estudiaron y procesaron los resultados expuestos en el proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional, desarrollado en 95 puntos de control, correspondiente a cuencas en régimen natural, representativas y distribuidas homogéneamente en el país.

Finalmente, en el caso de sequías, se estudiaron y procesaron los resultados expuestos en el proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional, con metodologías desarrolladas, para captar cambios en la magnitud y frecuencia de las sequías hidrológicas. Esta metodología se aplicó para 95 puntos de control, consistente con el eje de inundaciones rurales.

## 2.3 NOCIONES BÁSICAS DE HIDROLOGÍA

---

La Real Academia Española define la hidrología como la *“Ciencia que estudia las aguas de la tierra”*. Por lo tanto, es útil entender —dentro del dominio de estudio de las ciencias hidrológicas— todo proceso que involucre un movimiento físico de agua que se manifieste en cualquiera de los tres estados de esta. Dicho movimiento, cíclico e infinito, es comúnmente conocido como *“ciclo del agua”*.

La conceptualización del ciclo del agua comienza con la definición de *“hoya hidrográfica”* o *“cuenca hidrográfica”*. Una cuenca es una delimitación territorial generada por las altas cumbres divisorias de agua, que definen hacia qué sectores fluye esta, concentrando la precipitación y guiándola a los ríos principales que se definen en el territorio. Las cuencas hidrográficas son las unidades fundamentales de cualquier estudio hidrológico.

En base a dicha unidad fundamental, es útil conceptualizar el ciclo del agua mediante un diagrama perceptual **Figura 1.**

En la conceptualización de la **Figura 1**, se puede ver que el ciclo del agua comienza con la precipitación, que puede ser líquida (aguas lluvias) o sólida (por ejemplo, nieve o grani-zo). Una parte de la precipitación líquida escurre superficialmente hacia los ríos principales de las cuencas hidrográficas, mientras que otra, penetra la superficie del suelo (infiltración) y avanza verticalmente (percolación), para luego almacenarse en unidades subterráneas, donde el desplazamiento del agua se produce de manera más lenta.

Por otra parte, la precipitación sólida se almacena en zonas montañosas en forma de nieve o glaciares, donde usualmente existe un clima frío, con temperaturas inferiores a los 0 °C. Durante las temporadas de primavera y verano, las mayores temperaturas derriten la nieve y la transforman en agua, que fluye por los ríos, o actúa de

igual forma que la precipitación líquida, recargando las napas subterráneas. Hasta ahora, se han explicado los principales flujos de entrada de agua a una cuenca. Sin embargo, la cuenca también está sometida a procesos naturales de salida del agua, distinguiéndose: (i) esco-rrentía superficial, esto es, la cantidad de agua medida en el punto donde queda definida la cuenca hidrográfica, (ii) los flujos subterráneos de agua, no directamente obser-vables desde la superficie y (iii) la evaporación, donde el agua pasa desde un estado líquido a un estado gaseoso. Esto desde un cuerpo de agua superficial o bien bajo la forma de evapotranspiración, lo cual corresponde a una salida de agua desde las especies vegetales. Estos dos úl-timos procesos quedan fuertemente condicionados, entre otras variables, por las temperaturas registradas en las cuencas.



**Figura 1.** Conceptualización del ciclo del agua.



# 3

# METODOLOGÍA

## 3.1 INUNDACIONES URBANAS

---

El objetivo de este eje es analizar los efectos de inundaciones generadas por precipitaciones extremas de distinto periodo de retorno en las diferentes comunas del país.

Para cada análisis se considera la Amenaza (impacto de precipitación extrema sobre asentamientos urbanos), la Exposición (presencia de población y servicios críticos en cada comuna) y la Vulnerabilidad (susceptibilidad de la población y servicios críticos a sufrir impactos) para determinar el Riesgo (susceptibilidad a sufrir impactos adversos generados por inundaciones urbanas).

Los fenómenos de precipitación extrema se relacionan directamente con la intensidad de una tormenta, es decir, con la distribución del agua caída en el tiempo. Grandes intensidades de precipitación implican una gran cantidad de precipitación líquida distribuida en un tiempo acotado. Por el contrario, se tendrán bajas intensidades de precipitación si el agua caída es pequeña y se distribuye homogéneamente en un largo periodo. De esta forma, las

inundaciones en centros urbanos provocados por fenómenos climáticos, son producidas por lluvias de gran intensidad, donde el “sistema de recolección” no logra evacuar correctamente el agua a los cauces receptores.

El sistema de recolección corresponde a la infraestructura que tiene un centro urbano dedicada a la captación, conducción y evacuación de las aguas lluvias, es decir, las aguas de origen meteorológico que caen en una zona urbana durante una tormenta. La captación se compone de sumideros que reciben el agua que escurre gravitacionalmente por las pendientes de las calles y veredas. Las aguas captadas por estos sumideros entran en la denominada “red de colectores de aguas lluvias”.

El sistema de recolección corresponde a un conjunto de cámaras y conductos de agua de gran diámetro, donde las aguas fluyen gravitacionalmente hacia los sectores de evacuación. Dichos conductos corresponden a la componente donde fluye el agua. Por otro lado, las cámaras son estaciones que conectan las conducciones de agua, pudiendo en éstas cambiar el sentido del flujo. También son un elemento importante de inspección en la red, desde el



cual se logra acceder a las conducciones de agua y realizar los trabajos preventivos de mantenimiento, siendo el más habitual la limpieza de elementos que caen en la red y quedan estancados, provocando embancamientos y obstrucciones que impiden el flujo normal de las aguas.

Finalmente, existirá una obra de restitución hacia la cual convergerán todas las aguas lluvias conducidas por la red de colectores, las que serán evacuadas a un cauce receptor de manera segura, garantizando una nula afectación a terceras personas.

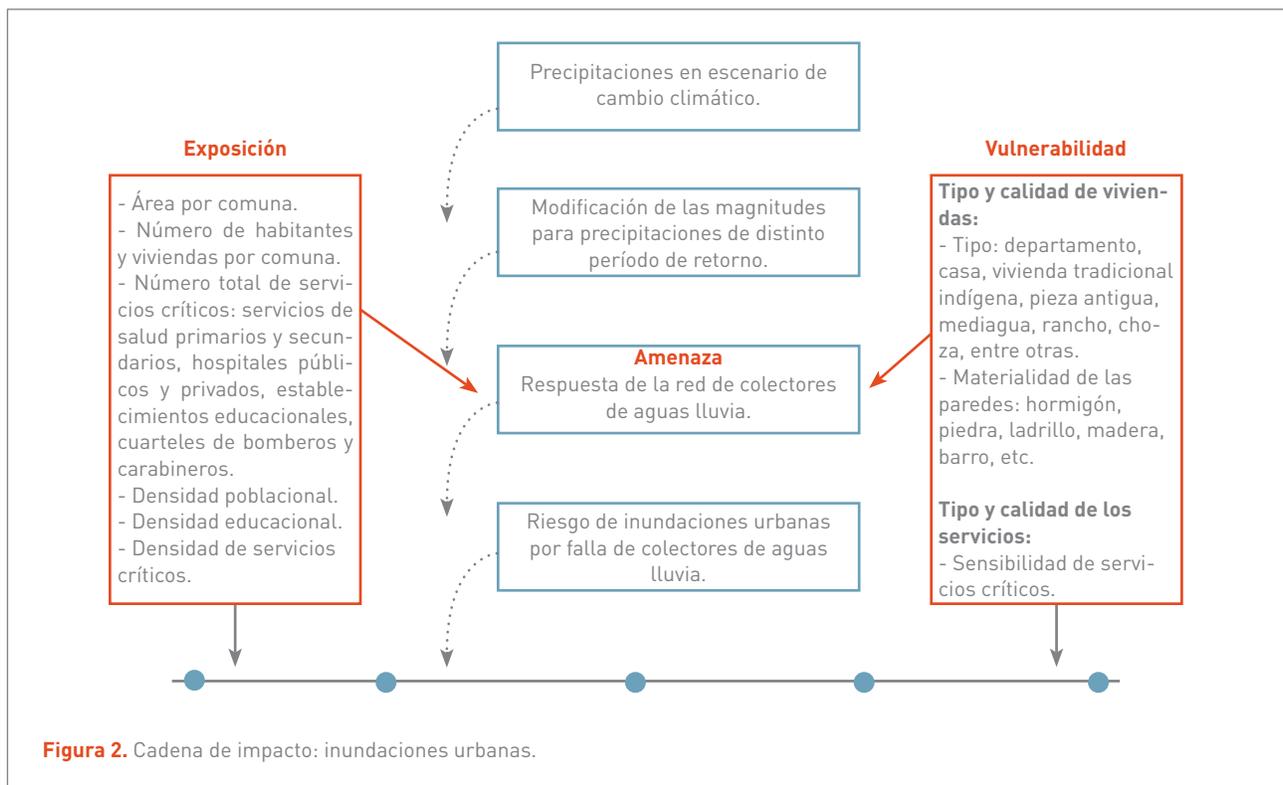
Se debe tener en cuenta que la hidrología es una ciencia que estudia la generación de escorrentía, poniendo énfasis tanto en el fenómeno meteorológico (es decir, las tormentas que causan la precipitación), como también en la formación de la escorrentía, lo cual viene determinado por procesos intrínsecos del sistema de recolección de aguas lluvias.

Una inundación corresponde a un aumento del nivel de las aguas en zonas urbanas, ocupando sectores que habitualmente están libres de ellas. Los efectos más relevantes

son el anegamiento de las calles de tránsito vehicular, veredas, entrada de aguas a las viviendas y edificios, provocando daños a la infraestructura de una ciudad y efectos adversos para las personas.

Entendiendo que el diseño de una red de colectores se realiza basándose en una recurrencia estándar de lluvias de gran intensidad, es necesario evaluar la respuesta de la población ante una inundación, y el real efecto que tendría el fenómeno en la calidad de vida de las personas. En este sentido, la Exposición será menor en aquellos centros urbanos, donde se tenga un número reducido de ervicios que pueda hacer frente a fenómenos hidrometeorológicos. Por otra parte, la Vulnerabilidad a las inundaciones urbanas tendrá relación con la calidad de la infraestructura (i.e., construcción) en los sectores que se vean afectados, lo que permitiría la continuidad en la operación de los servicios. Otra arista de Vulnerabilidad tiene que ver con la calidad de las viviendas, ubicadas en los sectores afectados por las inundaciones urbanas.

Integrando los conceptos expuestos se presenta, en la **Figura 2**, el esquema de la cadena de impacto desarrollada.



**Figura 2.** Cadena de impacto: inundaciones urbanas.

### 3.1.1 AMENAZA EN INUNDACIONES URBANAS

La Amenaza indica cómo las comunas se ven afectadas por inundaciones, producidas por eventos de precipitación extrema. Por lo tanto, considerando que la gravedad de la inundación depende de la falla del sistema de colectores de aguas lluvia, se estima la probabilidad de dicha falla, utilizando información de los Planes Maestros de Aguas Lluvias (PMAL). Además, el índice considera un análisis de frecuencia de las series de precipitación máxima, obtenidas de la base del CR2Met, y el promedio de los Modelos de Circulación General (GCMs, por sus siglas en inglés) utilizados.

La formulación del índice se basó en la información extraída de GCMs y Planes Maestros de Aguas Lluvias. La metodología empleada se describe a continuación:

**1)** Extracción y obtención de las series de tiempo de precipitación extrema para cuatro GCMs: CCSM4, CSIRO - Mk3 - 6 - 0, IPSL - CM5A - LR y MIROC - ESM. Se consideró una extensión temporal de 36 años, siendo el periodo histórico desde 1979 a 2014, mientras que el futuro es analizado desde 2025 a 2060.

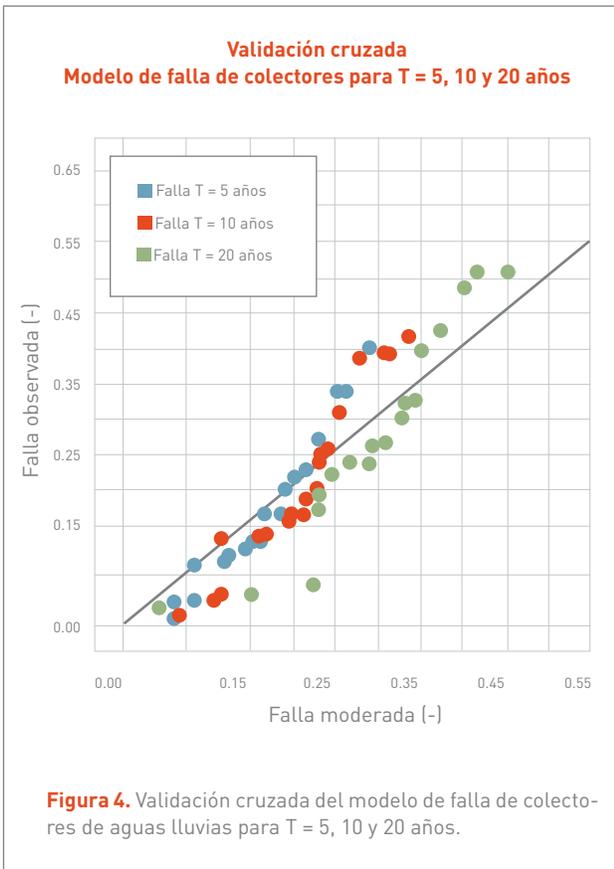
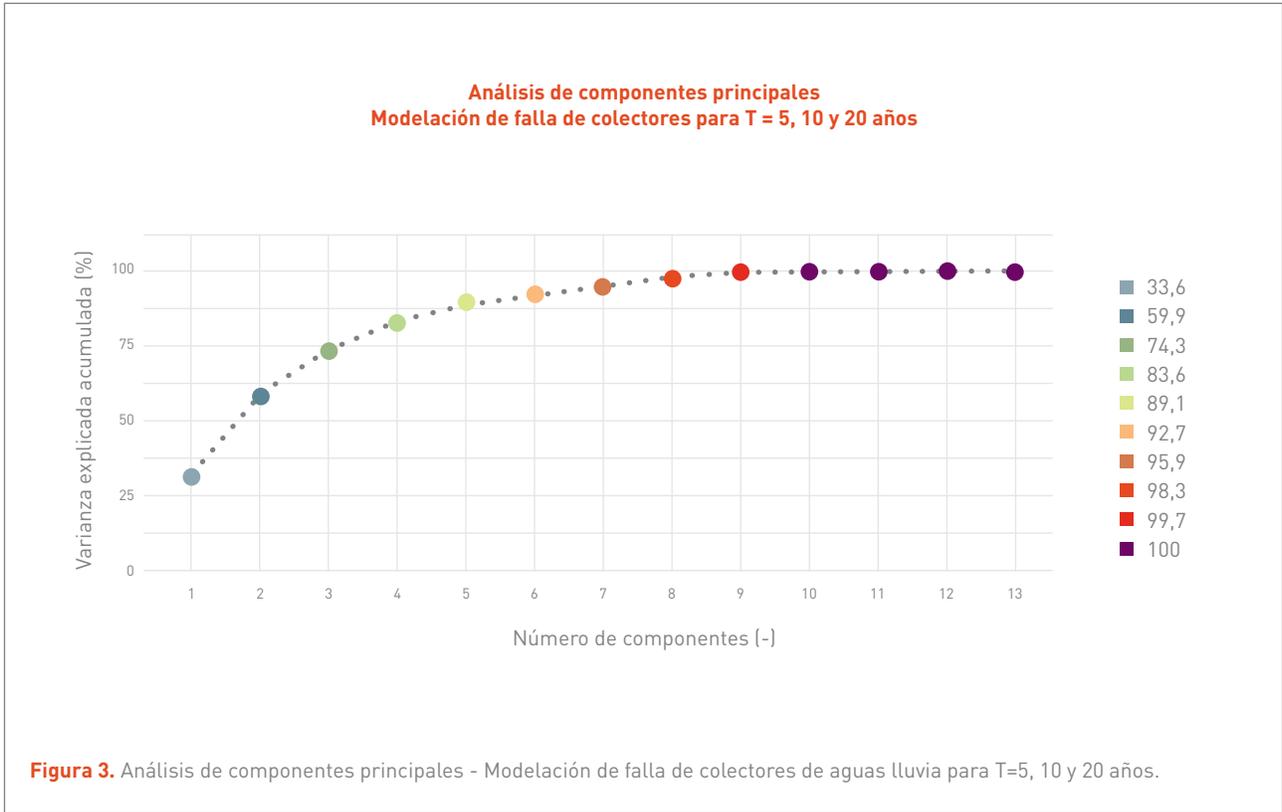
**2)** Análisis de frecuencia de las series de tiempo, con las distribuciones de probabilidad: Normal, Log - Normal, Exponencial, Gamma, Pearson III, Log - Pearson III, Gumbel y GEV. La mejor distribución es aquella que cumple con los Test  $\chi^2$  y Kolmogorov - Smirnov, y presenta un buen ajuste gráfico, tal como se señala, en el Manual de Carreteras MOP, Capítulo III (2018) o en Chow (1964). Tras escoger la distribución para cada comuna y modelo, se calcula la precipitación asociada a los periodos de retorno  $T=5, 10$  y  $20$  años.

