

Informe
Proyecto
Arclim

Atlas de Riesgo Climático para Chile

Equipo Editor:

Andrés Pica-Téllez
Centro de Cambio Global
Pontificia Universidad Católica de Chile

René Garreaud
Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)²
Universidad de Chile

Francisco Meza
Centro de Cambio Global
Pontificia Universidad Católica de Chile

Susana Bustos
Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)²
Universidad de Chile

Mark Falvey
Meteodata

Marcelo Ibarra
Meteodata

María Ignacia Silva
Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)²
Universidad de Chile

Katherine Duarte
Centro de Cambio Global
Pontificia Universidad Católica de Chile

Rocío Ormazábal
Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)²
Universidad de Chile

Rodrigo Dittborn
SSG



Este informe debe citarse de la siguiente manera:

Pica-Téllez, A.; Garreaud, R.; Meza, F.; Bustos, S.; Falvey, M.; Ibarra, M.; Duarte, K.; Ormazábal, R.; Dittborn, R. & Silva, I.; 2020. Informe Proyecto ARCLim: Atlas de Riesgos Climáticos para Chile. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Centro de Cambio Global UC y Meteodata para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Santiago, Chile.

Preparado para:



ARCLim es un proyecto del Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile apoyado por el Programa Mundial de Evaluación y Gestión de Riesgos para la Adaptación al Cambio Climático (Pérdidas y Daños) por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ).

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

Informe
Proyecto
Arclim

Atlas de Riesgo Climático para Chile



ÍNDICE DE CONTENIDOS

Pág.		Pág.	
12	1. Resumen Ejecutivo	33	5. Plataforma ARClím
14	2. Introducción y Motivación	34	5.1 Introducción
17	3. Objetivos	34	5.2 Mapas de Riesgo
17	3.1 Objetivo general	37	5.3 Explorador de Amenazas
17	3.2 Objetivos específicos	40	5.4 Mapas de especies
18	4. Marco Metodológico	42	5.5 API ARClím
18	4.1 Metodología general	44	6. Sistemas Abordados
18	4.1.1 Riesgos del cambio climático.	46	6.1 Agricultura
20	4.1.2 Componentes del Riesgo climático.	46	6.1.1 Introducción.
21	4.1.3 Cadenas de Impacto (CI).	46	6.1.2 Cadenas de Impacto.
22	4.1.4 Consideraciones respecto a la Amenaza.	46	6.1.3 Metodología.
23	4.1.5 Consideraciones respecto a la Exposición.	52	6.1.4 Resultados.
24	4.1.6 Consideraciones respecto a Vulnerabilidad.	55	6.1.5 Conclusiones.
24	4.1.7 Esquema de trabajo en ARClím.	57	6.2 Bosques Nativos
25	4.2 Generación de bases de datos climáticos	57	6.2.1 Introducción.
25	4.2.1 Introducción.	57	6.2.2 Cadenas de Impacto.
26	4.2.2 Metodología.	58	6.2.3 Metodología.
26	4.2.2.1 Periodos.	62	6.2.4 Resultados.
26	4.2.2.2 Variables.	65	6.2.5 Conclusiones.
27	4.2.2.3 Dominio espacial.	67	6.3 Plantaciones Forestales
27	4.2.2.4 Datos de referencia.	67	6.3.1 Introducción.
29	4.2.2.5 Método de escalamiento estadístico.	67	6.3.2 Cadenas de Impacto.
30	4.2.3 Resultados.	67	6.3.3 Metodología.
30	4.2.3.1 Base de datos.	70	6.3.4 Resultados.
30	4.2.3.2 Índices climáticos.	73	6.3.5 Conclusiones.



Pág.		Pág.	
75	6.4 Acuicultura	122	6.9 Biodiversidad
75	6.4.1 Introducción.	122	6.9.1 Introducción.
76	6.4.2 Cadenas de Impacto.	122	6.9.2 Cadenas de Impacto.
77	6.4.3 Metodología.	123	6.9.3 Metodología.
81	6.4.4 Resultados.	125	6.9.4 Resultados.
83	6.4.5 Conclusiones.	128	6.9.5 Conclusiones.
85	6.5 Pesca Artesanal	130	6.10 Salud y Bienestar Humano
85	6.5.1 Introducción.	130	6.10.1 Introducción.
85	6.5.2 Cadenas de Impacto.	130	6.10.2 Cadenas de Impacto.
86	6.5.3 Metodología.	134	6.10.3 Metodología.
87	6.5.4 Resultados.	143	6.10.4 Resultados.
90	6.5.5 Conclusiones.	145	6.10.5 Conclusiones.
92	6.6 Recursos Hídricos	148	6.11 Infraestructura Costera
92	6.6.1 Introducción.	148	6.11.1 Introducción.
92	6.6.2 Cadenas de Impacto.	148	6.11.2 Cadenas de Impacto.
92	6.6.3 Metodología.	149	6.11.3 Metodología.
99	6.6.4 Resultados.	151	6.11.4 Resultados.
102	6.6.5 Conclusiones.	154	6.11.5 Conclusiones.
105	6.7 Minería	156	6.12 Energía Eléctrica
105	6.7.1 Introducción.	156	6.12.1 Introducción.
106	6.7.2 Cadenas de Impacto.	157	6.12.2 Cadenas de Impacto.
106	6.7.3 Metodología.	158	6.12.3 Metodología.
107	6.7.4 Resultados.	162	6.12.4 Resultados.
110	6.7.5 Conclusiones.	165	6.12.5 Conclusiones.
112	6.8 Turismo	167	7. Síntesis de Desafíos
112	6.8.1 Introducción.	169	8. Conclusiones
112	6.8.2 Cadenas de Impacto.	172	9. Referencias
113	6.8.3 Metodología.		
118	6.8.4 Resultados.		
120	6.8.5 Conclusiones.		



ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.		Pág.	
19	Figura 1. Elementos que definen el Riesgo climático (AR5) y diferencias con el antiguo concepto de Vulnerabilidad climática.	42	Figura 14. Probabilidad de presencia (histórica y futura) y cambio de probabilidad de presencia a causa del cambio climático de la especie de ave Carpintero Negro (endémico).
20	Figura 2. Ejemplos del perfil del Riesgo ($R=E*A*S$).	51	Figura 15. Diagramas de flujo de categorización de la Exposición normalizada y la Amenaza porcentual.
22	Figura 3. Pasos claves para la construcción de una Cadena de Impacto viable.	52	Figura 16. Diagramas de flujo de categorización del Riesgo.
23	Figura 4. Representación gráfica de la Exposición en un nivel (a) comunal y (b) puntual.	52	Figura 17. Resultado de Amenaza. Ejemplo de Cadena de Impacto en "cambio de productividad de frejol".
25	Figura 5. Diversos sistemas considerados en ARCLim .	53	Figura 18. Resultado de Exposición. Ejemplo de Cadena de Impacto en "cambio de productividad de frejol".
29	Figura 6. Diagrama esquemático del funcionamiento de la técnica de escalamiento.	54	Figura 19. Resultado de Sensibilidad. Ejemplo de Cadena de Impacto en "cambio de productividad de frejol".
30	Figura 7. Método de cálculo de índices climáticos a partir de los datos diarios de todos los GCM.	54	Figura 20. Resultado de Riesgo. Ejemplo de Cadena de Impacto en "cambio de productividad de frejol".
33	Figura 8. Portada de acceso a la plataforma de información en-línea, ARCLim.	61	Figura 21. Esquema general para el cálculo del Riesgo climático para Bosques Nativos y Plantaciones Forestales".
35	Figura 9. Estructuración del contenido en la herramienta en-línea Atlas de Riesgo.	63	Figura 22. Resultado de Amenaza. Ejemplo de Cadena de Impacto "incendios en bosques nativos".
37	Figura 10. Cadena de Impacto que evalúa la pérdida de flora por cambios en la precipitación.	63	Figura 23. Resultado de Exposición. Ejemplo de Cadena de Impacto "incendios en bosques nativos".
38	Figura 11. Simulación de la temperatura media anual (°C) para un periodo de 100 años.		
39	Figura 12. Esquema de las cuatro secciones que dan forma al explorador de potenciales Amenazas climáticas.		
40	Figura 13. Visualización del explorador de Amenazas.		



Pág.		Pág.	
64	Figura 24. Resultado de Sensibilidad. Ejemplo de Cadena de Impacto "incendios en bosques nativos".	88	Figura 34. Resultado de Amenaza. Ejemplo de Cadena de Impacto "pérdida de desembarque pesquero artesanal".
64	Figura 25. Resultado de Riesgo. Ejemplo de Cadena de Impacto "incendios en bosques nativos".	89	Figura 35. Resultado de Exposición. Ejemplo de Cadena de Impacto "pérdida de desembarque pesquero artesanal".
71	Figura 26. Resultado de Amenaza. Ejemplo de Cadena de Impacto "incendios en plantaciones forestales".	89	Figura 36. Resultado de Sensibilidad. Ejemplo de Cadena de Impacto "pérdida de desembarque pesquero artesanal".
72	Figura 27. Resultado de Exposición. Ejemplo de Cadena de Impacto "incendios en plantaciones forestales".	90	Figura 37. Resultado de Riesgo. Ejemplo de Cadena de Impacto "pérdida de desembarque pesquero artesanal".
72	Figura 28. Resultado de Sensibilidad. Ejemplo de Cadena de Impacto "incendios en plantaciones forestales".	100	Figura 38. Resultado de Amenaza. Ejemplo de Cadena de Impacto "inundaciones por desbordes de ríos".
73	Figura 29. Resultado de Riesgo. Ejemplo de Cadena de Impacto "incendios en plantaciones forestales".	101	Figura 39. Resultado de Exposición. Ejemplo de Cadena de Impacto "inundaciones por desbordes de ríos".
81	Figura 30. Resultado de Amenaza. Ejemplo de Cadena de Impacto "pérdida de biomasa semilla de mejillones por aumento de salinidad".	101	Figura 40. Resultado de Sensibilidad. Ejemplo de Cadena de Impacto "inundaciones por desbordes de ríos".
82	Figura 31. Resultado de Exposición. Ejemplo de Cadena de Impacto "pérdida de biomasa semilla de mejillones por aumento de salinidad".	102	Figura 41. Resultado del índice de Riesgo. Ejemplo de Cadena de Impacto "inundaciones por desbordes de ríos".
82	Figura 32. Resultado de Sensibilidad. ejemplo de Cadena de Impacto "pérdida de biomasa semilla de mejillones por aumento de salinidad".	107	Figura 42. Resultado de Amenaza. Ejemplo de Cadena de Impacto "inundaciones locales y deslizamientos de tierra en faenas mineras".
83	Figura 33. Resultado de Riesgo. Ejemplo de Cadena de Impacto "pérdida de biomasa semilla de mejillones por aumento de salinidad".	108	Figura 43. Resultado de Exposición. Ejemplo de Cadena de Impacto "inundaciones locales y deslizamientos de tierra en faenas mineras".



Pág.		Pág.	
109	Figura 44. Resultado de Sensibilidad. Ejemplo de Cadena de Impacto "inundaciones locales y deslizamientos de tierra en faenas mineras".	127	Figura 54. Ejemplo para resultados del índice Riesgo "pérdida de fauna por cambios de precipitación".
109	Figura 45. Resultado de Riesgo. Ejemplo de Cadena de Impacto "inundaciones locales y deslizamientos de tierra en faenas mineras".	144	Figura 55. Ejemplo para resultados del índice de Amenaza "anegamiento de asentamientos costeros".
118	Figura 46. Resultado de Amenaza. Ejemplo de Cadena de Impacto "pérdida de atractivo turístico en alta montaña".	144	Figura 56. Ejemplo para resultados del índice de Exposición "anegamiento de asentamientos costeros".
119	Figura 47. Resultado de Exposición. Ejemplo de Cadena de Impacto "pérdida de atractivo turístico en alta montaña".	145	Figura 57. Ejemplo para resultados del índice de Riesgo "anegamiento de asentamientos costeros".
119	Figura 48. Resultado de Sensibilidad. Ejemplo de Cadena de Impacto "pérdida de atractivo turístico en alta montaña".	152	Figura 58. Resultado de Amenaza. Ejemplo de Cadena de Impacto "aumento de <i>downtime</i> en caletas de pescadores".
120	Figura 49. Resultado del Riesgo. Ejemplo de Cadena de Impacto "pérdida de atractivo turístico en alta montaña".	152	Figura 59. Resultado de Exposición. Ejemplo de Cadena de Impacto "aumento de <i>downtime</i> en caletas de pescadores".
124	Figura 50. Cálculo de los márgenes de seguridad a nivel de Chile continental.	153	Figura 60. Resultado de Sensibilidad. Ejemplo de Cadena de Impacto "aumento de <i>downtime</i> en caletas de pescadores".
126	Figura 51. Ejemplo para resultados del índice Amenaza "pérdida de fauna por cambios de precipitación".	153	Figura 61. Resultado de Riesgo. Ejemplo de Cadena de Impacto "aumento de <i>downtime</i> en caletas de pescadores".
126	Figura 52. Ejemplo para resultados del índice Exposición "pérdida de fauna por cambios de precipitación".	156	Figura 62. Variación porcentual del PIB, generación eléctrica y demanda promedio entre los años 2016 y 2019 para el SEN.
127	Figura 53. Ejemplo para resultados del índice Vulnerabilidad "pérdida de fauna por cambios de precipitación".	158	Figura 63. Representación del Sistema Eléctrico Nacional.



ÍNDICE DE TABLAS

Pág.		Pág.	
163	Figura 64. Ejemplo para resultados del índice Amenaza "aumento de temperatura sobre líneas de transmisión".	26	Tabla 1. Periodos de tiempo considerados en la base de datos climáticos.
163	Figura 65. Ejemplo para resultados del índice Amenaza "impactos de disminución del recurso hídrico".	27	Tabla 2. Variables incluidas en la base de datos climáticos.
164	Figura 66. Ejemplo de resultados para la Exposición.	28	Tabla 3. Bases de datos de referencia para el método de escalamiento estadístico.
164	Figura 67. Ejemplo resultados Amenaza "aumento de temperaturas sobre líneas de transmisión".	31	Tabla 4. Índices climáticos calculados.
165	Figura 68. Ejemplo resultados Riesgo "aumento de temperaturas sobre líneas de transmisión".	35	Tabla 5. Descripción de las secciones del Atlas de Riesgo representadas en el esquema de la Figura 9.
		39	Tabla 6. Descripción de cada sección del explorador de Amenazas.
		41	Tabla 7. Categorías de Vulnerabilidad.
		43	Tabla 8. Consultas disponibles en el API.
		47	Tabla 9. Resumen de Cadenas de Impacto seleccionadas para el Sistema Agricultura.
		49	Tabla 10. Parámetros considerados en el cálculo de Sensibilidad del Sector Agricultura.
		50	Tabla 11. Parámetros analizados en el análisis de capacidad adaptativa del Sector Agricultura.
		51	Tabla 12. Categorías de Riesgo del Sector Agricultura.
		58	Tabla 13. Resumen Cadenas de Impacto Sistema Bosques Nativos.
		68	Tabla 14. Resumen Cadenas de Impacto Sistema Plantaciones Forestales.



Pág.		Pág.	
76	Tabla 15. Resumen Cadenas de Impacto Sistema Acuicultura.	137	Tabla 26. Indicadores que componen el índice de Amenaza de la Cadena de Impacto "efecto olas de calor en salud humana".
85	Tabla 16. Resumen Cadenas de Impacto Sistema Pesca Artesanal.	138	Tabla 27. Categorías del índice de Amenaza - Cadena de Impacto "efecto olas de calor en salud humana".
93	Tabla 17. Resumen de Cadenas de Impacto seleccionadas para el Sector Hidrología.	139	Tabla 28. Interpretación del índice <i>Humidex</i> .
95	Tabla 18. Matriz de contingencia para determinar la Amenaza de "inundaciones en zonas urbanas".	148	Tabla 29. Resumen Cadenas de Impacto para el Sistema Infraestructura Costera.
98	Tabla 19. Reglas para determinar los niveles de Sensibilidad.	157	Tabla 30. Resumen de Cadenas de Impacto para el Sistema Energía Eléctrica.
105	Tabla 20. Resumen de Cadenas de Impacto seleccionadas para el Sector Minería.		
113	Tabla 21. Resumen Cadenas de Impacto Sistema Turismo.		
123	Tabla 22. Resumen Cadenas de Impacto Sistema Biodiversidad.		
132	Tabla 23. Resumen de Cadenas de Impacto para el Sistema Salud y Bienestar Humano.		
135	Tabla 24. Definición del índice de Riesgo según la Amenaza, Exposición y Vulnerabilidad - Cadenas de Impacto "inundaciones", "efecto olas de calor en salud humana", "seguridad hídrica doméstica urbana" y "seguridad hídrica doméstica rural".		
135	Tabla 25. Valores de los índices y su interpretación - Cadenas de Impacto "inundaciones", "efecto olas de calor en salud humana", "seguridad hídrica doméstica urbana" y "seguridad hídrica doméstica rural".		



ÍNDICE DE ECUACIONES

Pág.	
50	Ecuación 1. Cálculo de la Exposición normalizada.
50	Ecuación 2. Cálculo de la Amenaza porcentual.
97	Ecuación 3. Vulnerabilidad media en cada periodo de tiempo: histórico y futuro.
98	Ecuación 4. Vulnerabilidad extrema en serie de 6 meses de vulnerabilidades mensuales.
98	Ecuación 5. Vulnerabilidad extrema máxima.
135	Ecuación 6. Modelo de regresión de Poisson para cálculo de muertes.
136	Ecuación 7. Estimación de la variación de casos de muerte prematura por la variación en temperaturas a causa del cambio climático.
139	Ecuación 8. Definición del índice <i>Humidex</i> .
139	Ecuación 9. Intensidad de la ICU.
140	Ecuación 10. Cálculo del efecto de la ICU, agregando el efecto del cambio climático.
149	Ecuación 11. Cálculo de Amenaza del Sistema Infraestructura Costera.
150	Ecuación 12. Cálculo de Exposición en función de la carga transmitida.
151	Ecuación 13. Cálculo de Sensibilidad en función de las horas de cierre de puertos.
160	Ecuación 14. Generación eléctrica en plantas fotovoltaicas.





1

RESUMEN EJECUTIVO

El propósito de este documento es describir el proceso de desarrollo de la Plataforma ARClim.

La Plataforma ARClim es el principal producto del proyecto ARClim (Atlas de Riesgo Climático para Chile), una iniciativa apoyada por el Programa Mundial de Evaluación y Gestión de Riesgos para la Adaptación al Cambio Climático (Pérdidas y Daños), por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ), a través de la Agencia para la Cooperación Técnica GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit). El objetivo de este proyecto es colaborar con el Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de Chile, aportando al fortalecimiento de las capacidades nacionales frente a los desafíos del cambio climático en el país.

Para llevar a cabo este importante desafío, participaron 103 investigadores y 27 instituciones especializadas en distintas áreas del cambio climático, las que fueron lideradas por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR²) y el Centro de Cambio Global UC.

El proyecto ARClim desarrolló mapas de Riesgos relacionados con el cambio climático para Chile, incorporando proyecciones climáticas históricas (periodo 1980-2010) y futuras (periodo multidecadal de 30 años, centrado en 2050, bajo un escenario de altas emisiones de gases de efecto invernadero, RCP8.5). Los mapas comunican infor-

mación sobre Amenazas, Exposición, Sensibilidad y Riesgo de los sistemas nacionales seleccionados, a nivel comunal.

En el capítulo 4, Marco Metodológico, se explica la aproximación utilizada para analizar los Riesgos asociados al cambio climático, basada en el Quinto Reporte (AR5) del Grupo de trabajo II del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (WGII-IPCC), que describe el concepto de Riesgo de Impacto del Cambio Climático (IPCC, 2014) en el Suplemento de Riesgo del Libro de Consulta sobre Vulnerabilidad (GIZ & EURAC, 2017). Se definieron 12 sistemas de estudio y se evaluó el Riesgo de cada uno de ellos frente al cambio climático, identificando un total de 55 Cadenas de Impacto (CI). El Riesgo climático evaluado representa un indicador de la magnitud del daño que se podría esperar frente a un cambio en las condiciones climáticas. En consecuencia, la estimación del Riesgo (R) requiere conocer tres elementos básicos: Exposición (E), Vulnerabilidad (V) y el cambio en el elemento climático al cual puede reaccionar, que denominamos Amenaza (A). La Vulnerabilidad, por su parte, está determinada por la Sensibilidad (S) y la Capacidad Adaptativa (CA). En términos generales, $R = f(E,V,A)$, donde f es una función definida en forma *ad-hoc* para cada sistema. Para caracterizar la A, se generaron bases de datos climáticas comunes, las que fueron un insumo para la caracterización de las CI. Para esto, se realizó un trabajo de *downscaling* estadístico de los resultados disponibles de las simulaciones globales de la iniciativa CMIP-5, llevándolos a



una resolución geográfica de alta resolución (5 x 5 km) para Chile, lo que permitió obtener hasta 25 modelos de circulación general (GCM de la sigla en inglés), que representan distintas realizaciones del clima histórico reciente (1980-2010) y futuro (2035-2065), este último bajo un escenario de cambio climático pesimista (RCP8.5).

En el capítulo 5, Plataforma ARClím, se presenta una descripción de la estructura general de la web arclim.mma.gob.cl, cuyo propósito es ser una herramienta dinámica, que debiera seguir mejorando e incorporando información de manera continua, para convertirse en una fuente que provea acceso a una amplia base de datos climáticos.

Desde la perspectiva del usuario, la plataforma cuenta con 2 secciones principales: los Mapas de Riesgo y el Explorador de Amenazas. Adicionalmente, cuenta con un repositorio de datos y una API (del inglés Application Programming Interface) que permitirá, a usuarios avanzados, la extracción de índices climáticos y la interpolación de ellos a unidades geográficas relevantes.

En el capítulo 6, Sistemas Abordados, se presenta una descripción resumida de las Cadenas de Impacto y los sistemas caracterizados en la plataforma ARClím. Esta sección representa la integración y síntesis de la investigación desarrollada por los 14 grupos de trabajo (GT) que aportaron en este proyecto. Este capítulo cuenta, además, con una sección por cada sistema, presentando la metodología utilizada para cada Cadena de Impacto, algunos ejemplos de los resultados obtenidos y las principales conclusiones del análisis sectorial.

En el capítulo 7, Síntesis de Desafíos, se presenta un análisis crítico del trabajo realizado, identificando desafíos y oportunidades futuras. Dado que la caracterización de los Riesgos asociados al cambio climático es un trabajo continuo, considerando la existencia de múltiples Riesgos de distintas tipologías, la sofisticación en la modelación de muchos de ellos y que la información disponible varía continuamente y debe actualizarse, existe espacio para robustecer la plataforma ARClím. En términos generales, se recomienda avanzar en:

- > Extender el análisis agregando nuevas Cadenas de Impacto.
- > Realizar un análisis integrado de los Riesgos evaluando las interacciones de distintas Amenazas climáticas y el Riesgo agregado para sistemas y/o territorios específicos.
- > Mejorar la información disponible para realizar análisis de Riesgos asociados al cambio climático.
- > Mejorar los análisis y herramientas utilizadas, esto puede ser mediante mejoras en la precisión, resolución y análisis de las incertidumbres de las Cadenas de Impacto analizadas.
- > Avanzar en la caracterización de las acciones de adaptación y su impacto en la disminución de los Riesgos asociados al cambio climático.
- > Evaluar la efectividad de medidas/acciones de adaptación para disminuir el Riesgo climático, con el objetivo de incorporar la Capacidad Adaptativa al análisis, y aportar a la generación de estrategias nacionales, territoriales y sectoriales de adaptación al cambio climático.

Por último, en el capítulo 8, se presentan las principales conclusiones del trabajo. Lo realizado permite ver que los impactos del cambio climático para el país son principalmente negativos, en especial para algunas comunas, pero también es posible ver que existen algunas oportunidades. Para que esas oportunidades se conviertan en realidad, se requiere realizar acciones de adaptación al cambio climático (por ejemplo, en el sistema Agricultura). La plataforma ARClím puede ser un insumo relevante para las capacidades nacionales, territoriales y sectoriales de adaptación al cambio climático, pero en ningún caso representan la evaluación final de la Vulnerabilidad y el Riesgo climático. La plataforma ARClím es un primer paso y un hito significativo para mejorar la comprensión de los desafíos del cambio climático y, así, facilitar la construcción de estrategias de adaptación a escala nacional, local y sectorial, sin embargo no representa una evaluación final de los Riesgos climáticos para Chile.

ARClím está construida como una herramienta diseñada para crecer, complementarse con más información y refinarse en el tiempo.



2

INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN

El Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania, por medio de la agencia GIZ, decidió colaborar con el Gobierno de Chile, en particular con su Ministerio de Medio Ambiente, para fortalecer sus capacidades nacionales en el marco de los desafíos del cambio climático. Para este propósito financió el presente trabajo de generación de mapas de Riesgos de distintos sectores frente al cambio climático en Chile.

Este proyecto se alinea con las políticas impulsadas por el Gobierno de Chile, dado que la preocupación nacional por el cambio climático se ha incrementado sostenidamente, a la par con las tendencias internacionales, desde la aprobación del Plan de Acción Nacional de Cambio Climático (PANCC) 2008-2012, que por primera vez articuló la acción del sector público para enfrentar este fenómeno, estableciendo las líneas de acción principales para la adaptación, mitigación, creación y fomento de capacidades del país.

A su vez, el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, aprobado en 2014 por el Consejo de Ministros para la Sustentabilidad, ha servido como herramienta para guiar la acción nacional en materia de adaptación, definiendo los sectores vulnerables que requieren un plan de adaptación al cambio climático específico. Los objetivos de este plan son:

a) Establecer el marco conceptual para la adaptación en Chile.

- b)** Establecer el marco institucional bajo el cual operará el Plan Nacional de Adaptación y los planes sectoriales.
- c)** Establecer y actualizar los sectores que requieren planes de adaptación y establecer los criterios y lineamientos para su elaboración e implementación.

Bajo el tercer objetivo de dicho Plan, se han establecido nueve sectores vulnerables:

- > Silvoagropecuario
- > Biodiversidad
- > Pesca y acuicultura
- > Salud
- > Ciudades
- > Infraestructura
- > Energía
- > Turismo
- > Recursos hídricos

A la fecha, están vigentes los siguientes planes sectoriales:

- > Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (Oficina de Cambio Climático, 2014).
- > Plan de Adaptación al Cambio Climático Sector Silvoagropecuario (Ministerio de Agricultura & Ministerio del Medio Ambiente, 2013).
- > Plan de Adaptación al Cambio Climático Sector Biodiversidad (Ministerio del Medio Ambiente, 2014).

- > Plan de Adaptación al Cambio Climático para Pesca y Acuicultura (Ministerio de Economía Fomento y Turismo & Ministerio del Medio Ambiente, 2015).
- > Plan de Adaptación al Cambio Climático Sector Salud (Ministerio de Salud & Ministerio del Medio Ambiente, 2016).
- > Plan de Acción de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático 2017-2022 (Ministerio de Obras Públicas & Ministerio del Medio Ambiente, 2017).
- > Plan de Adaptación al Cambio Climático para Ciudades (Ministerio del Medio Ambiente & Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2018).
- > Plan de Adaptación al Cambio Climático del sector Turismo (Ministerio del Medio Ambiente, 2019).

Actualmente, se encuentra en elaboración el Plan de Adaptación Sectorial para Recursos Hídricos. Y en proceso de actualización está el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, junto con los planes de los sectores Silvoagropecuario, Energía y Biodiversidad.

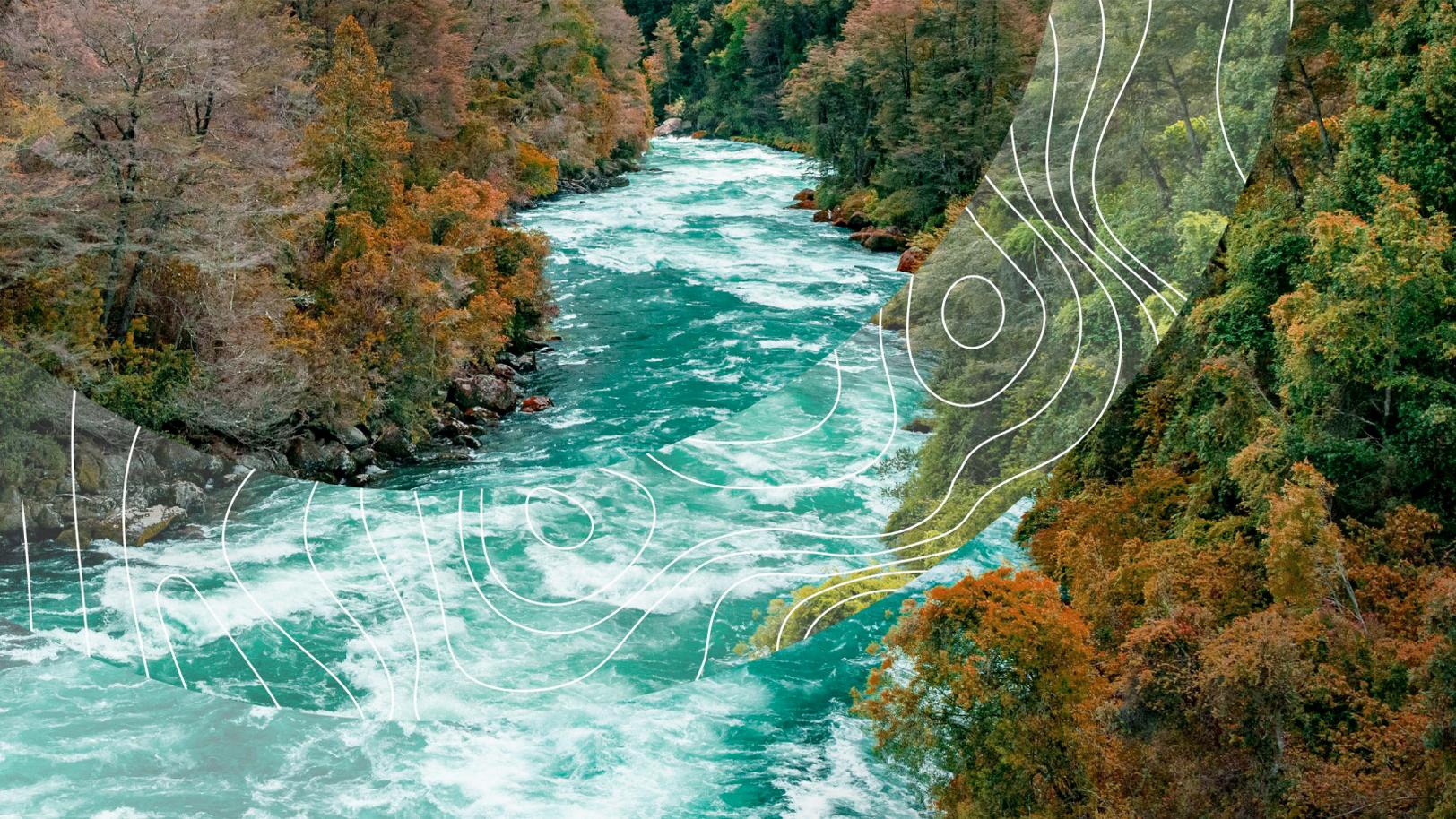
En esta misma línea, la Contribución Nacional de Chile (NDC) ante el Acuerdo de París 2015, incorporó acciones específicas en el ámbito de la adaptación, comprometiendo la elaboración y/o actualización de los planes de adaptación sectoriales ante sus pares internacionales.

Por otra parte, el Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022 (PANCCII), instrumento articulador de la política pública de cambio climático, es una actualización al documento de 2008-2012 y contiene cuatro ejes: i) mitigación, ii) adaptación, iii) medios de implementación y iv) gestión del cambio climático a nivel regional y local. Específicamente, en el eje de adaptación, se estableció como objetivo general “fortalecer la capacidad de Chile para adaptarse al cambio climático, profundizando los conocimientos de sus impactos y de la Vulnerabilidad del país, generando acciones planificadas que permitan minimizar los efectos negativos y aprovechar los efectos positivos para su desarrollo económico y social, asegurando su sustentabilidad y velando por conservar su patrimonio natural y cultural”. Este proyecto busca abordar este objetivo, fortaleciendo las capacidades nacionales e institucionales para adaptarse al cambio climático.

Es así que el eje de adaptación del PANCC 2017-2022 propone, entre sus objetivos específicos, “evaluar periódicamente la Vulnerabilidad de sistemas humanos y naturales frente a los impactos del cambio climático, estableciendo los Riesgos y oportunidades que presenta este fenómeno” a fin de mejorar y actualizar la información existente y disponerla públicamente para la toma de decisiones a nivel regional, comunal y local. En esa línea, este proyecto busca aportar al cumplimiento de algunas de las medidas establecidas en el PANCC 2017-2022, tales como:

- > **Medida MA4:** Evaluar los Riesgos de sistemas naturales y humanos frente a los impactos del cambio climático, que permitan priorizar las áreas y sectores críticos para ser incorporados oportunamente en la planificación.
- > **Medida MA5:** Generar y actualizar mapas de Vulnerabilidad en el territorio nacional.

La actual Contribución Determinada a Nivel Nacional de Chile (NDC), suscrita el 2020 por el Gobierno de Chile, establece el compromiso de elaborar una plataforma de mapas de Riesgos climáticos para Chile continental, a nivel comunal. Esta información complementaría el capítulo de Vulnerabilidad y adaptación de la Cuarta Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas (año 2020). Bajo el presente estudio se generaron índices de Vulnerabilidad y Riesgo frente al cambio climático, considerando las proyecciones futuras para el clima del país y los sistemas naturales y humanos expuestos. Esta información se presenta en formato de mapas, que permiten una visualización más interactiva y amigable para el acceso de toda la ciudadanía.