**3)** Se examinan los PMAL disponibles en Chile, dentro de los cuales se han realizado estudios para definir la red de colectores, la que debe contar cada comuna (incluyendo, en algunos casos, redes unitarias). De esta forma, se obtiene un catastro de las precipitaciones con las que se han desarrollado los PMAL y la red de colectores -existente o propuesta- para cada zona urbana.

**4)** Se analiza el porcentaje de falla que presentan los colectores, según la precipitación de periodo de retorno ( $T$ ) de 5, 10 y 20 años. Debido a que el número de ciudades para las cuales se tiene información (19), es menor que el total de ciudades (77), consideradas para el análisis de Riesgo, se construye un modelo de regresión lineal múltiple (RLM), para estimar el porcentaje de falla en colectores en las ciudades faltantes (58). El modelo se construye considerando limitaciones latitudinales y meteorológicas, y las principales fuentes de predictibilidad son las precipitaciones extremas de cada ciudad y sus características fisiográficas.

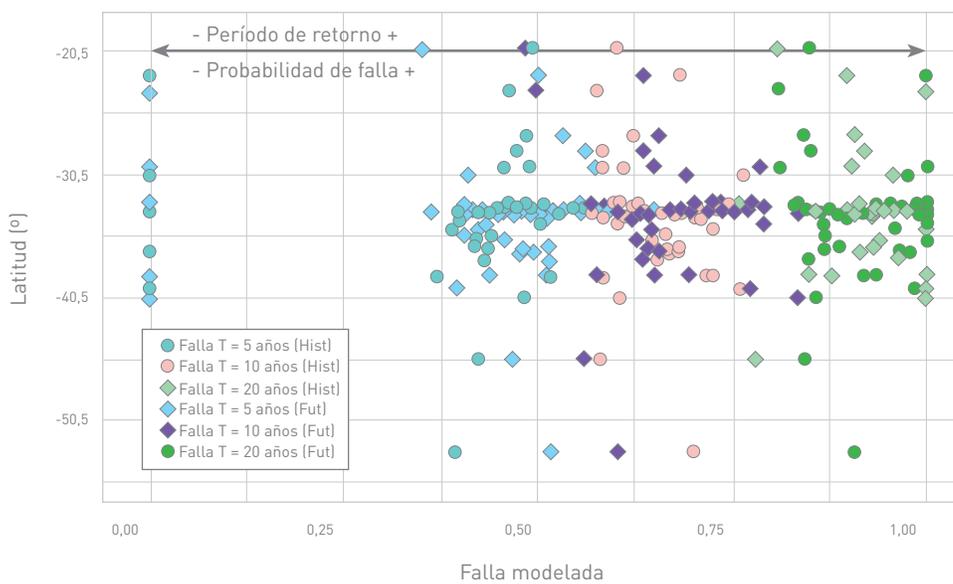
**5)** El proceso de modelación se presenta en los siguientes puntos:

- a.** Definición del set predictores para modelar la falla. En este punto, se calculan parámetros geomorfológicos de las distintas ciudades, además de considerar la precipitación de 5, 10 y 20 años de periodo de retorno, puesto que comúnmente son éstas las asociadas al dimensionamiento de las redes recolectoras de Aguas Lluvias. El set de predictores queda compuesto por: precipitación, altitud, área, pendiente, erodabilidad, latitud y longitud de cada ciudad.
- b.** Se realiza un análisis de componentes principales, en el que se busca reducir la dimensionalidad del problema abordado, encontrando combinaciones lineales que explican la mayor cantidad de la varianza de los datos observados. El modelo se construye con 4 componentes principales, que explican el 80% de la varianza de la muestra (**Figura 3**).
- c.** Posteriormente, se realiza una validación cruzada del tipo leave-one-out (LOOV), la cual omite una observación (en este caso, la falla de colectores en una ciudad) a la vez, para el ajuste de un modelo estadístico, que es posteriormente utilizado para generar una predicción, en el lugar que fue omitido. El proceso se repite tantas veces como el número de observaciones disponibles (19 ciudades), excluyendo en cada iteración una observación distinta. La **Figura 4** muestra el ajuste lineal de cada modelo, en la que se aprecia una subestimación de la falla observada para los valores superiores a 0,2.



Una vez validado el modelo, se evalúa para las ciudades faltantes, obteniendo la falla modelada para distintos periodos de retorno, tal como muestra la **Figura 5**. Los valores presentados se encuentran normalizados, utilizando una función por tramos, en la cual se consideran los percentiles 10, 80 y 90 (P10, P80 y P90) de la modelación de T=20 años del periodo histórico. Esto permite realizar una comparación entre los resultados históricos y proyectados.

$$A(x) = \begin{cases} A(x_i) < 0.4 \cdot P_{10} = 0 \\ 0.4 \cdot P_{10} < A(x_i) < P_{90} = A(x_i) / P_{80} \\ A(x_i) > P_{90} = 1 \end{cases}$$



**Figura 5.** Resultados del modelo de RLM: falla de colectores de aguas lluvia (T=5, 10 y 20 años). En la zona centro (30°S – 40°S), se observa una concentración de puntos dada la gran cantidad de comunas de estudio, donde la mayoría son parte de la Región Metropolitana. El eje de las ordenadas responde a la extensión latitudinal de Chile, mientras que el eje de las abscisas es la probabilidad de falla simulada para los períodos de retorno 5, 10 y 20 años.

Las clasificaciones de Amenaza (baja, moderada, alta o severa), para cada comuna, quedan representadas por una matriz de contingencia (**Tabla 1**), donde las columnas muestran la magnitud de un evento de precipitación diaria, respecto a un periodo de retorno; mientras que las filas son la probabilidad de falla del sistema de colectores. La Amenaza integra ambos factores, donde la falla aumenta al presentarse eventos de precipitación extrema de mayor magnitud, comprometiendo una mayor área del sistemas de colectores. En consecuencia, el índice de Amenaza integra una Amenaza climática (aumento o disminución

de los valores de precipitación extrema) y una Amenaza hidrológica, representada por la respuesta del sistema de colectores producto de la generación de escorrentía durante eventos de precipitación extrema.

Las columnas de la **Tabla 1** muestran los periodos de retorno asociados a eventos de precipitación; mientras que las filas muestran el porcentaje de falla de la totalidad del sistema de colectores. La severidad de la Amenaza integra ambos factores, donde se tendrá una Amenaza alta cuando el sistema sea forzado por una precipitación de

Probabilidad de falla del sistema de colectores	Periodo de retorno		
	5 años	10 años	20 años
0.00	Baja	Baja	Baja
0.25	Baja	Moderada	Moderada
0.50	Moderada	Moderada	Alta
0.75	Alta	Alta	Alta
1.00	Alta	Severa	Severa

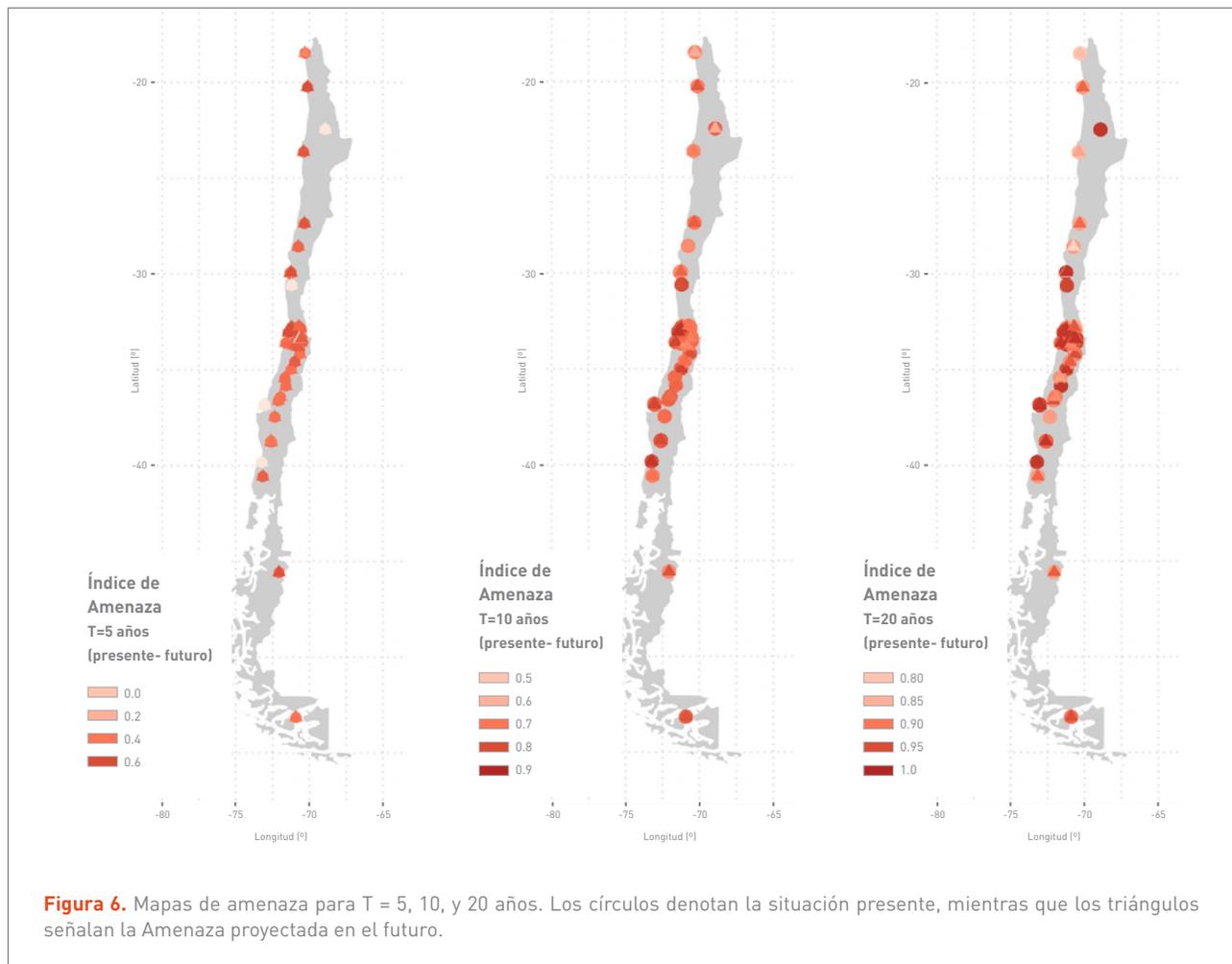
**Tabla 1.** Matriz de contingencia para determinación de la Amenaza



bajo periodo de retorno, que produzca un porcentaje de falla alto en la red de colectores o cuando una precipitación de alto periodo de retorno produce una falla media del sistema de colectores. De esta forma, es posible evaluar un aumento o disminución en la intensidad de las precipitaciones, producto del comportamiento de los extremos en el futuro. Esto integra, tanto una Amenaza climática (aumento de los valores de precipitación extrema) como

también una respuesta del sistema de colectores, en atención a que las ciencias hidrológicas se enfocan en la generación de escorrentía, debiendo evaluar obligatoriamente el sistema.

El índice de Amenaza obtenido, para las 77 ciudades consideradas, se sintetiza en la **Figura 6**.





### 3.1.2 EXPOSICIÓN EN INUNDACIONES URBANAS

La Exposición indica qué tan expuestas se encuentran las comunas de Chile frente a impactos de inundaciones en el área urbana. De ellas, las que presentan mayor Exposición, son las que concentran una gran densidad poblacional en una superficie pequeña, a lo que se suma la baja o nula cantidad de servicios disponibles para sus habitantes.

El desarrollo del índice de Exposición considera indicadores de densidad poblacional, educacional y cantidad de servicios disponibles para la comunidad, los que se describen a continuación:

- **Densidad poblacional:** Se calcula a partir de los datos del Censo 2017 y considera la población existente de la comuna dividida por el área urbana.

$$\rho_{POB} = \frac{\text{Total Habitantes (hab)}}{\text{Área Urbana Total (km}^2\text{)}}$$

- **Densidad educacional:** Este indicador considera el número de estudiantes matriculados en enseñanza básica y media, y la cantidad de establecimientos educacionales que presentan las distintas comunas.

$$\rho_{EDU} = \frac{\text{Total Estudiantes Matriculados}}{\text{Total de Establecimientos Educacionales}}$$

- **Densidad de servicios:** Se construye a partir de la cantidad de servicios críticos en las comunas del país. A cada servicio se le otorga un peso (porcentaje de importancia), para luego realizar una suma ponderada, según la siguiente expresión:

$$\rho_{SERV} = aX_1 + \beta X_2 + \gamma X_3 + \delta X_4 + nX_5$$

Donde  $X_{1-5}$  corresponden a los distintos servicios críticos: (1) hospitales públicos y privados, (2) servicios de salud (primarios y secundarios), (3) bomberos, (4) cuarteles

de carabineros y (5) establecimientos educacionales. De acuerdo a criterio experto, a los coeficientes  $a, \beta, \gamma$  y  $\delta$  se les asigna un peso de 22% y  $n$  de 12%.

El indicador de exposición queda compuesto por:

$$\text{Exposición} = 0.6 (\rho_{POB} \cdot \rho_{SERV} + 0.12 \cdot \rho_{EDU} \cdot \text{Est.Educ}) + 0.4 \cdot \rho_{POB} \cdot \text{Viviendas}$$

Finalmente, el índice es normalizado utilizando una función por tramos, quedando restringido a un rango (0 - 1).

$$E(x) = \begin{cases} E(x_i) < P_{10} = 0 \\ 0.4 \cdot P_{10} < E(x_i) < P_{90} = E(x_i) / P_{80} \\ E(x_i) > P_{90} = 1 \end{cases}$$

Se debe tener en cuenta que:

Una comuna presenta **Exposición alta** cuando la densidad poblacional y educacional es media/alta, lo que se suma a una cantidad media/alta de servicios críticos que puedan verse afectados frente a inundaciones urbanas provenientes de precipitaciones extremas.

Una comuna presenta **Exposición media** cuando la densidad poblacional y educacional no es un factor preponderante en el indicador. La concentración de habitantes es aceptable para el área urbana. Sin embargo, la cantidad de servicios críticos disponibles para la comunidad puede verse afectada por inundaciones urbanas, puesto que la infraestructura disponible satisface entre un 50 - 70% de las necesidades de la población, por lo que se infiere que la comuna cuenta con un alto porcentaje de infraestructura crítica.

Una comuna presenta **Exposición baja** cuando existe una baja/media densidad poblacional y educacional. Además, cuando su infraestructura crítica disponible es baja o casi nula y, por ello, es menos propensa a sufrir impactos, puesto que la comuna prácticamente no cuenta con ella. Los resultados obtenidos en las 77 ciudades analizadas, se sintetizan en la **Figura 7**.

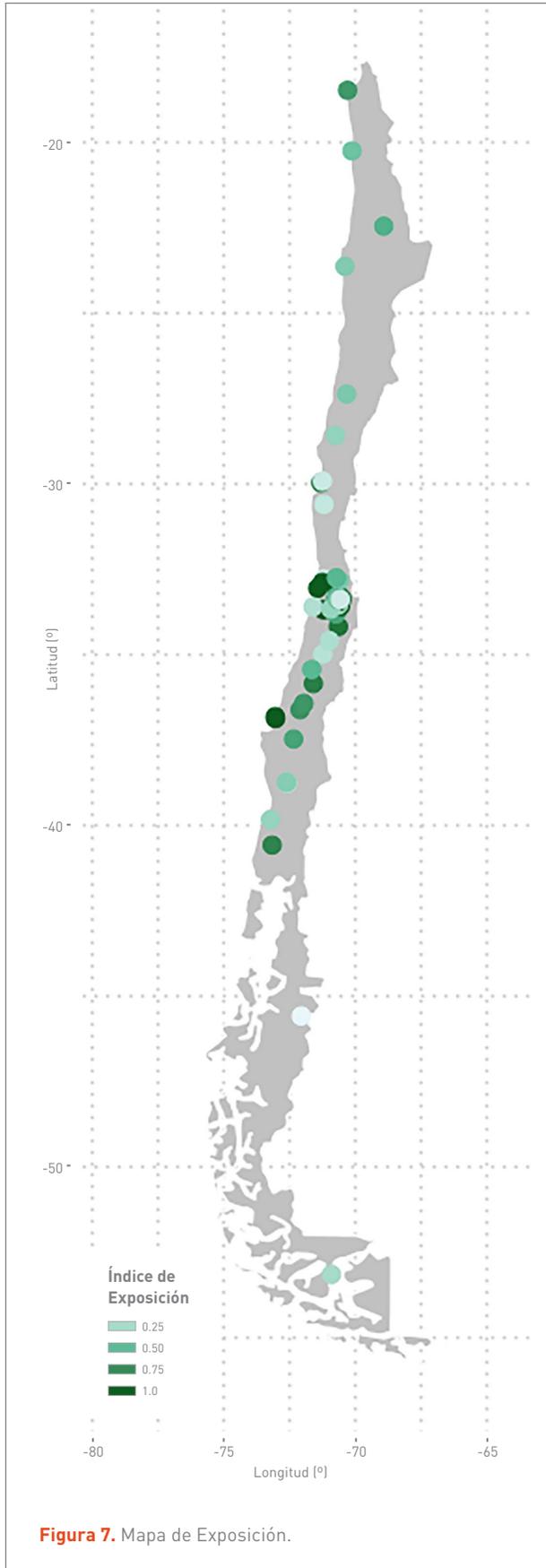


Figura 7. Mapa de Exposición.

### 3.1.3 VULNERABILIDAD EN INUNDACIONES URBANAS

El índice de Vulnerabilidad refleja el grado de susceptibilidad frente a los impactos adversos de inundaciones producidas por eventos de precipitación extrema, en presencia de distintas condiciones poblacionales. Es decir, se evalúa la calidad de viviendas y de servicios públicos/críticos (bomberos, carabineros, servicios de salud y educación).

El índice de Vulnerabilidad se compone de dos indicadores, que se describen a continuación.

- **Sensibilidad residencial:** Considera la calidad de los materiales con los que están construidos las viviendas, información que es extraída del Censo 2017. El indicador se calcula en función de una matriz de Riesgo (Tabla 4), que cruza la información de 7 tipos de techo (Tabla 2) y 6 tipos de paredes (Tabla 3) de las cuales pueden estar compuestas las viviendas. A cada tipo de techo y pared se le asigna un valor, siendo el más alto para el material más precario. De esta forma, la vivienda más precaria corresponde a una sin cubierta de techo sólida y materiales de las paredes exteriores de lata, cartón o plástico, la que alcanza un valor de 42 ( $T = 7; P = 6 \rightarrow 6 \times 7 = 42$ ). Posteriormente, la matriz es normalizada, de tal forma que el valor más alto sea igual a 1.

Finalmente, el indicador de Sensibilidad residencial se compone por una suma ponderada, que considera las fracciones del tipo de material y techo respecto al total de viviendas registradas, además del factor (i,j) asociado según la matriz.

$$\text{Indicador Residencial} = \sum_{i=1}^n \text{Mat.Pared } i \cdot \text{Mat.Techo } j \cdot \text{Factor } (i,j)$$

Materialidad en la cubierta del techo	Valor	Simb.
Tejas o tejuelas de arcilla, metálicas, de cemento, de madera, asfálticas o plásticas	1	T1
Losa hormigón	2	T2
Planchas metálicas de zinc, cobre, etc. o fibrocemento (tipo pizarreño)	3	T3
Fonolita o plancha de fieltro embreado	4	T4
Paja, coirón, totora o caña	5	T5
Materiales precarios (lata, cartón, plástico, etc.)	6	T6
Sin cubierta sólida del techo	7	T7

**Tabla 2.** Materialidad de la techumbre de viviendas.

Materialidad en las paredes exteriores	Valor	Simb.
Hormigón armado	1	P1
Albañilería (bloque de cemento, piedra o ladrillo)	2	P2
Tabique forrado por ambas caras (madera o acero)	3	P3
Tabique sin forro interior (madera u otro)	4	P4
Adobe, barro, quincha, pirca u otro artesanal tradicional	5	P5
Materiales precarios (lata, cartón, plástico, etc.)	6	P6

**Tabla 3.** Materialidad de paredes exteriores de viviendas.

–	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
P1	0,02	0,05	0,07	0,10	0,12	0,14	0,17
P2	0,05	0,10	0,14	0,19	0,24	0,29	0,33
P3	0,07	0,14	0,21	0,29	0,36	0,43	0,50
P4	0,10	0,19	0,29	0,38	0,48	0,57	0,67
P5	0,12	0,24	0,36	0,48	0,60	0,71	0,83
P6	0,14	0,29	0,43	0,57	0,71	0,86	1,00

**Tabla 4.** Matriz de Riesgo

• **Sensibilidad de servicios críticos:** Este indicador se compone de cinco servicios considerados críticos cuando las comunidades se enfrentan a eventos de inundaciones. Entre ellos están los servicios de salud primarios y secundarios, hospitales públicos y privados, establecimientos educacionales, bomberos y cuarteles de carabineros.

La Sensibilidad de servicios críticos se estima según la **Tabla 5**, donde a cada servicio crítico se le asigna una magnitud de Sensibilidad (1, 2 o 3) asociada a su calidad (excelente, media o precaria). Posteriormente, el índice de

Sensibilidad comunal se obtiene de la suma de los servicios críticos, siendo las comunas más sensibles aquellas con un valor de 15 puntos.

Calidad	Magnitud
Excelente	1
Media	2
Precaria	3

**Tabla 5.** Calidad y magnitud de servicios críticos.



Finalmente, el indicador de Vulnerabilidad se calcula como la suma de los dos indicadores previamente señalados (asociados a viviendas y servicios críticos) y normalizados bajo una función por tramos:

$$V(x) = \begin{cases} V(x_i) < P_{10} = 0 \\ P_{10} < V(x_i) < P_{90} = V(x_i) / P_{80} \\ V(x_i) > P_{90} = 1 \end{cases}$$

Cabe tener en cuenta que una comuna presenta **Vulnerabilidad alta** cuando:

- > La precariedad de la infraestructura de los servicios críticos es alta.
- > La Sensibilidad de servicios críticos alcanza valores entre 11 – 15 puntos.
- > La materialidad de paredes exteriores alcanza valores entre 5 – 6 puntos.
- > La materialidad de la cubierta del techo alcanza valores entre 5 – 7 puntos.

Además, una comuna presenta **Vulnerabilidad media** cuando:

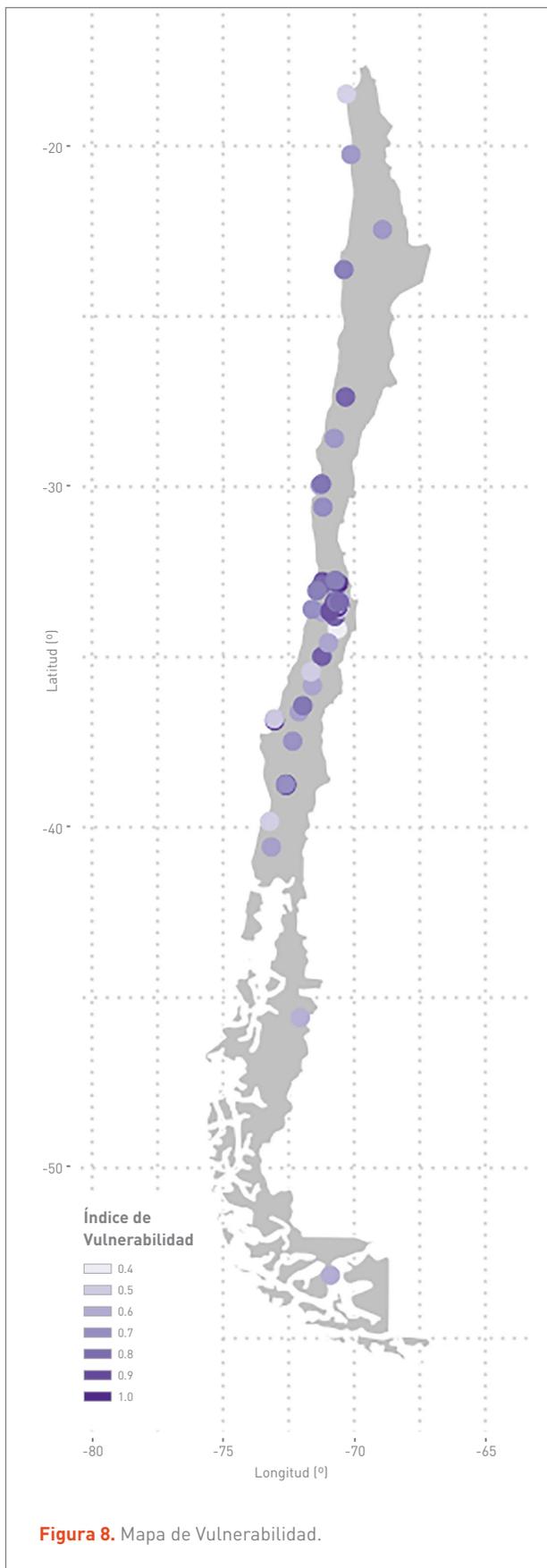
- > La precariedad de la infraestructura de los servicios críticos es media.

- > La Sensibilidad de servicios críticos alcanza valores entre 6 – 10 puntos.
- > La materialidad de paredes exteriores alcanza valores entre 3 – 4 puntos.
- > La materialidad de la cubierta del techo alcanza valores entre 3 – 4 puntos.

Finalmente, una comuna presenta Vulnerabilidad baja cuando:

- > La precariedad de la infraestructura de los servicios críticos es baja.
- > La Sensibilidad de servicios críticos alcanza valores entre 1 – 5 puntos.
- > La materialidad de paredes exteriores alcanza valores entre 1 – 2 puntos.
- > La materialidad de la cubierta del techo alcanza valores entre 1 – 2 puntos.

En el mapa de la **Figura 8**, se sintetizan los resultados obtenidos para la Vulnerabilidad, en las 77 ciudades analizadas.



### 3.1.4 RIESGO EN INUNDACIONES URBANAS

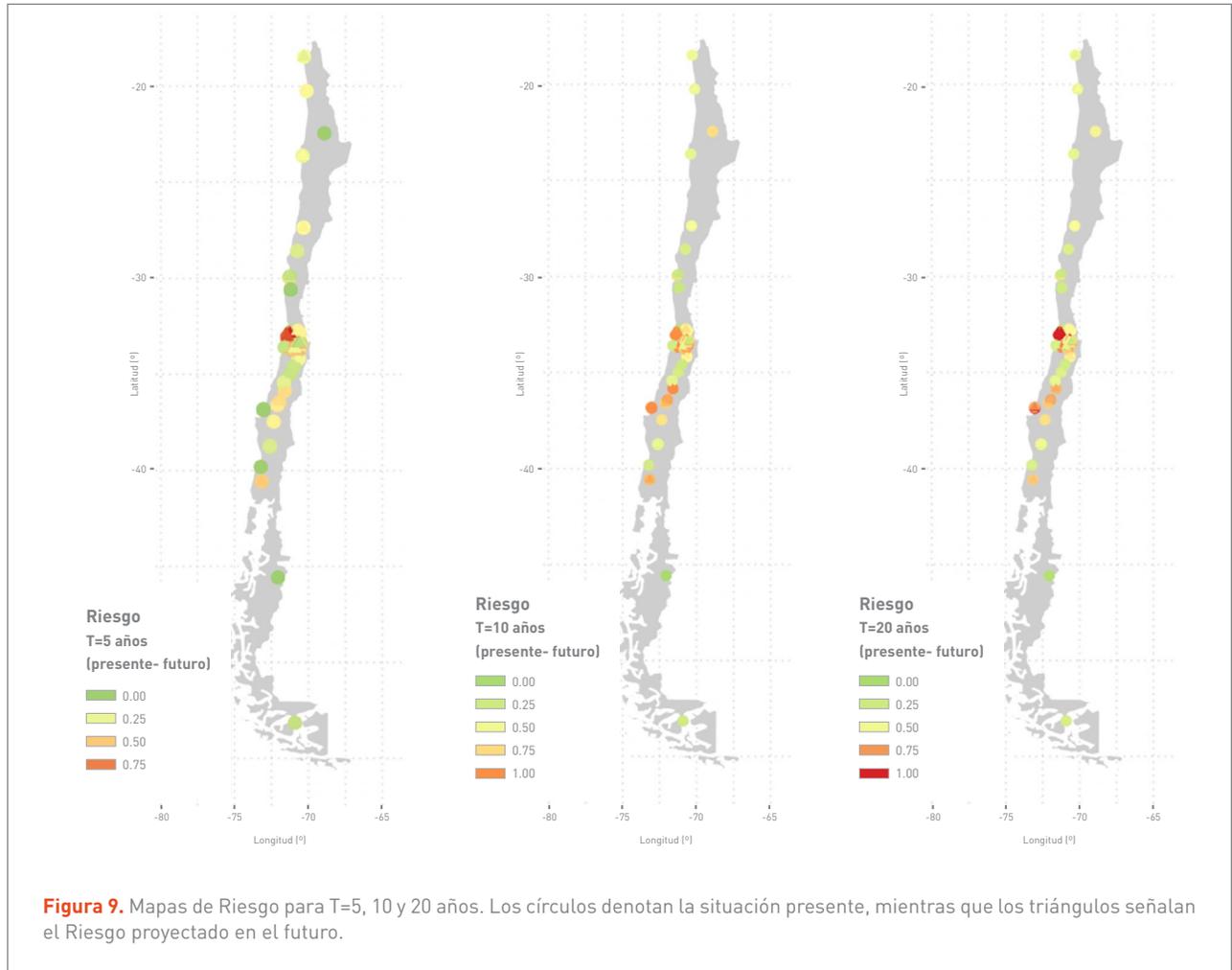
El índice de Riesgo da cuenta de la susceptibilidad que presentan las ciudades de sufrir un mayor o menor impacto adverso, frente a eventos extremos y sus consecuencias, como lo son las inundaciones urbanas. El Riesgo ha sido calculado como el producto entre los índices de Amenaza, Exposición y Sensibilidad, en donde cada índice posee el mismo grado de importancia. Los principales resultados se enfocan en el cambio de la Amenaza futura, lo cual consistentemente produce un cambio en el Riesgo. Lo anterior está condicionado por el comportamiento de las magnitudes esperadas de precipitación, las cuales en muchas ciudades de Chile aumenta.

Los mapas de la **Figura 9** muestran el nivel de Riesgo asociado a inundaciones urbanas, en las 77 ciudades analizadas.

Se presentan mapas de Riesgo para periodos de retorno de 5, 10 y 20 años, y estos resultados se relacionan con las precipitaciones extremas y fallas de colectores en las comunas. Se observa que, a menor periodo de retorno, la Vulnerabilidad y Exposición toman mayor peso en el cálculo del Riesgo. Sin embargo, para mayor periodo de retorno, el Riesgo se ve altamente influenciado por la Amenaza.

Se distingue principalmente la zona central, desde la Región de Coquimbo hasta la Región del Bío-Bío, donde la Amenaza y el Riesgo aumentan para el periodo de retorno de 10 años.

Por otro lado, se puede observar un mayor aumento proyectado para las precipitaciones con periodos de retorno altos en comparación a las de periodo de retorno bajos. Incluso existen ciudades donde se presenta una disminución en las precipitaciones de periodo de retorno 5 años. Sin embargo, se proyecta un aumento de las precipitaciones de periodo de retorno 10 o 20 años, lo que quiere decir que las tormentas pequeñas disminuirán su intensidad, mientras que aquellas asociadas a grandes eventos extremos aumentarán su intensidad. La interpretación de esto conlleva a una radicalización de los extremos, donde los eventos que causan grandes daños serán aún más violentos.



**Figura 9.** Mapas de Riesgo para T=5, 10 y 20 años. Los círculos denotan la situación presente, mientras que los triángulos señalan el Riesgo proyectado en el futuro.

## 3.2 INUNDACIONES POR DESBORDES DE RÍOS

---

El análisis de una crecida hidrológica comienza con el estudio de las precipitaciones. Los fenómenos de precipitación extrema se relacionan directamente con la intensidad de una tormenta, es decir, con la distribución del agua caída en el tiempo. Grandes intensidades de precipitación se refieren a una gran cantidad de precipitación líquida distribuida en un tiempo acotado. Por el contrario, se tendrán bajas intensidades de precipitación si el agua cae en una pequeña y se distribuye homogéneamente en un largo periodo de tiempo.

Se debe tener en cuenta que la hidrología es una ciencia que estudia tanto el fenómeno meteorológico (es decir, las tormentas que causan la precipitación), como también la formación de la escorrentía, que viene determinada por procesos intrínsecos del sistema hidrológico. Sólo para enumerar algunas variables, las crecidas de ríos deben considerar las condiciones de infiltración de la cuenca, altura de la línea de nieves que determina el área pluvial aportante, usos de suelo, tipos de suelo, entre otras variables. De esta forma, los mayores caudales resultan de la recolección de escorrentía en las cuencas aportantes a los cauces primarios, y se ven reflejados en las crestas de los hidrogramas de escorrentía directa.

Cuando los caudales aumentan, también lo hacen las alturas de escurrimiento en los ríos, lo que trae como consecuencia el aumento de las áreas en las cuales fluye el río. Dependiendo de las condiciones de topografía, infraestructura hidráulica de defensa fluvial, ancho del río, pendiente, características del lecho, caracterización de las riberas de inundación y una serie de parámetros hidráulicos y geomorfológicos, estas áreas de inundación podrían coincidir parcial o totalmente con áreas de desarrollo poblacional, pudiendo de esta forma inundar viviendas e infraestructura pública de un pueblo o ciudad. Por otro lado, sobre los lechos de los ríos puede existir infraestructura hidráulica construida, como puentes, bocatomas,

estaciones de control fluviométrico, obras de defensa fluvial e infraestructura sanitaria, las cuales quedan expuestas, al igual que las viviendas e infraestructura de un centro poblacional, a sufrir daños por los desbordes de los ríos. Una inundación corresponde a un aumento del nivel de las aguas en centros poblacionales, ocupando sectores que habitualmente están libres de ellas. Los efectos más relevantes son el anegamiento de las calles de tránsito vehicular, veredas, entrada de aguas a las viviendas y edificios, provocando daños a la infraestructura de una ciudad y efectos adversos para las personas.