3

OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar mapas de Riesgos relacionados con el cambio climático para Chile, incorporando proyecciones climáticas históricas (periodo 1980-2010) y futuras (periodo multidecadal de 30 años centrado en 2050), este último bajo un escenario de altas emisiones de gases con efecto invernadero (RCP8.5). Los mapas comunicarán información sobre las Amenazas climáticas, la Exposición, la Sensibilidad y el Riesgo de los sistemas seleccionados a nivel comunal, principalmente. Los mapas estarán presentes en una plataforma web que permitirá una visualización dinámica y una descarga de datos, convirtiéndose así en una herramienta importante para el diseño de políticas públicas y de implementación de medidas de adaptación a estos cambios.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos de este Informe son:

1. Realizar un inventario de información y sistematización de la información existente en Chile, considerando impactos, Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, particularmente aquellos a escala comunal.
2. Analizar los impactos del cambio climático concurrente y futuro para sistemas humanos, naturales y sectores económicos de interés seleccionados, en base a las

proyecciones climáticas, modelos numéricos e información disponible para el país.

3. Desarrollar un conjunto de datos hidrometeorológicos diarios de alta resolución (5 km) adecuado para la evaluación de peligros y para el cálculo potencial de Riesgos relacionados con el clima.
4. Desarrollar indicadores de Exposición y Vulnerabilidad basados en sus componentes (Sensibilidad y capacidad de adaptación), y un índice de Riesgo para sistemas predefinidos.
5. Preparar mapas basados en los resultados de los objetivos específicos 3 y 4.
6. Desarrollar una plataforma flexible, dispuesta en la web, abierta al público, que permita visualizar los mapas generados o que se generen en el futuro, que facilite la descarga de sus datos de una manera amigable e interactiva, y que su información básica sobre Vulnerabilidad y adaptación pueda ser utilizada por diferentes grupos de interés.
7. Realizar un análisis crítico de los resultados obtenidos en el proyecto, asociado a los objetivos 1, 2, 3, 4, 5 y 6, enfocado en la calidad y el alcance de su información.

Esta iniciativa contempla mucho material adicional, que puede ser descargado en la plataforma del proyecto ARCLIM (arclim.mma.gob.cl).



4

MARCO METODOLÓGICO

4.1 METODOLOGÍA GENERAL

En esta sección se describen los aspectos metodológicos empleados en el proyecto Atlas de Riesgo Climático (AR-Clim), los que dan soporte a la información y datos, especialmente explícitos, que se presentan en la plataforma web de este proyecto.

Es conveniente recordar que este proyecto es motivado por la necesidad de contar con una plataforma integrada y dinámica, que reúna información para evaluar el riesgo frente al cambio climático –con cobertura nacional y resolución comunal– de acuerdo a las proyecciones climáticas futuras, y que sirva de herramienta para el diseño de políticas e implementación de medidas de adaptación a este cambio. Finalmente, se espera que la información dispuesta en la plataforma sea actualizada y refinada en forma periódica.

4.1.1 RIESGOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El proyecto se abordó en base al Quinto Reporte (AR5) del Grupo de Trabajo II del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (WGII-IPCC), el cual emplea el concepto de **Riesgo de Impacto del Cambio Climático** (IPCC, 2014). Este elemento fundamental, originalmente empleado por las comunidades en torno a la reducción de Riesgo frente a desastres, cambia el foco empleado previamente por el WGII-IPCC (en especial en el AR4) que se centraba en el concepto de Vulnerabilidad climática. Este cambio de paradigma ha generado confusiones entre los investigadores y profesionales trabajando en este tema. Una excelente discusión sobre las diferencias metodológicas entre ambos conceptos (Riesgo *versus* Vulnerabilidad) se presenta en y en el **Suplemento de Riesgo del Libro de consulta sobre Vulnerabilidad** (GIZ and EURAC 2017), lo que se aprecia en la **Figura 1**.

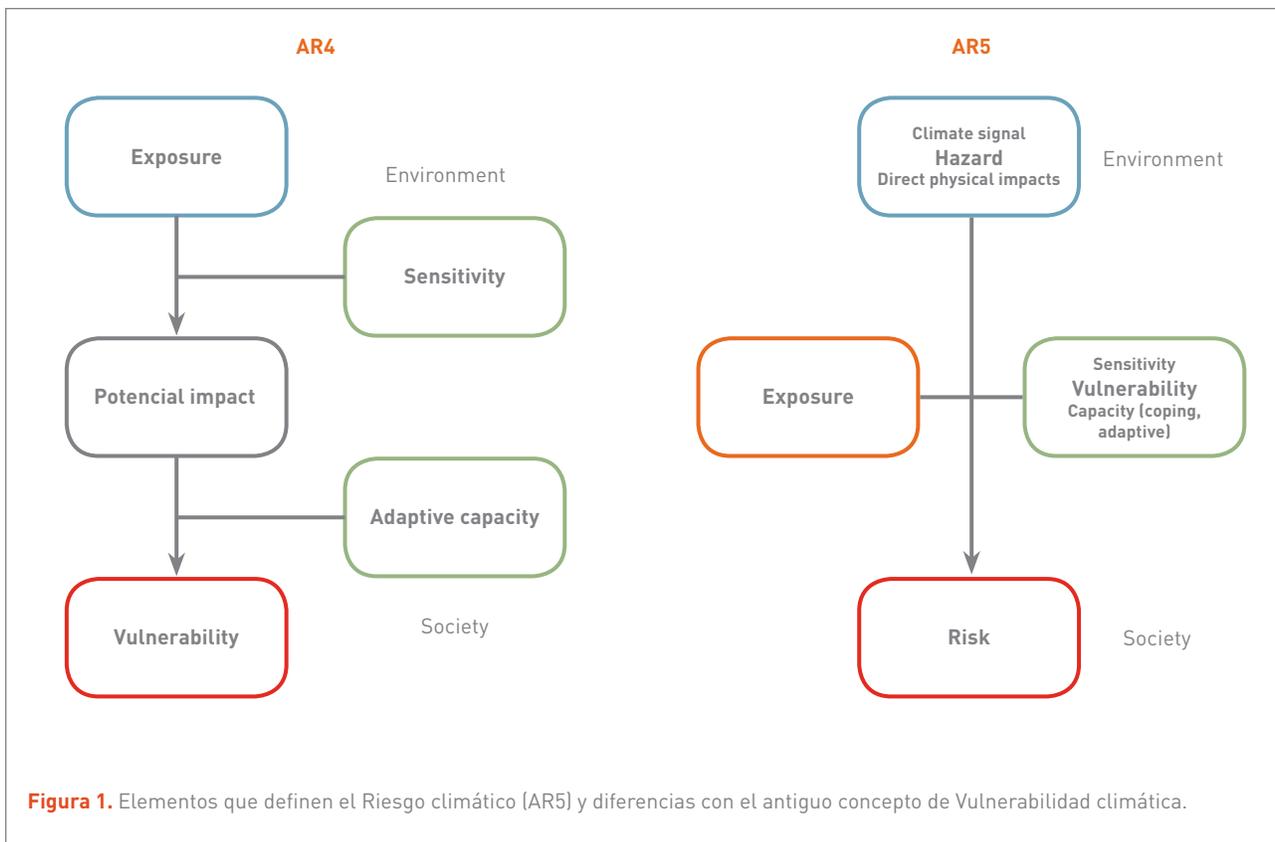


Figura 1. Elementos que definen el Riesgo climático (AR5) y diferencias con el antiguo concepto de Vulnerabilidad climática.

Fuente: GIZ and EURAC (2017).

La evaluación del Riesgo al cambio climático se realizó en forma individual para sistemas ambientales, como bosques nativos o humedales; sectores productivos, como turismo o minería; o grupos humanos, cómo es la población viviendo bajo cierta cota de inundación, por ejemplo. En forma genérica se llama “sistemas” a los elementos anteriores. Una vez definido un sistema, el Riesgo climático es un indicador de la magnitud del daño que podría experimentar ese sistema frente a un cambio en las condiciones climáticas. En consecuencia, la estimación del Riesgo (R), para un sistema o para el nivel nacional, requiere conocer tres elementos básicos: su Exposición (E), su Vulnerabilidad (V) y el cambio en el elemento climático al cual puede reaccionar, al que denominaremos Amenaza (A). La Vulnerabilidad, en tanto, está determinada por la Sensibilidad (S) y la Capacidad Adaptativa (CA), que podría expresarse como $V=S/CA$. En términos generales, $R = f(E,V,A)$, donde f es una función definida en forma ad-hoc para cada sistema. Una posible expresión para la función f es emplear el producto de los tres elementos ($R = E \times A \times V$), que asegura que el Riesgo es cero, si cualquiera de los elementos bá-

sicos es nulo, y que R aumenta conforme cualquiera de los elementos básicos lo hace.

Más adelante se hará explícito los conceptos A, E y V pero, para ilustrar cómo ellos se conjugan para determinar el Riesgo, consideramos un caso muy simple en que estos elementos varían en una sola dimensión espacial, por ejemplo, a lo largo de una línea norte-sur que cubre el país. En estos ejemplos suponemos que no existe capacidad adaptativa, de manera que la Sensibilidad es el único elemento que determina la Vulnerabilidad ($V=S$). El panel izquierdo de la **Figura 2** muestra el caso en que la Sensibilidad es uniforme a lo largo de todo el país, la Exposición es máxima en la zona norte y la Amenaza climática es máxima en la zona central. En ese caso el Riesgo se maximiza en la zona centro-norte, a medio camino entre el máximo de E y A. En el panel derecho de la **Figura 2** consideramos perfiles similares de E y A como en el caso anterior, pero hemos supuesto que la Sensibilidad es máxima en la zona norte, aumentando entonces el Riesgo en esa zona comparación con el caso anterior.



4.1.2 COMPONENTES DEL RIESGO CLIMÁTICO

Los elementos básicos que deben evaluarse para estimar el Riesgo climático son la Exposición, la Vulnerabilidad y la Amenaza, cuyas definiciones se presentan a continuación (tomadas de GIZ & EURAC, 2017; IPCC, 2014):

Exposición: Es la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios y recursos ambientales, infraestructura, o activos económicos, sociales o culturales, en lugares que podrían verse afectados negativamente.

Vulnerabilidad: Es la propensión o predisposición a verse afectado negativamente. La Vulnerabilidad se compone de la Sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad para responder y adaptarse.

Sensibilidad: Es determinada por todos los factores no climáticos que afectan directamente las consecuencias de un evento climático. Lo anterior incluye atributos físicos (como, por ejemplo, el material de construcción de las viviendas, el tipo de suelo agrícola); y sociales, económicos y culturales (como la estructura demográfica) del sistema.

Capacidad Adaptativa: Es la capacidad de las personas, instituciones, organizaciones y sistemas para enfrentar, gestionar y superar condiciones adversas en el corto y mediano plazo, utilizando las habilidades, valores, creencias, recursos y oportunidades disponibles.

Amenaza: Corresponde a una condición climática cuya potencial ocurrencia puede resultar en pérdidas de vidas, accidentes y otros impactos en salud, como también en pérdidas de propiedad, infraestructura, medios de subsistencia, provisión de servicios, ecosistemas y recursos medio ambientales.

Riesgo climático: Es la probabilidad e intensidad esperada de impactos negativos sobre un territorio, los sistemas sociales y comunidades humanas que lo habitan, que resulta de sucesos o tendencias de naturaleza climática.

En general los impactos del cambio climático son adversos para los sistemas en cuestión, pero hemos detectado algunas situaciones en que el nuevo contexto climático puede producir impactos positivos, como mejorar las condiciones de crecimiento de cierto tipo de frutales o disminuir las pérdidas de vidas humanas por heladas. En este caso el Riesgo resulta negativo y en este proyecto lo llamaremos “oportunidad”.

4.1.3 CADENAS DE IMPACTO (CI)

Las definiciones anteriores son estándar. Estimar cada uno de esos elementos no asegura obtener una representación adecuada de los Riesgos al cambio climático. Siguiendo las recomendaciones metodológicas de GIZ 2017, este proyecto ha hecho uso intensivo de las Cadenas de Impacto que representan un hilo conductor, uniendo los diferentes elementos básicos y terminando en la representación del Riesgo.

Las CI empleadas en la presente versión de ARCLIM fueron construidas siguiendo el esquema representado en la **Figura 3**.

i. Los sistemas (naturales, humanos o productivos) que se consideraron son complejos y, en algunos casos, susceptibles de ser desagregados en subsistemas. Por ejemplo, el sector forestal se dividió en bosque nativo y plantaciones forestales. Los asentamientos humanos se dividieron en zonas urbanas y población rural. En general, se conoce adecuadamente la Exposición de estos subsistemas en la condición actual.

ii. Para cada sistema o subsistema se identificaron y explicitaron los diversos impactos adversos que una Ame-

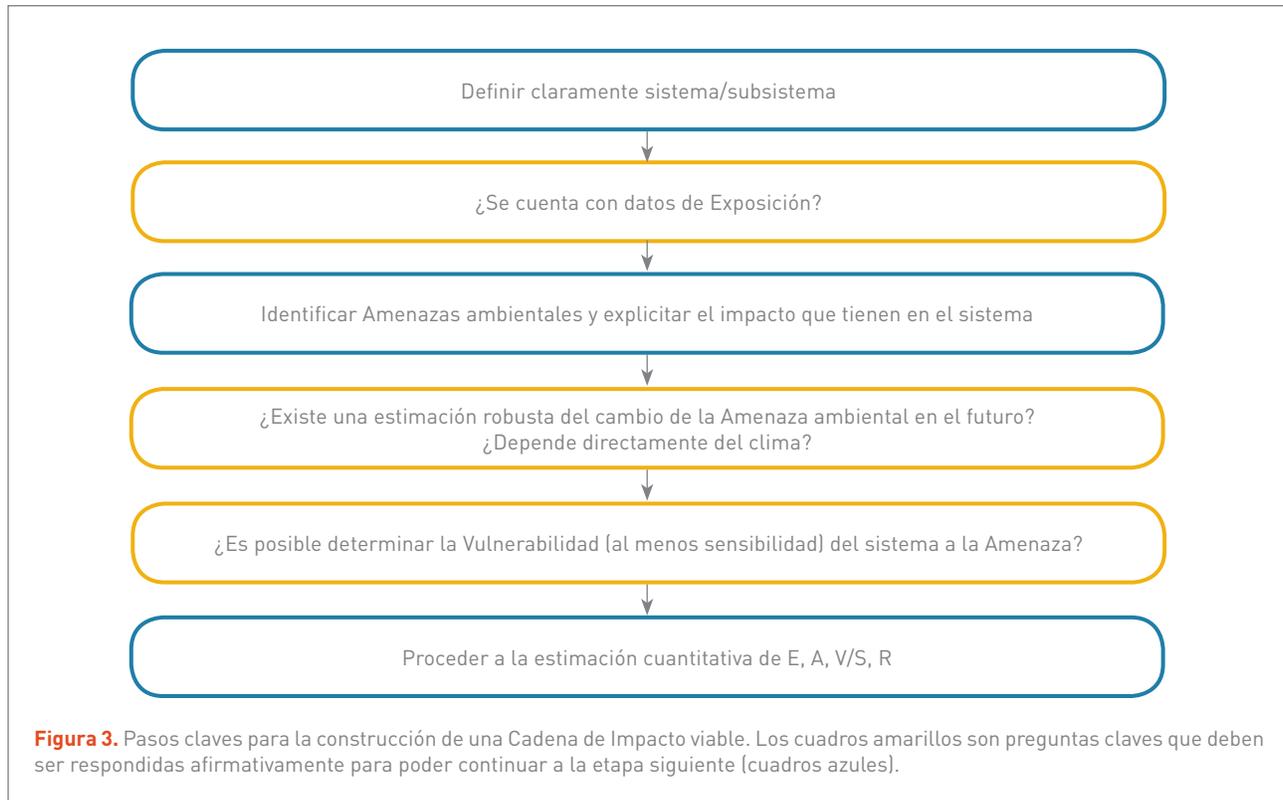
naza climática o ambiental podría producir. Por ejemplo, la población humana podría experimentar problemas de morbilidad y mortalidad. Un bosque podría experimentar mayores incendios o disminuir su crecimiento. Esta identificación de impactos fue realizada por los expertos en cada sistema, incluyendo consultas entre organismos técnicos y operativos.

iii. En forma paralela al punto anterior, para cada combinación de sistema e impacto/sistema es necesario identificar la Amenaza climática específica, es decir, los elementos del clima cuyo cambio puede resultar en la concreción del impacto. En algunos casos la Amenaza es producto de un solo elemento, como la disminución de la precipitación, y en otros casos es combinado (por ejemplo, en agricultura) influyen tanto los cambios de precipitación como de temperatura.

Reconociendo que un sistema puede sufrir diversos impactos asociados a distintas Amenazas, se privilegiaron las cadenas más relevantes (impactos sustanciales) que fueron posibles evaluar con la información disponible. La evaluación requirió desarrollar una relación cuantitativa o semi cuantitativa que vinculó el cambio de los factores climáticos con el nivel de impacto esperado. Este eslabón es precisamente la Vulnerabilidad (que en la mayoría de los casos se reduce a Sensibilidad) y uno de los aspectos más difíciles de evaluar. En algunos casos, se recurrió a la experiencia empírica y cuantitativa en base a estudios en Chile o el extranjero y, en otros, a una relación más cualitativa en base a entrevistas a expertos y metálogos¹. En las aproximaciones cualitativas también fue posible caracterizar la capacidad adaptativa, en elementos de respuesta y de adaptación.

Otro elemento que se consideró para discernir la viabilidad de una Cadena de Impacto fue la disponibilidad y robustez de la información climática para cuantificar la Amenaza. En base a los modelos numéricos del clima, los cambios en el futuro de los valores medios de precipitación y temperatura son bien representados, pero los cambios de los valores

¹ <http://www.fao.org/3/i3356s/i3356s.pdf>



extremos son menos confiables y los cambios en ciertas variables ambientales, por ejemplo oxígeno disuelto en el océano cerca de la costa, son pobremente conocidos.

4.1.4 CONSIDERACIONES RESPECTO A LA AMENAZA

Para evaluar el Riesgo en diversos sistemas frente al cambio climático se consideró la diferencia entre el clima del futuro intermedio (condiciones medias en las décadas centradas en el año 2050) y el clima histórico reciente (1980-2010). El clima futuro supone el escenario de emisiones RCP8.5, en el cual la humanidad no ha implementado medidas de mitigación importantes de las emisiones, y las concentraciones de CO₂ se han incrementado de manera significativa (unas 550 ppm al 2050 contra las 400 ppm actuales).

La proyecciones del clima están sujetas a múltiples fuentes de incertidumbre. Para abordar este desafío se utilizaron múltiples Modelos de Circulación General de la

atmosfera (GCM de la sigla en inglés). Para caracterizar las condiciones del clima histórico reciente y futuro se consideró el promedio entre 25 simulaciones en base a GCMs (ver detalles en sección 4.2). Los resultados de los modelos fueron, además, escalados (*downscaling*) y corregidos, empleando un método estadístico, para que en el presente no tengan sesgo respecto al clima observado referenciado con CR2Met. Los detalles de este proceso de modelación, escalamiento y corrección son presentados en la sección 4.2.

Ejemplos de Amenazas individuales empleadas en este proyecto son el cambio en la precipitación anual, el número de olas de calor durante el verano y la duración promedio de la cubierta de nieve. En algunos casos, como en los Sistema Biodiversidad y Agricultura, la Amenaza corresponde al compuesto de todos los factores climáticos, porque ellos son empleados como entrada para modelar el sistema en cuestión.

Además de los cambios climáticos simulados por modelos de la atmósfera, el proyecto ARCLim contó con resultados

de simulaciones basadas en modelos numéricos de otras componentes del sistema terrestre (hidrosfera y océano). En el caso de la modelación de hidrología, se consideró un conjunto de 4 GCMs, que entregaron las forzantes del modelo hidrológico VIC permitió estimar los caudales (a nivel diario y mensual), en el presente y en el futuro intermedio, para un conjunto de 116 cuencas a nivel nacional. Los detalles de las simulaciones VIC –originalmente desarrolladas para el Balance Hídrico Nacional– están descritos en la sección 6.5. Por otro lado, la principal Amenaza para sistemas emplazados en zonas costeras –como el caso de puertos y asentamientos humanos– corresponde al aumento en el nivel del mar y oleaje extremo. Estas variables fueron obtenidas de modelos de simulación oceánica descritos en detalle en la sección 6.11. Estas condiciones, alteradas de hidrología y océano, se asocian directamente al cambio climático, pero se han obtenido de modelos *ad-hoc* forzados por condiciones atmosféricas del futuro (y su contraparte en el clima actual).

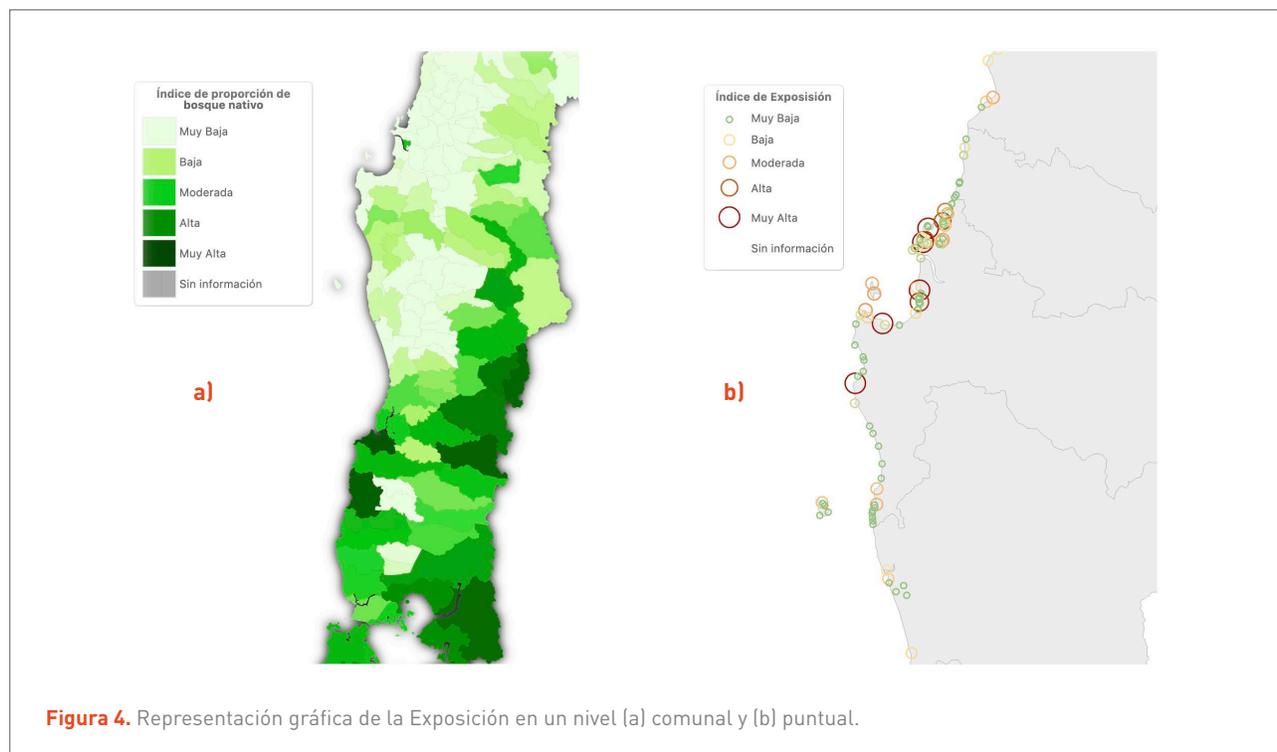
Existen otras Amenazas ambientales, vinculadas al clima de manera indirecta, que no fueron posibles de evaluar en el contexto de ARCLim, imposibilitando completar al-

gunas Cadenas de Impactos propuestas inicialmente. Por ejemplo, la “salud” de los bosques y plantaciones se ve afectada por diversas pestes que afectan a los árboles. La recurrencia de estas pestes parece estar vinculada a ciertas condiciones meteorológicas, pero predecir su comportamiento en el clima futuro es altamente incierto. Un caso similar ocurre con los florecimientos de algas nocivas (marea roja) y la proliferación del “piojo de mar” (*sea-lice*), dos de las mayores Amenazas para la acuicultura en el sur de Chile.

4.1.5 CONSIDERACIONES RESPECTO A LA EXPOSICIÓN

Para evaluar el impacto del cambio climático, se emplean condiciones futuras del clima (o diferencia con la condición histórica reciente).

Para caracterizar la Exposición se requiere saber cómo se distribuye el objeto de estudio en el territorio, una métrica del tamaño del sistema en una cierta unidad del territorio, la cual depende de cada cadena y sector. Para



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



la mayoría de los sistemas se utilizó una escala comunal para caracterizar la Exposición. Por ejemplo, en el caso de las Plantaciones Forestales, la Exposición es la superficie (en km² o hectáreas) comunal cubierta por este tipo de paisaje (**Figura 4a**).

Existen varios sistemas que son altamente concentrados espacialmente, ocupando una superficie minúscula al compararla con una comuna, como los puertos o centrales hidroeléctricas. En estos casos se optó por representar directamente esos sistemas, en el mapa de cobertura nacional, mediante un símbolo ubicado en su posición geográfica. El tamaño del símbolo, a su vez, es proporcional al tamaño (Exposición) del sistema presente en ese lugar (**Figura 4b**).

4.1.6 CONSIDERACIONES RESPECTO A VULNERABILIDAD

El valor actual de la Vulnerabilidad está mayormente determinado por la Sensibilidad del sistema al cambio de la condición climática (o su promedio en el futuro). Buena parte de esta Sensibilidad obedece a aspectos biofísicos y/o humanos –independientes del clima– que determinan el nivel de impacto que el cambio climático produciría en una determinada unidad territorial. Un ejemplo permite entender mejor este concepto: consideremos dos comunas con una cantidad comparable de población, es decir, con similar Exposición, las cuales se verán afectadas por un aumento de las olas de calor durante verano, generando así un impacto negativo en la salud de las personas. Se ha mostrado que el impacto es mayor sobre adultos mayores con enfermedades cardíacas, por lo que un posible indicador de la Sensibilidad es precisamente la fracción de la población comunal con esa condición, la cual podría variar significativamente entre las comunas.

La estimación de la Sensibilidad es compleja y depende del sistema/Amenaza en cuestión. Su estimación, para este proyecto, se realizó en base a la experiencia empírica y cuantitativa (estudios en Chile o el extranjero) y, en otros casos, a una relación más cualitativa en base a entrevistas a expertos y metálogos.

Cuando un sistema (o parte de este) cuenta con una mayor capacidad adaptativa, permite reducir su Vulnerabilidad, porque existen elementos que le permiten tener una buena respuesta frente a un impacto (capacidad de respuesta) y/o que le permiten adaptarse frente a una nueva condición (capacidad de adaptación). Esto puede darse para un municipio que cuenta con mejores elementos de gestión, por ejemplo. Además, como el cambio climático ha estado ocurriendo en forma marcada durante las últimas décadas, en algunos sistemas ya se han implementado ciertas medidas de adaptación, reduciendo la Vulnerabilidad para disminuir el impacto esperado. Regresando al ejemplo del impacto en salud humana sobre los habitantes, el seguimiento y aumento de las prestaciones de salud para los grupos de mayor Riesgo es un ejemplo de Capacidad Adaptativa que reduce la Vulnerabilidad. Sin embargo, la Capacidad Adaptativa, actualmente implementada, varía entre comunas (u otras unidades territoriales) y es difícil de cuantificar. Cada grupo de trabajo (encargado de un sistema/cadena) explicitó si su análisis consideró o no la Capacidad Adaptativa actual. En los casos específicos del impacto de olas de calor y sequías en mortalidad/morbilidad humana, se agregó además un “mapa de resiliencia”, que ofrece una aproximación a la capacidad de distintos asentamientos humanos para responder y adaptarse a las Amenazas climáticas a las que están expuestos.

Por otro lado, ARCLIM no consideró el efecto que la implementación de las estrategias adaptativas que podrían tener en el futuro. En este sentido, ARCLIM evaluó el Riesgo sin medidas de adaptación futuras, precisamente para relevar las zonas/sistemas en mayor Riesgo.

4.1.7 ESQUEMA DE TRABAJO EN ARCLIM

Este proyecto contempló el análisis de 12 sistemas, cada uno de los cuales puede tener varios subsistemas. Estos fueron abordados por 14 grupos de trabajo (GT) con amplia experiencia en estos sistemas (**Figura 5**), para cada uno de los cuales se caracterizaron un total de 55 Cadenas de Impacto, las cuales se presentan en detalle en la sección 6. Cabe recalcar que algunos sistemas fueron abordados por múltiples GTs (hasta 4) y algunos

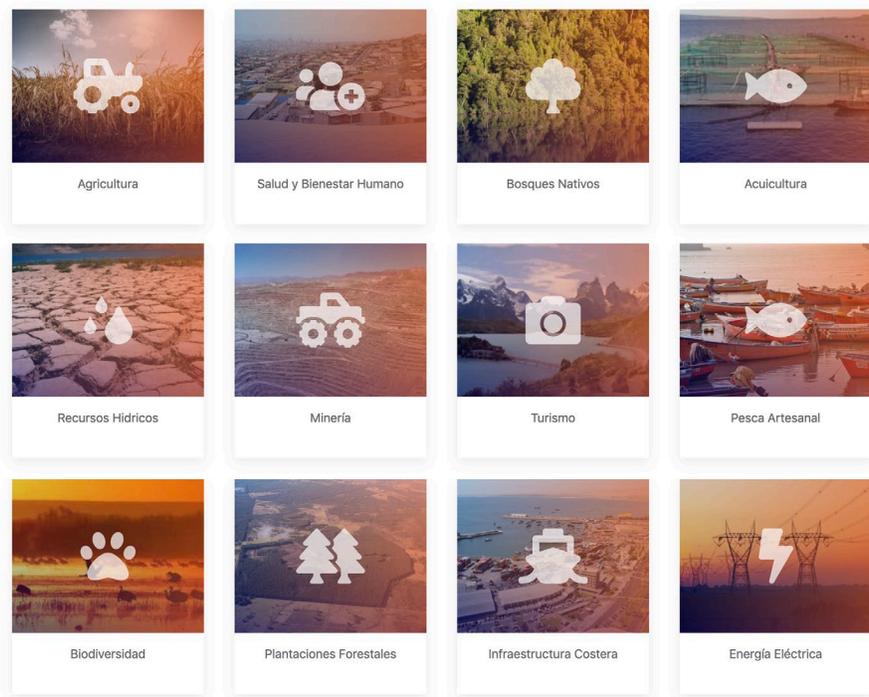


Figura 5. Diversos sistemas considerados en ARClím.

Fuente: Plataforma ARClím (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

GT contribuyeron a varios sistemas. Cada GT siguió la guía metodológica general (GIZ & EURAC, 2017; IPCC, 2014), aunque adaptada a su sistema en particular, con el fin de proveer valores numéricos o cualitativos de los elementos basales (E,V/S,A) y el nivel de Riesgo (R) con cobertura nacional y resolución comunal. En algunos sistemas la unidad territorial es diferente, como es el caso de Infraestructura costera, que se explica en la sección 6.11. Las CI desarrolladas por cada GT se presentan en la sección 6.

Los datos generados para cada sistema fueron desplegados en la página web de ARClím, en forma de mapas nacionales, usando una escala de colores asociada a los niveles de E, V, A y R. La página web permite, además, acceder a los valores numéricos/cualitativos de cada índice en las unidades territoriales (comunas o similar) y una descarga masiva de esa información, como se describe en la sección 5.

Tan importante como los datos que son desplegados en la web es la metadata y la descripción de la metodología

específica de cada GT. Por ejemplo, la generación de los índices básicos (A, E, V) para estimar el Riesgo requiere, en la mayoría de los casos, de la combinación de una serie de atributos (espaciales o puntuales) cuyos valores y combinatorias están disponibles en ARClím. Este esquema, modular y transparente, permite que los resultados en ARClím sean completamente trazables y reproducibles por terceras partes, como también puedan ser actualizados y refinados conforme a más información disponible.

4.2 GENERACIÓN DE BASES DE DATOS CLIMÁTICOS

4.2.1 INTRODUCCIÓN

Esta sección contiene una descripción de la base de datos de información climática desarrollada para el Atlas de Riesgos Climáticos de Chile. Los datos climáticos son un



componente fundamental del proyecto, ya que se requieren para el cálculo de la mayoría de las Amenazas climáticas incluidas en el Atlas. Los datos climáticos se obtienen a partir de los resultados de las simulaciones globales de la iniciativa CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5²) que se realizó en el marco del quinto reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) descrito en (Stocker *et al.*, 2013). Dicha iniciativa involucró a más de treinta grupos de investigación que ejecutaron modelos globales (GCM) para simular el impacto de las emisiones de los gases del efecto invernadero durante el siglo XXI bajo diferentes escenarios de desarrollo (Representative Concentration Pathways RCP) y para evaluar los mecanismos responsables e incertidumbres en las predicciones. Una descripción de las simulaciones de CMIP-5 se encuentra en “A Summary of the CMIP5 Experiment Design” (Taylor *et al.*, 2009) y en “An Overview of CMIP5 and the Experiment Design”(Taylor *et al.*, 2012).