El dominio de estudio corresponde a 253 “centros poblacionales”, los que incluyen villorrios, caseríos, aldeas, pueblos y ciudades, extendiendo el análisis tanto a sectores urbanos como rurales. La base de datos de los centros poblacionales de todo Chile, se obtiene desde la Biblioteca del Congreso Nacional (BCN), la cual se intercepta con los 95 puntos de aforo modelados dentro del contexto del proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional. De esta forma, se analizan las ciudades que se encuentren parcial o totalmente dentro de un “Buffer” de 2 km desde la red de drenaje declarada en la BCN.

Se muestran los efectos de inundaciones generadas por precipitaciones extremas de distinto periodo de retorno, las cuales aumentan los caudales en esteros y ríos, incrementando la altura de escurrimiento. Dependiendo de las condiciones del río, este aumento podría generar desbordes en los cauces, lo que comúnmente define áreas inundadas en los centros poblados que colindan con los ríos evaluados.

Se dispone de cuatro mapas para cada análisis: Amenaza (producida por la variación de los caudales extremos), Exposición (cantidad de infraestructura hidráulica dentro de potenciales áreas inundadas), Vulnerabilidad (asociado a una falla de la infraestructura hidráulica en caso de que los caudales de diseño sean sobrepasados) y Riesgo (disposición a sufrir impactos adversos generados por desbordes de los ríos).



### 3.2.1 AMENAZA EN INUNDACIONES POR DESBORDES DE RÍOS

La Amenaza es clasificada en categorías que permiten una evaluación cuantitativa del fenómeno. El concepto clave para trabajar estos mapas corresponde a “Periodo de Retorno”, el cual corresponde a la recurrencia promedio, medida en años, con que un caudal de determinada magnitud es igualado o excedido. Periodos de retorno altos implican caudales altos, puesto que, en promedio, debe pasar mucho tiempo para registrar estos caudales en los ríos. Por el contrario, periodos de retorno bajos corresponden a crecidas de ríos, que se reportan cada 2 a 5 años, los cuales son producidas por caudales asociados a crecidas de baja magnitud.

El nivel de Amenaza se basa en la información extraída desde las 95 estaciones (i.e., puntos de salida de cuencas) modeladas para la actualización del Balance Hídrico Nacional, las cuales corresponden a cuencas en régimen natural. Estas estaciones se encuentran adecuadamente tributadas a los centros poblacionales que presenten intersección con los ríos que representan dichos puntos de control. La metodología empleada se describe a continuación:

**1)** Extracción y obtención de las series de tiempo de caudales máximos medios diarios por cada año calendario. Los caudales han sido generados con el modelo hidrológico VIC, forzado con cuatro modelos climáticos globales, GCMs: CCSM4, CSIRO – Mk3 – 6 – 0, IPSL – CM5A – LR y MIROC – ESM. Se considera una extensión temporal de 36 años, siendo el periodo histórico desde 1979 a 2014, mientras que el futuro es analizado desde 2025 a 2060.

**2)** Análisis de Frecuencia de las series de tiempo con las distribuciones de probabilidad: Normal, Log – Normal, Exponencial, Gamma, Pearson III, Log – Pearson III, Gumbel y GEV. La mejor distribución es aquella que cumple con los tests  $\chi^2$  y Kolmogorov – Smirnov, y presenta un buen ajuste gráfico, tal como se señala en el Manual de Carreteras MOP, Capítulo III (2018) o en Chow (1964). Tras escoger la distribución para cada estación y modelo, se calcula la precipitación asociada a los periodos de retorno

T=10, 25, 50 y 100 años. Estos periodos de retorno son aquellos típicamente adoptados para el diseño de las Obras Hidráulicas en cauces naturales y artificiales.

**3)** En base a los caudales asociados a periodos de retorno presente y futuros, se pueden construir curvas de Caudal (Q) v/s Periodo de retorno (T) como las expuestas en la **Figura 10**. Respecto a la curva azul, la curva verde muestra un aumento de los caudales asociados a periodos de retorno altos y una disminución de los caudales asociados a periodos de retorno bajos. El caso contrario se muestra en la curva anaranjada. También puede suceder que, en el futuro, todos los valores de caudal sean superiores o inferiores a los del presente.

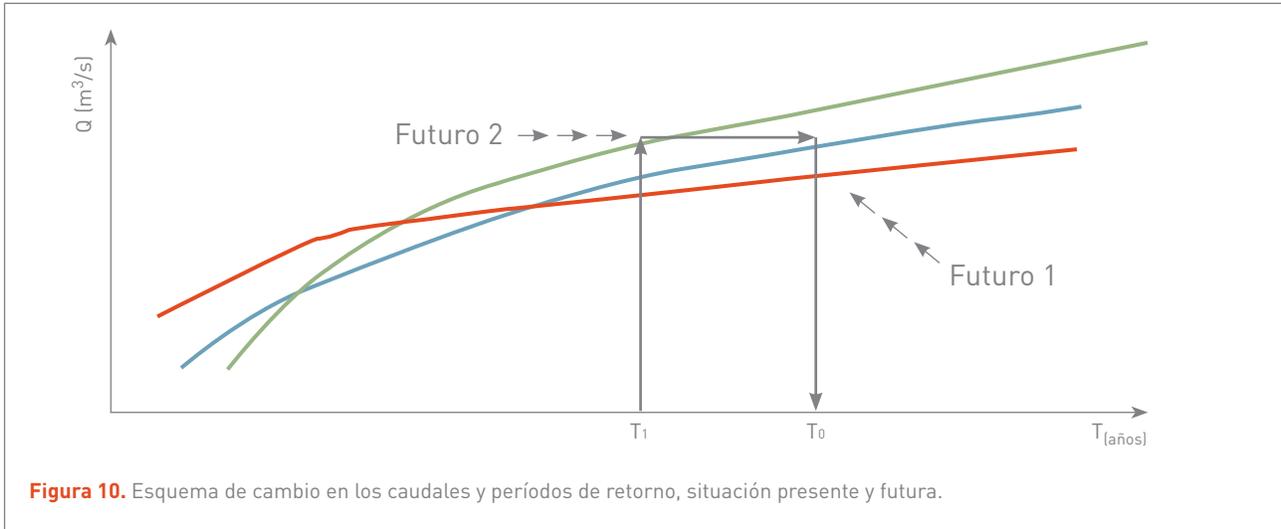
Para caracterizar cuantitativamente la situación anterior, es útil determinar los siguientes enfoques reportados en la tabla de atributos del mapa de Amenaza:

- > Factor de cambio: Determinado como el cociente entre el caudal futuro y el caudal presente, para un mismo periodo de retorno:

$$f = \frac{Q_{fut}(T=X)}{Q_{pres}(T=X)}$$

Factores mayores que 1 reflejan un aumento en los caudales, mientras que se tendrá una disminución en caso contrario. El caso de factores iguales a 1 indica que no habrá cambios en los caudales para el periodo de retorno analizado.

- > Cambio en el periodo de retorno: Este concepto obedece a que, en el caso de que los caudales aumenten en el futuro, el periodo de retorno asociado (T1) es menor que el periodo de retorno para el presente (T0). Lo contrario sucede si se registra una disminución de los caudales. Se debe destacar que existe una coherencia entre los atributos: en el caso que los factores sean mayores a 1, los periodos de retorno disminuirán con respecto a la condición base. Por el contrario, si se registra una disminución de los caudales, los periodos de retorno aumentarán.



> Finalmente, se calcula un índice de concordancia entre los resultados de los modelos. Los indicadores finales, previo a la tributación por ciudades, corresponderán al promedio y/o mediana de los resultados obtenidos por los distintos GCMs.

**4)** Para el mapa de Amenaza presente, se definirán a priori distintos niveles de Amenaza:

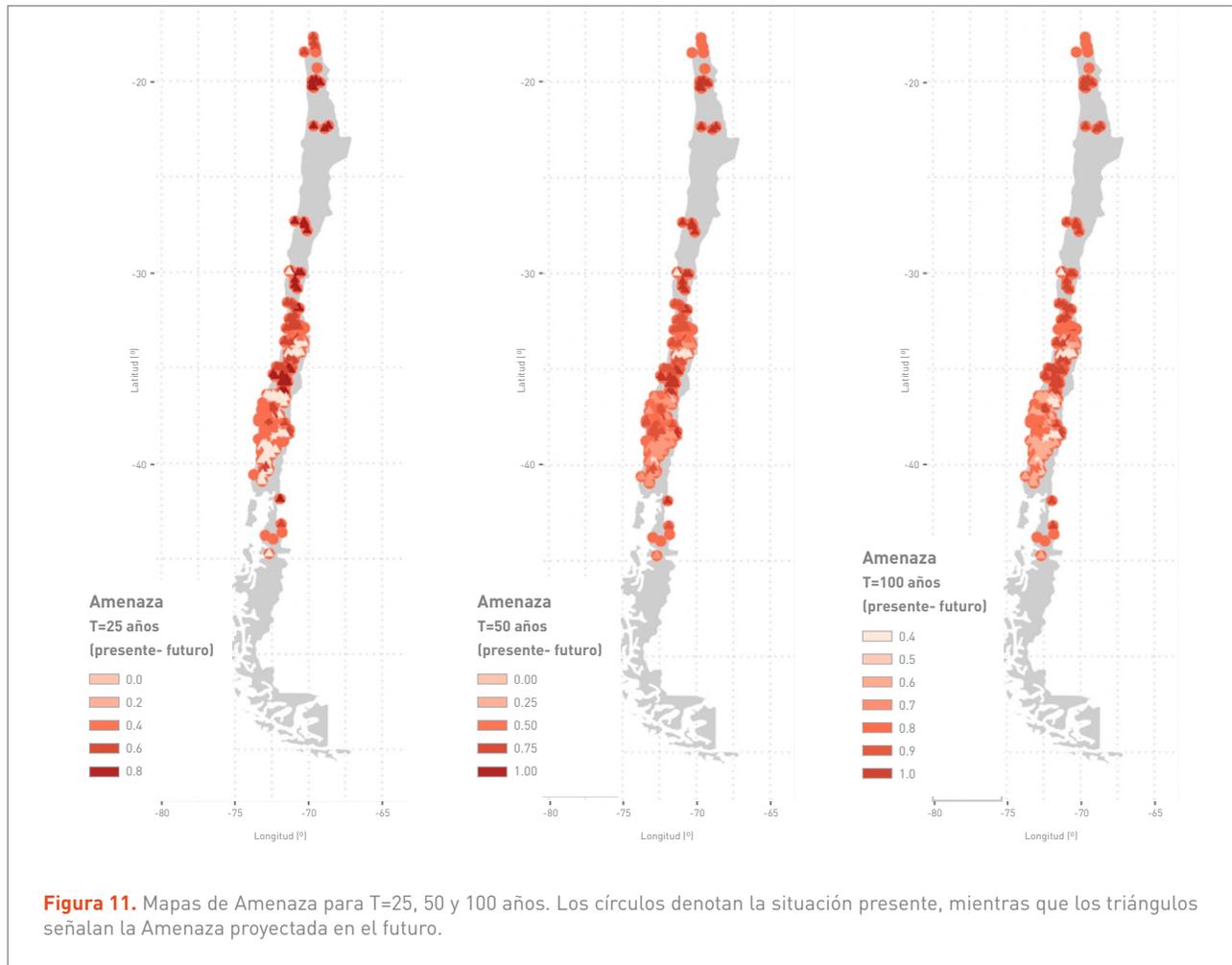
- > Para una crecida de  $T=10$  años se define una Amenaza baja.
- > Para una crecida de  $T=25$  años se define una Amenaza moderada.
- > Para una crecida de  $T=50$  años se define una Amenaza alta.
- > Para una crecida de  $T=100$  años se define una Amenaza severa.
- > Para una crecida de  $T>100$  años se define una Amenaza muy severa.

**5)** Para el mapa de Amenaza futura, se definen los mismos niveles de Amenaza presente, considerando que los periodos de retorno futuros, asociados a un periodo de

retorno presente, son distintos, producto del cambio en los caudales.

**6)** El cambio en la Amenaza será la diferencia aritmética entre Amenaza futura y presente. Los valores cuantitativos asignados ya se han descrito.

Los mapas de la **Figura 11** sintetizan los resultados del índice de Amenaza, para las 95 cuencas estudiadas.



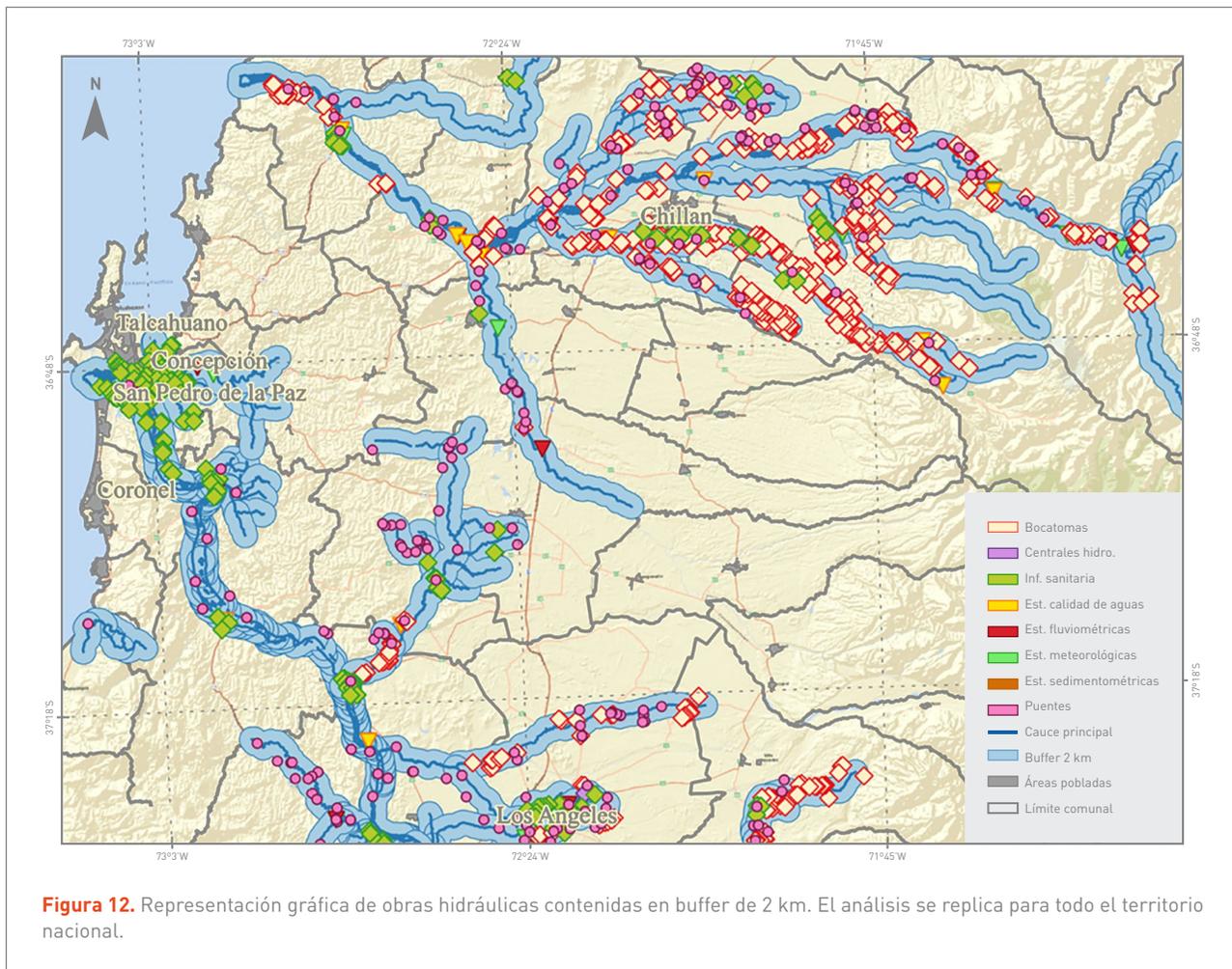
**Figura 11.** Mapas de Amenaza para T=25, 50 y 100 años. Los círculos denotan la situación presente, mientras que los triángulos señalan la Amenaza proyectada en el futuro.

### 3.2.2 EXPOSICIÓN EN INUNDACIONES POR DESBORDES DE RÍOS

La Exposición se determina en función de las obras hidráulicas ubicadas dentro de un buffer de 2 km, respecto a un cauce principal (ver **Figura 12**), que identifica a cada centro urbano considerado en el estudio. Para ello, se emplean indicadores de infraestructura hidráulica crítica. Este concepto se asocia a aquellas obras emplazadas en las cercanías de los cauces de agua, donde el cese de su funcionamiento, parcial o total, afectaría, de forma directa o indirecta, el bienestar de la población. En este grupo, se

reconocen estaciones de la red hidrométrica, bocatomas, centrales hidroeléctricas, puentes, plantas de tratamiento de agua potable y agua servida, con sus respectivas captaciones. Además, se considera un porcentaje del centro urbano, que se ve afectado por las inundaciones por desborde de ríos. Las zonas más expuestas son aquellas que concentran mayor cantidad de infraestructura crítica en el buffer de 2 km y el porcentaje del área del centro urbano afectado por la inundación.

El índice de Exposición se compone de dos indicadores, que se describen a continuación.



**Figura 12.** Representación gráfica de obras hidráulicas contenidas en buffer de 2 km. El análisis se replica para todo el territorio nacional.

• **Densidad de infraestructura crítica:** Considera aquella infraestructura comprendida en un buffer de 2 km, respecto al cauce principal que cruza cada zona de estudio. Para cada tipo de infraestructura, se calcula un subíndice, estimándose la densidad de infraestructura crítica como:

$$\rho_{Inf\ Crítica} = \rho_{Inf\ Red} + \rho_{CAD} + \rho_{Inf\ San.} + \rho_{Inf\ Vial}$$

Donde:  $\rho_{Inf\ Red}$  son las estaciones de la red hidrométrica,  $\rho_{CAD}$  corresponde a la infraestructura de captación, almacenamiento, regulación y descarga (bocatomas y centrales hidroeléctricas),  $\rho_{Inf\ San.}$  responde a la infraestructura sanitaria y, finalmente son los puentes de la red vial.

A continuación, se describe el detalle de cada sub-índice.

> **Densidad de la red hidrométrica:** Considera las estaciones de calidad de aguas, fluviométricas, meteorológicas y sedimentométricas. El indicador se calcula como la suma de las estaciones comprendidas en el buffer de 2 km.

$$\rho_{Inf\ Red} = \#Calidad + \#Fluviométricas + \#Meteorológicas + \#Sedimentométricas$$

> **Densidad de infraestructura de captación, almacenamiento, regulación y descarga (CAD):** El indicador se construye a partir de las distintas bocatomas y tipos de centrales que pueden existir en el buffer de 2 km. En consecuencia,  $\rho_{CAD}$  se compone de dos índices con distinta ponderación:

$$\rho_{CAD} = 30\% * \rho_{Bocatomas} + 70\% * \rho_{Centrales\ Hidroeléctricas}$$



Cada índice se construye a partir de la suma ponderada de los tipos de infraestructura que describen la obra. Por ejemplo, la densidad de centrales hidroeléctricas se obtiene de la suma ponderada de embalses (60%), hidráulicas de pasada (35%) y mini hidráulica de pasada (5%). El mismo ejercicio es aplicado para la obtención de densidad de bocatomas.

Cabe señalar que las distintas ponderaciones otorgadas, a las distintas obras de infraestructura, fueron determinadas según criterio de experto del *Working Package*.

Los tipos bocatomas y centrales hidroeléctricas, junto al peso de importancia que reciben en el cálculo, se describen en la **Tabla 6**.

Obra hidráulica		Coficiente	Porcentaje	Descripción
Bocatomas	Tipo	α	70%	Permanente
		β	30%	Temporal
	Captación	γ	50%	Bombeo
		δ	50%	Gravitacional
	Obra de desvío	ε	50%	Barrera frontal
		φ	50%	Barrera lateral
Centrales	Embalse	ω	60%	
	Hidráulica de pasada	θ	35%	
		τ	5%	

**Tabla 6.** Peso de importancia otorgados a bocatomas y centrales hidroeléctricas.

> **Densidad de infraestructura sanitaria:** Se calcula a partir de las distintas captaciones que consideran las plantas elevadoras y de tratamiento, que pueden ser para el uso/tratamiento de agua potable o de aguas servidas. En consecuencia, es una suma ponderada de tres indicadores:

$$\rho_{Inf San.} = 40\% * \rho_{Captaciones} + 30\% * \rho_{Elevadoras} + 30\% * \rho_{Tratamiento}$$

El índice de captaciones se construye por aquellas provenientes de canales, drenes, norias, ríos y sondeos; mientras que el índice de plantas elevadoras y de tratamiento, a partir de la clasificación y uso que recibe cada tipo de planta: 70% para agua potable y 30% para agua servida.

> **Densidad de infraestructura vial:** Se calcula a partir del catastro nacional de puentes (MMA, 2019) dentro del buffer de 2 km.

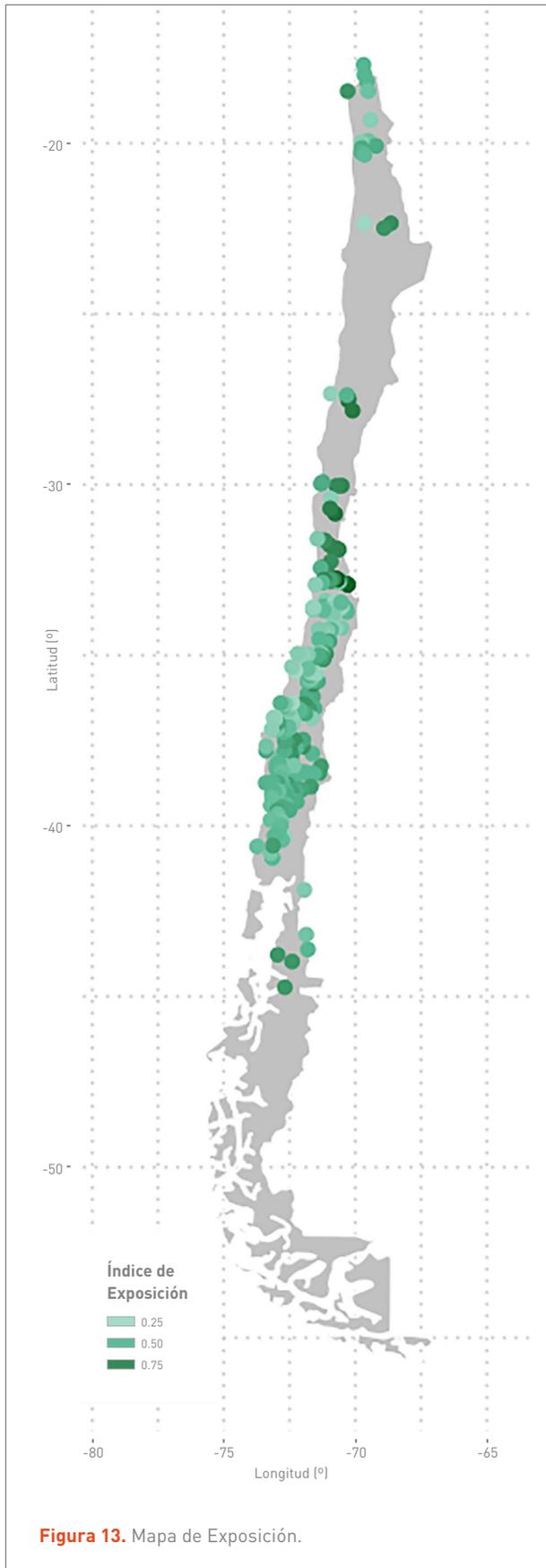
• **Porcentaje de área anegada del centro urbano:** Corresponde al porcentaje de área del centro urbano que queda expuesto a la inundación por desborde de ríos, representada por un buffer de 2 km.

Finalmente, la Exposición queda definida por:

$$Exposición = 70\% * \rho_{Inf Crítica} + 30\% * Area anegada (\%)$$

Toda la información de estaciones y bocatomas es obtenida a través del Ministerio de Bienes Nacionales – Infraestructura de Datos Geoespaciales. Los registros de centrales hidroeléctricas se obtienen de la Comisión Nacional de Energía, en su página web (<http://energiamaps.cne.cl/>); mientras que la información de infraestructura sanitaria y vial se obtiene del MMA (2019).

En el mapa de la **Figura 13**, se sintetizan los resultados obtenidos para la Exposición en las 95 cuencas analizadas.



**Figura 13.** Mapa de Exposición.

### 3.2.3 VULNERABILIDAD EN INUNDACIONES POR DESBORDES DE RÍOS

Una obra hidráulica se considera vulnerable si el periodo de retorno en evaluación es superior al periodo de retorno utilizado en el diseño. Por otro lado, la evaluación de la Vulnerabilidad considera parámetros geomorfológicos, tanto de las condiciones del lecho del río, características de las superficies de inundación y obras de defensa fluvial de carácter “natural” (por ejemplo, consideraciones de cotas entre ciudad y río) como también de origen antrópico (enrocados de protección, canalizaciones).

El índice de Vulnerabilidad se construye a partir de dos indicadores. El primero de ellos representa la Vulnerabilidad media de las obras hidráulicas, respecto a periodos de retorno de diseño y evaluación, según la magnitud de la crecida estudiada ( $T=25, 50$  y  $100$  años). El segundo indicador sigue una escala cualitativa de Vulnerabilidad, en la que son evaluadas las características del cauce y las obras de defensa fluvial colindantes a él. A continuación, se describe el detalle de cada indicador.

- **Vulnerabilidad media:** Para la construcción de este indicador, se analiza el periodo de retorno de diseño de todas las obras de infraestructura crítica, las que se indican en la **Tabla 7**.

Posteriormente, se analiza la cantidad de elementos expuestos de cada infraestructura hidráulica crítica, y se calcula una Vulnerabilidad ( $V(T)$ ), la cual toma valores iguales a cero o uno dependiendo de la siguiente función:

$$V(T) = \begin{cases} 1 & \text{si } T_{\text{diseño}} < T_{\text{evaluación}} \\ 0 & \text{si } T_{\text{diseño}} \geq T_{\text{evaluación}} \end{cases}$$

Donde  $T_{\text{diseño}}$  corresponde al periodo de retorno para el cual se ha diseñado la obra, mientras que  $T_{\text{evaluación}}$  responde a las crecidas con periodo de retorno de 25, 50 y 100 años.

El ejercicio es aplicado a cada infraestructura crítica, obteniéndose una vulnerabilidad media ( $V_m$ ) a partir de la siguiente expresión:



Infraestructura	Descripción	Periodo de retorno de diseño (años)
Estaciones	Calidad de aguas, meteorológicas, fluviométricas, sedimentométricas	10
Bocatomas	Tipo (permanente o temporal), captación (bombeo o gravitacional) y obra de desvío (barrera frontal o lateral)	40
Infraestructura Sanitaria	Captaciones	30
	Planta de agua potable y agua servida	40
Puentes	Acero	100
	Asfalto	75
	Hormigón	50
	Ripio	40
	Madera	30
	Tierra	20

**Tabla 7.** Periodo de retorno de infraestructura crítica.<sup>1</sup>

$$V_m(T) = \frac{\sum V(T)_{i(0-1)} \cdot E_i}{\sum E_i}$$

Donde  $E_i$  representa el número de elementos expuestos de cada infraestructura crítica, i.e. estaciones de la red hidrométrica, obras de captación, almacenamiento, regulación y descarga, infraestructura sanitaria y puentes de la red vial.

• **Escala cualitativa de Vulnerabilidad:** Para todos los centros poblacionales bajo análisis, se utiliza la herramienta Street View de Google Earth, donde se puede apreciar el entorno de los ríos, las características del cauce y las obras de defensa fluvial de carácter antrópico. Para distintos puntos de las ciudades, se asignó un valor de 1 a 5, donde 1 corresponde a “Vulnerabilidad baja” mientras que 5 corresponde a “Vulnerabilidad alta”.

Las variables que afectan dicha escala cuantitativa son:

- 1) Presencia de defensas fluviales.
- 2) Materialidad de las obras de defensa fluvial y puentes.
- 3) Cercanía de casas e infraestructura a los cauces.
- 4) Ancho de los ríos.

5) Superficies de inundación de los ríos libres y/o campos de cultivos que puedan “frenar” superficies de inundación.

6) Diferencia de cotas entre río y ciudad.

Para ejemplificar la asignación de puntaje de 1 a 5, se muestran los siguientes casos:

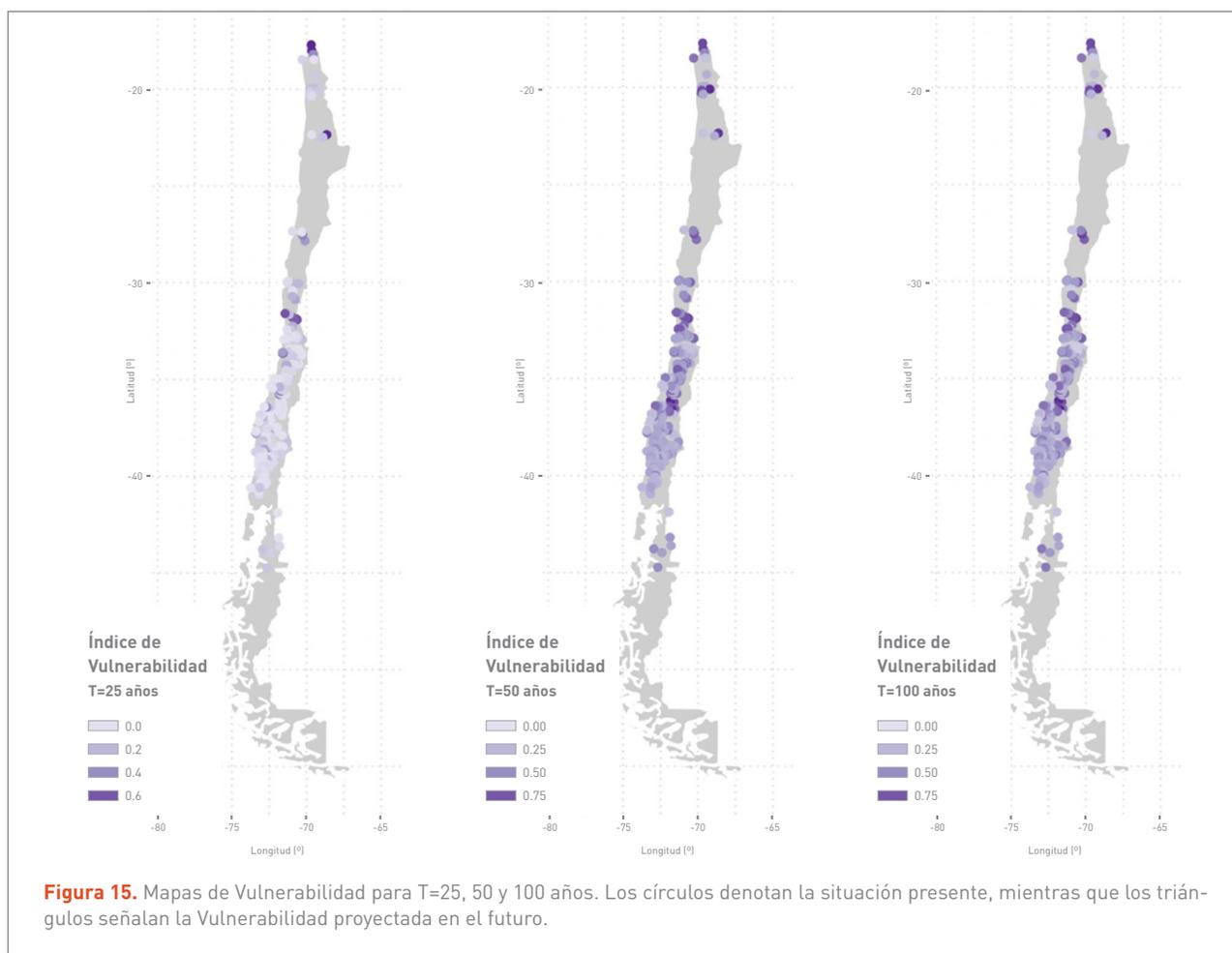
El primero corresponde a un pueblo de Tarapacá (panel izquierdo), al que se ha asignado una Vulnerabilidad baja, puesto que el río cuenta con una caja ancha, enrocados de protección y puentes de asfalto. Por otro lado, se presenta la imagen de San Carlos (derecha), donde se ve un estero muy mal encauzado, alledaño a casas, y que se cruza por un puente de madera, por lo que se le asigna una Vulnerabilidad alta. En otras palabras, la escala cualitativa de Vulnerabilidad se puede entender como la presencia y materialidad de obras fluviales, y su respectiva cercanía a asentamientos humanos, donde una mayor cantidad y mejor calidad de obras fluviales, además de una lejanía de los centros urbanos, indica una Vulnerabilidad baja. Mientras que una escasa y precaria calidad de defensas fluviales, además de una cercanía considerable a centros urbanos, define una Vulnerabilidad alta.

<sup>1</sup> Los periodos de retorno establecidos en la **Tabla 7** han sido determinados en función la vida útil de las distintas obras hidráulicas, criterios de diseño indicados por la Dirección General de Aguas y criterio de experto del Working Package.



**Figura 14.** Imágenes Street View para determinación de la escala cualitativa de Vulnerabilidad.

Finalmente, la Vulnerabilidad para cada periodo de retorno se calcula como la multiplicación entre la Vulnerabilidad media (T=25, 50 y 100 años) y la escala de Vulnerabilidad. De esta forma, se obtienen los mapas de la **Figura 15**.



**Figura 15.** Mapas de Vulnerabilidad para T=25, 50 y 100 años. Los círculos denotan la situación presente, mientras que los triángulos señalan la Vulnerabilidad proyectada en el futuro.