Los datos de los modelos de CMIP-5 fueron compilados por investigadores del CR² y almacenados en servidores de la Universidad de Chile. Para fines del presente proyecto, se utilizaron los resultados de los GCM para un periodo de 100 años (1970 a 2070), con un intervalo de tiempo diario. Dado que los modelos globales de CMIP-5 no tienen una resolución espacial suficientemente fina para representar correctamente los patrones espaciales de las variables atmosféricas de interés, se aplicaron técnicas de reducción de escala del tipo estadístico (*statistical downscaling*, en inglés) para generar una base de datos de alta resolución (5x5 km para Chile).

4.2.2 METODOLOGÍA

4.2.2.1 PERIODOS

La base de datos climática considera un periodo total de 100 años centrado en el año 2020, es decir, el periodo desde el año 1970 hasta al año 2070. Dentro de este periodo hay ciertos intervalos específicos que se usan para generar productos representativos del clima actual y futuro (**Tabla 1**). El periodo denominado “histórico reciente” se extiende desde 1980 a 2010, y sirve como referencia para calcular los cambios futuros. Sólo hay un periodo para representar el futuro (2035 a 2065), que utiliza el escenario de emisiones RCP8.5, y que es el escenario que supone la mayor tasa de emisiones hacia el futuro (en otras palabras, la más pesimista).

El periodo denominado “referencia” es el que se utiliza para desarrollar los modelos estadísticos de escalamiento y se define de tal manera que incluye todos los años en que se disponen observaciones meteorológicas locales de buena calidad.

El calendario empleado para la base de datos es un calendario idealizado, en que todos los años tienen 365 días, es decir, un calendario sin años bisiestos.

4.2.2.2 VARIABLES

En la **Tabla 2** se muestran las variables atmosféricas incluidas en la base de datos climática. Los datos de estas variables se guardan en intervalos diarios para el periodo completo (1970-2070) y para cada GCM disponible.

Periodo	Años (inclusivo)	Escenarios de emisiones
Referencia	1979-2018	Historico + RCP8.5 ³
Histórico reciente	1980-2009	Historico + RCP8.5
Futuro	2035-2064	RCP8.5

Tabla 1. Periodos de tiempo considerados en la base de datos climáticos.

² <http://https://cmip.lnl.gov/cmip5/>

³ Desde el año 2005 se usan resultados de simulaciones forzadas con emisiones del RCP85.



Código Variable	Descripción	Unidades	Número GCM	Número corridas
Variables básicas				
pr	Precipitación diaria	mm/día	34	67
tasmax	Temperatura máxima diaria	°C	32	60
tasmin	Temperatura mínima diaria	°C	32	60
ps	Presión en superficie	hPa	34	67
uas	Velocidad zonal	m/s	25	29
vas	Velocidad meridional	m/s	25	29
rsds	Radiación global horizontal	W/m2	29	34
huss	Humedad específica	g/kg	10	10
Variables derivadas				
tas	Temperatura media diaria (calculada como el promedio de la temperatura máxima y mínima)	°C	32	60
rain	Precipitación líquida, calculada como la precipitación acumulada (pr) en los días de temperatura media mayor a 0 °C	mm/día	32	58
snow	Precipitación sólida (agua equivalente), calculada como la precipitación acumulada (pr) en los días de temperatura media igual o menor a 0 °C	mm/día	32	58
vel	Velocidad de viento, calculada como la magnitud de los componentes uas y vas	m/s	25	29
hursmax	Humedad relativa máxima diaria	%	10	10
hursmin	Humedad relativa mínima diaria	%	10	10
eto	Evaporo-transpiración potencial diaria, calculada con la metodología Penmann-Montieth (FAO-56)	mm	24	25
<p>Tabla 2. Variables incluidas en la base de datos climáticos.</p> <p>Las variables “básicas” son variables que se tomaron directamente de los resultados de los gcm de cmip-5. Las variables “derivadas” son nuevas variables que se calcularon en base a las variables básicas.</p>				

Las variables “básicas” son variables que se tomaron directamente de los resultados de los modelos de CMIP-5, mientras que las variables “derivadas” son nuevas variables que se calcularon en base a las variables básicas. La columna “número de GCM” indica la cantidad de modelos globales disponibles que entregan al menos una proyección de cambio climático para la variable. Cabe destacar que las variables relacionadas con la temperatura, la precipitación y la presión tienen más proyecciones que las otras variables. La humedad específica, por ejemplo, tiene resultados sólo para 10 GCMs. Al caracterizar las Amenazas se utilizó el promedio aritmético entre los GCMs disponibles para cada variable, un estimador no sesgado del valor central de la distribución. La columna “número corridas” indica la cantidad total de corridas (*runs*, en inglés) disponibles.

4.2.2.3 DOMINIO ESPACIAL

El dominio espacial utilizado en la base de datos es una región rectangular y considera todo Chile continental, con una resolución de 0,05° de latitud. Además, incluye los territorios insulares de Rapa Nui y la Isla Juan Fernández. El dominio espacial se extiende desde 57°S a 17°S y 110°W a 66°W. Para reducir el tamaño de los datos en disco, sólo se guarda información para los puntos de grilla terrestres, y no para el dominio completo. El número de puntos de grilla “activos” es aproximadamente 35 mil.

4.2.2.4 DATOS DE REFERENCIA

En la **Tabla 3** se entrega un resumen de los datos de referencia (datos observados) que se usaron para imple-



Variables	Fuente	Periodo de datos	Resolución especial de la fuente	Resolución temporal de la fuente
tasmax	CR2MET v2.0	1979-2018	0,05°	Diario
tasmin	CR2MET v2.0	1979-2018	0,05°	Diario
pr	CR2MET v2.0	1979-2018	0,05°	Diario
uas	Explorador Eólico	1980-2016	0,01°	Horario
vas				
ps	MERRA2	1980-2016	0,5°	Horario
rsds	Explorador Solar	2004-2016	0,01°	Horario
huss	ERA-5	1980-2016	0,25°	Horario

Tabla 3. Bases de datos de referencia para el método de escalamiento estadístico.

mentar el escalamiento regional. El objetivo del método de escalamiento regional es transformar los resultados de cada GCM para que la distribución transformada sea lo más cercana posible a la distribución observada.

Los datos de temperatura y precipitación diaria se tomaron del producto CR2MET versión 2.0, desarrollado por investigadores de CR² y publicado en su página web. CR2MET es un análisis grillado de la precipitación y temperatura (máxima y mínima) diaria para todo Chile continental, con resolución de 0,05 grados. La técnica utilizada para el producto de precipitación se basó en una regionalización estadística de datos de un reanálisis atmosférico, considerando el impacto de la topografía local mediante un conjunto de parámetros calibrados con observaciones locales de precipitación. Los datos de las temperaturas extremas (máximas y mínimas diurnas) también se construyeron con una mezcla de observaciones locales, topografía y reanálisis, pero, además, se consideraron datos de temperatura superficial estimadas mediante imágenes satelitales. Más información sobre el producto CR2MET se puede encontrar en la página web del producto⁴.

Los datos de viento se basaron en el Explorador Eólico (Muñoz *et al.*, 2018), que es una base de datos de viento simulado de un modelo numérico de alta resolución. El

Explorador Eólico fue desarrollado por el DGF para el Ministerio de Energía. Dado que hay escasa información observada de viento en Chile, se considera que una referencia modelada es la mejor opción con una cobertura espacial completa para Chile. De modo similar, los datos de radiación solar provinieron del Explorador Solar (Molina *et al.*, 2017), que es otro producto de modelación operado por el DGF para el Ministerio de Energía. El Explorador Solar ocupa un modelo de transferencia radiativa para simular la radiación solar en condiciones de cielo despejado, junto con un modelo empírico para simular la reducción de radiación en la presencia de nube detectadas en una base de datos de imágenes del satélite geoestacionario GOES. Tal como el explorador Eólico, el Explorador Solar fue validado con observaciones locales y se considera la mejor opción con cobertura completa para Chile.

Los datos de presión en superficie se basaron en el reanálisis atmosférica MERRA2, de la NASA, EEUU. Si bien este producto no tiene buena resolución espacial (0.5°), la variabilidad espacial de la presión atmosférica es relativamente suave y la baja resolución no tiene mayor importancia. La presión en superficie se obtuvo a través de una interpolación 3D de los datos de geopotencial en diferentes los niveles estándares de presión (1.000, 750 y 500 hPa).

⁴ <http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados>

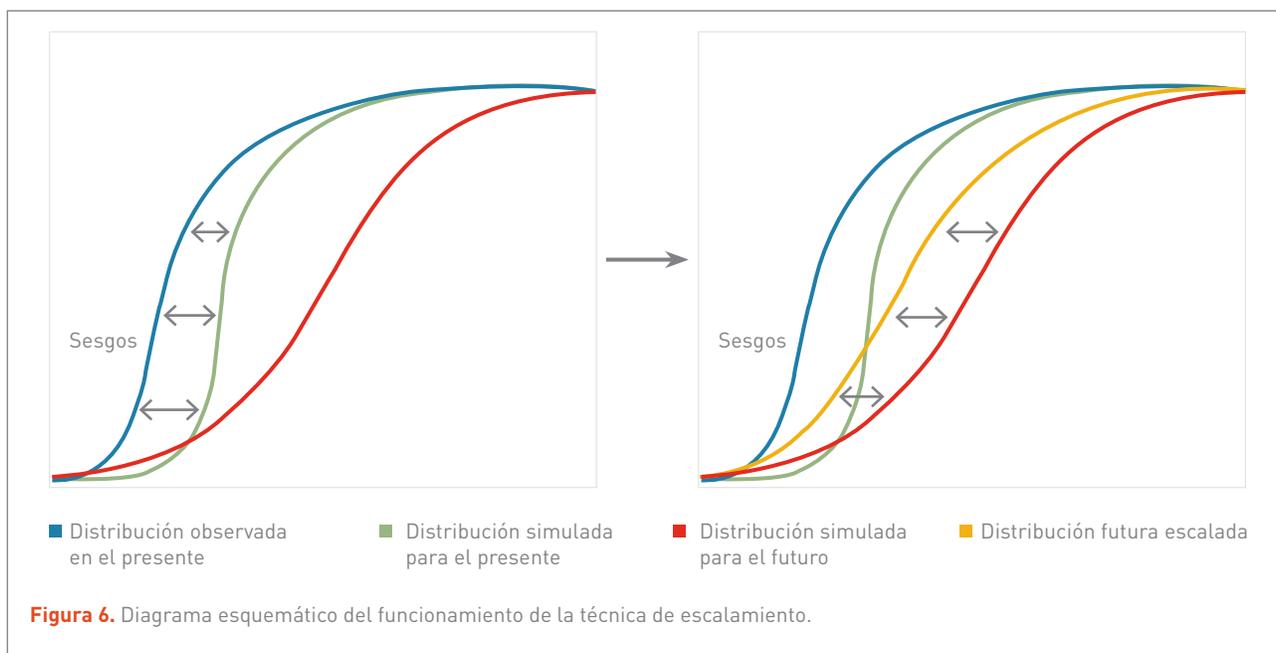
No se conoce un producto grillado de alta resolución espacial y temporal para variables relacionadas a la humedad. Es por esta razón que se ocupó, como primera aproximación, datos del reanálisis ERA-5, con una resolución espacial de $0,25^\circ$. La base de datos fue construida de la siguiente manera: primero, los datos de la depresión del punto de rocío fueron interpolados bilinealmente a la grilla de referencia de $0,05$ grados. En cada punto de grilla, la humedad específica se calculó usando los datos de temperatura y presión descritas anteriormente.

4.2.2.5 MÉTODO DE ESCALAMIENTO ESTADÍSTICO

Para realizar el escalamiento estadístico, que lleva los datos de los GCM al dominio espacial de $0,05^\circ$ de resolución, se utilizó un método simple denominado Quantile-Mapping (QM), el cual es ampliamente descrito en la literatura científica [Déqué *et al.*, 2007; Maraun, 2016; Panofsky & Brier, 1968; Themeßl *et al.*, 2012]. A grandes rasgos, la técnica busca una función de transferencia f ,

de tal manera que la distribución de la variable modelada P_m es igual que la distribución de la variable observada P_o , es decir $P_o = f(P_m)$. En la práctica, la técnica calculó el sesgo (diferencia) entre los valores observados y simulados para cada percentil de la distribución simulada para el periodo climático que correspondiente al periodo de las observaciones. Luego, esta diferencia, se agregó a los datos simulados para obtener el resultado escalado (ver **Figura 6**).

El escalamiento estadístico se debió desarrollar para cada GCM por separado (todos los modelos tienen sesgos diferentes), en cada punto de grilla (los sesgos varían de un lugar a otro) y para cada mes del año (los sesgos varían según la estación). Es importante señalar que el método de escalamiento se aplicó solo para las variables básicas (ver **Tabla 3**). Las variables derivadas se calcularon después de haber realizado el escalamiento. De forma similar, el promedio multi-modelo se aplicó posteriormente a la corrección de las variables básicas.



Fuente: La figura fue adaptada de un tutorial online de JPL⁵.

⁵ <https://rcmes.jpl.nasa.gov/content/statistical-downscaling>



4.2.3 RESULTADOS

4.2.3.1 BASE DE DATOS

La base de datos completa de proyecciones climáticas de alta resolución espacial se generó usando la metodología descrita anteriormente y está almacenada en el servidor de ARCLIM en formato NetCDF. Esta base de datos tiene un tamaño de 2,7 Tb.

4.2.3.2 ÍNDICES CLIMÁTICOS

Para facilitar el uso y análisis de los datos climáticos, se realizó un conjunto de índices climáticos que resumen diversos aspectos del clima de Chile. Los índices escogidos (Tabla 4) se basaron en los índices recomendados por el ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indi-

ces) y han sido utilizados en diversos estudios orientados a la caracterización de los efectos del cambio climático (Donat *et al.*, 2013; Karl *et al.*, 1999). La mayoría de los índices tienen que ver con la temperatura y precipitación, pero se han calculado algunos índices adicionales para otras variables como el viento y la humedad.

La forma de calcular los índices a partir de los resultados de múltiples GCM es mostrado en la **Figura 7**. Cabe señalar que los índices se han agregado para el año completo, para los semestres de verano (octubre a marzo) e invierno (abril a septiembre), para las estaciones de DJF (diciembre a febrero), MAM (marzo a mayo), JJA (junio a agosto) y SON (septiembre a noviembre), y para cada mes de forma individual. Las estaciones incluyen el periodo de verano (octubre a marzo) y de invierno. Los índices que se calculan con valores de referencia (como por ejemplo el percentil 90%) utilizaron el periodo “histórico reciente” (1980-2010) para el cálculo de estos valores.

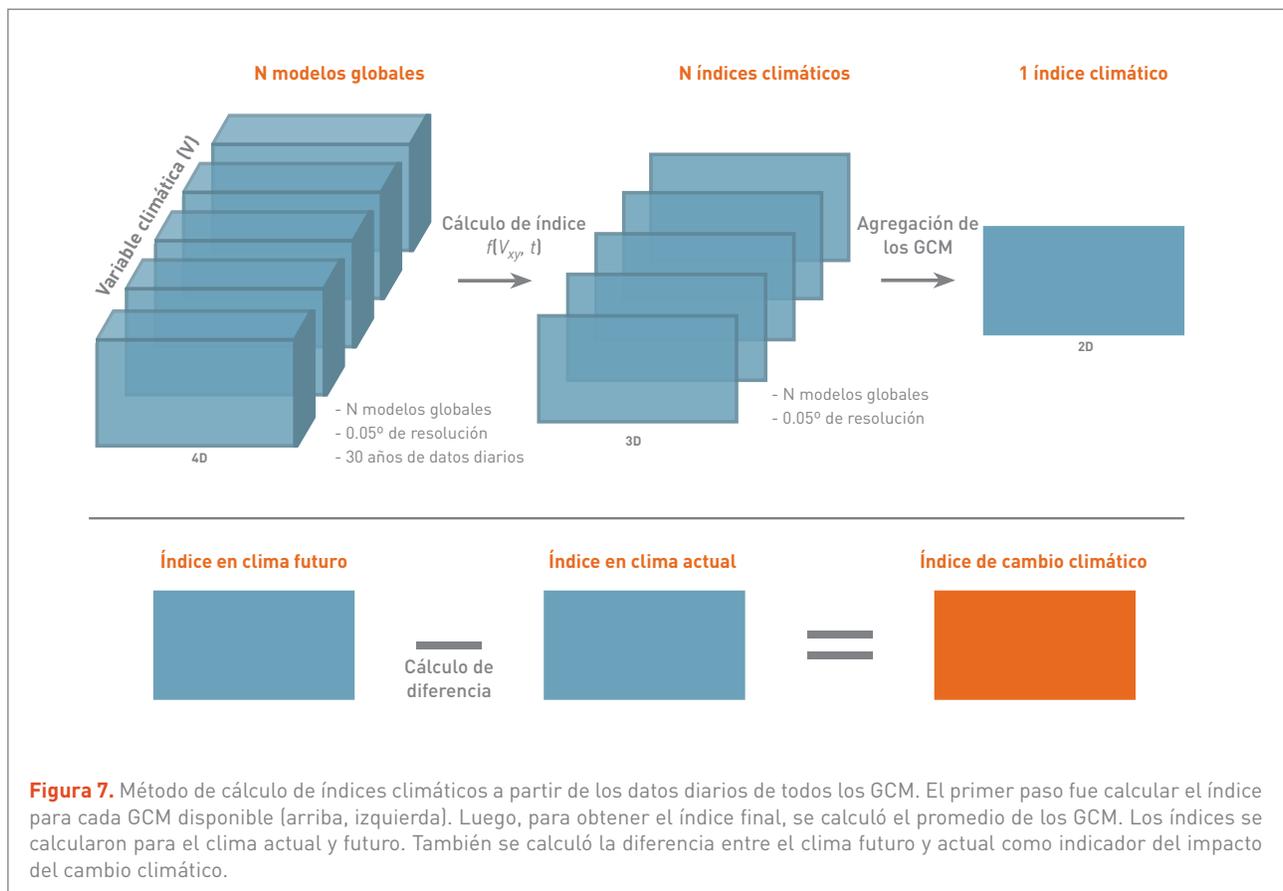


Figura 7. Método de cálculo de índices climáticos a partir de los datos diarios de todos los GCM. El primer paso fue calcular el índice para cada GCM disponible (arriba, izquierda). Luego, para obtener el índice final, se calculó el promedio de los GCM. Los índices se calcularon para el clima actual y futuro. También se calculó la diferencia entre el clima futuro y actual como indicador del impacto del cambio climático.



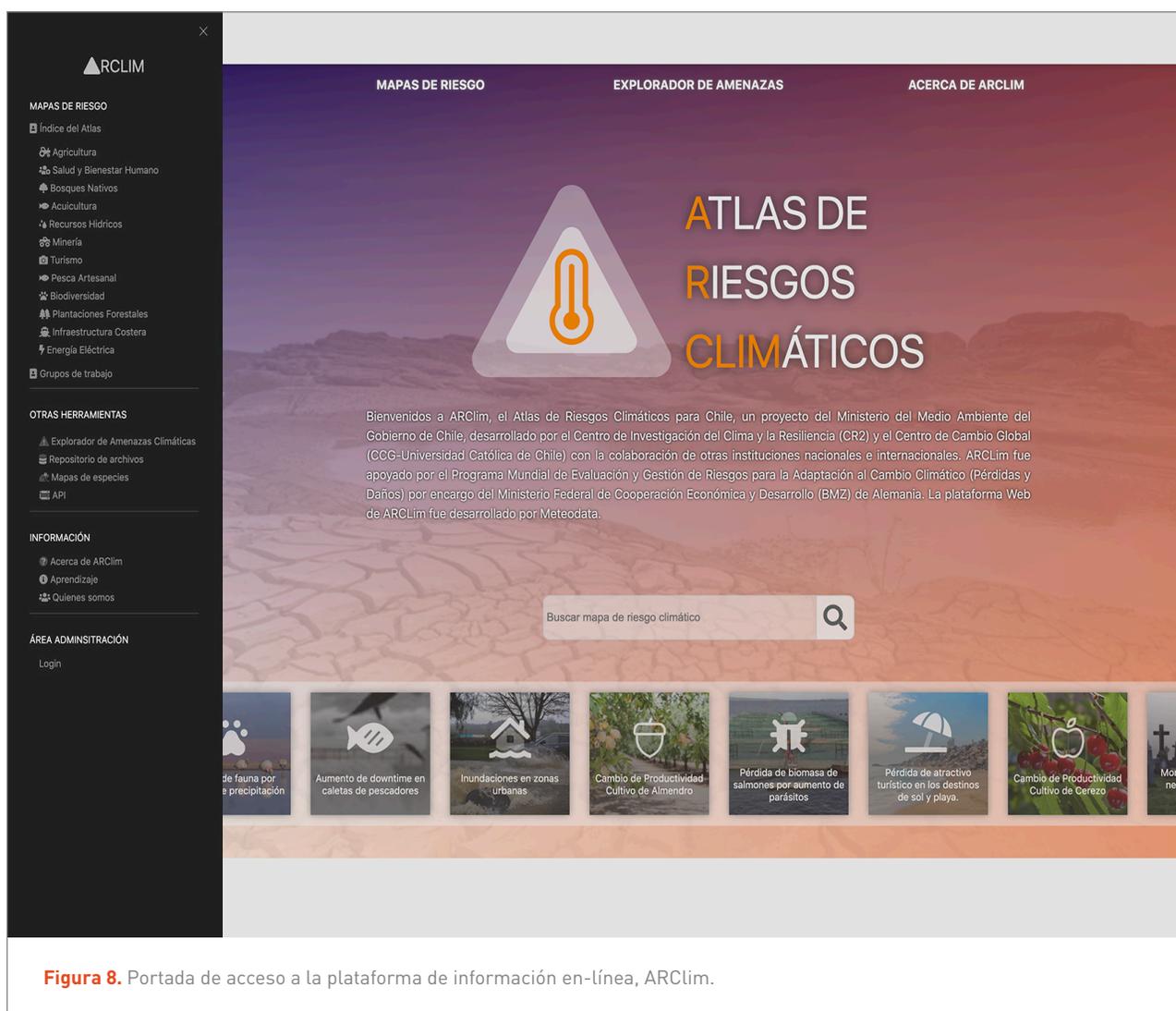
Nombre	Descripción	Unidades
Temperatura		
Temperatura máxima	Promedio de la temperatura máxima diaria	°C
Temperatura mínima	Promedio de la temperatura mínima diaria	°C
Día más cálido	Temperatura del día más cálido del periodo	°C
Noche más cálido	Temperatura de la noche más cálido del periodo	°C
Día más frío	Temperatura del día más frío del periodo	°C
Noche más fría	Temperatura de la noche más fría del periodo	°C
Días cálidos	Porcentaje de días con temperatura máxima mayor al percentil 90	%
Noches cálidas	Porcentaje de días con temperatura mínima mayor al percentil 90	%
Días fríos	Porcentaje de días con temperatura máxima menor al percentil 10	%
Noches fríos	Porcentaje de días con temperatura mínima menor al percentil 10	%
Días helados	Número de días de temperatura máxima bajo 0 grados	días
Días de hielo	Número de días de temperatura mínima bajo 0 grados	días
Días calorosos	Días de temperatura máxima mayor a 30°C	días
Días de verano	Días de temperatura máxima mayor a 25°C	días
Noches tropicales	Noches de temperatura mínima mayor a 20°C	días
Índice de duración de periodos calorosos largos	Número de días en que la temperatura se mantiene sobre el percentil 90 durante 6 días consecutivos	días
Índice de duración de periodos fríos largos	Número de días en que la temperatura se mantiene bajo el percentil 10 durante 3 días consecutivos	días
Índice de duración de periodos calorosos largos	Número de días en que la temperatura se mantiene sobre el percentil 90 durante 6 días consecutivos	días
Índice de duración de periodos fríos largos	Número de días en que la temperatura se mantiene bajo el percentil 10 durante 3 días consecutivos	días
Rango temperatura extrema	Promedio de la diferencia entre la temperatura máxima y mínima diaria	°C
Precipitación		
Precipitación acumulada	Total acumulada de la precipitación	mm
Lluvia acumulada	Total lluvia acumulada	mm
Nieve acumulada	Total nieve acumulada	mm
Precipitación máxima 1 día	Máximo de la precipitación diaria	mm
Precipitación máxima 5 días	Máxima de la precipitación acumulada en 5 días consecutivos	mm
Índice simple de la precipitación diaria	La razón entre la precipitación anual y el número de días con precipitación mayor a 1 mm	mm/día
días de precipitación intensa	Número de días de precipitación mayor a 10 mm	días
días de precipitación muy intensa	Número de días de precipitación mayor a 20 mm	días
Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos de precipitación menor a 1mm	días
Días de precipitación consecutivos	Número máximo de días consecutivos de precipitación igual o mayor a 1mm	dais
Días húmedos	Precipitación acumulada de días de precipitación mayor al percentil 95	mm
Días muy húmedos	Precipitación acumulada de días de precipitación mayor al percentil 99	mm



Nombre	Descripción	Unidades
Contribución de días húmedos	Precipitación de días de precipitación mayor al percentil 95 como porcentaje del total	%
Contribución de días húmedos	Precipitación de días de precipitación mayor al percentil 99 como porcentaje del total	%
Años de sequía	Porcentaje de periodos en que la precipitación acumulada no supera 33% del valor medio	
Otros		
Velocidad media	Promedio de la velocidad del viento	m/s
Velocidad meridional media	Promedio de la velocidad meridional del viento	m/s
Velocidad zonal media	Promedio de la velocidad zonal del viento	m/s
Humedad máxima	Promedio de la humedad relativa máxima diaria	%
Humedad mínima	Promedio de la humedad relativa máxima diaria	%
Humedad media	Promedio de la humedad relativa	%
Evaporo-transpiración media	Promedio de la evaporo-transpiración	mm/día
Presión media	Promedio de la presión atmosférica	hPa
Radiación solar media	Promedio de la radiación global horizontal	W/m2
Tabla 4. Índices climáticos calculados. Los índices se calcularon para el año completo y también para diferentes estaciones y meses del año. Cada índice se calculó para el periodo presente y futuro. También se calculó un índice de cambio que representa la diferencia entre el valor del índice en clima presente y su valor en clima futuro.		

5

PLATAFORMA ARCLIM



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



5.1 INTRODUCCIÓN

En esta sección se describen algunos de los componentes que dan forma a la plataforma de información en-línea desarrollada en el contexto del proyecto ARCLIM. Para acceder a la plataforma se debe utilizar el siguiente enlace: <https://arclim.mma.gob.cl/>

La **Figura 8** muestra la portada del sitio web con enlaces de acceso a los distintos recursos que ofrece la plataforma.

A continuación, en la sección 5.2, se describe el Atlas de Riesgo Climático. En la sección 5.3 se describe el Explorador de Amenazas. En la sección 5.4 se presenta el Mapa de Especies. Y, en la sección 5.5 se presenta el API de datos climáticos.

5.2 MAPAS DE RIESGO

El producto principal de ARCLim es el Atlas de Riesgo digital, la plataforma web. El objetivo del Atlas es entregar visualizaciones (mapas) de las Cadenas de Impacto desarrolladas por los grupos de trabajo. Dado que las CI consideran varios aspectos del Riesgo como la Amenaza, la Exposición y la Vulnerabilidad, junto con el Riesgo, propiamente tal, su presentación necesariamente involucra un grupo de mapas. Por lo tanto, la visualización básica de una Cadena de Impacto, es un conjunto de 4 mapas que muestran todo o parte de Chile, con colores o símbolos, que representan los componentes del Riesgo en los lugares de interés (típicamente comunas).

La sección de mapas de Riesgo permite a los usuarios explorar las 55 Cadenas de Impacto desarrolladas para los 12 sistemas analizados. Para cada cadena se despliegan mapas de la Amenaza climática (A), de la Exposición (E) y de la Sensibilidad (S) del sistema afectado (como por ejemplo la producción de maíz). Los mapas tienen cobertura nacional y resolución comunal (o puntual, en ciertas cadenas). Las tres variables (A, E y S) se combinan para

determinar el Riesgo debido al cambio climático sobre el sistema en cuestión.

Los mapas tienen una cobertura nacional. Dependiendo de las características del área de interés de la evaluación de Riesgo climático, el Atlas ofrece diversos niveles de resolución espacial, por ejemplo, resultados agregados en polígonos que delimitan comunas o parques nacionales o puntos representativos del lugar de emplazamiento de caletas de pescadores o asentamientos costeros.

Todas las evaluaciones de Riesgo presentan resultados para el horizonte temporal de cambio climático. Dicho horizonte temporal refleja la diferencia de los factores de Riesgo entre las condiciones del clima presente (1980-2010) y el clima futuro (2035-2065). Adicionalmente, algunas de las evaluaciones de Riesgo ofrecen evaluaciones complementarias, representativas de horizontes temporales y representativas del clima presente y futuro.

A la fecha, el contenido de la plataforma consiste en 55 evaluaciones que se organiza en 12 sectores: Agricultura; Salud y Bienestar Humano; Bosques Nativos; Acuicultura; Minería; Turismo; Pesca Artesanal; Biodiversidad; Silvicultura; Sistema Eléctrico; Recursos Hídricos; e Infraestructura Costera.

La **Figura 9** muestra esquemáticamente la manera en que se estructura el contenido de la plataforma ARCLim. Por su parte, la **Tabla 5** muestra una descripción de las secciones del Atlas de Riesgo.

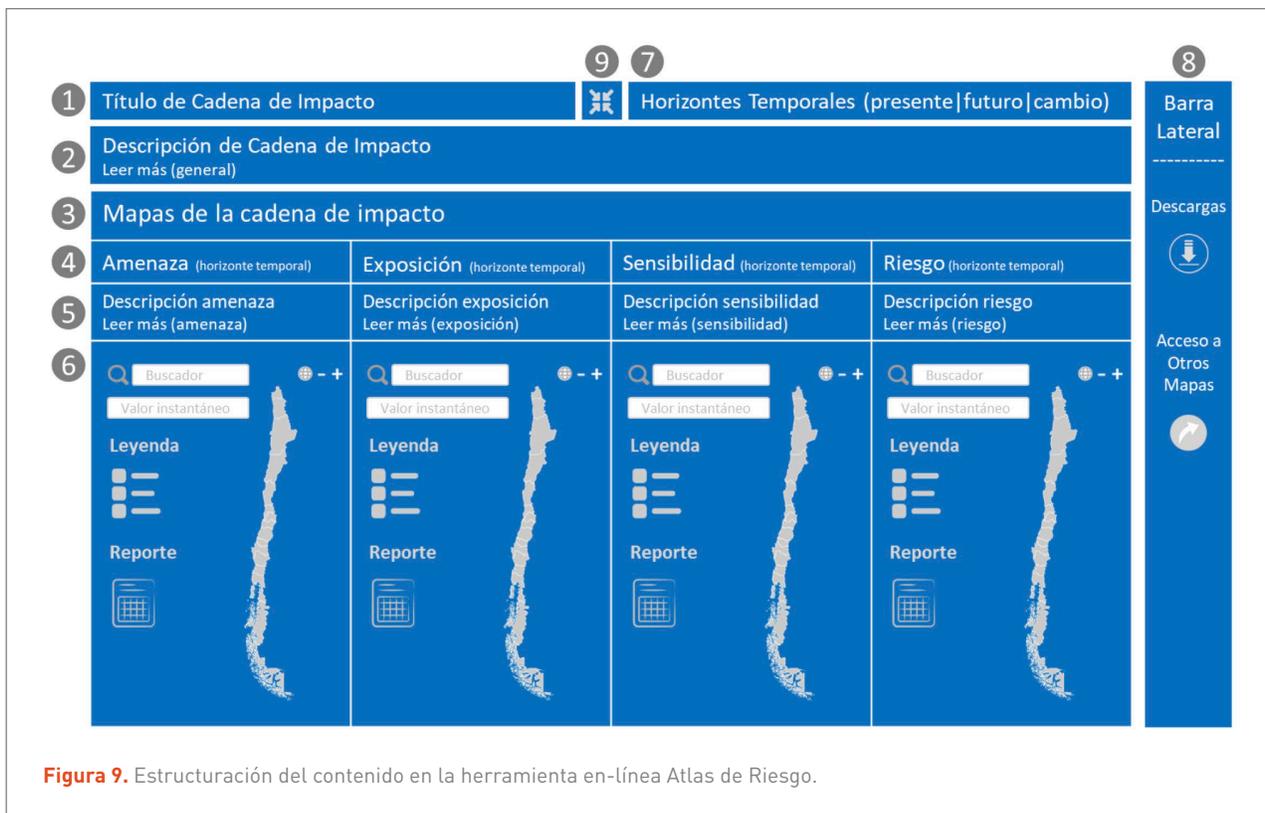


Figura 9. Estructuración del contenido en la herramienta en-línea Atlas de Riesgo.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

Tabla 5. Descripción de las secciones del Atlas de Riesgo representadas en el esquema de la Figura 9.

Sección	Descripción
1	Título de Cadena de Impacto Título que resume cuál es el objetivo de la evaluación de Riesgo.
2	Descripción de Cadena de Impacto Describe de manera general: <ul style="list-style-type: none"> > qué muestran los mapas, > cómo se leen los mapas, > cómo se desarrollaron los análisis, > quién desarrolló la evaluación de Riesgo, y > referencias bibliográficas.
3	Mapas Cadena de Impacto Sección en la que se agrupan los mapas de factores y resultados de la evaluación de Riesgo.
4	Identificador de mapas de la Cadena de Impacto Permite identificar: <ul style="list-style-type: none"> > los mapas que conforman la Cadena de Impacto, > horizonte temporal representado en cada mapa.
5	Descripción de mapas de la Cadena de Impacto Describe de manera específica: <ul style="list-style-type: none"> > metodologías utilizadas en la generación de cada mapa, y > análisis de los resultados que se muestran en el mapa.