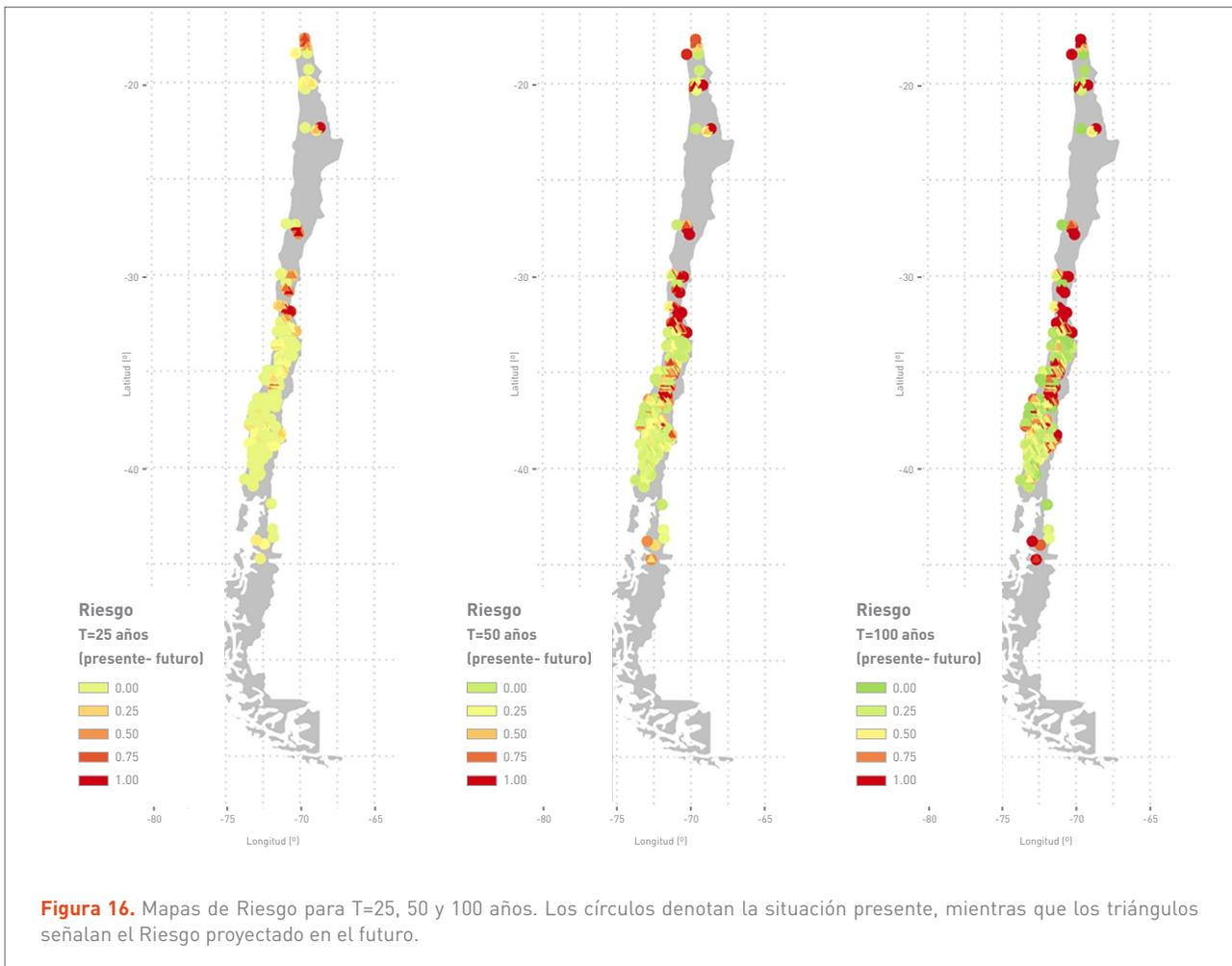
### 3.2.4 RIESGO EN INUNDACIONES POR DESBORDES DE RÍOS

Los mapas de la **Figura 16** muestran el nivel de Riesgo asociado a inundaciones por desborde de ríos en distintos centros urbanos de Chile. Es necesario destacar que el índice desplegado en los mapas no representa la probabilidad de que el centro urbano se inunde, sino que ilustra la susceptibilidad que presenta la infraestructura hidráulica crítica —cercana al cauce principal— que describe la zona urbana a sufrir los impactos en mayor o menor magnitud frente a un desborde de río.

Se presentan mapas de Riesgo para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años. Estos resultados se relacionan a crecidas con dicho periodo de retorno y la Vulnerabilidad

que presenta la infraestructura crítica según periodo de retorno de diseño respecto del periodo evaluado.

El índice es el producto entre los índices de Amenaza (**Figura 10**), Exposición (**Figura 12**) y Sensibilidad (**Figura 15**), en donde cada índice posee el mismo grado de importancia. Los resultados obtenidos se ven condicionados principalmente por el índice de Amenaza, seguido del índice de Vulnerabilidad. Se observa que la zonas norte y centro del país presentan altos niveles de Riesgo, debido a la precariedad y falta de infraestructura crítica que presenta la zona norte (Región de Atamaca a Región de Valparaíso) para mitigar los efectos de crecidas, mientras que en la zona centro - sur (Regiones del Maule, Ñuble y Biobío), los altos niveles de Riesgo responden a las magnitudes de las crecidas.



Se observa un aumento del Riesgo con mayores periodos de retorno, es decir, una crecida con periodo de retorno igual a 100 años tiene asociado un Riesgo mayor que una crecida con periodo de retorno de 20 o 50 años. Además, se observa que el Riesgo aumenta cuando existe un gran porcentaje de infraestructura crítica diseñada con un periodo de retorno menor al de evaluación.

Las proyecciones de Riesgo indican un aumento generalizado en el país, es decir, se proyectan aumentos en las magnitudes de las crecidas que pueden afectar las zonas urbanas. Sin embargo, existen urbanizaciones donde esto no se percibe y, caso contrario, la Amenaza disminuye, lo que se aprecia principalmente en la Región de O'Higgins y algunas localidades del sur del país.

### 3.3 SEQUÍAS HIDROLÓGICAS

La sequía hidrológica responde a una condición de déficit extremo en alguna variable hidrológica, con respecto a su comportamiento habitual, en una o más cuencas de interés. Estas condiciones están asociadas tanto a un aumento en la frecuencia de los caudales bajos, como también a una disminución en la magnitud de los caudales extremos bajos. El objetivo principal de este eje es señalar los efectos adversos de sequías hidrológicas mediante mapas, y dichos eventos son identificados en base a mediciones de caudal, en distintas comunas del país.

Se dispone de cuatro mapas: Amenaza (íntegramente asociada al aumento de eventos de sequía, en magnitud y frecuencia), Exposición (grado de impacto en la comuna ante eventos de sequía), Vulnerabilidad (susceptibilidad de las comunas a sufrir impactos producto de bajas condiciones de resiliencia) y Riesgo (definido como el producto de los tres indicadores anteriores).

El déficit de agua en una cuenca hidrográfica puede tener su origen en dos alteraciones de los procesos naturales planteados en el ciclo del agua, expuesto en el capítulo introductorio: **(i)** una falta de precipitación, lo cual es

comúnmente conocido como una “sequía meteorológica”; **(ii)** un aumento en la evapotranspiración por efecto de una mayor temperatura, disminuyendo la fracción de la precipitación que finalmente alimenta nuestros ríos. Ambos procesos pueden actuar por separado o de manera conjunta.

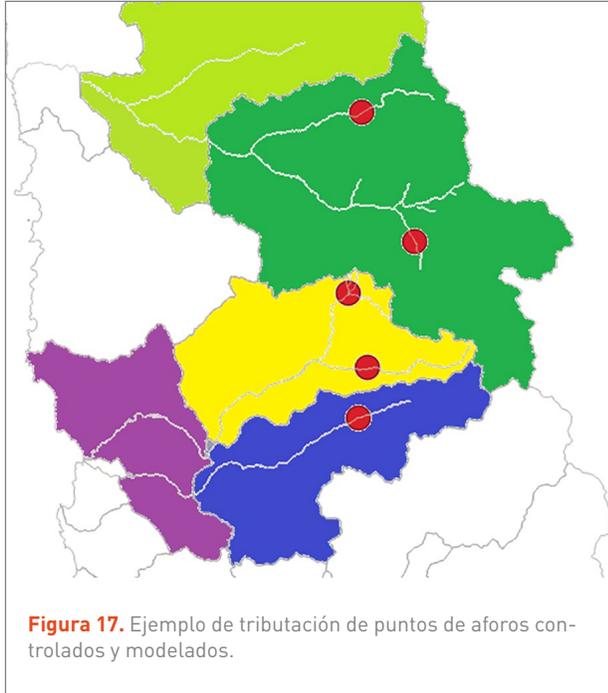
A diferencia de la “sequía meteorológica”, la cual se refiere a un déficit exclusivo de precipitaciones, la “sequía hidrológica” apunta a la disminución de almacenamientos y flujos de agua en la cuenca hidrográfica, donde influyen factores como uso y tipo de suelo, además de otras variables meteorológicas (temperatura, vientos, humedad relativa).

Para caracterizar una sequía, existen dos variables o indicadores relevantes desde el punto de vista hidrológico, y que se relacionan entre sí:

- 1) Magnitud de la sequía, es decir, cuánta agua menos escurre por la sección de un río, en comparación de la condición “normal”. Mientras más extrema sea la sequía, menos agua se tendrá en el río en comparación a la condición normal.
- 2) Frecuencia de la sequía, es decir, qué tan recurrente es el déficit de la magnitud del caudal, con respecto a la condición “normal”.

La base de datos para el estudio de las sequías tiene su origen en los resultados presentados en la actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018). Los resultados se encuentran restringidos a 95 cuencas de estudio, en régimen cercano a natural y distribuidas a lo largo del país, tributando a las diferentes comunas. Para el proceso anterior, se ha desarrollado una función que asocia a cada punto de aforo controlado y modelado, una de las comunas en las cuales se tiene caudal de dichos ríos, lo que permite traspasar los puntos de aforo discretos a comunas discretas a lo largo del país. La tributación se explica en la **Figura 17**.

La comuna en color verde oscuro presenta dos puntos de aforo modelados, asociados al balance hídrico. De esta



forma, se ponderan ambos puntos para obtener un valor representativo de la comuna. El resultado obtenido se aplica también a la comuna verde clara, puesto que el río pasante por esta comuna se encuentra aguas abajo de las estaciones de cabecera modeladas en la comuna verde oscuro.

El caso de la comuna en color amarillo es similar al anterior, y análogo a la comuna en azul, donde solamente tiene un punto con información, que será representativo de la comuna. La información de las comunas en colores amarillo y azul será ponderada y traspasada a la comuna en color fucsia, considerando que existe información aguas arriba de los ríos que pasan por esta última. Además, de la figura se desprende que existen comunas donde no se tiene información y que no posee un mismo río modelado aguas arriba, lo que constituye una limitación para cubrir la totalidad del territorio nacional. Sin embargo, para algunas de estas no se tiene información, puesto que las cuencas asociadas a dichas comunas no fueron modeladas en el Balance Hídrico Nacional.

### 3.3.1 AMENAZA EN SEQUÍAS HIDROLÓGICAS

La Amenaza tiene por objetivo ilustrar cómo las comunas se ven afectadas por sequías. Para ello, se estiman conjuntamente los valores asociados a una probabilidad de excedencia alta para los caudales medios anuales y el número de días promedio en los cuales la cuenca se encuentra en una condición de sequía, es decir, cuando escurre un caudal menor al histórico, para un periodo del año determinado (promedio para todo el periodo histórico/futuro).

Se han adoptado dos probabilidades de excedencia para la definición de los mapas:

- > Una probabilidad de excedencia igual a 85%, asociada a sequías severas. Este dato usualmente está vinculado al dimensionamiento de las obras de riego y a la producción agrícola.
- > Una probabilidad de excedencia del 95%, asociado a sequías muy severas. Este dato usualmente está asociado al dimensionamiento de las obras de captación, regulación y operación de sistemas de agua potable, indispensable para el consumo humano.

Finalmente, se elabora un mapa que combina sequías severas y muy severas.

Para el desarrollo anterior, se han procesado 95 cuencas en régimen natural, distribuidas a lo largo del país. Posteriormente, se ha desarrollado una función que asocia a cada punto de aforo controlado y modelado, una de las comunas donde se tiene flujo de dichos ríos controlados, lo que permite traspasar los puntos de aforo discretos a comunas discretas a lo largo del país.

La información necesaria para el desarrollo del índice se basa en los resultados de la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA 2017, 2018, 2019). En dicho proyecto, se ha trabajado con el modelo VIC (Variable Infiltration Capacity) donde se tiene un rendimiento para cada unidad de grilla (pixel) del país. El modelo ha sido calibrado con



cuencas en régimen natural y las series de caudal medio diario modelado se encuentran a resolución temporal diaria para cuatro (4) Modelos de Circulación General: CCSM4, CSIRO – Mk3 – 6 – 0, IPSL – CM5A – LR y MIROC – ESM.

La metodología consta de los siguientes pasos:

**1) Preparación de la base de datos:** Se obtienen caudales modelados con VIC para 95 cuencas distribuidas a lo largo del territorio nacional. De esta forma, se tienen series de caudales medios diarios, en cada uno de estos puntos, para un periodo futuro. Cabe destacar que se cuenta con dichos caudales para cada uno de los modelos climáticos mencionados.

**2) Años base de análisis:** Se considera una extensión temporal de 36 años, siendo el periodo histórico 1979 – 2014, mientras que el futuro analizado es 2025 – 2060.

**3) Indicadores base calculados:** Se han calculado tres indicadores distintos asociados a las sequías:

> **Caudales medios anuales, presente y futuro:** Para cada año hidrológico (i.e., de abril a marzo), se calcula un caudal medio anual (Qma). Luego, tanto para el periodo histórico como futuro, se obtienen los Qma de probabilidad de excedencia 85% y 95%, asociados a sequías severas y muy severas. El cálculo de Qma (X%) viene dado por:

$$Q_i > Q_{ma} (X\%) \text{ el } X\% \text{ del tiempo}$$

> **Días de sequía:** Corresponde a los días del año cuando se tiene una condición de sequía, lo que implica que los caudales, que están fluyendo por un determinado río, son menores a los históricamente observados. Para determinar un umbral comparativo, se calcula una condición normal que obedece a definir un caudal de cierta probabilidad de excedencia para la observación histórica. Este caudal es diferente en cada día del año, y debe considerar tanto un promedio temporal (ya que el sistema hidrológico no es exacto para cada

día del año), como la variabilidad interanual (ya que existen años húmedos, normales y secos). Luego, la definición del caudal caso base para el día y, asociado a una cierta probabilidad de excedencia es:

$$Q_{\text{caso base}}(i, X\%) = Q_{X\%}(Q(i-15:i+15, \forall j))$$

Donde:

$Q_{\text{caso base}}(i, X\%)$ : Caudal de probabilidad de excedencia X% del día juliano i.

X%: Porcentaje asociado a cierta probabilidad de excedencia (85% para sequías severas y 95% para sequías muy severas).

i: Día Juliano de cálculo.

j: Años para el cálculo de la línea base. En este caso, todo el período histórico.

Esquemáticamente, el  $Q_{\text{caso base}}(i, X\%)$  se calcula en base al orden de los caudales por la siguiente matriz:

Día Juliano	Año $j_1$	Año $j_2$	...	Año $j_n$
$i-15$				
...				
$i$				
...				
$i+15$				

\*\*Área anaranjada corresponde a los caudales para extracción de aquellos de X% de probabilidad de excedencia. Para cada día i, se tendrán 30 (días) x 36 (años) datos para la extracción del caudal representativo.

Este caudal representativo, asociado a cada día y probabilidad de excedencia, permite construir una curva de condición de sequía, representativa de la cuenca.

En base a la curva anterior, se definen los días de sequía de acuerdo a la comparación con la curva de sequía Línea Base:

$$Q_{\text{sequía}} = \begin{cases} \text{Si } Q_i(\text{Serie modelada}) < Q_{\text{caso base}}(i, X\%) \rightarrow \text{Con Sequía} \\ \text{Si } Q_i(\text{Serie modelada}) > Q_{\text{caso base}}(i, X\%) \rightarrow \text{Sin Sequía} \end{cases}$$

Naturalmente, dada la construcción de la curva del "línea base", en promedio para los diferentes años en la evaluación de esta condición en la serie histórica,



se tendrá un  $X\%$  de días de sequía, uniforme para todas las cuencas de estudio, ya que se ha forzado esta condición para la construcción de la curva. La comparación es útil de realizar para el futuro, donde el impacto del cambio climático modifica la cantidad de días de sequía de manera no uniforme en la cuenca.

- > **Días seguidos de sequía:** Se evalúa la cantidad de días seguidos (promedio anual) para los que se tiene una condición de sequía. El índice es relevante, puesto que su interpretación práctica habla de días donde no se podrá captar caudal para riego y producción de agua potable, sólo por citar algunos ejemplos. En este caso, no se cumplen necesariamente las probabilidades con las que se han construido las curvas del caso base, puesto que la distribución temporal de la sequía queda condicionada por el tipo de cuenca en estudio y su condición hidrometeorológica.

**4) Definición de Amenaza presente y futura:** A fin de contrarrestar el presente con el futuro, se realizan dos mapas:

- > El mapa presente de Amenaza de sequía evalúa un promedio temporal a lo largo de todo el territorio nacional, para luego determinar las cuencas más afectadas ante la condición de sequía. El indicador base, para este cálculo, es la cantidad de días consecutivos de sequía por cuenca. El indicador de Amenaza final presente normaliza los resultados dentro de las 95 cuencas analizadas y asigna valores entre 0 y 1, dependiendo de la realidad de la cuenca en el contexto nacional. Para dicha normalización, se ha utilizado la banda 90% como límite para adoptar los valores máximos y mínimos.
- > El mapa futuro de Amenaza de sequía evalúa una matriz bidimensional entre los indicadores de cambio para el caudal medio anual, asociado a cierta probabilidad de excedencia y los días seguidos promedio de sequía en la condición futura.

**5) Mapas generados para condición de sequía:** Se confeccionan tres mapas:

- > Mapa para probabilidad de excedencia de 85%, asociado a condición de sequía severa.
- > Mapa para probabilidad de excedencia de 95%, asociado a condición de sequía muy severa.
- > Mapa para un indicador combinado, tomando una ponderación igual entre las dos condiciones de sequía enunciadas anteriormente.

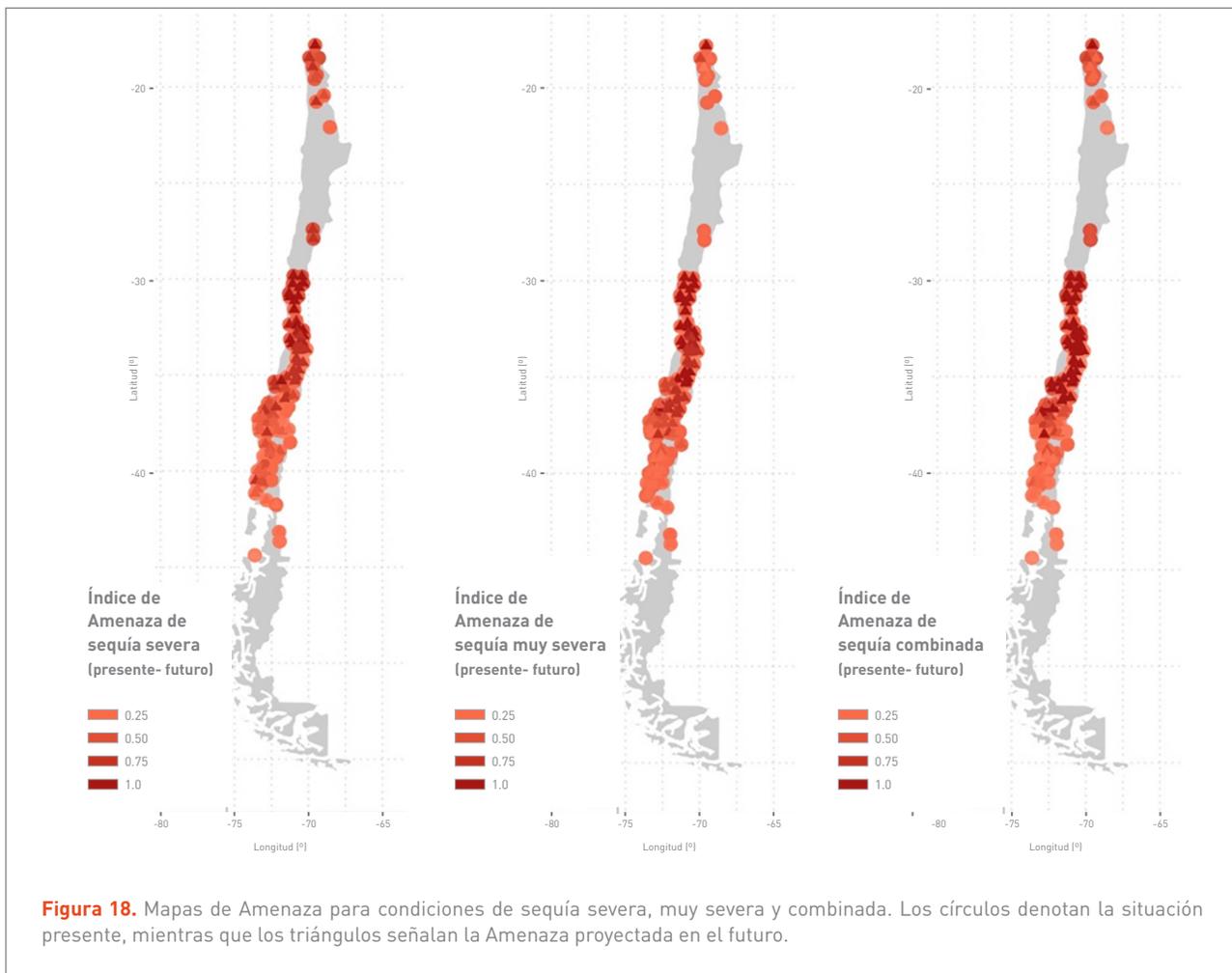
**6) Traspaso desde los puntos de aforo y las comunas de Chile:** A fin de realizar un mapa con resolución comunal, se traspasa la información desde los puntos de aforo a las comunas, en base a los siguientes criterios:

- > Si existe un punto de aforo exclusivo dentro de la comuna, se supone la condición en el punto de aforo como representativo de la comuna.
- > Si existen dos (2) o más puntos de aforo dentro de una misma comuna, el índice de Amenaza será el promedio de dichos puntos, lo cual será representativo de la comuna.
- > Si existen comunas aguas abajo o cercanas a los ríos donde se tienen puntos de aforo, se extrapolan los resultados hacia estas comunas. El límite para extrapolar información desde el punto  $i$  hasta la comuna  $j$ , es pasar como máximo por tres (3) comunas distintas. Se considera que, a partir de la cuarta comuna aguas abajo del punto de aforo, no es válida la extrapolación de los caudales.

Los mapas de la **Figura 18** sintetizan los resultados del índice de Amenaza para las 95 cuencas estudiadas.

### 3.3.2 EXPOSICIÓN EN SEQUÍAS HIDROLÓGICAS

La Exposición (**Figura 19**) señala el efecto adverso que tienen las sequías hidrológicas sobre las personas. Para ello, son analizadas las comunas ubicadas en las cuencas incluidas en la actualización del Balance Hídrico Nacional



**Figura 18.** Mapas de Amenaza para condiciones de sequía severa, muy severa y combinada. Los círculos denotan la situación presente, mientras que los triángulos señalan la Amenaza proyectada en el futuro.

### 3.3.3 VULNERABILIDAD EN SEQUÍAS HIDROLÓGICAS

(DGA, 2018, 2019, 2020). El índice entrega una relación entre la cantidad de población de una comuna respecto al promedio nacional de habitantes. Considerando el crecimiento demográfico, se ha realizado una distinción entre la población presente reportada por el CENSO 2017 y la población proyectada al año 2035, según los análisis realizados por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE).

El índice se basa en el logaritmo de la población residente en cada comuna y transformado a una distribución de lógica difusa comprendida en un espacio de valores 0 – 1. A fin de homogeneizar iniciativas de distintos *Working Package*, se han utilizado las definiciones desarrolladas por el grupo de Asentamientos Humanos.

La Vulnerabilidad (**Figura 20**) corresponde a la susceptibilidad de personas, identificadas como potencialmente expuestas a la sequía hidrológica, lo cual queda condicionado a diversas características de la población expuesta. El índice ilustra la susceptibilidad, de distintas comunas del país, a sufrir efectos adversos debido al déficit hídrico que puede experimentar la zona producto de sequías hidrológicas y meteorológicas. El índice depende de condiciones hidrológicas e hidráulicas características de cada comuna, incluyendo, por ejemplo, número de APR con derechos de agua, huella hídrica, desertificación y zonas de escasez hídrica entre otras. Además, condiciones poblacionales referentes a características de la población (por ejemplo: rango etario, nivel educacional y nivel de pobreza).

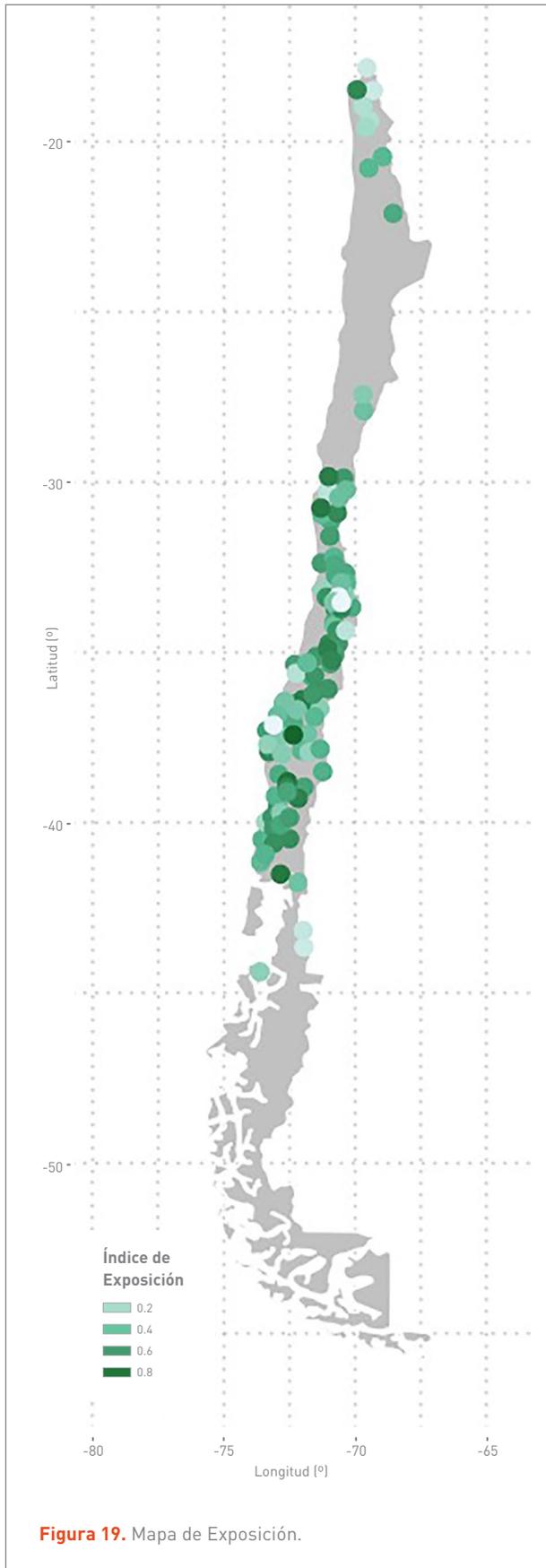


Figura 19. Mapa de Exposición.

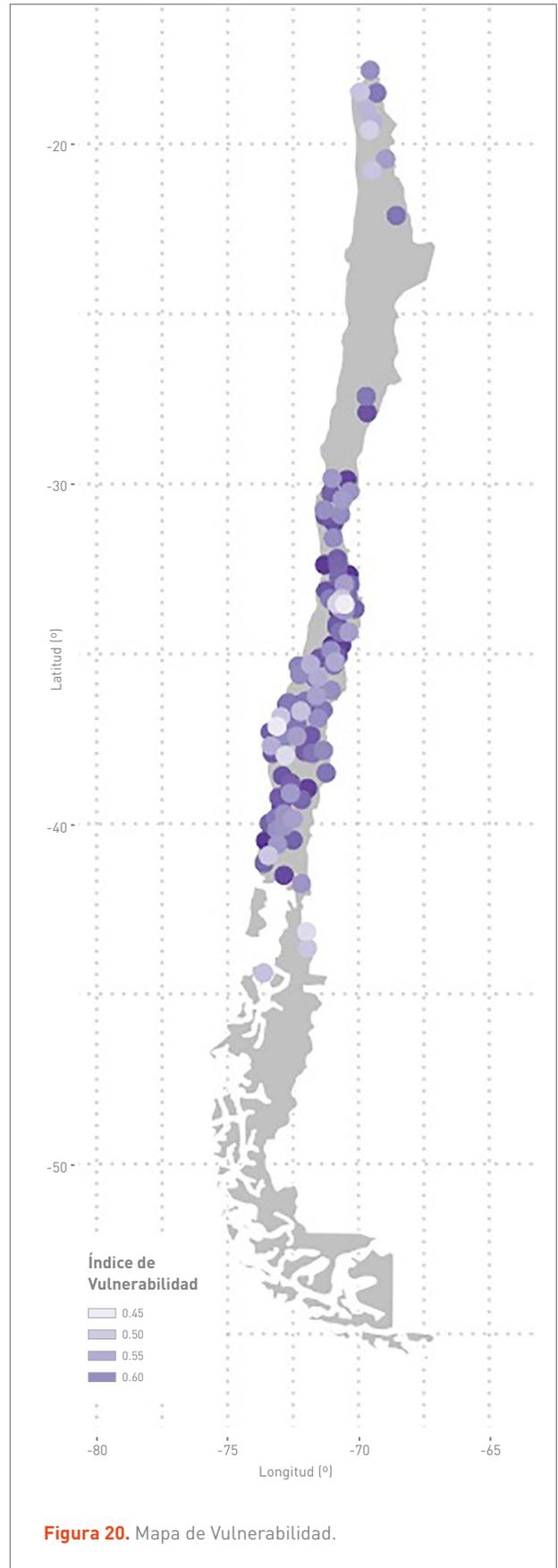


Figura 20. Mapa de Vulnerabilidad.

El índice de Vulnerabilidad se construye a partir de cuatro conjuntos de parámetros, donde cada conjunto representa distintas condiciones de Sensibilidad de las comunas.

**1) Condiciones de Sensibilidad territorial:** Zonas de escasez hídrica, declaraciones de prohibición y restricción de aprovechamiento del recurso hídrico, índice de desertificación, huella hídrica y APR con derechos de agua (APRs sin derechos no se encuentran debidamente catastrados a nivel nacional).

**2) Condiciones de Sensibilidad poblacional – socioeconómica:** Incidencia de pobreza por ingreso, incidencia de pobreza multidimensional, proporción de población con reducida educación y fuente principal de suministro de agua por camión aljibe.

**3) Condiciones de Sensibilidad poblacional – etaria y de salud:** Proporción de la población en la categoría de adulto mayor, proporción de población infantil y prevalencia de condiciones de Riesgo por desnutrición.

**4) Condiciones de Sensibilidad demográficas:** Proporción de hogares liderados por una mujer, proporción de habitantes pertenecientes a pueblos originarios, proporción de población inmigrante y número promedio de habitantes por vivienda.

Los niveles de Sensibilidad se determinan a través de las siguientes reglas:

**1) Sensibilidad alta:** La comuna presenta estrés hídrico y cumple conjuntamente con condiciones de Sensibilidad poblacional (etaria/de salud) y demográficas. Además, cumple con condiciones de Sensibilidad socioeconómicas.

**2) Sensibilidad media:** La comuna presenta estrés hídrico, pero no cumple con condiciones de Sensibilidad socioeconómicas o demográficas. También se da el caso de que la comuna no presente estrés hídrico, pero cumpla conjuntamente las condiciones de Sensibilidad demográficas, o al menos cumpla una de estas y presente Sensibilidad socioeconómica.

**3) Sensibilidad baja:** La comuna no presenta estrés hídrico y al menos una de las condiciones de Sensibilidad no se cumple en su totalidad.

Los cuatro conjuntos de parámetros han sido trabajados y analizados en la plataforma de lógica difusa, acoplado a las reglas de operación que rigen la estimación del índice. De esta forma, se obtiene una distribución que varía entre 0 y 1.

Con el fin de homogeneizar esfuerzos de distintos Grupos de Trabajo, se han utilizado las definiciones desarrolladas por el grupo de Asentamientos Humanos. Para conocer el detalle del índice, se recomienda visitar el capítulo del *Working Package* mencionado. En él se puede encontrar una ficha técnica detallada del proceso de cálculo; la conversión de los indicadores de lógica difusa y la agregación de reglas para determinar el nivel de Sensibilidad.

### 3.3.4 RIESGO EN SEQUÍAS HIDROLÓGICAS

El Riesgo se encuentra altamente condicionado por el índice de Amenaza. Los resultados para esta variable (**Figura 21**), indican que la zona centro-norte se encuentra bastante afectada, lo que se debe principalmente a que se proyectan sequías futuras de mayor magnitud y frecuencia. Se distingue además una zona sur, donde no se proyectan cambios tan severos como en el resto del territorio nacional. Los valores elevados de Riesgo presente y futuro responden a cuencas que poseen una demanda superior a su oferta, donde se registran caudales extremadamente bajos, no se cuenta con obras de resiliencia para afrontar la baja de los caudales y se encuentran con una Exposición alta, es decir, tienen un número considerable de servicios dependientes del agua.

Por lo tanto, se ha elaborado un mapa que da cuenta de los cambios de Riesgo, donde un mayor cambio en el indicador señala las comunas en que los caudales bajos han disminuido considerablemente, sumado al aumento en la frecuencia con la cual se registra este tipo de caudales. Lo anterior se ve incrementado en comunas donde existe una resiliencia limitada debido a factores socioeconómicos, entre otros.