6	Área de visualización de mapas y herramientas complementarias	<p>Sección en la que se despliegan los mapas de la Cadena de Impacto. Entre los principales componentes y capacidades se encuentra:</p> <ul style="list-style-type: none"> > Capa geográfica que describe la variabilidad espacial de cada componente de la Cadena de Impacto, > Leyenda de mapa para cada componente de la Cadena de Impacto, > Mapa base con la delimitación político-administrativa del territorio (nacional/regional/comunal, entre otras posibles alternativas). > Herramientas de navegación. <ul style="list-style-type: none"> > Botones de vista general y zoom (in/out). > Respuesta al control del ratón (mediante clic y zoom con rueda de mouse [requiere complemento con tecla shift]). > Valor instantáneo de la variable al posicionar el mouse sobre el mapa. > Reportes con información de los factores involucrados en la valuación de Riesgo climático e información complementaria. El reporte se despliega con un clic en la entidad de interés. > Buscador de lugares, permite realizar búsquedas de zonas o puntos geográficos específicos y desplegar reportes para el lugar seleccionado. La búsqueda se ajusta automáticamente mientras se ingresan caracteres.
7	Selector de horizontes temporales	Posibilita explorar la dimensión temporal de evaluación de Riesgo. Los botones permiten revisar mapas para los horizontes temporales presente (1980-2010), futuro (2035-2065) y cambio (diferencia entre horizontes presente y futuro).
8	Barra Lateral	Permite la descarga de datos asociados a la evaluación de Riesgo en formatos de tabla (Excel) y de capa geográfica (GeoJSON). Conjuntamente, ofrece acceso directo a otras evaluaciones de Riesgo.
9	Compactador de vista	Con un clic esta herramienta optimiza el uso de la pantalla para el despliegue de mapas. Para ello, oculta la visualización los textos que describen la Cadena de Impacto y sus componentes. Tocando nuevamente el botón es posible revertir la compactación de la visualización.

Tabla 5. Descripción de las secciones del Atlas de Riesgo representadas en el esquema de la Figura 9.

La **Figura 10** es un ejemplo de la Cadena de Impacto destinada a evaluar los efectos adversos sobre la distribución de la biodiversidad de especies vegetales producto del cambio futuro de las condiciones de precipitación promedio anual en Chile continental. La información se presenta a nivel comunal.

Para interpretar correctamente los resultados del Atlas de Riesgo Climático hay que tener presente las siguientes consideraciones:

- > Dos lugares con igual Amenaza pueden tener niveles de Riesgo muy distintos, dependiendo de su Exposi-

ción (tamaño del sistema afectado) y Sensibilidad (factores no climáticos, como estructuras sociales, que influyen en la respuesta frente al clima).

- > Los valores y colores desplegados en los mapas de Riesgo representan un ordenamiento de lugares en que el sistema en cuestión enfrenta un mayor o menor Riesgo. Se trata entonces de una medida Riesgo relativo del sistema frente al cambio climático.

- > Dado el carácter relativo del Riesgo que se presenta en ARCLIM, no es posible agregar los resultados de las diferentes Cadenas de Impacto.

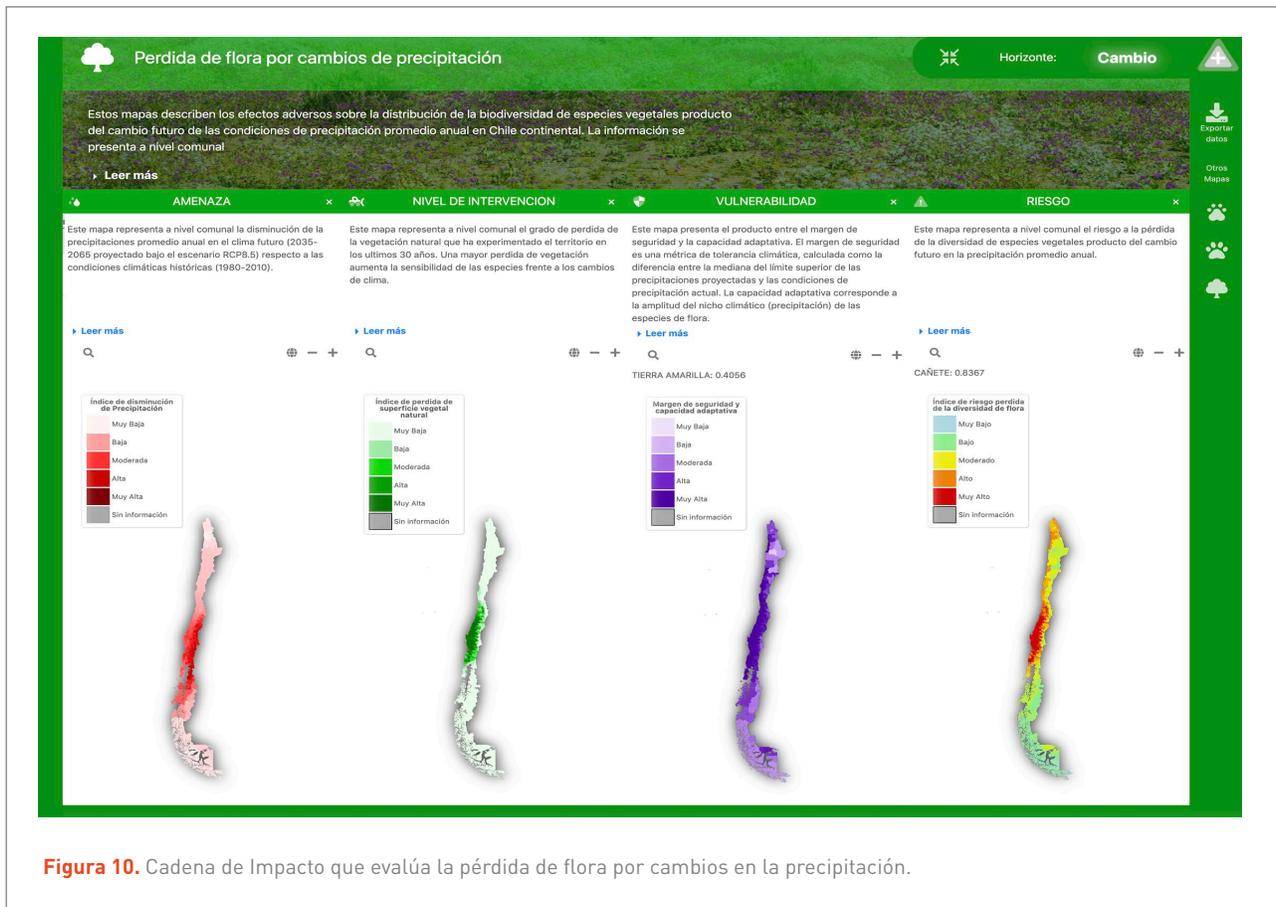


Figura 10. Cadena de Impacto que evalúa la pérdida de flora por cambios en la precipitación.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

➤ Las Amenazas se obtuvieron a partir del cambio que experimentarían las variables climáticas entre el pasado reciente (1980-2010) y el futuro mediano (2035-2065). El clima, en ambos periodos, se obtuvo de simulaciones climáticas. En el pasado reciente se verificó que estas simulaciones reproducieran el clima observado. El clima futuro no es una predicción sino una proyección basada en un escenario de intensas emisiones de gases con efecto invernadero (RCP8.5).

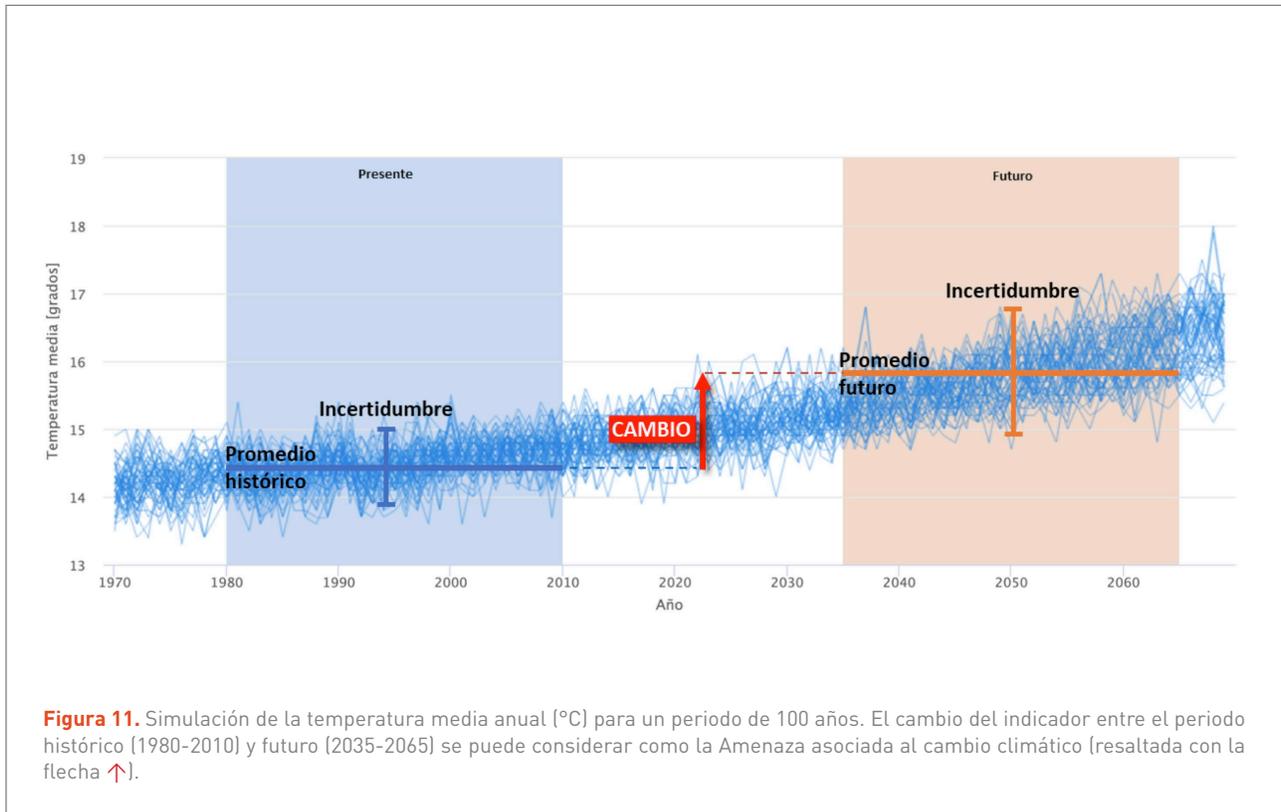
futuro cercano (2035-2065, bajo el escenario RCP8.5) y su respectiva diferencia (cambio).

Los índices climáticos corresponden a resúmenes estadísticos que facilitan la comprensión del comportamiento de variables climáticas como la temperatura o la precipitación (para mayores detalles sobre índices climáticos revise la sección 4 del presente documento). El cálculo de estos índices se realizó en base a los valores de diversas variables atmosféricas simuladas por modelos climáticos. Se incluyeron, también, los promedios de variables seleccionadas en ambos periodos.

5.3 EXPLORADOR DE AMENAZAS

El explorador de Amenazas climáticas es una herramienta cuyo objetivo es facilitar el acceso, visualización, análisis y descarga de índices climáticos sobre el territorio nacional para un periodo histórico reciente (1980-2010), un periodo

Cuando un índice climático puede afectar negativamente a la sociedad y/o al medioambiente, puede ser considerado una Amenaza climática. Las Amenazas se obtuvieron del cambio que experimentara las variables climáticas entre el pasado reciente (1980-2010) y el futuro mediano (2035-2065), tal como se ejemplifica en la **Figura 11**.



Los índices climáticos disponibles a nivel anual o mensual, se pueden desplegar en una grilla regular de 5x5 km² o en unidades territoriales de uso común. Algunas de las principales características del explorador de Amenazas climáticas son:

- > Utiliza índices climáticos contruidos a partir 100 años de datos climáticos (1970-2070 a nivel diario) de 5km de resolución.
- > Ofrece un conjunto de herramientas destinadas a facilitar la visualización de mapas de más de 50 índices climáticos.

- > Ofrece resúmenes estadísticos para unidades territoriales útiles (comunas, cuencas, ciudades, entre muchas otras).
- > Ofrece un conjunto de herramientas estadísticas para facilitar el análisis de datos climáticos.
- > Permite exportar series de datos y mapas climáticos.

La **Figura 12** muestra, de manera esquemática, las cuatro secciones que dan forma al explorador de potenciales Amenazas climáticas. La **Tabla 6** muestra una descripción de cada sección.

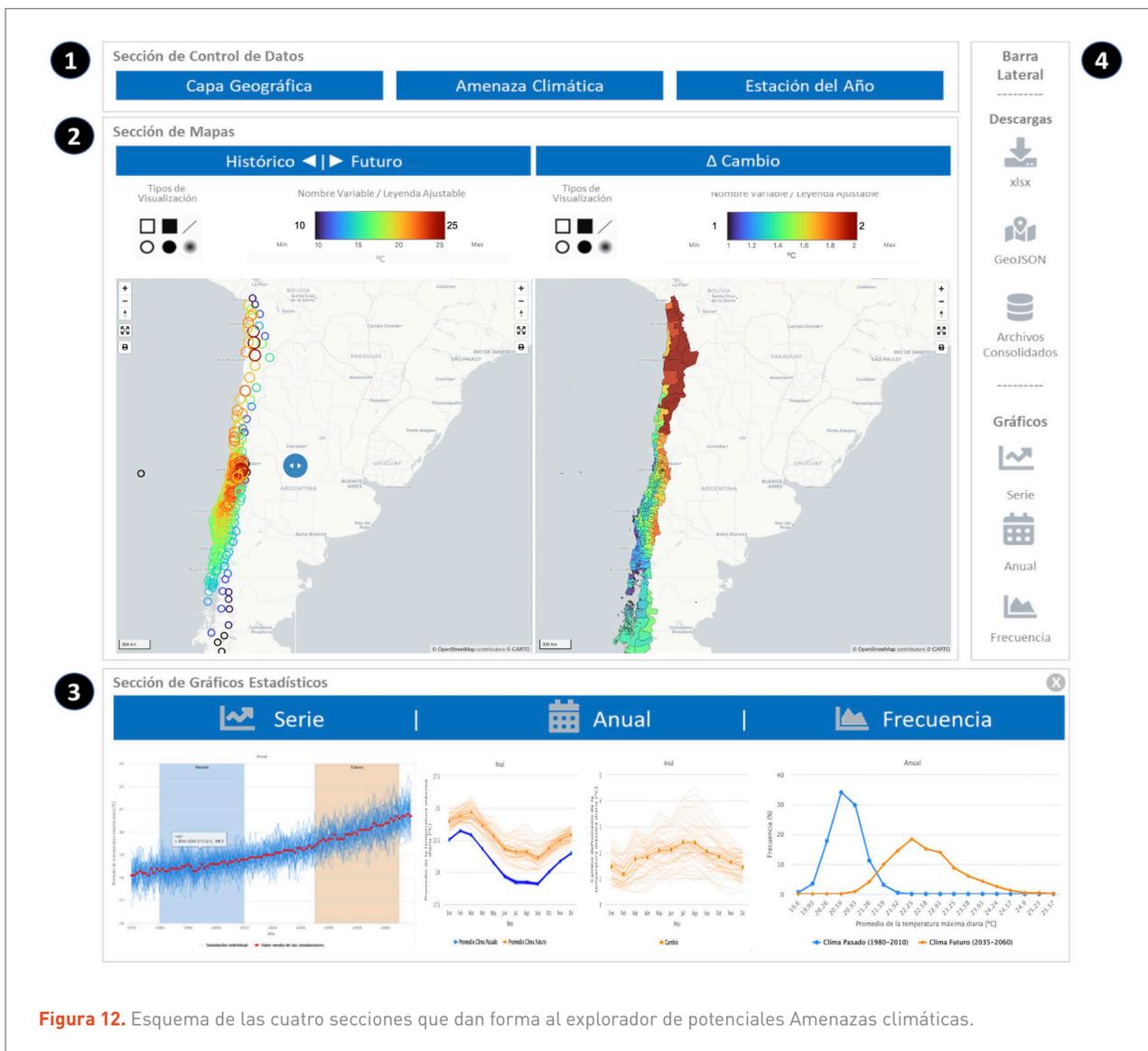


Figura 12. Esquema de las cuatro secciones que dan forma al explorador de potenciales Amenazas climáticas.

Fuente: Plataforma ARCLIM [Ministerio del Medio Ambiente, 2020].

○	Sección	Descripción
1	Herramientas de control de datos	Permite seleccionar la capa geográfica de interés, el índice climático (o potencial Amenaza climática) y el periodo de tiempo de interés
2	Mapas	Permiten visualizar y analizar la variabilidad espacial de la potencial Amenaza.
3	Gráficos de variabilidad temporal	Permiten visualizar y analizar, estadísticamente, la variabilidad temporal de la potencial Amenaza.
4	Barra lateral	Permite: a) gestionar descargas de datos y b) seleccionar el tipo de gráfico de variabilidad temporal que desea desplegar.

Tabla 6. Descripción de cada sección del explorador de Amenazas.



Para interpretar correctamente los resultados del explorador de Amenazas hay que tener presente que:

- > Los modelos del clima nos informan apropiadamente de las condiciones medias en periodos largos de tiempo (décadas o más) y cómo estas se alteran conforme cambia la concentración de gases con efecto invernadero en la atmosfera. Se emplearon sobre 20 modelos climáticos, cuyos resultados fueron promediados para obtener una señal climática más robusta.
- > El clima del pasado reciente, y del futuro, se obtuvo de simulaciones climáticas. En el pasado reciente se ha verificado que estas simulaciones reproduzcan el clima observado. El clima futuro no es una predicción sino una proyección basada en un escenario de intensas emisiones de gases con efecto invernadero (RCP8.5).
- > Cada modelo genera una evolución climática a nivel diario para cada punto sobre el planeta. Sin embargo, los valores simulados para un instante particular no tienen relación con los valores observados o que ocurrirán en el futuro.

El explorador de Amenazas permite combinar campos de “capa geográfica”, “Amenaza climática” y “estación del año”, permitiendo generar cientos de cruces, que muestran el cambio en la Amenaza específica producto del cambio climático. Como ejemplo, en la **Figura 13** se presenta una visualización de la Amenaza promedio de la temperatura máxima diaria, para la capa geográfica comunas y con resolución anual.

5.4 MAPAS DE ESPECIES

La herramienta denominada “mapas de especies” permite visualizar y descargar modelos de distribución para especies de flora y fauna nativas y endémicas presentes en Chile continental, para un periodo histórico reciente (1980-2010) y un periodo futuro cercano (2035-2065, bajo el escenario RCP8.5), como su diferencia. En cada caso, se muestra la probabilidad de la presencia por especie en cada pixel (celda de 5x5 km²) con valores entre 0 (no

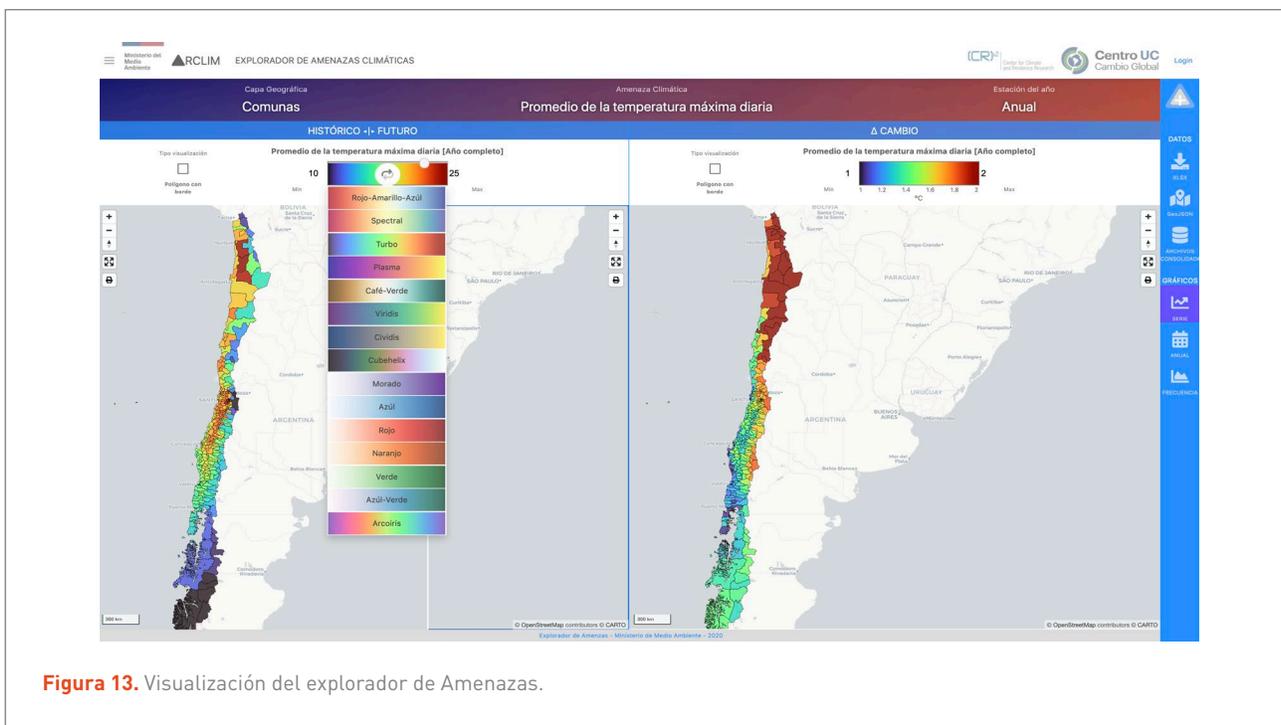


Figura 13. Visualización del explorador de Amenazas.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

hay probabilidad) y 1 (máxima probabilidad) obtenidos del modelo Maxent⁶ el cual emplea un conjunto de variables ambientales (incluyendo el clima) y observaciones de ocurrencia georreferenciada. Se consideran 440 especies de flora y 110 especies de fauna. La modelación fue desarrollada por el grupo del profesor Patricio Pliscoff del Centro de Cambio Global de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

En este trabajo se emplearon cinco variables climáticas: i) evapotranspiración promedio anual, ii) precipitación acumulada anual, iii) promedio anual de la insolación solar diaria, iv) promedio anual de la temperatura mínima diaria y v) promedio anual de la temperatura máxima diaria. Estas variables fueron obtenidas de simulaciones climáticas desarrolladas para el proyecto ARCLim. En el periodo histórico (1980-2010), las simulaciones reproducen adecuadamente estas observaciones. En el periodo futuro (2035-2065), las simulaciones proveen una proyección del clima asumiendo un escenario de intensas emisiones de gases con efecto invernadero (RCP8.5).

Al explorar estos resultados es importante tener presente que:

- > Los resultados del modelo Maxent indican la probabilidad de que en cada pixel existan condiciones ambientales propicias a existencia de las especies, pero no indica el número o densidad (actual o futura) de estas especies.
- > La probabilidad para el periodo futuro no es una predicción sino una proyección, basada en un escenario climático, que considera intensas emisiones de gases con efecto invernadero (RCP8.5).

La herramienta ofrece información de la Vulnerabilidad de cada especie. Una simbología indica si la especie pertenece a alguna categoría de Vulnerabilidad. Las categorías posibles son presentadas en la **Tabla 7**.

CÓDIGO CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
CR	En peligro crítico
EN	En peligro
NT	Casi amenazada
VU	Vulnerable
RA	Rara
LC	Preocupación menor
FP	Fuera de peligro
DD	Datos insuficientes
NE	NO clasificada
EW	Extinta en estado silvestre
EX	Extinta

Tabla 7. Categorías de Vulnerabilidad.

La **Figura 14** muestra un ejemplo de probabilidad de presencia (histórica y futura) y cambio de probabilidad de presencia a cauda del cambio climático de la especie de ave Carpintero Negro (endémico).

La plataforma ofrece un conjunto de herramientas que facilitan la visualización y comparación de datos geográfico. Conjuntamente, en la sección superior derecha de la herramienta se destacan:

- > Las coordenadas en la que se encuentra posicionado el cursor (en grados decimales).
- > La categoría de Vulnerabilidad de la especie analizada, según región administrativa.

Finalmente, con un simple clic en el ícono de descarga, ubicado la barra lateral, es posible acceder los datos que se visualizan en pantalla.

⁶ https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/

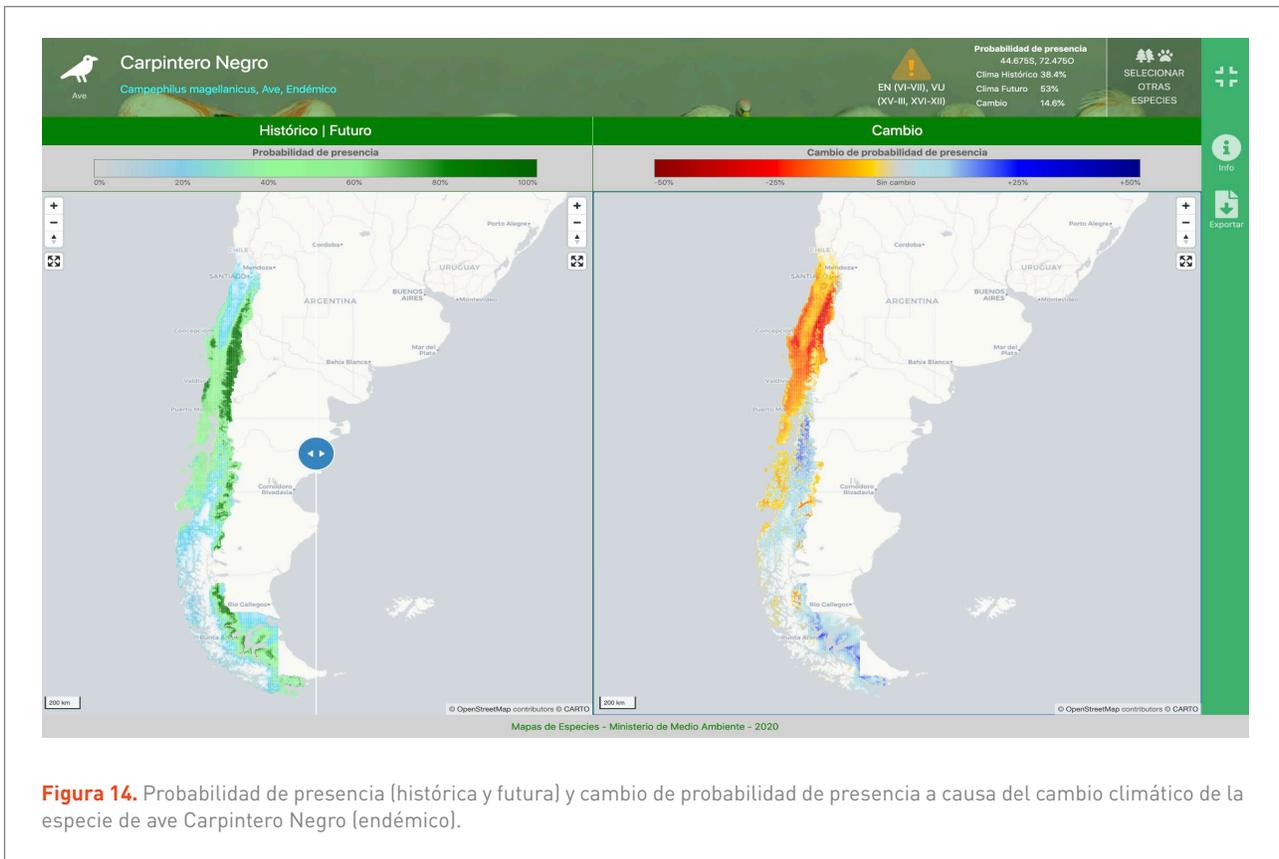


Figura 14. Probabilidad de presencia (histórica y futura) y cambio de probabilidad de presencia a causa del cambio climático de la especie de ave Carpintero Negro (endémico).

Fuente: Plataforma ARCLim [Ministerio del Medio Ambiente, 2020].

5.5 API ARCLIM

ARCLim cuenta con una interfaz de programación de aplicaciones (API) que permite acceder a gran parte de la información almacenada en la plataforma. Los tipos de información disponible a través del API son:

Capas geográficas: Corresponden a capas de información geográfico, en formato *GeoJSON*. Los mapas incluyen, por ejemplo, comunas, ciudades, zonas protegidas, caletas, etcétera. Es importante señalar que, generalmente, la información geográfica fue recopilada desde otras fuentes nacionales (como por ejemplo el IDE) y ARCLim no se debe considerar como fuente principal u “oficial” de la información.

Indicadores climáticos: Corresponden a variables calculados a partir de los datos de simulaciones con mo-

delos climáticos. Esta variables incluyen, por ejemplo, la temperatura media, la frecuencia de olas de calor y los índices de sequía, entre otros. La plataforma ARCLim permite obtener los datos de los indicadores climáticas para cada valor (punto, línea o polígono) de las capas geográficas mencionadas anteriormente. Los valores se disponen para el periodo histórico y futuro, y para todas las estaciones/meses del año. También se puede obtener series para valores específicos.

Atributos: Corresponden a variables adicionales asociadas a las capas geográficas. Por ejemplo, cada comuna en la capa geográfica de *comunas* cuenta con varios atributos, tales como el nombre de la comuna, el número de habitantes, u otros atributos provenientes de múltiples fuentes. En muchos casos, los grupos de trabajo que participaron en ARCLim, recopilaron o calcularon atributos para facilitar los cálculos de los índices de Amenaza, Exposición, Sensibilidad y Riesgo (que también se consideran como atributos).



Las consultas realizables con el API devuelvan información en el formato JSON. La **Tabla 8** describe las consultas disponibles. Para mayores detalles, se puede

consultar la documentación en el siguiente enlace: https://arclim.mma.gob.cl/media/learning/API_ARCLim.pdf

/api/capas	Listado de capas geográficas disponibles
/api/indicadores_climaticos/	Listado de indicadores climáticos disponibles.
/api/atributos/{capa}/	Listado de atributos para una capa geográfica específica.
/api/datos/{capa}/{formato}/?attributes=...	Datos de atributos e indicadores climáticos para una capa geográfico.
/api/datos/{capa}/{indicador_climatico}/{season}	Serie de tiempo de un indicador climático para el periodo 1970-2070.
Tabla 8. Consultas disponibles en el API.	



6

SISTEMAS ABORDADOS

La siguiente sección presenta una síntesis de la metodología utilizada para caracterizar las 55 Cadenas de Impactos consideradas en los 12 sistemas. El Proyecto ARCLim cuenta con 14 informes complementarios donde se puede ver en mayor detalle la metodología específica para cada sector.

6.1 AGRICULTURA





6.1 AGRICULTURA

6.1.1 INTRODUCCIÓN

El sector silvoagropecuario nacional es uno de los sistemas vulnerables frente al cambio climático, ya que cambios en temperatura, precipitación y eventos hidrometeorológicos extremos impactan directamente la fisiología de los cultivos, generando cambios significativos en la producción, que pueden tener efectos negativos en la seguridad alimentaria, los medios de vida de los agricultores, perjudicando así a un sector que genera empleo y es responsable de una fracción importante del producto interno bruto nacional (PIB), teniendo un 3% de participación sectorial, según datos del Banco Central para el año 2018.

Dentro de los impactos potenciales del cambio climático, se encuentran la aridización y el desplazamiento de las actuales zonas agroclimáticas hacia el sur, que según AGRIMED (2008) es “consecuencia de la declinación pluviométrica que continuará durante todo el siglo XXI”.

De acuerdo a estudios preliminares (MMA, 2016) se estima que los cultivos agrícolas experimentarán una disminución de rendimientos en las zonas centro-norte y costeras, debido al incremento de temperaturas en zonas que ya muestran niveles importantes de estrés hídrico que, en conjunto con crecientes reducciones de precipitación, agravarían la situación. Por otra parte, las zonas del sur podrían ver una expansión de la actividad agrícola, explicado por los aumentos de temperatura que permitirían un mejor desarrollo de cultivos sumados a menores reducciones de precipitación que no serían limitaciones importantes. El desarrollo de estos cultivos, en las nuevas condiciones climáticas, tendrá también un efecto en la calidad de los productos. Por ejemplo, se estima que, bajo futuros escenarios de cambio climático, las uvas de vino experimenten cambios en la composición química y que se observen efectos negativos en las características organolépticas de la uva, la fecha de maduración, la Vulnerabilidad a plagas, enfermedades y malezas, como también en sus necesidades de riego (MMA, 2016).

El objetivo general de esta sección es sintetizar la estrategia de evaluación del Riesgo climático en el sector agrícola, el cual se encuentra detallado en el **Informe Proyecto ARCLim: Equipo de Agricultura (Meza, Morales, González, Duarte, Jara & Saldaña, 2020)**.

6.1.2 CADENAS DE IMPACTO

Se analizó el Riesgo en la productividad de diversos sistemas agrícolas según la variación climática, producto del cambio climático. Las variables climáticas consideradas relevantes para el análisis corresponden a la temperatura, la precipitación, la radiación, la humedad relativa y la velocidad del viento.

Para este estudio se identificaron Cadenas de Impacto para:

- a) Cultivos anuales representativos del sistema productivo nacional: trigo, maíz, frejol, papa.
- b) Frutales: almendro, nogal, cerezo, manzano.
- c) Praderas naturales y capacidad de carga animal, resumidos en la **Tabla 9**.