En concordancia con los indicadores de Vulnerabilidad y Riesgo, se ha utilizado un procedimiento de lógica difusa para considerar los tres factores definidos en el presente trabajo (Amenaza, Exposición y Vulnerabilidad) y combinarlos, recuperando un solo índice de Riesgo.

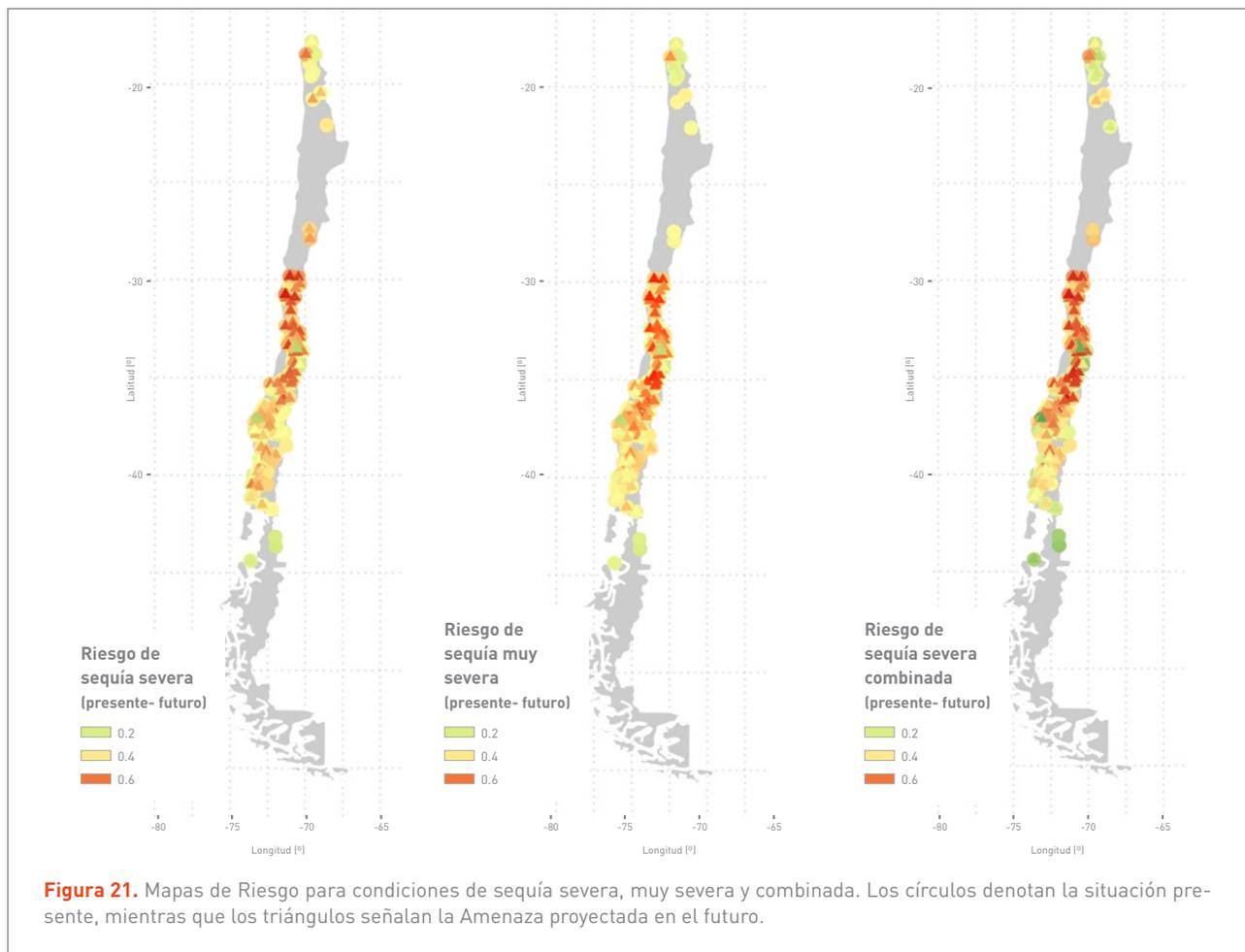
### 3.4 SIMILITUDES Y DIFERENCIAS CON WP: ASENTAMIENTOS HUMANOS

Los *Working Packages*, Asentamientos Humanos e Hidrología, han evaluado y desarrollado en paralelo los efectos adversos de inundaciones y sequías generadas por

eventos extremos. El eje de inundaciones desarrollado por el grupo de Hidrología, se subdivide en dos temas: inundaciones urbanas e inundaciones por desbordes de ríos. Por otro lado, el WP Asentamientos Humanos realiza un análisis exclusivo de la temática de desborde de colectores de aguas lluvias urbanas. Con respecto al enfoque de sequía presentado por este último grupo, se debe mencionar que está basado en el concepto de sequía meteorológica, mientras que el grupo de Hidrología ha presentado un enfoque de sequía hidrológica.

#### 3.4.1 INUNDACIONES

Las *inundaciones urbanas* corresponden a fallas en la red de colectores producto de precipitaciones extremas. Para determinar su nivel de Riesgo, el grupo de Hidrología ha considerado la cantidad de infraestructura crítica expues-



**Figura 21.** Mapas de Riesgo para condiciones de sequía severa, muy severa y combinada. Los círculos denotan la situación presente, mientras que los triángulos señalan la Amenaza proyectada en el futuro.

ta (cuarteles de bomberos y carabineros, establecimientos educacionales, hospitales y servicios de salud primarios y secundarios), además de la población expuesta. El enfoque de Hidrología estudia las fallas en la red de colectores para distintos periodos de retorno (T), siendo estos T=5, 10 y 20 años. De esta forma, se busca evaluar la variabilidad de la falla frente a posibles aumentos futuros en la precipitación extrema.

La segunda clase, *inundaciones por desborde de ríos*, se genera por eventos de precipitación extrema, y se traduce en un peralte del nivel del agua, en donde los cauces salen de su curso normal e inundan sectores urbanos aledaños, provocando destrucciones parciales o totales de infraestructura hidráulica (bocatomas, canales, estaciones de la red hidrométrica nacional y puentes). El grupo de Hidrología considera esta infraestructura para evaluar el nivel de Riesgo que presenta este eje, además de considerar la cantidad de plantas de tratamiento de aguas servidas y de agua potable existentes en cada ciudad.

Por otro lado, el grupo de *Asentamientos Humanos*, tomando como insumo estos resultados, analiza los efectos que los impactos -identificados por hidrología- conllevan para la población de las comunas afectadas. Para ello, *Asentamientos Humanos* realiza un análisis exclusivo de los desbordes de colectores de aguas lluvias. Analiza particularmente la Sensibilidad de la población expuesta, las viviendas y la habitabilidad del territorio en el “contexto de inundación”. Además, se identifican los factores de resiliencia/capacidad de adaptación que tienen los sistemas para enfrentar los dos tipos de Amenazas, como sistemas de monitoreos, infraestructuras anti-inundaciones y planes oficiales del desarrollo territorial, entre otros.

En síntesis, se tiene que cada grupo evalúa las inundaciones desde un punto de vista diferente: Asentamientos Humanos busca evaluar los efectos sobre las personas,

mientras que Hidrología evalúa los efectos de eventos extremos sobre las viviendas e infraestructura hidráulica.

### 3.4.2 SEQUÍAS

La *sequía meteorológica* corresponde a un déficit del recurso hídrico, asociado con las condiciones de precipitación, temperatura y humedad atmosférica. Se reconoce la importancia que estas variables juegan en la generación de la escorrentía superficial en las cuencas y recarga de acuíferos que constituyen, en un gran número de casos, la fuente de abastecimiento de agua de los sectores rurales que poseen pozos profundos.

Por otro lado, la *sequía hidrológica*, tal como ha sido abordada en este trabajo, corresponde a cambios que se producen en los caudales de los ríos, considerando una mayor cantidad de variables que en el enfoque meteorológico. Estas variables son: precipitación, temperatura, humedad del suelo, cobertura de las cuencas, acumulación de nieves, entre otras. De esta forma, el enfoque hidrológico posee una mejor representación de los caudales en las cuencas al incluir más variables.

Se debe mencionar que se cuenta con datos hidrológicos en un número limitado de cuencas en el territorio nacional, por lo que la cantidad de las comunas donde se puede modelar la sequía hidrológica es también reducida y representa un enfoque territorial discreto. Al considerar una sequía meteorológica, se logra generar una variación futura con dominio espacial continuo, logrando modelar la totalidad de comunas en el territorio nacional.

Como conclusión, ambos enfoques son diferentes conceptualmente, y poseen ventajas y desventajas. A pesar de lo anterior, se destaca la consistencia entre los mapas de Riesgo generados por ambos grupos.



# 4

## CONCLU- SIONES

### 4.1 INUNDACIONES URBANAS: RESILIENCIA, ADAPTABILIDAD Y BRECHAS PARA DESARROLLO FUTURO

---

A la luz de los resultados, se puede observar que la magnitud de los eventos extremos aumentará en el futuro y, en particular, aquellos de mayor periodo de retorno. La adaptabilidad al cambio climático, en este eje de trabajo, pasa por una mejora de las redes de recolección, conducción y restitución de aguas lluvias construidas en las ciudades. Los resultados sugieren que se deben fortalecer dichas redes, especialmente en sectores donde aún no se tiene un saneamiento de aguas lluvias efectivo, así como también aumentar su capacidad de porteo, haciendo nuevas líneas de colectores o aumentando los diámetros actuales. Se apuesta, además, por una correcta materialización de las cámaras de inspección y una mantención reiterada y consciente de las redes actuales, con el fin de sacar un

mejor provecho a la infraestructura instalada. Otras soluciones podrían apuntar a espacios de “sacrificio”, que puedan almacenar escorrentía en las crecidas urbanas y que, en el cotidiano, sirvan como espacios de recreación importantes para la comunidad, integrados al proyecto urbanístico de las ciudades. Este podría ser el caso de parques fluviales y canchas deportivas, entre otras.

A fin de optimizar los limitados recursos, se deberá realizar un estudio de los puntos críticos a reforzar, para evitar las inundaciones urbanas. Comúnmente, los Planes de Manejo de Aguas Lluvias incluyen este tipo de capítulo, aunque muchas veces las sugerencias de nuevas líneas de alcantarillado, para diferentes sectores, no se encuentran ejecutadas a la fecha o no se tiene información sobre el real estado de avance. Por otro lado, se deben aumentar los periodos de retorno para el cálculo de las líneas, puesto que el análisis de las precipitaciones máximas demuestra un aumento de las intensidades en precipitaciones extremas para diferentes ciudades del país. Todo esto apunta a disminuir tanto las Amenazas como Vulnerabilidad de las ciudades.



El eje de inundaciones urbanas es desarrollado en 77 comunas del país, debido a que la información disponible no es la suficiente para abordar y estudiar todo el territorio nacional. Se han aplicado criterios geográficos y meteorológicos para estimar la Amenaza, debido a que ésta fue desarrollada bajo un modelo de regresión lineal múltiple y posee incertidumbre en sus resultados. En función de esto, se espera que en un futuro próximo sea factible desarrollar un catastro de la red de colectores en todo el país, en conjunto con un análisis de las áreas inundables de cada comuna (escala micro) o ciudad (escala macro). De esta forma, la estimación de la Amenaza poseerá mayor certeza y permitirá conocer a fondo los efectos adversos, generados por precipitaciones extremas que afectan el área urbana. Otra de las brechas detectada, que deberá ser desarrollada a futuro, tiene relación con el crecimiento urbano y planes reguladores de las áreas urbanas, aspecto que no ha sido considerado en el presente estudio.

## **4.2 INUNDACIONES POR DESBORDES DE RÍOS: RESILIENCIA, ADAPTABILIDAD Y BRECHAS PARA DESARROLLO FUTURO**

---

Con el fin de disminuir la Vulnerabilidad ante eventos de crecida, se proponen modificaciones a leyes que -en la actualidad- instruyen a los embalses disponer de volúmenes de almacenamiento para la contención de crecidas. Esta modificación debería apuntar a disponer de volúmenes reales para el almacenamiento de crecidas de gran envergadura, en un espectro ampliado de embalses de distintas capacidades, lo que podría disminuir daños en infraestructura de carreteras y ciudades, entre otras.

Por otro lado, se propone la construcción de obras de defensa fluvial, tales como encauzamientos, enrocados de protección, muros guardarradier, parques inundables, entre otras, que sean capaces de resguardar a las ciudades en los eventos de crecidas.

Lo anterior debe ser complementado con una actualización y correcta fiscalización de los planes reguladores en las ciudades, los cuales prohíban de manera efectiva el emplazamiento de viviendas o infraestructura crítica, en las planicies de inundación de los cauces, tomando escenarios verdaderamente desfavorables en la elaboración de los mapas de inundación.

La adaptabilidad al cambio climático pasa por un resguardo de la ciudad, con obras de defensa fluvial y el diseño de la infraestructura crítica para periodos de retorno altos. Finalmente, se deben evaluar los planes reguladores a fin de restringir edificaciones colindantes con los ríos.

Las inundaciones por desborde de ríos se analizaron a partir de resultados del Balance Hídrico Nacional DGA (DGA 2018, 2019 y 2020), donde se modelaron cuencas en régimen natural a lo largo de Chile continental. Debido a esto, se dejó fuera del análisis un número considerable de comunas. Se espera que, en un futuro próximo, sea posible realizar la modelación de todos los ríos del país.

Por otro lado, se requiere conocer la calidad de la infraestructura hidráulica que permite monitorear eventos extremos, como también aquella que permita mitigar efectos adversos generados por dichos eventos. Con respecto a la calidad de la infraestructura de medición y protección contra crecidas, ésta debe ser levantada con DGA y DOH de acuerdo a la pertinencia, para tener mejor idea de la brecha con respecto a esta información (qué información hay; con qué nivel de detalle y qué se necesita).

En el marco de este proyecto, se espera agregar —en el índice de Vulnerabilidad— la Sensibilidad de viviendas y servicios potencialmente afectados.

## 4.3 SEQUÍAS HIDROLÓGICAS: RESILIENCIA, ADAPTABILIDAD Y BRECHAS PARA DESARROLLO FUTURO

---

La Vulnerabilidad hace referencia a condiciones territoriales y socioeconómicas, las que pueden ser mejoradas con programas específicos de gobierno.

Por otro lado, se proponen dos medidas, desde el punto de vista hidrológico, asociadas a la intervención humana:

- > **Aumento y mejoramiento de la capacidad de regulación en ríos:** Este punto tiene que ver con agua dulce, que potencialmente podría ser utilizada para usos de producción agrícola, industrial o de consumo humano, que, bajo dicha perspectiva, llega al océano al no poder ser embalsada. En esta línea, se propone la construcción o mejoramiento de embalses, en puntos específicos de las cuencas, a fin de guardar agua para la temporada de estiaje.
- > **Enfoque hacia una gestión integrada del recurso hídrico:** Actualmente, el sistema del uso de agua -en las cuencas chilenas- maximiza el beneficio individual de los diferentes actores, lo que potencialmente corresponde a un punto subóptimo, en el beneficio conjunto de todos los actores involucrados en el manejo de los recursos hídricos. Por lo tanto, se propone una gestión centralizada por cuenca del recurso, donde las asignaciones sean realizadas apuntando a un óptimo social e incorporando múltiples dimensiones en la asignación de aguas. Esto podría agregarse con una optimización de nuevas reglas de operación en embalses, que minimicen años con caudales demasiado bajos, en la época crítica del estiaje (habitualmente el mes de marzo). Otra arista de la gestión integrada del recurso hídrico, implica tomar medidas en las cuencas, tales como: cambios de uso de suelo; mejor

planificación territorial; aumento productivo de cultivos (de menor demanda de agua y mayor productividad); mejor distribución en canales; infraestructura de medición para la gestión; protección de servicios básicos (APR y APU); mantención de servicios ecosistémicos; generación de capacidades a nivel territorial para enfrentar sequías; mejorar los instrumentos normativos para enfrentar sequías, entre otras.

- > **Potenciar la regulación natural en cuencas críticas:** En aumento de regulación interanual, existen medidas basadas en la naturaleza (en las distintas etapas del ciclo hidrológico, que también significan mejoras en la capacidad de regulación, como lo son el manejo y protección de bosques nativos; manejo y protección de las zonas de recarga de las cuencas; manejo y protección de humedales, entre otras. Por otro lado, la base de información para estimar el Riesgo asociado a sequías hidrológicas, la da el proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional, en el que se calibraron las cuencas consideradas en régimen natural y luego se regionalizaron los parámetros por macrozonas, usando conceptos de similitud física y/o climática. En base a esto, se estimaron caudales en régimen natural en otras cuencas, lo que no representa, necesariamente, lo observado en las estaciones de control fluviométrico.

Queda por desarrollar, en un futuro próximo, la modelación de ríos de interés para el análisis de Riesgo, particularmente en zonas donde no existe ningún registro de modelación, como lo es en parte del norte grande y en el territorio austral e insular del país.