6.1.3 METODOLOGÍA

La descripción de la metodología utilizada, que se resume a continuación, se encuentra más detallada en el informe proyecto ARCLim, Atlas de Riesgo Climático en Chile: Informe Proyecto ARCLim, Equipo de Agricultura (Meza et al., 2020).

a. Región bajo análisis

El análisis se centra entre la Región de Atacama y la Región de Aysén, que es donde se concentran los cultivos priorizados para este estudio y que, a su vez, es el área donde se dispone de una base de datos sólida y espacialmente continua de las características climáticas, de suelo y manejo agronómico.



Subsistema	Cadena de Impacto	Amenaza derivada del cambio climático	Exposición	Sensibilidad	Riesgo
Cultivos Anuales	Cambio de productividad trigo de secano	Variación del rendimiento de trigo	Superficie de cultivo por comuna entre la región de Coquimbo y de Los Lagos (excluyendo provincia de Palena)	Factor en una escala relativa del estado a nivel comunal a partir de parámetros socio-económicos y ambientales	Riesgo u oportunidad en la producción, categorizado en función de las condiciones de Exposición, Amenaza y Sensibilidad existentes en la comuna
	Cambio de productividad trigo bajo riego	Variación del rendimiento de trigo			
	Cambio de productividad papa - secano	Variación del rendimiento de papa			
	Cambio de productividad papa bajo riego	Variación del rendimiento de papa			
	Cambio de productividad frejol bajo riego	Variación del rendimiento de frejol			
	Cambio de productividad maíz bajo riego	Variación del rendimiento de maíz			
Frutales	Cambio de productividad almendro	Variación del rendimiento de almendro	Superficie de cultivo por comuna entre la región Atacama y de Aysén		
	Cambio de productividad cerezo	Variación del rendimiento de cerezo			
	Cambio de productividad manzano	Variación del rendimiento de manzano			
	Cambio de productividad nogal	Variación del rendimiento de nogal			
Praderas	Cambio en productividad praderas y capacidad de carga animal	Variación del rendimiento de praderas	Superficie de cultivo por comuna entre la región de La Araucanía y de Los Lagos		

Tabla 9. Resumen de Cadenas de Impacto seleccionadas para el Sistema Agricultura.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

b. Modelos utilizados

Los modelos utilizados por este sistema de trabajo para caracterizar la Amenaza fueron diferentes para cada subsistema de cultivos. Para analizar el subsistema "cultivos anuales" (trigo, maíz, papa y frejol) y subsistema "praderas" se utilizó el modelo *CropSyst* (Stöckle *et al.*, 2003). En

el subsistema de "frutales" se utilizó el modelo simple de Zhao *et al.* (2019), y finalmente, para determinar la capacidad de "carga animal", se utilizó como referencia el modelo de Castellaro *et al.* (2010).



En el caso de la Sensibilidad, el modelo utilizado corresponde a una media aritmética que involucra diferentes parámetros, teniendo cada uno igual peso.

c. Caracterización de la Amenaza

Para el sector agrícola, el cambio climático representa un conjunto de Amenazas que afectan su desempeño. Existen Amenazas derivadas de los eventos extremos (como sequías, olas de calor, heladas, etc.) como también Amenazas derivadas del cambio en la tendencia de variables meteorológicas que condicionan su producción (como la precipitación, las temperaturas medias, la radiación solar, la humedad relativa o la velocidad del viento). En este caso se optó por representar el efecto del cambio climático sobre el conjunto de las variables que explican el comportamiento vegetal, sintetizándolas en la métrica de los posibles cambios de rendimiento (impacto) que experimentarían los cultivos. Para ello se utilizó el modelo *CropSyst* (Stöckle *et al.*, 2003) que define la Amenaza de los subsistemas anuales y praderas, y el modelo simple (Zhao *et al.*, 2019) en el cultivo de frutales para estimar cambios en el rendimiento de los cultivos frente a escenarios de cambio climático. *CropSyst* es un modelo de simulación de cultivos desarrollado para analizar integralmente el efecto del clima, suelo y manejo sobre el rendimiento de los sistemas de cultivo (Stöckle *et al.*, 2003). En tanto, el modelo simple (Zhao *et al.*, 2019), corresponde a un modelo simplificado que permite el cálculo de la productividad primaria de los cultivos en respuesta a la intercepción de radiación solar y el desarrollo de su área foliar. El modelo simple, al igual que *CropSyst*, es sensible a elementos ambientales importantes como el estrés térmico e hídrico.

De los resultados de *CropSyst* y del modelo simple, se extrajo la media de los rendimientos para ambos períodos (1980-2009 y 2035-2064), los cuales fueron interpolados usando una combinación por peso de diferentes modelos de interpolación (Inverse Distance Weighting, Natural Neighbour, Krigging y Trend) en la plataforma *ArcMap 10* (Esri, 2016). Estos pesos fueron estimados en función de una correlación lineal utilizando los puntos de interpolación, como puntos de validación y, posteriormente, se agregaron

en función de cuán significativa sea su estimación con el objetivo de mejorar la estabilidad y precisión de algoritmos de interpolación. Para la generación de la Amenaza, se calculó la tasa de cambio (delta) del rendimiento del cultivo en el futuro con respecto al rendimiento presente para el promedio de los 6 GCM que contaban con todas las variables necesarias para la modelación que requiere *CropSyst* o el modelo simple.

Para la creación de un modelo simple de carga animal para bovinos de carne, bovinos de leche y ovinos, se recurrió a la fórmula de potencial de capacidad de pastoreo de Castellaro *et al.* (2010).

d. Caracterización de la Exposición

La información de Exposición de los cultivos anuales corresponde a sus propias superficies, cuyos datos fueron reportados en el censo agropecuario de 2007. En el caso de estos cultivos, la información es actualizada con datos regionales reportados por ODEPA, que son posteriormente traspasados a nivel comunal, siguiendo la misma proporción de las comunas en relación con el total regional reportado en el censo agropecuario. En el caso de sistemas frutales, esta información fue complementada con datos derivados de los catastros frutícolas.

e. Caracterización de la Sensibilidad

El índice de Sensibilidad está en función de siete parámetros listados a continuación:

1. Presencia de las pequeñas y medianas explotaciones (PYMEX).
2. Población urbana-rural (IRU).
3. Diversidad de cultivos.
4. Número de embalses.
5. Cantidad de usuarios y funcionarios INDAP.
6. Disponibilidad de infraestructura.
7. Proporción de superficie de cultivos en riego-secano.

Los parámetros utilizados se expresan en la **Tabla 10**.

Parámetro	Definición
PYMEX	Número de explotaciones pertenecientes a pequeña y mediana explotación.
IRU	Proporción de la población rural con respecto a la población urbana.
Diversificación	Representa la diversidad de cultivos que hay por comuna. Se consideraron frutales, hortalizas, cereales, leguminosas, tubérculos y cultivos industriales.
Embalses	Número de embalses por comuna.
INDAP	Proporción de número usuarios INDAP y el número de funcionarios INDAP a nivel regional.
Infraestructura	Representa el número de infraestructuras totales por comuna. Dentro del cálculo se consideró bodegas, cámaras de frío, invernaderos, establos, galpones, gallineros, pabellones, pozos, salas de ordeña, silos, terneras, tranques, oficinas, otros.
Balance Riego-Secano	Proporción de superficie cultivada en secano con respecto a la superficie cultivada bajo riego.

Tabla 10. Parámetros considerados en el cálculo de Sensibilidad del Sector Agricultura.

Fuente: Elaborado a partir de Meza *et al.*, 2020.

En este caso, se define como Sensibilidad a la media aritmética de todos los parámetros mencionados anteriormente. Cabe señalar que el indicador seleccionado contiene algunos elementos que podrían caer dentro de la categoría de “capacidad adaptativa”, sin embargo, se ha preferido mantener el concepto de Sensibilidad ya que no se dispone de información completa que permita adecuadamente separarlas, optando, entonces, por hacer un análisis por separado de la capacidad adaptativa. Este índice cualitativo permite comparar la susceptibilidad relativa de las comunas frente a cambios en la productividad de los cultivos ya que se encuentra elaborado sobre la base de datos tipo *proxy* que la literatura señala como apropiados para medir nivel de impacto y puede ser interpretado como la probabilidad de experimentar los impactos potenciales de la Amenaza climática en forma efectiva.

f. Análisis sobre la capacidad adaptativa

La Capacidad Adaptativa de sistemas agrícolas se puede definir como el aprovechamiento de las oportunidades que se presentan o la capacidad para hacer frente ante las condiciones climáticas cambiantes, considerando recursos naturales, condiciones económicas, sociales, culturales y políticas públicas (Wall & Smit, 2005). Esta capacidad de adaptación y estrategias que se implementen dependerá de si se trata de una agricultura industrial, intensiva y de gran escala o de una agricultura pequeña, baja en insumos y en capital (AGRIMED, 2017).

La Capacidad Adaptativa fue analizada en función de ocho parámetros, los cuales se definen en la **Tabla 11**.



Parámetro	Definición
Internet	Hogares por comuna que cuentan con acceso a internet
Escolaridad	Proporción entre habitantes sin estudios y la población total a nivel comunal
Maquinaria	Representa el número de maquinaria agrícola presente por comuna
Pozos	Representa el número de pozos a nivel comunal
Caminos urbanos y pavimentados	Nivel y calidad de conexión vial a nivel comunal, usando como indicador la longitud de los caminos que se encuentran catalogados como urbanos y pavimentados
Suelo cultivable	Proporción entre el suelo con aptitud agronómica (clases de I a IV, de acuerdo a CIREN) y la superficie comunal
Instituciones/sedes agrícolas	Representa el número de Instituciones/sedes que imparten formación técnica-profesional en el área agrícola, por región
Trabajadores permanentes/temporales	Representa la estabilidad laboral en el rubro agrícola, a partir de la proporción entre trabajadores agrícolas permanentes y temporales

Tabla 11. Parámetros analizados en el estudio de Capacidad Adaptativa del Sector Agricultura.

Fuente: Elaborado a partir de Meza et al., 2020.

De este análisis, se pudo desprender que aquellas comunas con mayor capacidad adaptativa, según estos parámetros, corresponden a las comunas de Maipú (Región Metropolitana), Melipilla (Región Metropolitana), Puente Alto (Región Metropolitana) y Los Ángeles (Región del Biobío), mientras que las comunas con menor Capacidad Adaptativa son: General Lagos (Región de Arica y Parinacota), Camiña (Región de Tarapacá), Alto Biobío (Región del Biobío) y Colchane (Región de Tarapacá).

g. Caracterización del Riesgo

El Riesgo se define como una categoría alimentada con por índices de Amenaza, Exposición y Sensibilidad de la comuna. Para categorizar el Riesgo, en los 5 niveles propuestos, primero se debe normalizar la Exposición y, para esto, utilizamos la **Ecuación 1**:

$$E' = \frac{E - E_{min}}{E_{Max} - E_{min}}$$

Ecuación 1. Cálculo de la Exposición normalizada.

Donde E' es la Exposición normalizada, E es la Exposición de la comuna objetivo, y E_{min} y E_{max} son la Exposición mínima y máxima respectivamente dentro de todas las comunas. Luego, se calcula la Amenaza porcentual, utilizando la **Ecuación 2**.

$$A\% = \frac{Rend_{futuro} - Rend_{Presente}}{Rend_{presente}}$$

Ecuación 2. Cálculo de la Amenaza porcentual.

Siendo $A\%$ la Amenaza porcentual, y $Rend_{Presente}$ y $Rend_{futuro}$ el rendimiento (en Kg/ha) del periodo presente (1980-2010) y futuro (2035-2065) respectivamente.

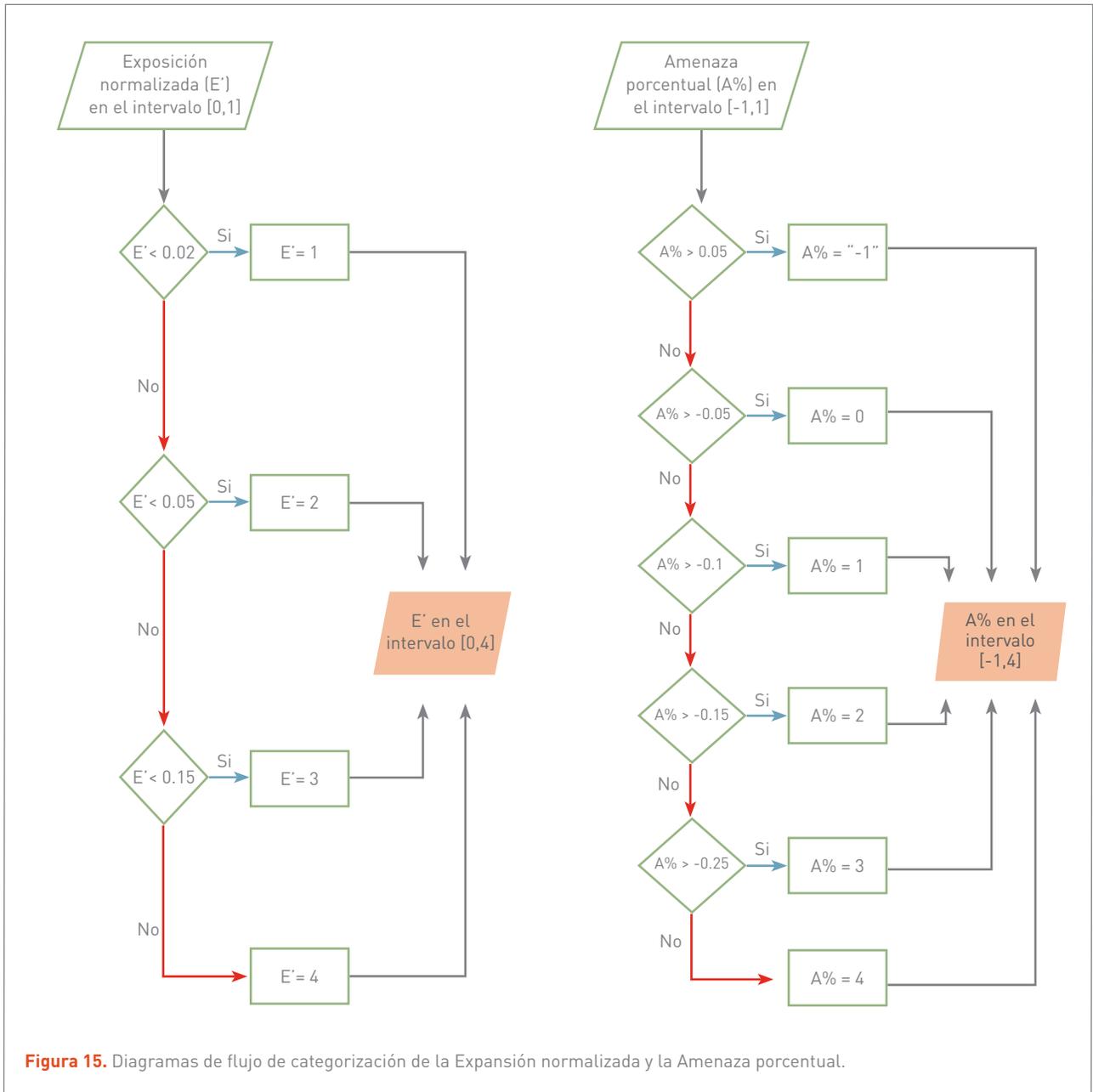


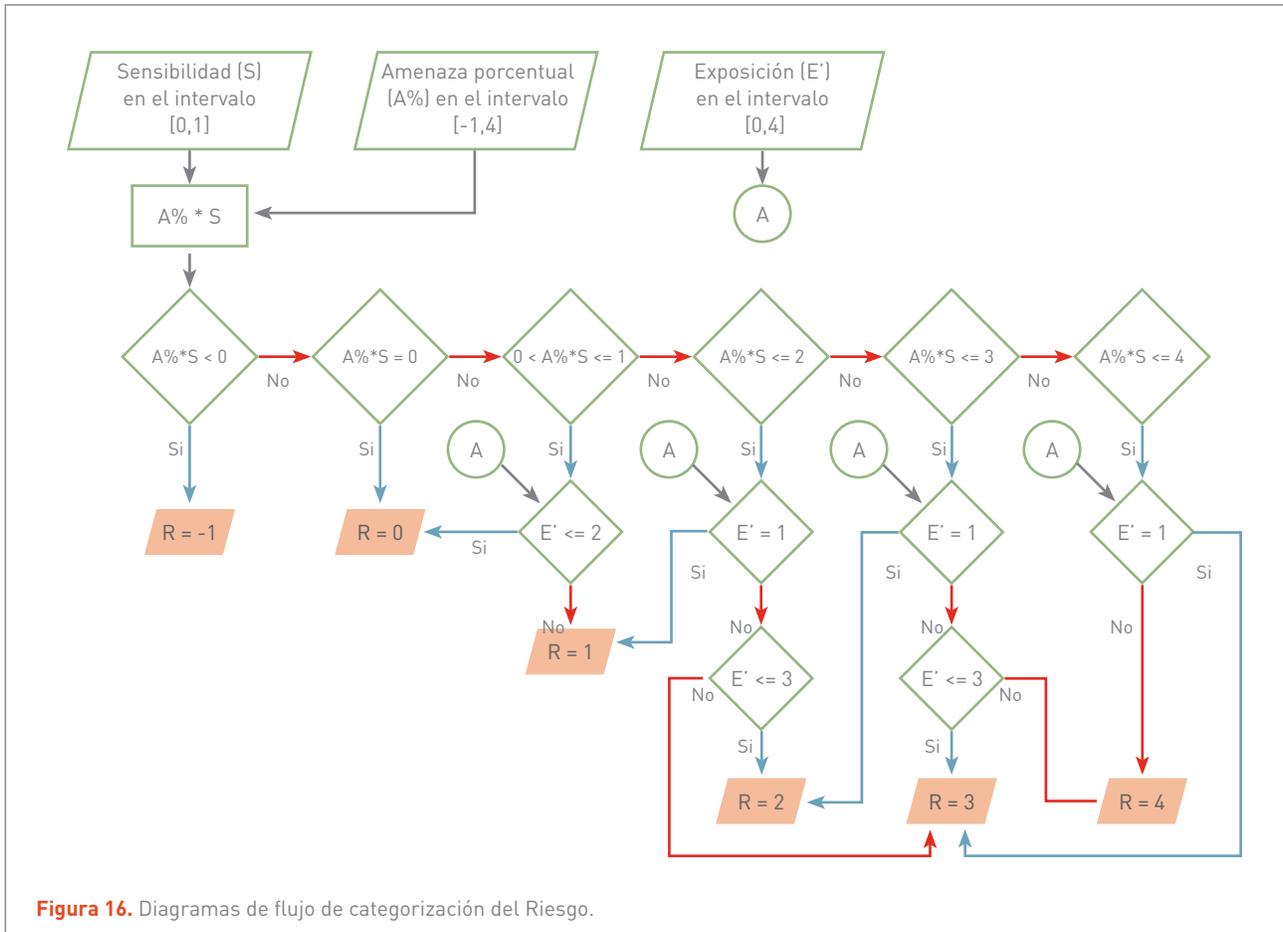
Figura 15. Diagramas de flujo de categorización de la Expansión normalizada y la Amenaza porcentual.

Amenaza porcentual y Exposición normalizada se categorizaron utilizando los diagramas de flujo mostrados en la **Figura 15**.

Con los resultados de Exposición normalizada y Amenaza porcentual categorizados, se utiliza el diagrama de flujo de la **Figura 16** para categorizar el Riesgo y queda definido según la **Tabla 12**.

Riesgo	Categoría
-1	Oportunidad
0	Sin Riesgo
1	Riesgo bajo
2	Riesgo medio
3	Riesgo alto
4	Riesgo muy alto

Tabla 12. Categorías de Riesgo del Sector Agricultura.

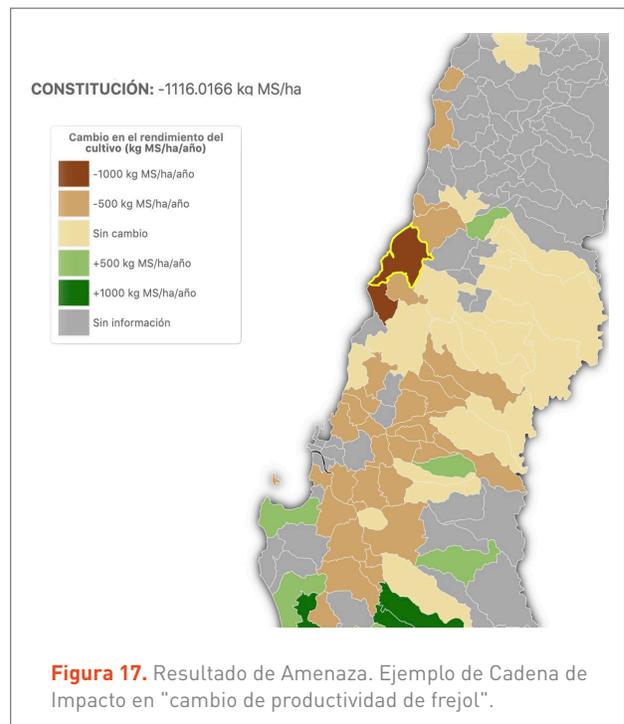


6.1.4 RESULTADOS

Los resultados de Amenaza, Exposición, Sensibilidad y Riesgo de este sistema se pueden consultar y descargar desde la plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020). A continuación se presenta, a modo de ejemplo, algunos resultados de la Cadena de Impacto “cambio de productividad cultivo del frejol”.

a. Resultados de Amenaza

La Amenaza se presenta como la variación en el rendimiento futuro con respecto al presente, en kilogramos de materia seca, por hectárea, por año (kg MS/ha/año) para el cultivo de frejol. Los resultados negativos indican que existe pérdida en los rendimientos simulados, mientras que los resultados positivos muestran un aumento en los rendimientos (**Figura 17**).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

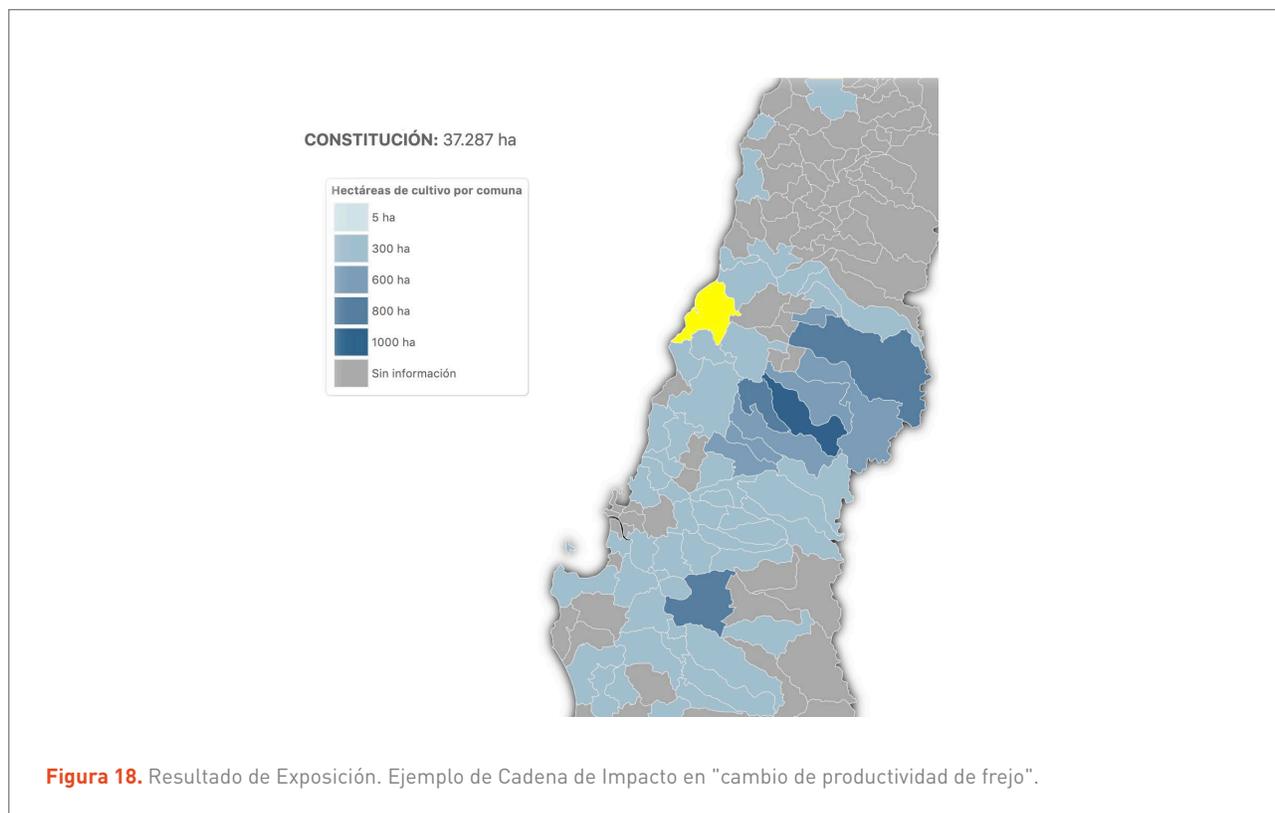


Figura 18. Resultado de Exposición. Ejemplo de Cadena de Impacto en "cambio de productividad de frejo".

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

Las comunas que se ven mayormente amenazadas corresponden a Constitución (Región del Maule), Melipilla (Región Metropolitana) y Chanco (Región del Maule), con una Amenaza promedio de -1.115, -1.028 y -1.020 kg MS/ha/año, respectivamente.

b. Resultados de Exposición

La Exposición se presenta como la superficie del cultivo en hectáreas a nivel comunal. Tanto la extensión como la concentración de la superficie cultivada depende del tipo de cultivo a analizar, como también si se presenta bajo riego o en secano (**Figura 18**).

Para el caso del frejol, las comunas con mayor superficie son Longaví (Región del Maule), Los Ángeles (Región del Bío-Bío) y San Clemente (Región del Maule), con 1.358, 709 y 708 hectáreas, respectivamente.

c. Resultados de Sensibilidad

El índice de Sensibilidad se presenta como el resultado del promedio entre diversos parámetros comunes para todas las Cadenas de Impacto analizadas por el sector agrícola. Los valores van de la categoría "bajo" a la categoría "muy alto", en una escala relativa de 0 a 1 (**Figura 19**).

A nivel nacional, las comunas que presentaron un mayor índice de Sensibilidad relativo corresponden a Chaitén (Región de Los Lagos), San Fabián (Región de Ñuble), Lonquimay (Región de La Araucanía) y Treguaco (Región de Ñuble), mientras que las que presentaron un menor índice de Sensibilidad relativo son Melipilla (Región Metropolitana), Colina (Región Metropolitana) y Casablanca (Región de Valparaíso).

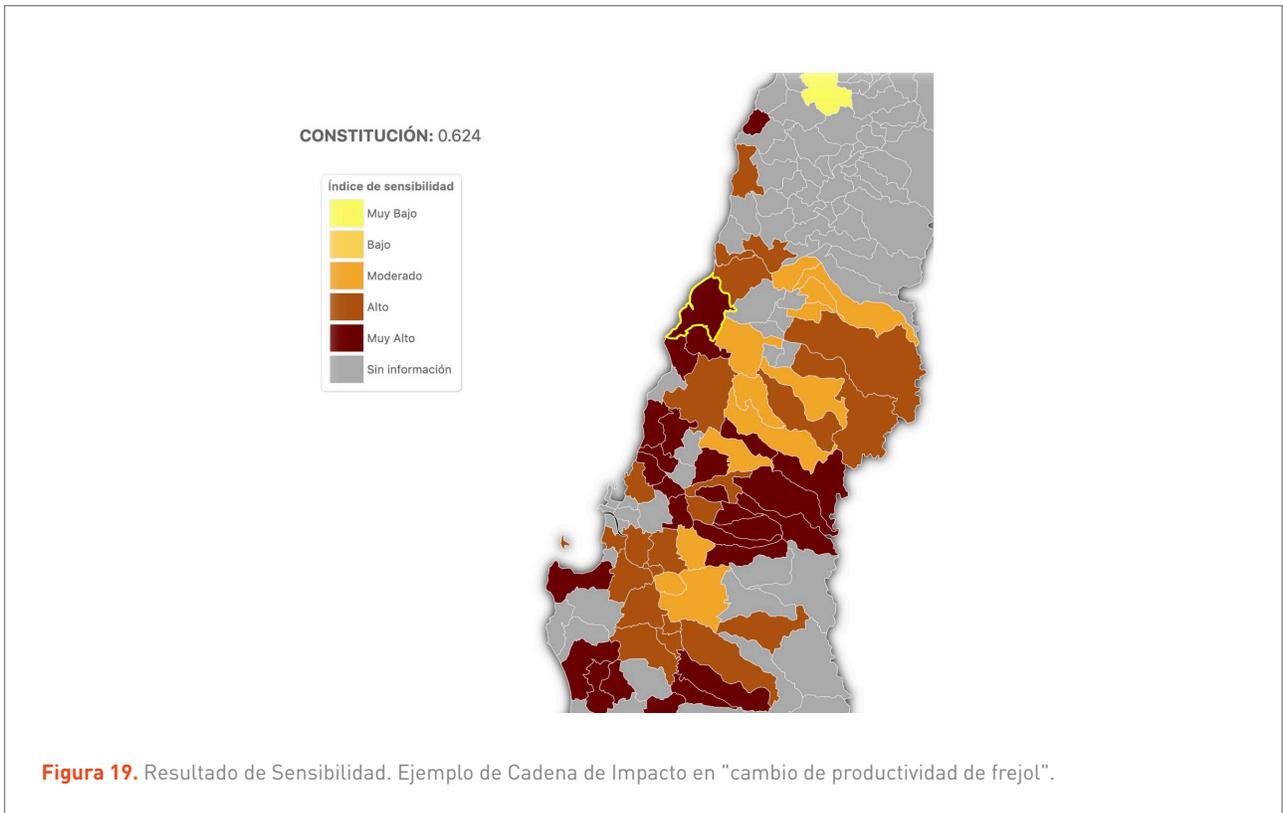


Figura 19. Resultado de Sensibilidad. Ejemplo de Cadena de Impacto en "cambio de productividad de frejol".

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

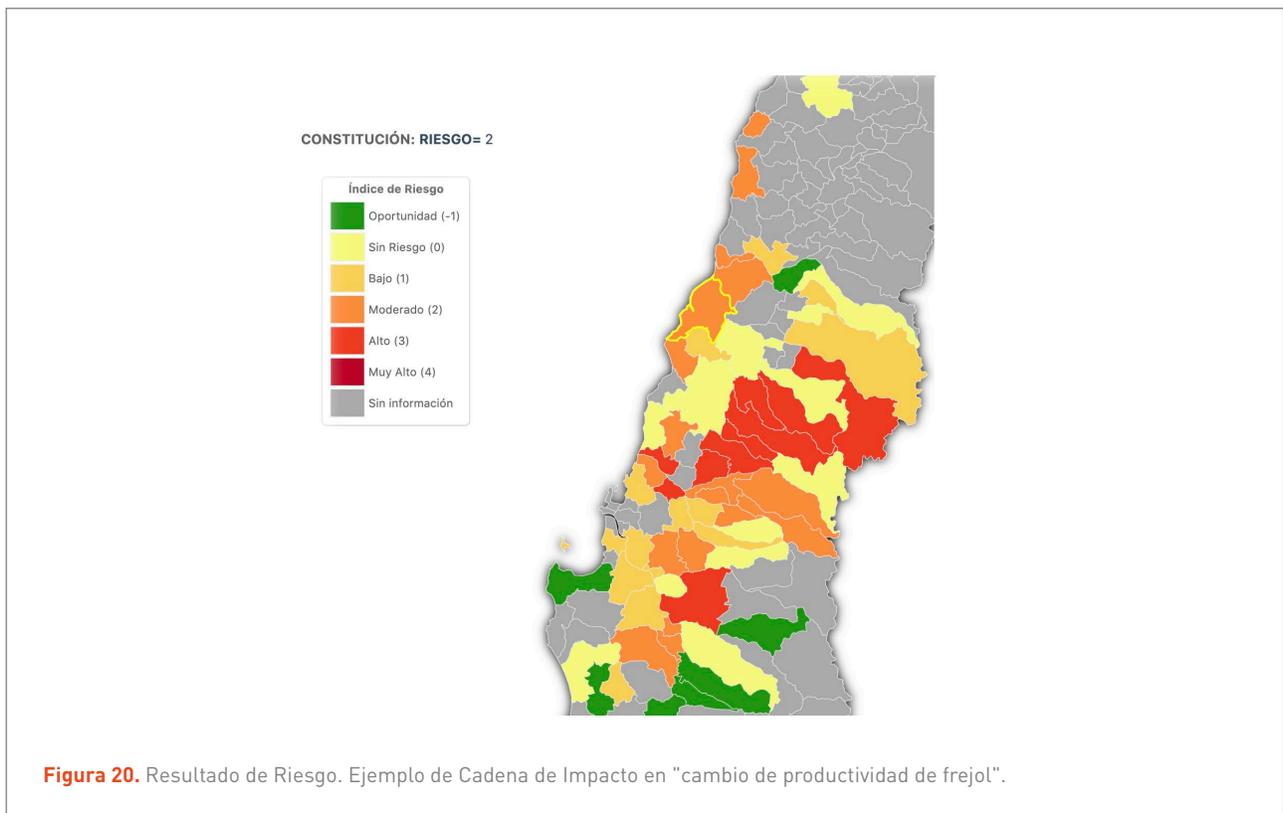


Figura 20. Resultado de Riesgo. Ejemplo de Cadena de Impacto en "cambio de productividad de frejol".

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

d. Resultados de índice de Riesgo

Se estima que todas las Cadenas de Impacto analizadas en este proyecto presentarán algún grado de Riesgo en la productividad asociada al cambio climático. Sin embargo, existen cultivos que, en determinadas zonas presentan una oportunidad, dado que los rendimientos futuros son mayores a los presentados en el tiempo presente (frejol, praderas, bovinos de carne y leche, ovino, nueces, almendra y cerezo).

En la **Figura 20** se muestra un ejemplo del resultado de Riesgo en frejol. Los valores van de la categoría bajo a la categoría muy alto, en una escala relativa de 0 a 4. Los valores -1, que son categorizados como “oportunidad”, presentan rendimientos positivos significativos en el escenario futuro. En este caso, las comunas que se estiman tendrán mayor Riesgo relativo corresponden a Colbún, Longaví (Región del Maule), Retiro (Región del Maule), Parral (Región del Maule), Ñiquen (Región de Ñuble), San Carlos (Región de Ñuble), San Nicolas (Región de Ñuble), Treguaco (Región de Ñuble), Ránquil (Región de Ñuble) y Los Ángeles (Región del Biobío).

6.1.5 CONCLUSIONES

Es posible estimar el cambio en los rendimientos de diferentes subsistemas agrícolas dado los modelos matemáticos y agronómicos (Meza *et al.*, 2020).

Los resultados obtenidos de este estudio varían entre un subsistema y otro. Para cultivos anuales, se estima que todos presentarán un nivel de Riesgo debido al cambio climático. En general, si el cultivo se produce bajo riego, el mayor Riesgo se ve en zonas costeras y del centro-norte del país, mientras que, si es en seco, el mayor Riesgo se encuentra en el sector cordillerano de la zona sur (Meza *et al.*, 2020).

Con respecto a praderas y capacidad de carga animal, los resultados no muestran un Riesgo significativo en la productividad asociado al cambio climático. Es más, se

estima que la productividad a causa del cambio climático aumente en las zonas estudiadas (Meza *et al.*, 2020).

Finalmente, a partir de los resultados de frutales, se estima que la tendencia posiciona a la zona costera y a la depresión intermedia como las áreas de mayor Riesgo consecuente del cambio climático entre las regiones de Coquimbo y del Biobío. Por otro lado, se estima un aumento en el rendimiento en la zona precordillerana desde la región de La Araucanía hacia el sur (Meza *et al.*, 2020).

En cuanto a los aspectos que no se abordaron en este sistema, y que son consideradas como brechas, se encuentra la incorporación de eventos climáticos extremos (olas de calor, sequías, heladas e inundaciones), cambios de uso de suelo, deforestación y factores culturales en las proyecciones futuras. Asimismo, está pendiente la incorporación más formal de la capacidad adaptativa en un índice consolidado de Vulnerabilidad, de manera de modificar el valor de Sensibilidad que se presenta en este estudio.

6.2 BOSQUES NATIVOS



6.2 BOSQUES NATIVOS

6.2.1 INTRODUCCIÓN

En Chile existen, aproximadamente, 14 millones de ha de bosques nativos de diferentes estructuras y especies arbóreas dominantes en un gradiente latitudinal de 2.700 km (31°-56°S) (CONAF, 2020). Los bosques nativos, asociados a una alta biodiversidad de especies nativas y endémicas, corresponden al principal patrimonio natural del país. Brindan servicios ecosistémicos que incluyen la regulación climática, el secuestro de carbono y la provisión de agua en cantidad y calidad (Lara *et al.*, 2019; Lewis *et al.*, 2019; Viña *et al.*, 2016).

A diferencia del cambio de uso de suelo, los efectos del cambio climático en los bosques nativos han sido poco evidentes, pues éstos ocurren de manera gradual y acumulativa en el tiempo, generando cambios a escalas temporales poco perceptibles para los humanos. Sin embargo, se ha demostrado que algunos fenómenos climáticos extremos, como las sequías y las olas de calor, pueden tener consecuencias sobre la productividad fotosintética de los bosques, que incluso podrían llegar a ser fatales para las especies nativas. La respuesta de los bosques nativos puede considerarse un efecto directo del cambio climático y son cuantificados mediante el análisis de índices de vegetación (IV's, e.g. NDVI, del inglés Normalized Difference Vegetation Index) y su relación con los cambios de temperatura y precipitación.

Por otro lado, se ha identificado que los cambios en el clima también pueden producir efectos indirectos sobre los bosques nativos, a través de la interacción con otros componentes del sistema climático que pueden llegar a producir otros efectos que deterioran o destruyen los bosques nativos. Los incendios forestales han sido el efecto indirecto más notorio en el deterioro de los bosques en Chile, cuyo origen se relaciona fuertemente a actividades humanas ya sea accidentales o intencionales, no obstante, existen condiciones climáticas que son favorables para su propagación y mantención.

El incremento en las temperaturas, una reducción de las precipitaciones en la zona central de Chile y una mayor frecuencia de años secos consecutivos entre los años 2010 y 2020 (Boisier *et al.*, 2016; Garreaud *et al.*, 2017, 2020; González *et al.*, 2018) han aumentado los efectos directos e indirectos del cambio climático en los bosques. Un ejemplo de ello es lo ocurrido el año 2017, cuando Chile sufrió la más catastrófica temporada de incendios con ~ 530.000 ha quemadas, representando 10 veces la media histórica (54.800 ha/año; CONAF, (2018)). La combinación de la mega sequía y olas de calor han producido un aumento en el área total quemada. En la última década se han producido 16 de los 22 mega incendios registrados desde 1985, representando el 82% del área quemada total por estos eventos desde dicho año. Esto ha significado, también, que los bosques nativos han aumentado en casi al doble la media anual de área quemada en el periodo 2008-2018 (González *et al.*, 2020).

En la presente sección se sintetiza la estrategia de evaluación del Riesgo climático en bosque nativo, según detalla el **Informe Proyecto ARCLim: Equipo de Bosques Nativos y Plantaciones Forestales (Miranda, Carrasco, González, Mentler, Moletto, Altamirano & Lara, 2020)**.

6.2.2 CADENAS DE IMPACTO

Considerando los antecedentes expuestos en la introducción, para este estudio se identificaron dos Cadenas de Impacto. En la **Tabla 12** se observan los subsistemas abordados en este estudio, cuyo Riesgo se obtuvo a través de Cadenas de Impacto en función de tres factores determinantes: (i) Amenaza, (ii) Exposición y (iii) Sensibilidad.



Subsistema	Cadena de Impacto	Amenaza derivada del cambio climático	Exposición	Sensibilidad	Riesgo
Bosques nativos	Verdor en bosques nativos	Aumento conjunto de olas de calor y sequías	Proporción de bosques nativos en todo el territorio nacional	Efecto combinado de cambios de variables ambientales y climáticas que afectan el índice de vegetación (NDVI)	Riesgo de pérdida de verdor
	Incendios en bosques nativos	Aumento de frecuencia de olas de calor	Proporción de bosques nativos en todo el territorio nacional	Probabilidad de ocurrencia de incendios forestales	Riesgo de incendios forestales

Tabla 13. Resumen Cadenas de Impacto “Sistema Bosques Nativos”.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

6.2.3 METODOLOGÍA

La metodología utilizada responde al cumplimiento del objetivo general: “Evaluar el Riesgo climático en bosques nativos y plantaciones forestales en Chile, determinando las áreas de mayor Sensibilidad y Amenaza de sufrir incendios forestales o disminución en su productividad” obtenido del Informe Sectorial de Bosques y Plantaciones (Miranda *et al.*, 2020).

a. Región bajo análisis

El área de estudio comprende a todo el territorio de Chile continental, desde la Región de Arica y Parinacota a la Región de Magallanes. Sin embargo, es importante mencionar que la mayoría de los bosques nativos se encuentran entre las regiones de Coquimbo y Magallanes. Por otro lado, los incendios se concentran mayormente entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos (González *et al.*, 2018), que es coincidente, además, con las zonas que concentran la mayor parte de los asentamientos humanos del país. Considerando que las bases de datos son de diferentes resoluciones espaciales, los resultados de los análisis fueron agrupados a escala comunal con el objetivo de homogeneizar la información.

b. Modelos utilizados

Para el cálculo de la Amenaza y de la Sensibilidad de los bosques nativos, se utilizó un modelo de *machine learning*

(ML), que permite encontrar relaciones complejas entre variables predictoras y variables respuesta. Estos modelos han demostrado ser muy útiles en aplicaciones prácticas donde no hay modelos paramétricos que expliquen el fenómeno en cuestión, incluso se ha evidenciado que en diferentes aplicaciones son más precisos que los modelos estadísticos tradicionales (Olden *et al.*, 2008).

El método de ML utilizado consiste en un análisis de *boosted regression trees* (BRT) (Elith *et al.*, 2008), que son árboles de decisión, cuyo objetivo es predecir respuestas en función de variables predictoras. Se identifican las variables predictoras más importantes en la predicción de un proceso modelado (variables respuesta), basado en la contribución que hace cada variable en el proceso de aprendizaje del modelo. Por ejemplo, se puede predecir o modelar la ocurrencia o no ocurrencia de una ignición, o la pérdida de productividad fotosintética del bosque forestal, a partir de variables climáticas. Mediante esta técnica se generan muchos árboles de decisión que son combinados en un último modelo, mejorando las capacidades predictivas y exactitud de este último. Este método entrega también, como resultado, las variables más relevantes para cada formación y el tipo de relación con las variables de respuesta.

c. Caracterización de la Amenaza

i. Amenazas sobre verdor en bosques nativos

Se evaluó la Amenaza directa que existe sobre la pro-

ductividad de bosques nativos por efecto de cambios en el régimen de temperatura y precipitación. Para determinar específicamente cuál o cuáles son las variables climáticas que representan una mayor Amenaza para los bosques nativos fue necesario encontrar una relación entre los cambios que ha sufrido la productividad fotosintética (verdor) de los bosques en los últimos 20 años y las variables climáticas como las sequías, los cambios en la temperatura máxima y las olas de calor. Para lograr este objetivo se utilizó un modelo de *machine learning* (ML) que permitió vincular variables predictoras con variables respuestas. En este caso la variable respuesta es el cambio de verdor de la vegetación medido con un índice de vegetación (NDVI) en relación a variables climáticas como predictores, específicamente el cambio en la precipitación entre los períodos 2000-2010 y 2010-2020, y el cambio en la ocurrencia de olas de calor, calculado como el número de días en el mes con temperaturas máximas sobre 30°C, entre los períodos 2000-2010 y 2010-2020.

Finalmente, con el uso de este modelo, la Amenaza se calculó para el período histórico (1980-2010), futuro (2035-2065) y el cambio entre ambos períodos. Para cubrir estos períodos de tiempo se utilizaron datos generados por el proyecto ARCLim, provenientes de modelos de circulación general (GCM). Los valores de Amenaza van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las comunas que no poseen Amenaza en el clima histórico o futuro, o que no muestran aumento de Amenaza entre ambos períodos, y donde 1 corresponde a las comunas donde existe la mayor Amenaza en el clima histórico o futuro, o que muestran un aumento de Amenaza entre ambos períodos, donde se define a la Amenaza como el índice de aumento de olas de calor y sequías.

ii. Amenazas de incendios en bosques nativos

Se evaluó la Amenaza indirecta del cambio climático reflejada en la ocurrencia y propagación de incendios en los bosques nativos por un aumento de fenómenos climáticos extremos, como las sequías y las olas de calor (temperaturas sobre 30°C por al menos tres días). En particular, las altas temperaturas favorecen la ignición debido a la rápida pérdida del contenido de humedad de los combustibles finos y, por otro lado, las altas temperaturas sostenidas

por varios días pueden generar condiciones favorables para la propagación de incendios forestales mediante la pérdida de humedad de todo el sistema e incremento de la velocidad de propagación del calor (Van Wagtenonk, 2006). A su vez, las olas de calor se encuentran asociadas a una disminución de la humedad relativa, disminución de la nubosidad y a fuertes vientos en diferentes zonas del país (González et al., 2020), todas condiciones favorables para la ignición y propagación de los incendios.

Para entender el efecto de las olas de calor en la superficie afectada por los incendios, se relacionó el número de días en régimen de ola de calor anual con el área anual quemada entre los años 1985 y 2018. Por otro lado, para determinar el efecto de las olas de calor en los incendios forestales, se utilizó la base de datos de todos los incendios desde el 1985 y a cada uno se le asignó la temperatura máxima del día con el objetivo de establecer la relación entre estas variables a nivel individual utilizando como variable respuesta el área quemada por incendio.

Finalmente, la Amenaza se calculó para el período histórico (1980-2010), futuro (2035-2065) y el cambio entre ambos períodos, utilizando datos generados por el proyecto ARCLim provenientes de modelos de circulación general (GCM). Los valores de Amenaza van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las comunas que no poseen Amenaza en el clima histórico o futuro, o que no muestran aumento de Amenaza entre ambos períodos, y donde 1 corresponde a las comunas en las que existe la mayor Amenaza en el clima histórico o futuro, o que muestran un aumento de Amenaza entre ambos períodos, donde se define a la Amenaza como el índice de olas de frecuencia de olas de calor.

d. Caracterización de la Exposición

La Exposición de los bosques nativos frente a los efectos del cambio climático es igual para ambas Cadenas de Impacto (directa e indirecta) y se representa mediante la distribución comunal de los bosques nativos en todo el territorio nacional. Para la generación del mapa se utilizó el mapa de coberturas de suelo de Chile de Zhao *et al.* (2016) del año 2014, que distingue entre bosques nativos y plantaciones forestales para todo el territorio nacional. Sin



embargo, para la región de Magallanes, se prefirió utilizar la base de datos global de cambio de cobertura forestal con una cobertura arbórea mayor a 50% de Hansen *et al.* (2013), que determina la pérdida y ganancia de bosques desde el año 2000 y que se actualiza anualmente. Sobre estos datos iniciales se estimó la Exposición considerando otras dos bases de datos en el análisis: los resultados de proyecto “Catastro de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile: Monitoreo de Cambios y Actualizaciones” (CONAF, 2011), la base de datos de la Sinopsis Bioclimática y Vegetacional publicada por Luebert & Pliscoff (2006) y la de Hansen *et al.* (2013) para corregir la de Zhao *et al.* (2016).

La metodología consiste en sumar o restar píxeles a los datos iniciales según algunos criterios definidos por región administrativa, lo que tiene como objetivo mejorar el mapa base de cobertura de Bosques Nativos de Zhao *et al.* (2016) entre las regiones de Arica y Parinacota y la cobertura de Hansen *et al.* (2013) para la región de Aysén y Magallanes. Sumado a lo anterior, se realizó una corrección o proceso de depuración que evita, por ejemplo, la presencia de píxeles de bosque en ciudades o dentro de cuerpos de agua. Finalmente, se constituyó la base final de bosques nativos de Chile, que representa toda área que se encuentre dominada por árboles nativos de forma natural. Los valores de Exposición de bosques nativos van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las comunas menos expuestas (ausencia de bosques nativos) y donde 1 a las más expuestas (máxima proporción de bosques nativos) frente a efectos del cambio climático (pérdida de verdor o incendios forestales). Cabe indicar que en ambos horizontes temporales se emplea la misma distribución de Exposición actual.

e. Caracterización de la Sensibilidad

i. Sensibilidad del verdor en bosques nativos

La Sensibilidad de la productividad fotosintética de los bosques nativos frente a cambios en el régimen de temperatura y precipitación se evaluó utilizando datos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI), que es útil para determinar la abundancia de clorofila en las hojas, lo que a su vez determina la productividad fotosintética de los bosques. Sobre las series de tiempo de NDVI

se realizaron dos cálculos: i) el cambio proporcional en el NDVI entre dos períodos PreSr y Sr (PreSr: 18/02/2000 - 18/02/2010 y Sr: 18/02/2010 - 18/02/2020) y ii) la tendencia del NDVI en el tiempo calculado mediante el ajuste de una regresión lineal simple en el período 2000-2020. Por otro lado, a cada píxel se le asignaron diferentes variables ambientales que dan cuenta de la Sensibilidad de los bosques nativos a los cambios en temperatura y precipitación, denominadas variables predictoras de la Sensibilidad. Para más información sobre el detalle y la obtención de las variables utilizadas se invita a revisar el Informe Sectorial de Bosques y Plantaciones (Miranda *et al.*, 2020).

Finalmente, para la evaluación de la Sensibilidad, se utilizó un modelo de machine learning. En este caso, la variable respuesta es el cambio en el verdor de la vegetación medido en las series temporales de NDVI y las variables predictoras son las variables ambientales y climáticas. Utilizando este modelo se obtienen las variables más relevantes para cada formación y el tipo de relación con el cambio en NDVI. Para la evaluación final de la Sensibilidad se ajustarán nuevos modelos, excluyendo las variables climáticas, para cuantificar el efecto de las variables no climáticas que hayan sido seleccionadas en los modelos generales por formación. Con estos modelos finales se predijo la Sensibilidad a escala comunal. Los valores de Sensibilidad van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las comunas menos sensibles (nula sensibilidad) y donde 1 a las comunas más sensibles a efectos del cambio climático sobre la productividad fotosintética de los bosques nativos. En ambos horizontes temporales se emplea la misma distribución de sensibilidad actual.

ii. Sensibilidad de los bosques nativos a incendios forestales

La Sensibilidad de los bosques nativos frente los incendios forestales depende de la probabilidad de ocurrencia de éstos, es decir, la Sensibilidad va a depender del contexto en el cual se encuentren los bosques nativos para determinar qué tan probable es que se inicie un incendio en sus cercanías. Para cuantificar los incendios se utiliza la base de datos pública de incendios, provista por la Corporación Nacional Forestal (CONAF), que entrega las coordenadas geográficas de todos los puntos de ignición de incendios

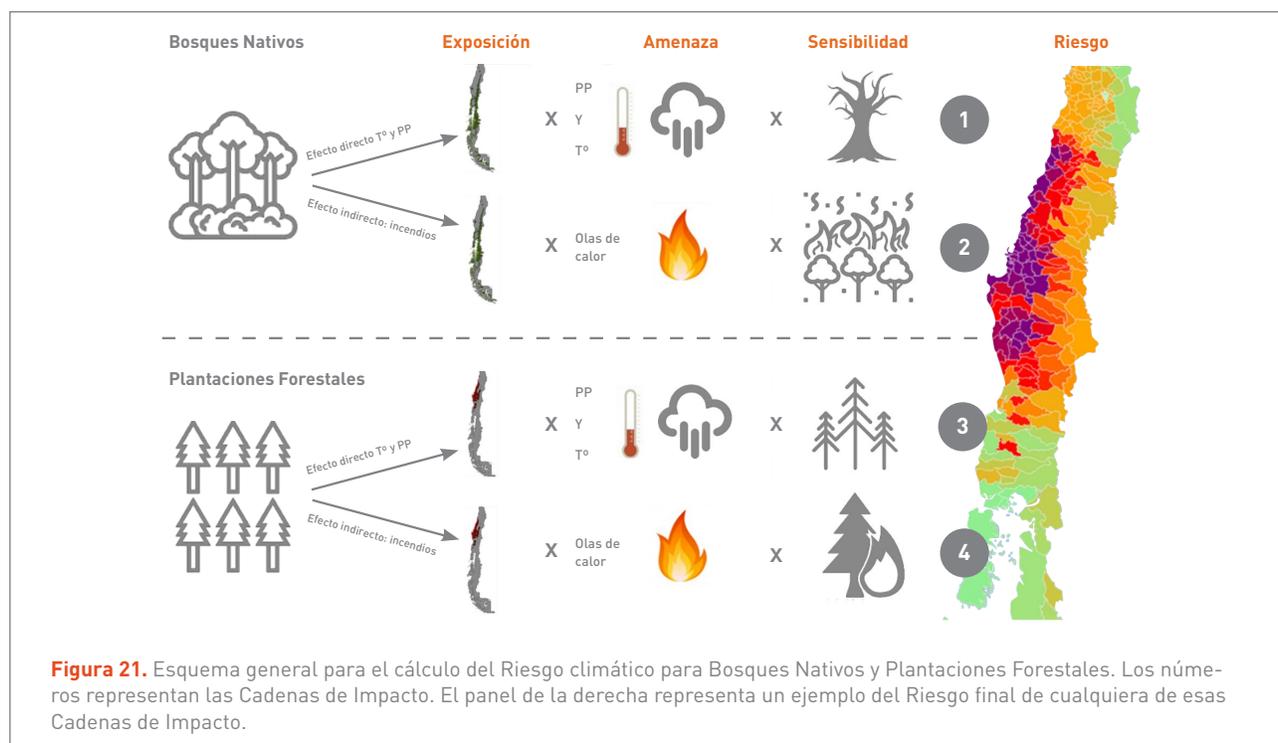
ocurridos en Chile, entre el año 1985 y el 2018. Para el análisis, se separa en dos partes la base de datos original: una para el análisis de la relación clima-incendios y la otra para entender el proceso de ignición de los incendios, determinada principalmente por variables relacionadas con la actividad humana. A su vez, para contrastar la ocurrencia con condiciones en donde pueda ser menos probable, la base de datos fue complementada con la misma cantidad de puntos en donde no hubo un incendio en el periodo anteriormente mencionado, cumpliendo, además, con la condición de estar localizados a una distancia mínima de 2 km de cualquier punto de ignición.

Para determinar las zonas de mayor probabilidad de ocurrencia, se selecciona una serie de variables que pueden operar, como factores subyacentes de las etapas tempranas de los incendios forestales (Ganteaume & Syphard, 2018). En particular, se agrupan variables que representan diferentes características del territorio, tales como actividad humana, topografía y coberturas del suelo. Para identificar las variables más importantes, con el fin de explicar la probabilidad de ocurrencia, se utilizaron modelos de machine learning (ML) que predicen la ocurrencia o la no ocurrencia de una ignición mediante

árboles de decisión, que además identifican las variables más importantes en la predicción del proceso modelado. Finalmente, para determinar la Sensibilidad final de bosques nativos, se utilizó el modelo entrenado para la predicción de la ocurrencia de incendios para todo el territorio nacional, dadas las condiciones ambientales propias de cada comuna en cuanto a su actividad humana, topografía y coberturas del suelo. Finalmente, la Sensibilidad fue agrupada a nivel comunal y sus valores van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las comunas menos sensibles (nula sensibilidad) y donde 1 equivale a las comunas más sensibles a efectos del cambio climático por generación de incendios en bosques nativos. En ambos horizontes temporales se empleó la misma distribución de Sensibilidad actual.

f. Análisis sobre la capacidad adaptativa

El análisis de capacidad adaptativa sobre bosques nativos y plantaciones forestales se revisa en la Sección 6.10 de plantaciones forestales. Sin embargo, su análisis completo se encuentra en el informe “Consideraciones Preliminares de la Capacidad Adaptativa al Cambio Climático del Sector Forestal en Chile” (Andueza *et al.*, 2020).



Fuente: Miranda *et al.* (2020).



g. Caracterización del Riesgo

La **Figura 21** muestra el flujo de trabajo utilizado para el cálculo del riesgo climático a escala comunal, tanto para el sistema de bosques nativos como para el de plantaciones forestales, este último explicado en la Sección 6.10 de este informe. Para el sistema de bosques nativos se realizó el cálculo para dos Cadenas de Impacto: i) el verdor en los bosques nativos y ii) los incendios de bosques nativos. Según este esquema, la estimación del Riesgo se cuantifica como la multiplicación de los índices de Amenaza, Exposición y Sensibilidad para cada Cadena de Impacto, donde, al igual que la Amenaza, se obtienen distintos valores para el período histórico (1980-2010), futuro (2035-2065) y el cambio entre ambos. Los valores de Riesgo van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las comunas con menor Riesgo o cambio de Riesgo (nulo) y donde 1 corresponde a las comunas con mayor Riesgo o cambio de Riesgo por efectos del cambio climático.

6.2.4 RESULTADOS

Aquí se presenta, a modo de ejemplo, la Amenaza, la Exposición, la Sensibilidad y el Riesgo de la Cadena de Impacto “incendios en bosques nativos”, según los resultados presentes en la plataforma ARCLIM. Para más detalles ver el informe sectorial de Bosques y Plantaciones (Miranda *et al.*, 2020).

a. Resultados de la Amenaza

La Amenaza de los bosques nativos, por la ocurrencia de incendios, se realizó a través de la exploración de la relación que existe entre el área quemada y las olas de calor, lo cual surge de la hipótesis de que altas temperaturas favorecen la ocurrencia de incendios. En el informe sectorial (Miranda *et al.*, 2020) se demuestra que existe una relación entre la frecuencia de olas de calor y los incendios forestales y que, por lo tanto, las olas de calor representan una Amenaza real sobre los bosques nativos y plantaciones forestales. Los resultados se presentan en la **Figura 22** como un índice de aumento de frecuencia de olas de calor.

b. Resultados de la Exposición

La Exposición de los bosques nativos es un valor común para ambas Cadenas de Impacto y se representa como la superficie comunal cubierta por bosques nativos. En total se graficaron 13.241.627 ha de bosques nativos, con la máxima proporción en el sur de Chile. En la **Figura 23** se observa el mapa de Exposición de bosques nativos definido como un índice de proporción del bosque nativo.

c. Resultados de la Sensibilidad

En la **Figura 24** se observa la Sensibilidad de un bosque nativo frente a un incendio, la que se determinó mediante la estimación de probabilidad de que un incendio se inicie dadas ciertas condiciones socioambientales. Las variables más relevantes en la ocurrencia de incendios fueron la elevación y latitud, dentro de las variables topográficas, y la densidad a caminos, ciudades y densidad poblacional, como reflejo de la actividad humana en la probabilidad de ocurrencia. De esta manera, se realizó una modelación que evaluó las comunas que presentan los mayores índices de Sensibilidad, los que se encuentran localizados principalmente en la depresión intermedia y costa de la zona centro-sur del país. En la Figura indicada se observa la Sensibilidad obtenida como un índice de probabilidad de ocurrencia de incendios.

d. Resultados del Riesgo

El Riesgo de incendios en bosques forestales fue determinado utilizando índices calculados previamente. El Riesgo se obtiene a nivel comunal en el período histórico (1980-2010), futuro (2035-2065) y el cambio entre ambos. En la **Figura 25** se observa el índice de aumento de Riesgo de incendios en bosques nativos (diferencia entre el periodo futuro y periodo histórico). Aquí se aprecia que los máximos valores de Riesgo se ubican en la depresión intermedia de las regiones Metropolitana y O'Higgins, modulados por la Sensibilidad y por la Amenaza.

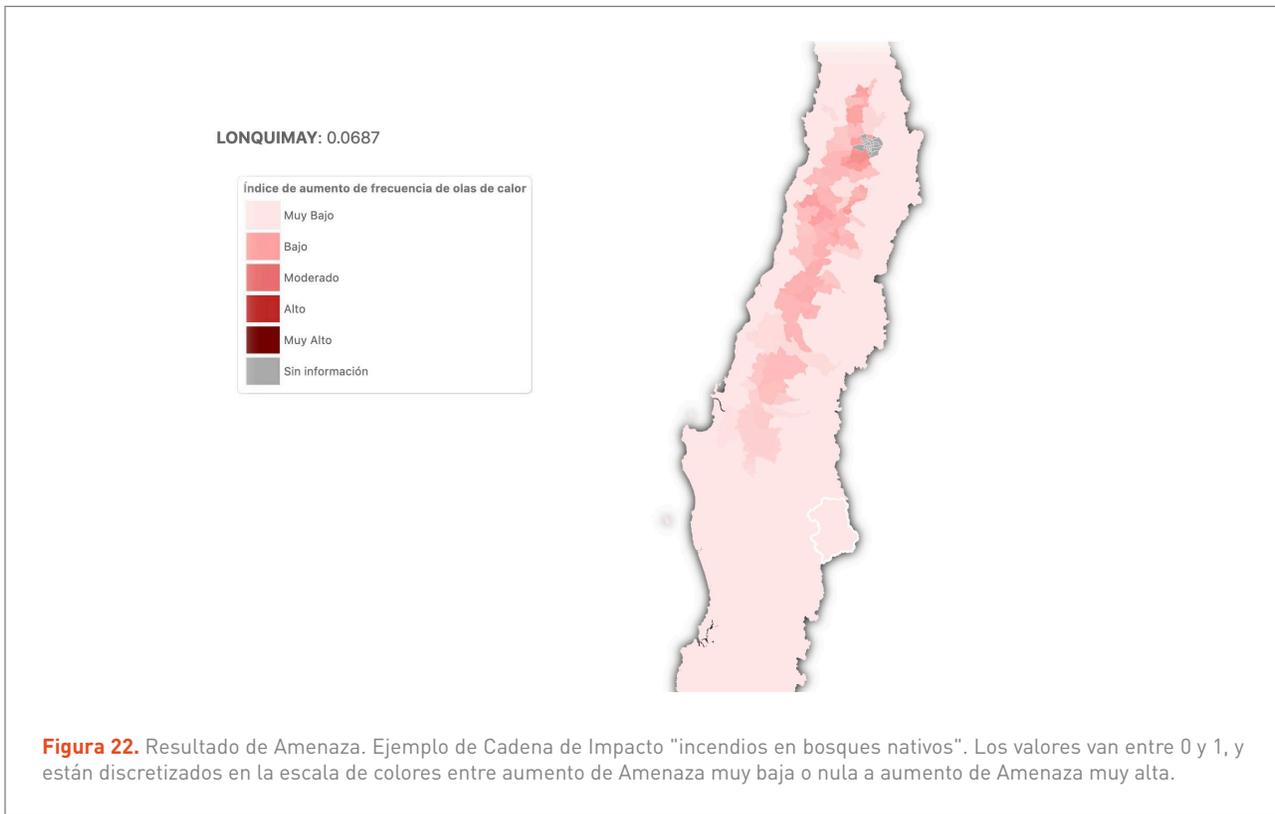


Figura 22. Resultado de Amenaza. Ejemplo de Cadena de Impacto "incendios en bosques nativos". Los valores van entre 0 y 1, y están discretizados en la escala de colores entre aumento de Amenaza muy baja o nula a aumento de Amenaza muy alta.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

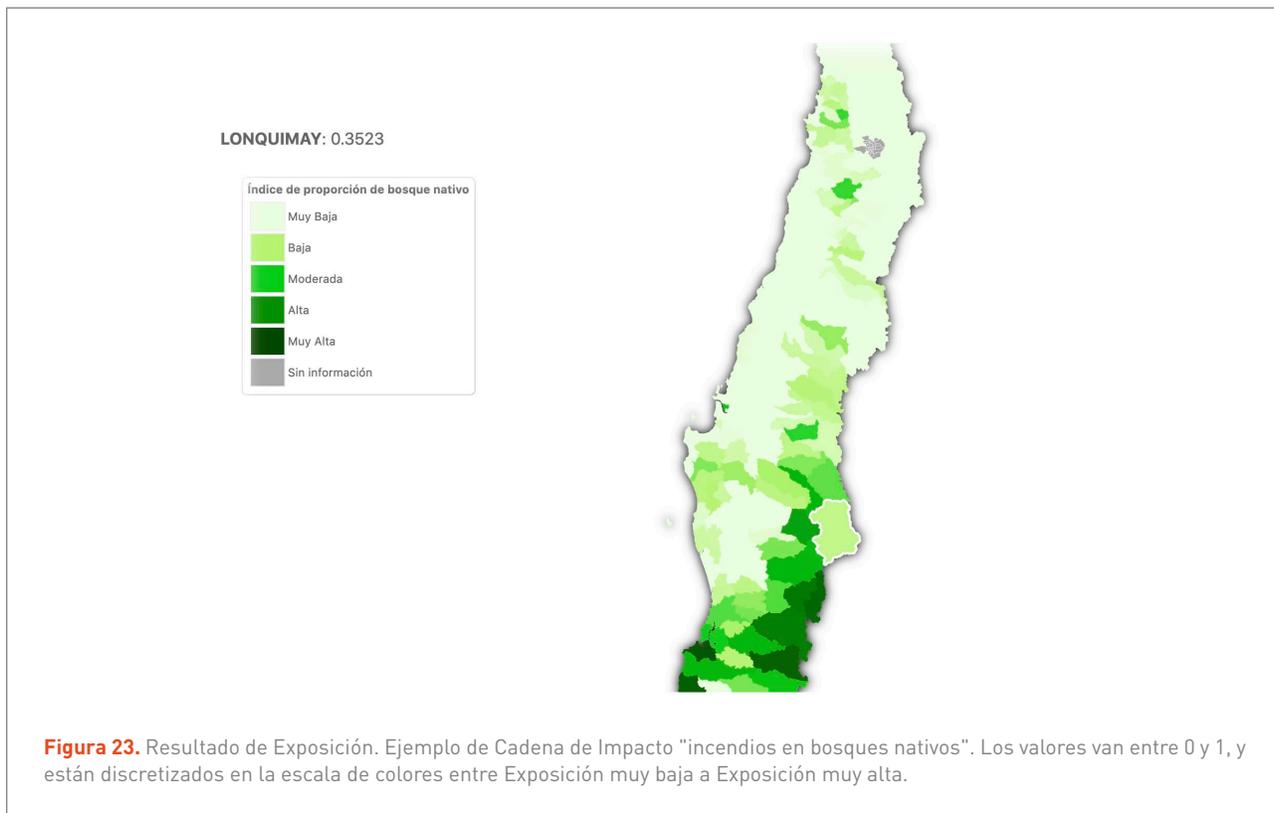


Figura 23. Resultado de Exposición. Ejemplo de Cadena de Impacto "incendios en bosques nativos". Los valores van entre 0 y 1, y están discretizados en la escala de colores entre Exposición muy baja a Exposición muy alta.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

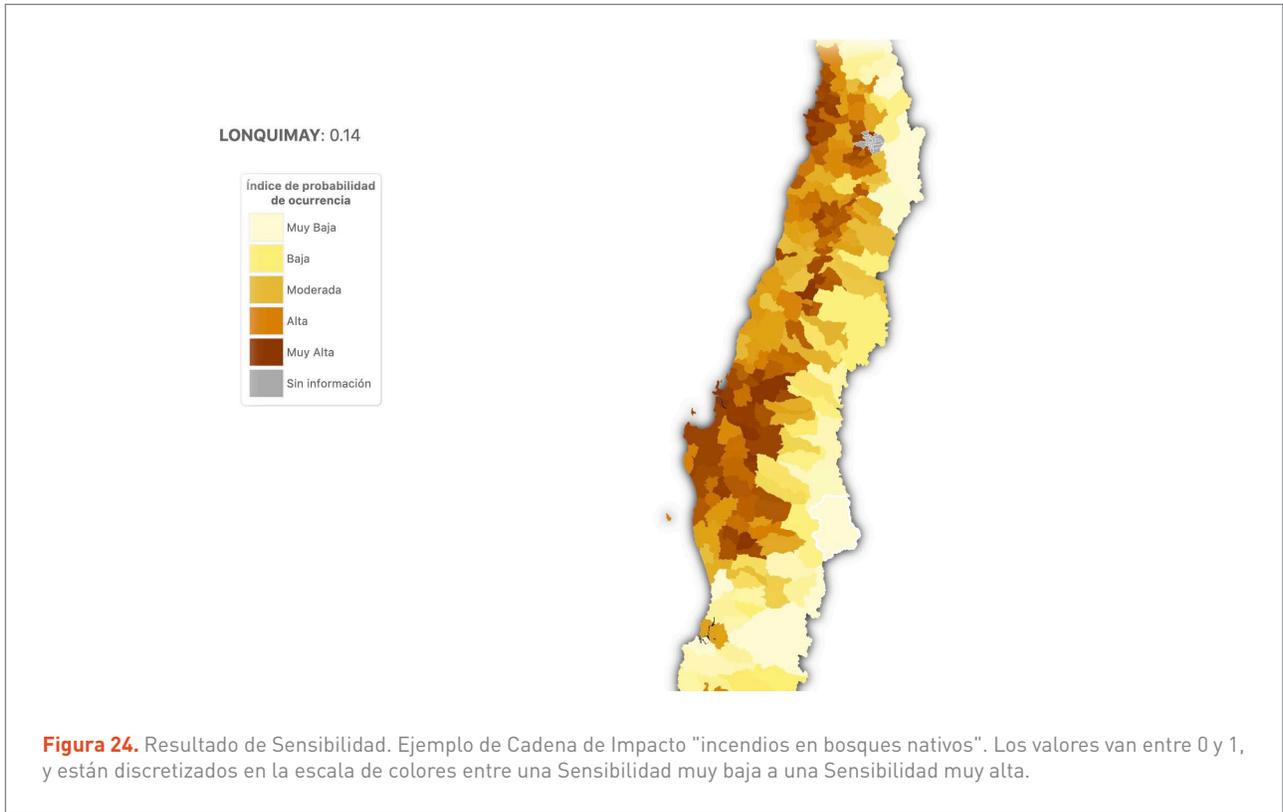


Figura 24. Resultado de Sensibilidad. Ejemplo de Cadena de Impacto "incendios en bosques nativos". Los valores van entre 0 y 1, y están discretizados en la escala de colores entre una Sensibilidad muy baja a una Sensibilidad muy alta.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

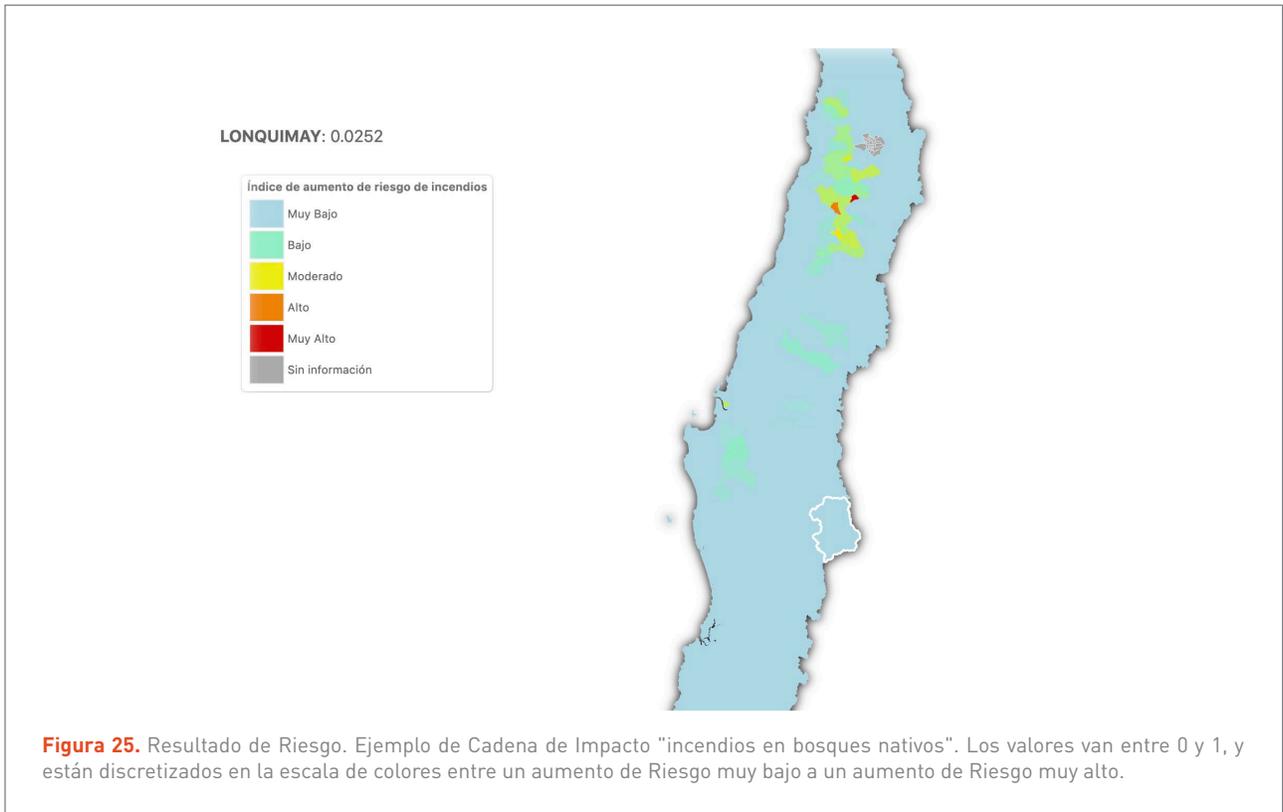


Figura 25. Resultado de Riesgo. Ejemplo de Cadena de Impacto "incendios en bosques nativos". Los valores van entre 0 y 1, y están discretizados en la escala de colores entre un aumento de Riesgo muy bajo a un aumento de Riesgo muy alto.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

6.2.5 CONCLUSIONES

En esta sección se exponen las principales conclusiones del informe sectorial de Bosques Nativos y Plantaciones (Miranda *et al.*, 2020). Respecto al análisis del Riesgo se observó que los bosques nativos entre las regiones de Los Lagos y Magallanes se encuentran en un régimen de Riesgo bajo en comparación a las otras zonas del país. Sin embargo, las zonas de los bosques nativos más expuestos a Riesgos climáticos son coincidentes con aquellas que contienen a los bosques de mayor valor de conservación para el país. Por otro lado, estos bosques, particularmente ubicados la cordillera de la costa y la depresión intermedia entre la Región de Coquimbo y Los Lagos, se encuentran en áreas sensibles ante incendios forestales, pues coinciden con las áreas de mayor densidad demográfica.

Los bosques entre Coquimbo y O'Higgins se encuentran bajo un alto Riesgo por la disminución de la precipitación

y los bosques ubicados entre el Maule y la Araucanía por el efecto de las olas de calor en la propagación de incendios forestales. Sin embargo, ambos efectos interactúan, pudiendo la disminución de la productividad fotosintética ser un precursor de incendios forestales. Además, estas regiones poseen una alta proporción del paisaje destinado a plantaciones forestales, lo que facilita la ignición y la propagación de incendios hacia bosques nativos aledaños a las plantaciones.

Como desafío futuro de este estudio, se identificó la necesidad de seguir explorando el efecto de los cambios en la temperatura y precipitación en la productividad fotosintética, pues el efecto de estos cambios es evidente en las regiones de Coquimbo y O'Higgins, pero a latitudes más altas este efecto no es tan claro. Lo anterior respondería a efectos locales o cambios en la composición de los bosques.

6.3 PLANTACIONES FORESTALES



6.3 PLANTACIONES FORESTALES

6.3.1 INTRODUCCIÓN

El grupo de trabajo encargado de evaluar las Cadenas de Impacto y el Riesgo sobre el Sistema de Plantaciones Forestales es el mismo que analizó el Sistema de Bosques Nativos (Sección 6.2) por lo tanto, los objetivos son los mismos para ambos sistemas. Sin embargo, las metodologías y resultados varían según las distintas características que tiene cada sistema.

A diferencia de los bosques nativos, que poseen una alta diversidad de especies, las plantaciones forestales en Chile están compuestas principalmente por especies de los géneros *Pinus* y *Eucalyptus*, cuyas principales características es que son monoespecíficos, coetáneos, establecidos a altas densidades y en grandes extensiones de terreno (Salas *et al.*, 2016), y que están destinados principalmente a la producción de pulpa y papel (Lara *et al.*, 2019). Según la Corporación Nacional Forestal, quienes llevan el registro oficial de bosques, la superficie actual de este sistema está estimada por en cerca de 3,2 millones de ha, distribuidos principalmente entre las regiones del Maule y La Araucanía (CONAF, 2020).

La evidencia indica que la megasequía no afectó a la productividad fotosintética de las plantaciones forestales y que, incluso, se observó una respuesta positiva en ella (Garreaud *et al.*, 2017). Sin embargo, la continuidad de las condiciones desfavorables podría afectar a las plantaciones forestales, a pesar de que sean especies mejor adaptadas a condiciones más secas. Por otro lado, existen evidencias de que hay una relación entre la disminución de la precipitación y el aumento de temperaturas con la ocurrencia y propagación de incendios forestales. Lo que se justifica principalmente porque, a diferencia de los bosques nativos, las especies forestales contienen una alta cantidad de combustible y producen paisajes homogéneos y continuos que favorecen la propagación de incendios (Gómez-González *et al.*, 2019; McWethy *et al.*, 2018; Miranda *et al.*, 2017).

En este trabajo se busca entender el potencial efecto del cambio climático sobre las plantaciones forestales a través de la influencia directa en la productividad fotosintética debido al aumento de las temperaturas y el déficit de precipitación, y en el efecto indirecto de estos cambios en el clima sobre la generación de condiciones favorables para la propagación de incendios.

En la presente sección se sintetiza la estrategia de evaluación del Riesgo climático en plantaciones forestales, según detalla el **Informe Proyecto ARCLIM: Equipo de Bosques Nativos y Plantaciones Forestales (Miranda, Carrasco, González, Mentler, Moletto, Altamirano & Lara, 2020)**.

6.3.2 CADENAS DE IMPACTO

Considerando los antecedentes expuestos en la introducción, para este estudio se identificaron dos Cadenas de Impacto. Se observa, además, los subsistemas abordados en este estudio cuyo Riesgo es obtenido a través de Cadenas de Impacto en función de tres factores determinantes: (i) Amenaza, (ii) Exposición, y (iii) Sensibilidad.

6.3.3 METODOLOGÍA

La metodología utilizada responde al cumplimiento del objetivo general “evaluar el Riesgo climático en bosques nativos y plantaciones forestales en Chile, determinando las áreas de mayor Sensibilidad y Amenaza de sufrir incendios forestales o disminución en su productividad.” obtenido del informe sectorial de Bosques y Plantaciones (Miranda *et al.*, 2020).

a. Región bajo análisis

Al igual que el sistema de bosques nativos, el área de estudio comprende a todo el territorio de Chile continental desde las regiones de Arica y Parinacota a Magallanes. Sin embargo, las plantaciones forestales, al igual que los bosques nativos, se encuentran principalmente entre las regiones de Coquimbo y Magallanes.



Subsistema	Cadena de Impacto	Amenaza derivada del cambio climático	Exposición	Sensibilidad	Riesgo
Plantaciones forestales	Verdor en plantaciones forestales	Aumento conjunto de olas de calor y sequías	Proporción de plantaciones forestales en todo el territorio nacional	Efecto combinado de cambios de variables ambientales y climáticas que afectan el índice de vegetación (NDVI)	Riesgo de pérdida de verdor
	Incendios en plantaciones forestales	Aumento de frecuencia de olas de calor	Proporción de plantaciones forestales en todo el territorio nacional	Probabilidad de ocurrencia de incendios forestales	Riesgo de incendios forestales

Tabla 14. Resumen Cadenas de Impacto Sistema Plantaciones Forestales.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

En las últimas cinco décadas, la zona entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos (González et al., 2018) ha sufrido fuertes cambios de uso y cobertura del suelo (Heilmayr et al., 2016; Miranda et al., 2017) por el reemplazo de bosques nativos a matorrales y plantaciones forestales, lo que ha generado paisajes homogéneos e inflamables que son más propicios para incendios forestales.

b. Modelos utilizados

Los cálculos realizados en esta sección son iguales o bastante similares a los realizados en la sección de bosques nativos (6.2), por lo tanto, para los cálculos también se utilizó un modelo entrenado de machine learning (ML), específicamente el uso de árboles de regresión, que identifican las variables más importantes en la predicción de un proceso modelado (variables respuesta), como por ejemplo la ocurrencia o no ocurrencia de una ignición o la pérdida de productividad fotosintética de una plantación forestal.

La única diferencia metodológica es que las plantaciones forestales, a diferencia de los bosques nativos, deben considerar la tala rasa que ocurre cada cierto período de tiempo, lo que dificulta el análisis sobre largos períodos de tiempo.

c. Caracterización de la Amenaza

i. Amenazas sobre verdor en plantaciones forestales

Se considera que las Amenazas sobre la productividad fotosintética (verdor) de los bosques nativos son las mismas que afectan sobre las plantaciones forestales. En resumen, se utilizó un modelo entrenado de inteligencia artificial para obtener la Amenaza del período histórico (1980-2010), futuro (2035-2065) y el cambio entre ambos períodos. Los valores de Amenaza van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las comunas que no poseen Amenaza en el clima histórico o futuro, o que no muestran aumento de Amenaza entre ambos períodos y 1 a las comunas donde existe la mayor Amenaza en el clima histórico o futuro, o que muestran un aumento de Amenaza entre ambos períodos, donde se define a la Amenaza como el índice de aumento de olas de calor y de sequías. Para más detalles ver sección 6.2 en Amenazas sobre verdor en bosques nativos.

ii. Amenazas de incendios en plantaciones forestales

Se considera que las Amenazas de incendios en bosques nativos son las mismas que afectan sobre las plantaciones forestales. En resumen, en este subsistema también se utilizó un modelo entrenado de inteligencia artificial para obtener la Amenaza del período histórico (1980-2010), futuro (2035-2065) y el cambio entre ambos períodos. Los

valores de Amenaza van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las comunas que no poseen Amenaza en el clima histórico o futuro, o que no muestran aumento de amenaza entre ambos períodos y 1 corresponde a las comunas en las que existe la mayor Amenaza en el clima histórico o futuro, o que muestran un aumento de Amenaza entre ambos períodos, donde se define a la Amenaza como el índice de frecuencia de olas de calor. Para más detalles ver sección 6.2 en Amenazas de incendios en bosques nativos.

d. Caracterización de la Exposición

La Exposición de las plantaciones forestales frente a los efectos del cambio climático se obtiene con la misma metodología utilizada para los bosques nativos, es decir, se utiliza una base de datos de cobertura de plantaciones forestales inicial (2017) sobre la cual se suman o restan píxeles según distintos criterios, con el objetivo de corregir. En este caso se utilizan otros criterios (ver informe sectorial) que determinan la distribución comunal de las plantaciones forestales en todo el territorio nacional. Los valores de Exposición de plantaciones forestales van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las comunas menos expuestas (ausencia de plantaciones forestales) y 1 a las más expuestas (máxima proporción de plantaciones forestales) frente a efectos del cambio climático (pérdida de verdor o incendios forestales). Tanto para el horizonte histórico y futuro La distribución de Exposición se asume igual a la actual.

e. Caracterización de la Sensibilidad

i. Sensibilidad del verdor en plantaciones forestales

Al igual que en el sistema de bosques nativos, la Sensibilidad de la productividad fotosintética de las plantaciones forestales, frente a cambios en el régimen de temperatura y precipitación, será evaluada utilizando datos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI). Sin embargo, a diferencia de los bosques nativos, en este caso se debe tener en consideración que las plantaciones forestales tienen la característica de ser cosechadas mediante tala rasa (remoción total) cada 12 años, aproximadamente, para *Eucalyptus* y 14-18 para *Pinus*, lo que impide poder contar con series temporales entre los años 2000-2020 como en el caso de los bosques nativos.

Para calcular la Sensibilidad, considerando la tala, se identificó el momento en el que se produce la cosecha y se extraen los cinco valores máximos del índice NDVI de los dos años previos junto con todas las otras variables climáticas y no climáticas asignadas a la base de datos de bosques nativos (ver más en la sección 6.2). Para entender mejor este proceso y ver las variables climáticas y no climáticas utilizadas se recomienda leer el Informe Sectorial de Bosques y Plantaciones (Miranda *et al.*, 2020).

Luego de tener los datos arreglados y compatibilizados entre todas las bases de datos, se evaluó la Sensibilidad de la misma forma que para los bosques nativos, es decir, se utilizó un modelo de *machine learning*, en donde la variable respuesta es el promedio de los cinco valores máximos previo a la tala rasa y las variables predictoras son las condiciones de temperatura y precipitación de la década en la cuales fueron cosechadas, junto con las condiciones no climáticas generales (por ejemplo la elevación o el contenido de humedad del suelo).

Finalmente, aplicando este modelo, se obtuvieron los valores de Sensibilidad, cuyos valores van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las comunas menos sensibles (nula Sensibilidad) y 1 a las comunas más sensibles a efectos del cambio climático sobre la productividad fotosintética de las plantaciones forestales. Tanto para el horizonte histórico y futuro la distribución de Sensibilidad se asume igual a la actual.

ii. Sensibilidad de las plantaciones forestales a incendios

Al igual que en la sección de bosques nativos, la Sensibilidad de bosques nativos a los incendios forestales depende de la probabilidad de ocurrencia de éstos. La Sensibilidad final de plantaciones forestales se determinó utilizando un modelo entrenado para la predicción de la ocurrencia de incendios para todo el territorio nacional, dadas las condiciones ambientales propias de cada comuna en cuanto a su actividad humana, topografía y coberturas del suelo. La Sensibilidad fue, finalmente, agrupada a nivel comunal y sus valores van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las comunas menos sensibles (nula Sensibilidad) y donde 1 corresponde a las comunas más sensibles a efectos del cambio climático por generación de incendios



en plantaciones forestales. Para más información revisar la sección 6.2, Sensibilidad de Bosques Nativos a Incendios Forestales. Tanto para el horizonte histórico y futuro la distribución de Sensibilidad se asume igual a la actual.

f. Análisis sobre la capacidad adaptativa

Se define la capacidad adaptativa como la capacidad de las personas, instituciones, organizaciones y sistemas para enfrentar, gestionar y superar condiciones climáticas adversas en el corto y mediano plazo, utilizando habilidades, valores, creencias, recursos y oportunidades disponibles. Para efectos de este sistema, esta definición se enmarca en el ámbito forestal, dentro del cual las principales Amenazas climáticas y ambientales identificadas corresponden a incendios forestales y sequías.

Para el análisis sobre bosques nativos y plantaciones forestales se utilizaron algunas dimensiones fundamentales que fueron identificadas dentro de las políticas de adaptación de otros países como Australia, Estados Unidos, Canadá, España y Portugal, que comparten escenarios similares a los de Chile en cuanto a la complejidad de los procesos asociados al cambio climático como sequía e incendios forestales.

Para más detalles sobre la metodología utilizada para el análisis de la capacidad adaptativa ver el Informe "Consideraciones Preliminares de la Capacidad Adaptativa al Cambio Climático del Sector Forestal en Chile" (Andueza *et al.*, 2020).

g. Caracterización del Riesgo

El esquema mostrado en la **Figura 21** (sección 6.2, Bosques Nativos) muestra el flujo de trabajo utilizado para el cálculo del Riesgo climático a escala comunal, tanto para el Sistema de Bosques Nativos como para el de Plantaciones Forestales. Para el Sistema de Plantaciones Forestales se realizó el cálculo para dos Cadenas de Impacto: "verdor en plantaciones forestales" e "incendios en plantaciones forestales". Según este esquema, la estimación del Riesgo se cuantifica como la multiplicación de los índices de Amenaza, Exposición y Sensibilidad para cada Cadena de Impacto (3 y 4 en la **Figura 21**). Donde, al

igual que la Amenaza, se obtienen distintos valores para el período histórico (1980-2010), futuro (2035-2065) y el cambio entre ambos. Los valores de Riesgo van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las comunas con menor Riesgo o cambio de Riesgo y 1 a las comunas con mayor Riesgo o cambio de Riesgo por efectos del cambio climático.

6.3.4 RESULTADOS

Según los resultados que se encuentran en la plataforma y a modo de ejemplo, aquí se presenta la Amenaza, la Exposición, la Sensibilidad y el Riesgo de la Cadena de Impacto "incendios en plantaciones forestales". Para más detalles ver el Informe Sectorial de Bosques y Plantaciones (Miranda *et al.*, 2020).

a. Resultados de la Amenaza

Al igual que en bosques nativos, la Amenaza sobre las plantaciones forestales por la ocurrencia de incendios, se realizó a través de la exploración de la relación que existe entre el área quemada y las olas de calor, lo cual surge de la hipótesis de que altas temperaturas favorecen la ocurrencia de incendios. Se demuestra que las olas de calor representan una Amenaza indirecta sobre los bosques nativos y las plantaciones forestales. Los resultados se pueden ver en la **Figura 26** como un índice de aumento de la frecuencia de olas de calor.

b. Resultados de la Exposición

La Exposición de las plantaciones forestales se representa como la superficie comunal cubierta por plantaciones forestales, donde 0 representa la ausencia de plantaciones y 1 a la mayor proporción en una comuna. Las plantaciones identificadas representan 2.882.615 ha que incluyen los cultivos en todas las etapas del proceso productivo y estados de desarrollo de los árboles, en su mayoría dominados por especies de los géneros Pinus y Eucalyptus. Este valor representa a todas las áreas destinadas a la producción industrial de madera. Entre las regiones del Maule y La Araucanía se encuentran el 83% de las plantaciones forestales del país, siendo la Región del Biobío

la de mayor concentración. En la **Figura 27** se observa la Exposición obtenida como un índice de proporción de plantaciones forestales.

c. Resultados de la Sensibilidad

La Sensibilidad de las plantaciones forestales frente a un incendio se determinó mediante la estimación de la probabilidad de que un incendio se inicie dadas ciertas condiciones socioambientales, de la misma manera que sucede en el sistema de bosques nativos. El cálculo de la Sensibilidad utilizando todas las variables relevantes se encuentra detallado en la sección de bosques nativos (6.2 de este informe). Los resultados de Sensibilidad se pue-

den ver en la **Figura 28**, como un índice de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

d. Resultados del Riesgo

Se calcula el Riesgo de incendios (efecto indirecto) en plantaciones forestales utilizando los índices calculados previamente: Amenaza, Exposición y Sensibilidad. El Riesgo se obtiene a nivel comunal en el período histórico (1980-2010), futuro (2035-2065, bajo el escenario RCP 8.5) y el cambio entre ambos. En la **Figura 29** se observa el índice de aumento de Riesgo de incendios en plantaciones forestales.

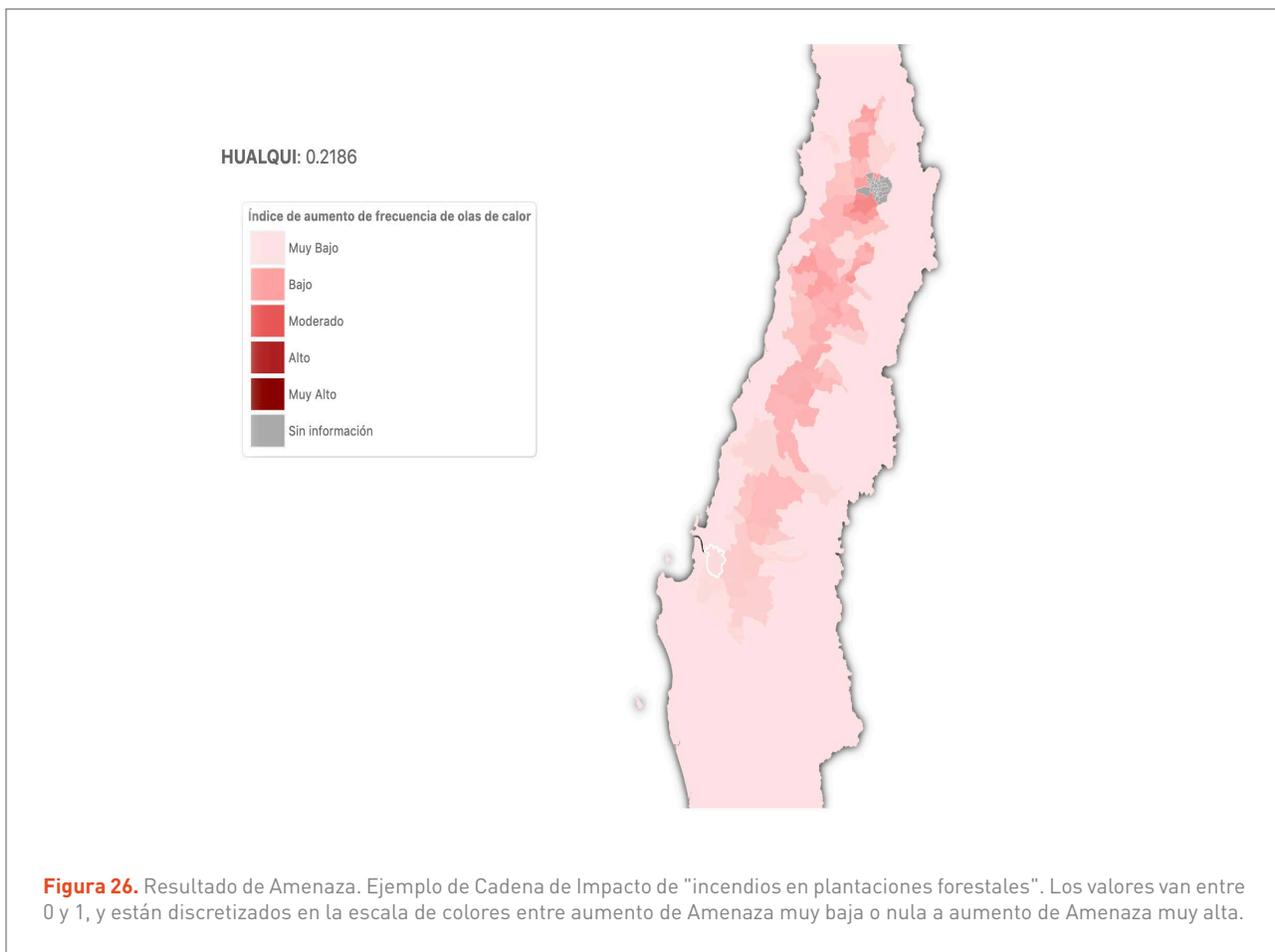


Figura 26. Resultado de Amenaza. Ejemplo de Cadena de Impacto de "incendios en plantaciones forestales". Los valores van entre 0 y 1, y están discretizados en la escala de colores entre aumento de Amenaza muy baja o nula a aumento de Amenaza muy alta.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

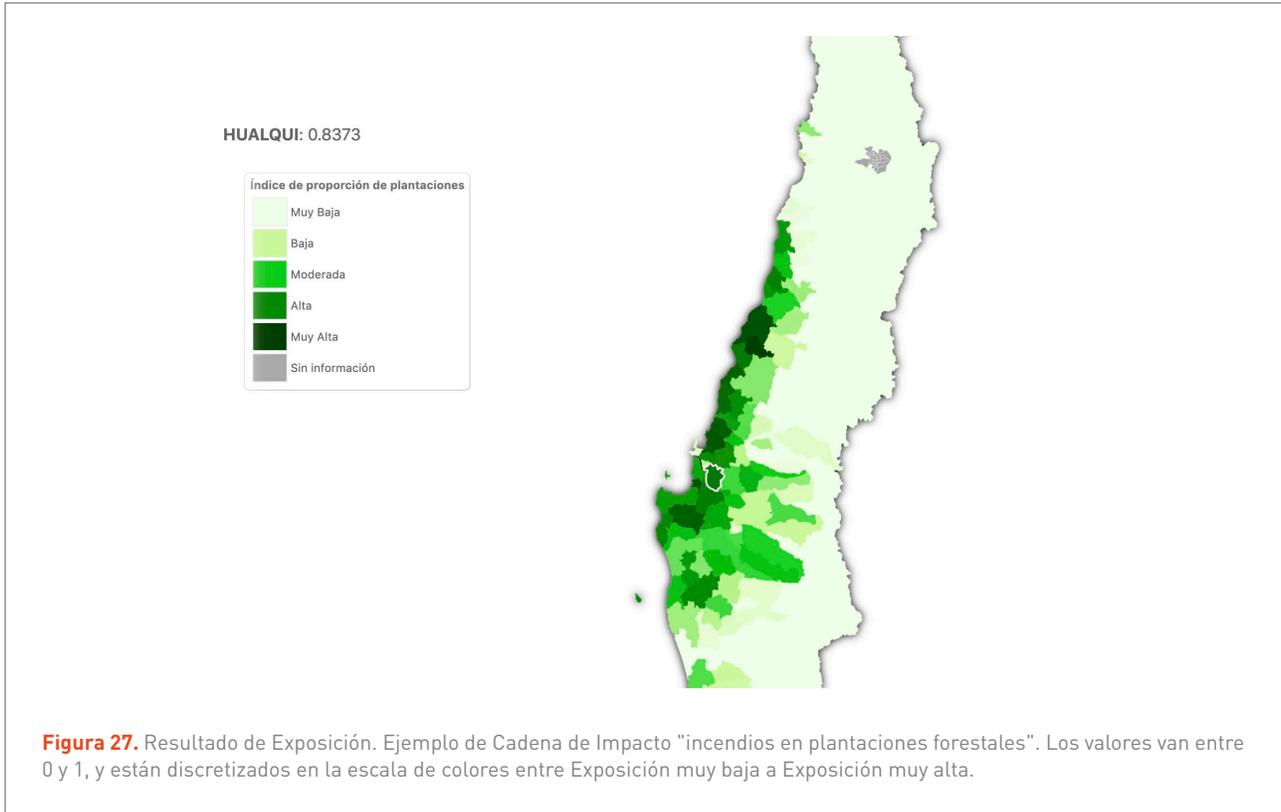


Figura 27. Resultado de Exposición. Ejemplo de Cadena de Impacto "incendios en plantaciones forestales". Los valores van entre 0 y 1, y están discretizados en la escala de colores entre Exposición muy baja a Exposición muy alta.

Fuente: Plataforma ARClím (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

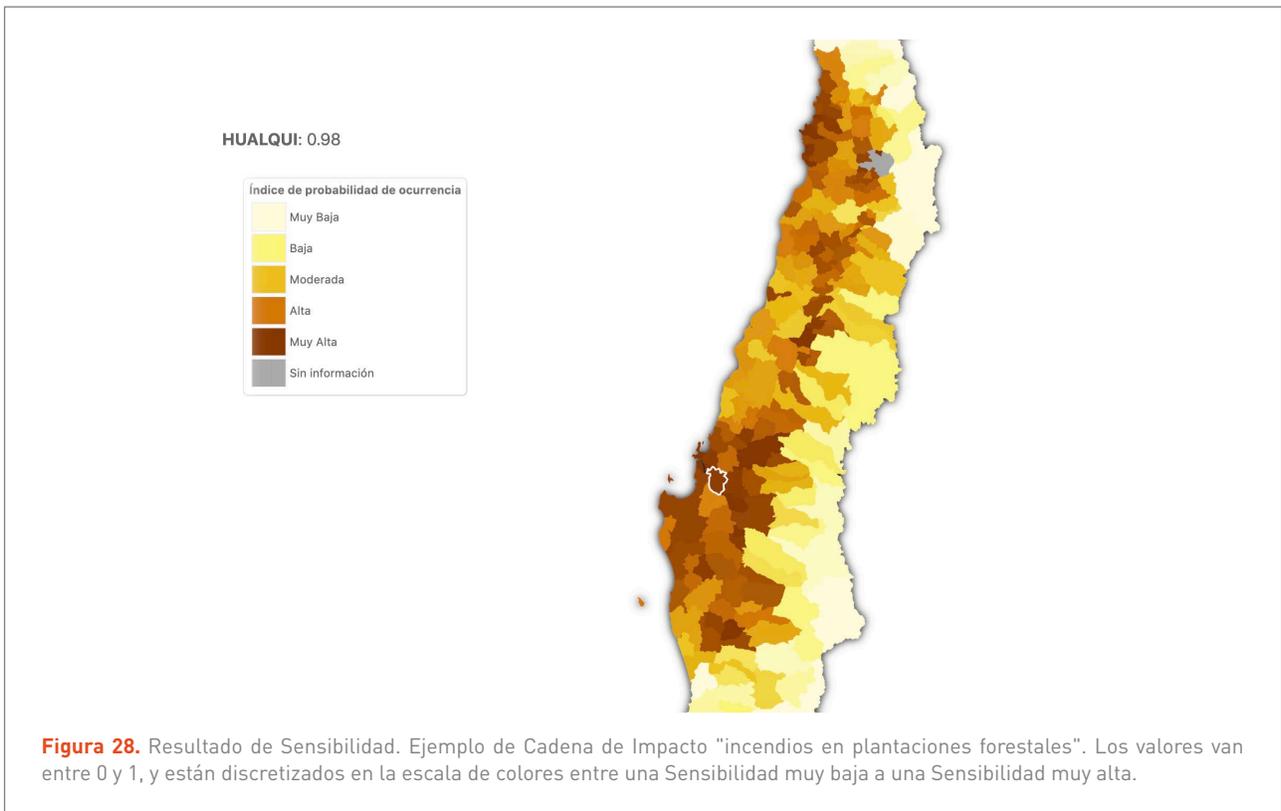


Figura 28. Resultado de Sensibilidad. Ejemplo de Cadena de Impacto "incendios en plantaciones forestales". Los valores van entre 0 y 1, y están discretizados en la escala de colores entre una Sensibilidad muy baja a una Sensibilidad muy alta.

Fuente: Plataforma ARClím (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

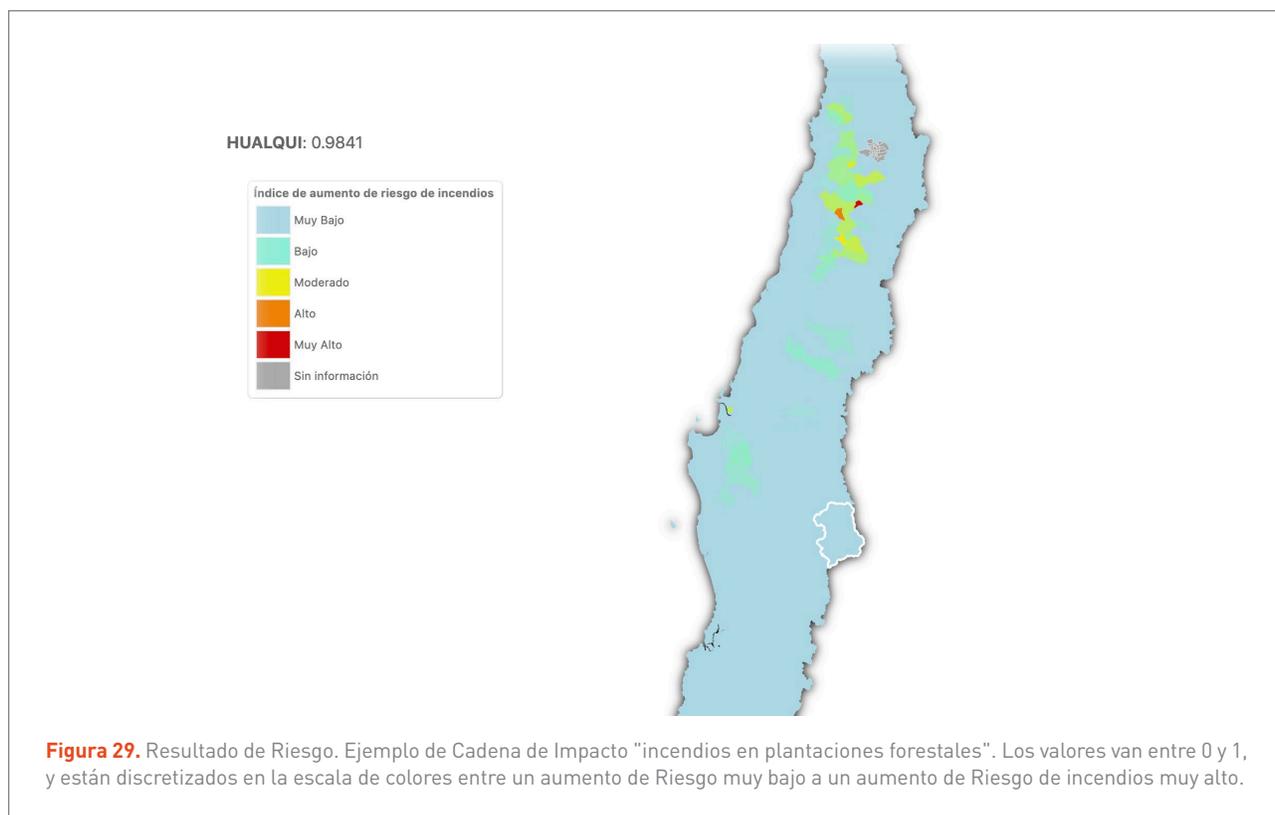


Figura 29. Resultado de Riesgo. Ejemplo de Cadena de Impacto "incendios en plantaciones forestales". Los valores van entre 0 y 1, y están discretizados en la escala de colores entre un aumento de Riesgo muy bajo a un aumento de Riesgo de incendios muy alto.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

6.3.5 CONCLUSIONES

En esta sección se exponen las principales conclusiones del informe sectorial de Bosques Nativos y Plantaciones (Miranda *et al.*, 2020). Se han visto evidencias de que la distribución de plantaciones forestales coincide con la zona de mayor Riesgo de incendios, en donde, a su vez, existe un alto Riesgo de generación de incendios por olas de calor, particularmente en la cordillera de la costa entre el Maule y la Araucanía. De manera indirecta, los bosques nativos de mayor valor de conservación adquieren mayor Sensibilidad ante incendios forestales debido a la alta proporción del paisaje destinado a plantaciones forestales con fines industriales. En línea con lo anterior, queda claro que la alta concentración de plantaciones genera un Riesgo para sí mismo y para otras especies, pues la mezcla entre incidencia de olas de calor y conectividad del combustible (densidad de especies forestales) generan un alto Riesgo de producción de incendios.

Con respecto a los efectos directos del cambio climático, los cambios de temperatura y precipitación en la productividad fotosintética de las plantaciones forestales requieren de un estudio más profundo con una buena distinción entre bosques nativos y plantaciones, considerando, principalmente, los ciclos de cosecha de las plantaciones. Por otro lado, según la evidencia actual, no se observa un efecto de los cambios de temperatura y precipitación en la productividad fotosintética de las plantaciones forestales de las últimas décadas. Sin embargo, de mantenerse las condiciones actuales en relación a las tendencias de precipitación y temperatura, las plantaciones forestales podrían sufrir consecuencias a futuro. Seguir estudiando con mayor profundidad este efecto es uno de los desafíos que se propone en esta sección.

6.4 ACUICULTURA





6.4 ACUICULTURA

6.4.1 INTRODUCCIÓN

Entre los años 1961 y 2016, el consumo mundial de pescado comestible aumentó anualmente un 3,2%, superando incluso la tasa de crecimiento de las carnes procedentes de todos los animales terrestres, que sólo aumentaron un 2,8% (FAO, 2020). Este aumento se explica, principalmente, por un alto interés mundial por consumir proteínas de buena calidad, que sean más sanas y sustentables, y por un aumento en el nivel de ingresos de la población que le permite este consumo.

La acuicultura se define como el conjunto de actividades técnicas y conocimientos de cultivo industrial de especies acuáticas, vegetales y animales. Esta actividad ha jugado un papel preponderante en la producción de peces en Chile, pues, desde el año 2012, la producción acuícola supera a la generada por la pesca extractiva, condición que se ha acentuado durante los últimos años (FAO, SOFIA 2020). A nivel mundial, Chile se encuentra entre los primeros 10 productores acuícolas, siendo el exportador más importante de América Latina. Para las cosechas acumuladas a diciembre de 2019 (que ascendieron a 1,3 millones de toneladas), los principales recursos cosechados fueron el salmón del atlántico, el chorito, y el salmón del pacífico, aportando el 53,0%, 25,3% y 13,4%, respectivamente, según lo reportado por Soto *et al.* (2020).

El estudio en cuestión acotó su trabajo a las actividades de salmonicultura y mitilicultura, que en conjunto suman más del 98% de la producción nacional (Subsecretaría de Pesca, 2020) entre todas las cosechas acumuladas a diciembre de 2019. Además, Chile es el segundo productor de salmónes a nivel mundial, después de Noruega, y su actividad productiva se ha centrado en la Región de Los Lagos, Aysén y Magallanes.

La formación de los salmónes involucra una serie de pasos que determinan el ciclo de vida natural de esta especie. La etapa inicial ocurre en pisciculturas, que son instalacio-

nes emplazadas en tierra abastecidas por fuentes de agua dulce. Luego siguen su proceso de crecimiento en el mar para finalmente ser cosechados.

La miticultura chilena, por su parte, representado por el chorito o mejillón Patagónico (*Mytilus chilensis*), ha tenido un aumento de forma exponencial en los últimos 20 años, situando a Chile también en el segundo lugar como productor a nivel mundial. Las semillas utilizadas para comenzar con el proceso de producción de esta especie son obtenidas a partir de larvas que son generadas por bancos naturales de mejillones, las que luego de unos meses son trasladadas a zonas de engorda.

A diferencia de las aves y los mamíferos, los organismos acuáticos son poiquiloterms, es decir, no pueden controlar su temperatura interna, convirtiéndolos dependientes de las condiciones del medio externo. Además, poseen una limitada capacidad para controlar otros parámetros internos como la salinidad y acidez. Es por eso que las Amenazas más comunes para la acuicultura dulceacuícola y acuicultura costera están asociadas a la reducción en las precipitaciones y/o aumentos en la temperatura del agua debido a incrementos en la temperatura del aire y mayor radiación, que cambian las propiedades ambientales de las especies. Estos cambios pueden afectar directamente a los organismos en cultivo, por estrés fisiológico, o bien gatillar una cadena de eventos y de efectos altamente complejos y que a menudo ocurren en forma sinérgica y/o como resultado de complejas interacciones biofísicas.

Estudios preliminares indican que en la patagonia norte la reducción de las precipitaciones y leves incrementos en la temperatura superficial del mar serían las Amenazas más relevantes para la industria acuícola. En detalle, menores ingresos de agua dulce a los mares interiores generarían una condición más propicia para la proliferación de parásitos nocivos para la salmonicultura, que a la vez que podrían aumentar el Riesgo de ocurrencia y expansión de otras enfermedades y eventos de floraciones de algas nocivas (FAN) (Aguayo *et al.*, 2019; León-Muñoz *et al.*, 2018; Doris Soto *et al.*, 2019).



En la presente sección, se sintetiza la estrategia de evaluación del Riesgo climático en Sistemas de Acuicultura, según detalla el **Informe Proyecto ARCLim: Equipo de Acuicultura (Soto, León-Muñoz, Molinet, Soria-Galvarro, Videla, Opazo, Díaz, Tapia & Segura. 2020).**

6.4.2 CADENAS DE IMPACTO

Considerando los antecedentes expuestos en la introducción, para este estudio se identificaron cinco Cadenas de Impacto. En la **Tabla 14** se observan los subsistemas abordados, cuyo Riesgo es obtenido a través de Cadenas de Impacto en función de tres factores determinantes: (i) Amenaza, (ii) Exposición, y (iii) Sensibilidad.

Subsistema	Cadenas de Impacto	Amenaza derivada del cambio climático	Exposición	Sensibilidad	Riesgo
Salmonicul-tura en agua dulce	Pérdida de producción por menor provisión de agua dulce	Reducción de precipitaciones y aumento de temperatura	Producción de huevos (ovas), alevines y juveniles-smolts de salmónidos generados en cada una de las pisciculturas evaluadas	Porcentaje de bosque nativo en relación con otros usos de suelo antrópicos	Riesgo de pérdida de producción de salmonicul-tura
Salmonicul-tura costera	Pérdida de biomasa de salmones por FAN	Reducción de precipitaciones	Volúmenes cosechados	Efecto combinado de elementos que incrementan la sensibilidad del sistema ante un aumento de disponibilidad de luz y potencial incremento de FAN	Riesgo de pérdida de biomasa en salmonicul-tura
	Pérdida de biomasa de salmones por aumento de parásitos	Reducción de precipitaciones	Volúmenes cosechados	Efecto combinado de múltiples factores que son relevantes sobre la sensibilidad frente al incremento de parasitismo	Riesgo de pérdida de biomasa en salmonicul-tura
	Pérdida de biomasa semilla de mejillones por aumento de salinidad	Reducción de precipitaciones	Biomasa de semillas producidas	Efecto combinado de la sobreexplotación de los bancos semilleros, concentración de la captación por área y de la probabilidad de ocurrencia de eventos nocivos.	Riesgo de pérdida de biomasa de semilla de mejillones
	Pérdida de biomasa de mejillones en fase engorda por FAN	Reducción de precipitaciones	Biomasa cosechada de choritos	Efecto combinado de la historia de eventos de mareas rojas, el estado de manejo de producción, variabilidad espacio temporal de la temperatura superficial del mar y de la probabilidad de ocurrencia de eventos nocivos	Riesgo de pérdida de biomasa de mejillones

Tabla 15. Resumen Cadenas de Impacto Sistema Acuicultura.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

6.4.3 METODOLOGÍA

La metodología utilizada, en función del objetivo general de este estudio, consistió en elaborar mapas de Riesgo ante el cambio climático para los dos principales sistemas acuícolas de Chile, la salmonicultura y la miticultura, obtenido del Informe Sectorial de Acuicultura (Soto *et al.*, 2020).

a. Región bajo análisis

El desarrollo de las industrias de salmonicultura y miticultura se concentra en las regiones administrativas del centro-sur y sur de Chile, específicamente entre las regiones del Biobío y de Magallanes, en el caso de la salmonicultura, y en la región de Los Lagos, en el caso de la miticultura. Por esta diferencia de regiones, el área de estudio en este análisis es distinta para cada industria y para cada Cadena de Impacto.

Las Cadenas de Impacto de salmonicultura separan las áreas de estudio dependiendo de las fases de cultivo: en agua dulce (pisciculturas) o en agua de mar (balsas jaulas). La fase de cultivo en agua dulce considera a la Cadena de Impacto "pérdida de producción por menor provisión de agua dulce", cuyas pisciculturas se encuentran emplazadas en el centro-sur de Chile (36°S - 42°S) y se analizan por cuencas asociadas a los cursos de ríos que las alimentan. Por su parte, a la fase de cultivo en agua de mar le corresponden las Cadenas de Impacto "pérdida de biomasa por FAN y por aumento de parásitos", cuyas balsas jaulas se desarrollan en la zona sur de Chile (41,5°S - 56°S) y se analizan por Agrupación de Concesiones de Salmones (ACS).

Con respecto a los mapas de miticultura, se consideraron dos sistemas de análisis: el primero asociado a la fase de producción de semillas de mejillones, realizada en fiordos y canales de patagonia Norte (fiordo Reloncaví, Hualaihué) y asociado a la Cadena de Impacto "pérdida de masa de mejillones en fase engorda por FAN"; y el segundo sistema de análisis se encuentra vinculado a las áreas de engorda de esta especie, ubicada principalmente en el sector sur este del Seno de Reloncaví y en todo el mar interior de la Isla de Chiloé, cuya Cadena de Impacto corresponde a la

"pérdida de biomasa de semilla de mejillones por aumento de salinidad". El área de estudio considerada fue las comunas donde se capturan las semillas y aquellas donde se cosecha la biomasa final para la exportación.

b. Modelos utilizados

Para la obtención de la Amenaza, en este estudio se consideraron distintos indicadores climáticos que pueden afectar el desarrollo de las actividades acuícolas por cambios a futuro. Dentro de ellos se encuentran las variables climáticas (cambios de precipitación y temperatura), la variabilidad de la temperatura superficial del mar y como indicador biológico se consideró utilizar la probabilidad de ocurrencia de eventos nocivos (FAN). Por otra parte, la Sensibilidad consideró indicadores físicos, biológicos, oceanográficos y, especialmente, de gestión de la producción, que hace más susceptible a la industria para su cálculo. Los cálculos finales de cada sector se realizaron mediante el uso de la media aritmética.

c. Caracterización de la Amenaza

La Amenaza se define como los cambios climáticos futuros que pudiesen afectar el desarrollo de las actividades acuícolas evaluadas. Para evaluar las Amenazas climáticas se utilizaron indicadores de las tasas de cambio (1980-2010 v/s 2030-2060) de la temperatura del aire (ΔT) y precipitación (ΔP) generados por el proyecto ARCLIM desde datos provenientes de Modelos de Circulación General (GCM) obtenidos dentro del mismo proyecto.

i. Amenazas sobre salmonicultura en agua dulce

Sobre este subsistema, la principal Amenaza climática es la disminución de las precipitaciones en el futuro, lo que produciría una menor disponibilidad de agua dulce para el funcionamiento de las pisciculturas en períodos de estiaje y que también afectaría a la calidad del producto, aumentando la mortalidad y reduciendo el crecimiento de los salmones. Lo anterior determina la Amenaza de la Cadena de Impacto "pérdida de biomasa por menor provisión de agua dulce".



Para el cálculo de la Amenaza se consideró, como unidad de estudio, la cuenca tributaria asociada a cada piscicultura en el dominio entre 36,5°S y 42°S, sobre las cuales se obtienen las variables climáticas: datos de conteo anual de días con temperaturas máximas sobre 25°C, frecuencia de sequías (déficit de precipitación mayor al 75%), número de días consecutivos con precipitación sobre 1 mm y cambio en la precipitación media anual.

Finalmente, la Amenaza se estimó en base a la media aritmética de los indicadores identificados, de donde se obtiene el cambio de la Amenaza entre el período futuro (2030-2060) y el período histórico (1980-2010). Los valores de Amenaza van entre 1 y 5, donde 1 corresponde a las unidades de estudio que muestran aumento mínimo de Amenaza hacia el futuro y 5 corresponde a las zonas que muestran el máximo aumento de Amenaza entre ambos períodos.

ii. Amenazas sobre salmonicultura en agua salada o costera

Para el subsistema de salmonicultura costera, se considera como principal Amenaza la reducción de precipitaciones en el futuro, cuyos efectos varían según la Cadena de Impacto considerada:

- > **Pérdida de biomasa por incremento de parásitos y enfermedades:** una disminución de las precipitaciones a futuro produciría menor ingresos de agua dulce al mar interior, lo que a su vez aumentaría la salinidad de algunos fiordos y canales, facilitando el ingreso de parásitos como el piojo del salmón y la amebiasis. Lo anterior produciría un aumento en la mortalidad y reducción de crecimiento de las especies cultivadas, que culmina en pérdida de biomasa en la cosecha.
- > **Pérdida de biomasa por FANs:** el aumento de días sin lluvias genera que ingrese mayor cantidad de radiación solar sobre los sistemas de cultivos, pues los cielos estarían más despejados bajo este escenario. Lo anterior podría generar un leve incremento de la temperatura superficial del mar, lo que a su vez favorece a las floraciones algales nocivas (FANs), las cuales causan mortalidad en los salmones (León-Muñoz *et al.*, 2018; Soto *et al.*, 2019).

En ambos casos, los valores de Amenaza se estimaron sobre unidades espaciales que representan cada Agrupación de Concesiones Salmónidos (ACS) contenidas en el dominio entre 41,5°S y 56°S. Finalmente, en base a los indicadores climáticos, en particular a la reducción de las precipitaciones, se obtuvo el cambio de la Amenaza entre el período futuro (2030-2060) y el período histórico (1980-2010), cuyos valores van entre 1 y 5, donde 1 corresponde a las unidades de estudio que muestran aumento mínimo de Amenaza hacia el futuro y 5 corresponde a las zonas que muestran el máximo aumento de Amenaza en el futuro.

iii. Amenazas sobre miticultura en producción de semilla

La Amenaza para el subsistema de miticultura en producción de semilla, se obtuvo en función de la reducción de las precipitaciones, cuyos efectos sobre el subsistema producen menos ingresos de agua dulce a los lugares en donde se encuentra la producción de semillas en el mar, lo que provocaría un ambiente de mayor salinidad que favorece la presencia de especies que competirán por espacio con los bancos semilleros de mejillones. Lo anterior determina la Amenaza de la Cadena de Impacto de "pérdida de biomasa semilla de mejillones por aumento de salinidad".

Finalmente, en base al indicador identificado (reducción de las precipitaciones), se obtuvo el cambio de la Amenaza entre el período futuro (2030-2060) y el período histórico (1980-2010). Los valores de Amenaza van entre 1 y 5, donde 1 corresponde a las unidades de estudio que muestran el mínimo aumento de Amenaza hacia el futuro y 5 corresponde a las zonas que muestran el máximo aumento de Amenaza entre ambos períodos.

iv. Amenazas sobre miticultura en fase engorda

Las Amenazas sobre la miticultura en fase de engorda dependen directamente del efecto en la reducción de las precipitaciones, en términos del incremento del número de días consecutivos sin lluvia y el incremento de años secos, particularmente en la zona norte de la Patagonia. Lo anterior, resulta en una mayor cantidad de días con mayor radiación, lo que favorece el crecimiento del fitoplancton y los florecimientos de algas nocivas (FAN). Dicho proceso

determina la Amenaza de la Cadena de Impacto "pérdida de masa de mejillones en fase engorda por FAN".

En base al indicador identificado (reducción de las precipitaciones), se obtuvo el cambio de la Amenaza entre el período futuro (2030-2060) y el período histórico (1980-2010), cuyos valores van entre 1 y 5, donde 1 corresponde a las unidades de estudio que muestran el mínimo aumento de Amenaza hacia el futuro y 5 corresponde a las zonas que muestran el máximo aumento de la Amenaza climática entre ambos períodos.

d. Caracterización de la Exposición

i. Exposición de salmonicultura en agua dulce

La Exposición se definió como el volumen de producción que se podría perder producto de los efectos adversos del cambio climático. Para el cálculo de la Exposición de la salmonicultura en etapa de agua dulce (piscicultura) se utilizó información geográfica de las coordenadas de los puntos de captación e información productiva (volúmenes cosechados de ovas, alevines y juveniles-smolts de salmónidos), brindada por el Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (SERNAPESCA) y la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (SUBPESCA) a través del Sistema de Transparencia y Acceso a la Información Pública de Chile (Ley N°20.285).

Se utilizaron datos productivos del período 2012-2018, vinculados sólo a instalaciones de cultivo, cuyos puntos de captación de agua se ubiquen entre los 36,5°S y 42°S y que se encuentren asociados a cursos de agua superficiales. Luego, en cada punto de captación, se delimitaron las cuencas tributarias de las pisciculturas como unidades de análisis. Los valores del índice de Exposición de la salmonicultura en agua dulce van entre 1 y 5, donde 1 corresponde a las cuencas menos expuestas y 5 a las más expuestas frente a efectos del cambio climático.

ii. Exposición de salmonicultura costera

Para las dos Cadenas de Impacto que pertenecen al subsistema de salmonicultura en agua salada, se definió la Exposición como los volúmenes cosechados promedio entre los años 2017 y 2018. La información fue brindada por

SERNAPESCA, donde específicamente se utilizaron datos productivos de concesiones (balsas jaulas) de acuicultura de salmónidos vigentes de las regiones de Los Lagos y Magallanes. Los datos fueron anidados utilizando, como unidad espacial de análisis, a las Agrupaciones de Concesiones de Salmónidos (ACS) definidas entre los 41,5°S y 56°S.

Se reconoce, de antemano, que la medida espacial utilizada es artificial y que, por lo tanto, no pueden representar fielmente las características oceanográficas del área. Sin embargo, son una unidad clave en la toma de decisiones de manejo y gobernanza. Finalmente, los valores del índice de Exposición de la salmonicultura costera van entre 1 y 5, donde 1 corresponde a las ACS menos expuestas y 5 a las más expuestas frente a efectos del cambio climático.

iii. Exposición de miticultura en producción de semilla

La Exposición se obtuvo a partir de la biomasa de semillas producida por comuna en el año 2017, cuyos datos fueron entregados por SERNAPESCA. Finalmente, la Exposición se define como el índice de biomasa de semilla que se puede perder, cuyos valores van entre 1 y 5, donde 1 corresponde a las comunas menos expuestas y 5 a las más expuestas frente a efectos del cambio climático.

iv. Exposición de miticultura en fase engorda

La Exposición se obtuvo a partir de la biomasa cosechada de choritos para exportación del año 2018, cuyos datos fueron brindados por SERNAPESCA. Finalmente, la Exposición se define como el índice de biomasa para cosecha que se puede perder, cuyos valores van entre 0 y 5, donde 0 corresponde a las comunas menos expuestas y 5 a las más expuestas frente a efectos del cambio climático.

e. Caracterización de la Sensibilidad

i. Sensibilidad de salmonicultura en agua dulce

Para el cálculo de Sensibilidad de la industria salmonicultura, se consideraron aquellos factores físicos, biológicos, oceanográficos y, especialmente, de gestión de la producción que hacen más susceptible a la industria y capaces de maximizar el impacto de las Amenazas previamente evaluadas.



Para las pisciculturas, se consideró un indicador del estado de conservación de las cuencas tributarias. Para lo anterior, se determinó que una alta cobertura de bosques nativos en la cuenca se asocia a la presencia de cursos de agua que ayudan a mantener bien la productividad del sector. De esta manera, se estimó un índice por cuenca, que representa el porcentaje de bosque nativo en relación con otros usos de suelo antrópicos (agricultura, pastoreo o plantaciones forestales). Este indicador permite asignar bajos niveles de Sensibilidad a las pisciculturas abastecidas por cuencas dominadas por bosque nativo. Finalmente, los valores de Sensibilidad van entre 1 y 5, donde 1 es el valor más bajo de Sensibilidad y 5 el valor más alto.

ii. Sensibilidad de salmonicultura costera

Para el cálculo de Sensibilidad sobre el subsistema de salmonicultura costeras se consideraron distintos indicadores según Cadena de Impacto.

Pérdida de biomasa por incremento de parásitos y enfermedades. Se consideraron aquellos factores relevantes sobre la Sensibilidad frente al incremento de parasitismo, dentro de los que se incluyen:

- > Actual dependencia del agua dulce
- > Dominancia de *Salmo Salar*
- > Manejo sanitario o uso de antibióticos

Pérdida de biomasa por FANs. Se consideraron aquellos elementos que incrementan la susceptibilidad o Sensibilidad del sistema ante incremento de disponibilidad de luz y potencial incremento de FAN, dentro de los que se incluye:

- > Tasa de recambio del agua de un fiordo o sistema costero
- > Preexistencia de mareas rojas
- > Variabilidad espacio temporal de la TSM
- > Biomasa acumulada en los últimos 10 años
- > Dominancia de *Salmo Salar*
- > Uso de antibióticos en los dos últimos años de ciclos productivos

En ambas Cadenas de Impacto se calculó la Sensibilidad como el promedio aritmético de los indicadores descritos, cuyos valores van entre 1 y 5, donde 1 es el valor más bajo de Sensibilidad y 5 el valor más alto.

iii. Sensibilidad de miticultura en producción de semilla

El elemento que hace más sensible a la etapa de producción de semilla en la industria de miticultura es la sobreexplotación de los bancos semilleros a través de la excesiva captación de la semilla, lo que impediría que nuevas de semillas contribuyan a mantener los bancos naturales (Molinet *et al.*, 2017). Lo anterior produciría que los efectos del cambio climático tengan mayores impactos sobre los bancos que ya se encuentren debilitados. Por otro lado, otro elemento que brinda Sensibilidad es un indicador que describe la concentración de la captación por área en el supuesto que mayor densidad de captación puede reducir la circulación y oxigenación de las cuelgas, lo que podría hacer más fácil el desprendimiento de la semilla en caso de incremento de la salinidad y reducción de oxígeno. De manera adicional, se consideró la asignación de puntajes a la probabilidad de ocurrencia de eventos nocivos (FANs), en base a información histórica. Todos los factores mencionados componen a la Sensibilidad a través del promedio aritmético, lo que asigna a cada uno el mismo peso relativo en el cálculo final. Los valores de Sensibilidad final van entre 1 y 5, donde 1 es el valor más bajo de Sensibilidad y 5 el valor más alto.

iv. Sensibilidad de miticultura en fase engorda

La Sensibilidad de la miticultura en la fase engorda depende de tres factores: i) la historia de eventos de mareas rojas, ii) el indicador de estado de manejo de producción y iii) la inclusión de la variabilidad espacio temporal de la temperatura superficial del mar. Finalmente, se consideró la asignación de puntajes a la probabilidad de ocurrencia de eventos nocivos FAN, en base a información histórica.

La Sensibilidad, entonces, fue determinada por todos los factores mencionados, a través del promedio aritmético, lo que asignó, a cada uno, el mismo peso relativo en el cálculo final. Si es que existiese suficiente información, lo recomendable habría sido asignar distintos pesos relativos a cada uno. Los valores de Sensibilidad final van entre 1 y 5, donde 1 es el valor más bajo de Sensibilidad y 5 el valor más alto.

f. Análisis sobre la capacidad adaptativa

La capacidad adaptativa indica que se puede reducir el Riesgo si se mejora la gestión sanitaria de los salmones y, también, repartiendo en forma más equitativa la producción entre los ACS. Para el subsistema de miticultura, un reordenamiento espacial más estratégico que tome en consideración el conocimiento sobre Riesgo, Amenaza, Exposición y Sensibilidad y que esté en balance con oportunidades económicas que incluyan aspectos sociales y económicos, sería la clave para mejorar la resiliencia del sector.

g. Caracterización del Riesgo

Para todas las Cadenas de Impacto, el Riesgo se cuantifica como la multiplicación de la respectiva Amenaza, Exposición y Sensibilidad ($R=A \times E \times S$), lo que significa que todos los elementos tienen el mismo peso relativo en el cálculo. El valor final de Riesgo se normaliza entre 0 y 1, donde 0 corresponde a aquellas zonas en donde no hubo aumento de Riesgo entre el período futuro y el período histórico y 1 corresponde a las zonas de máximo aumento de Riesgo entre ambos períodos.

6.4.4 RESULTADOS

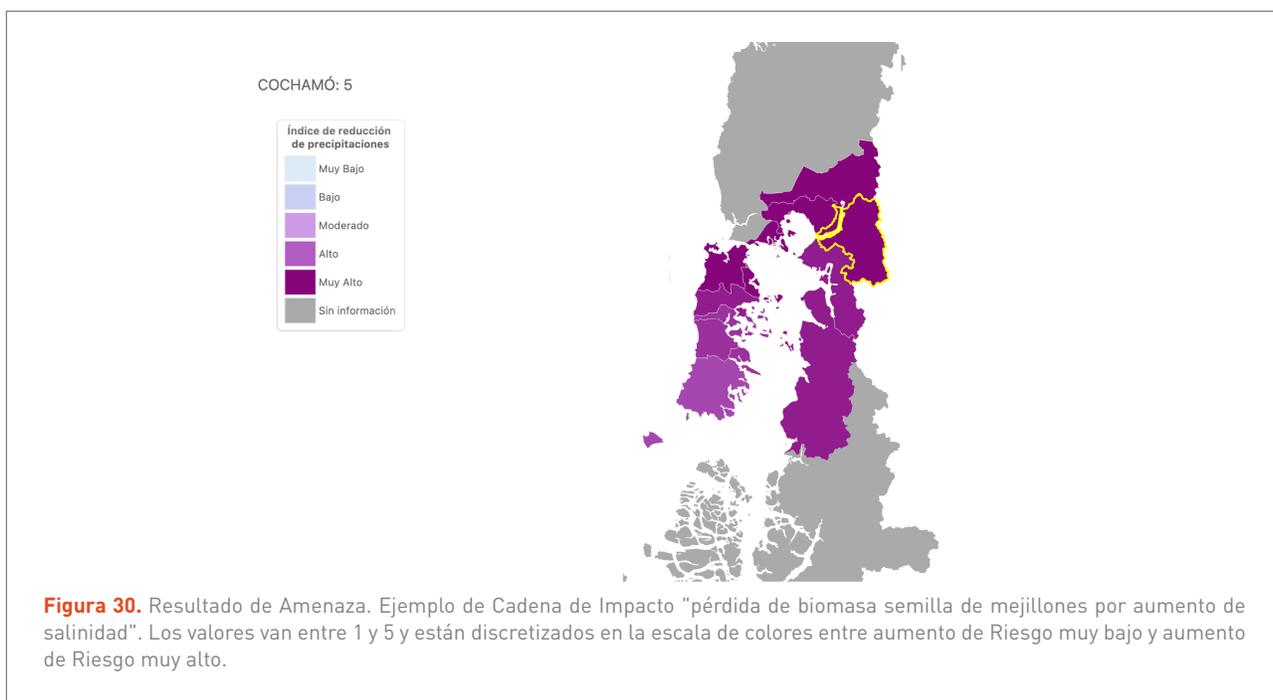
Según los resultados que se encuentran en la plataforma, aquí se presenta a modo de ejemplo la Amenaza, Exposición, Sensibilidad y Riesgo de la Cadena de Impacto "pérdida de semilla de mejillones por aumento de salinidad". Para más detalles ver el informe sectorial de Acuicultura (Soto *et al.*, 2020).

a. Resultados de Amenaza

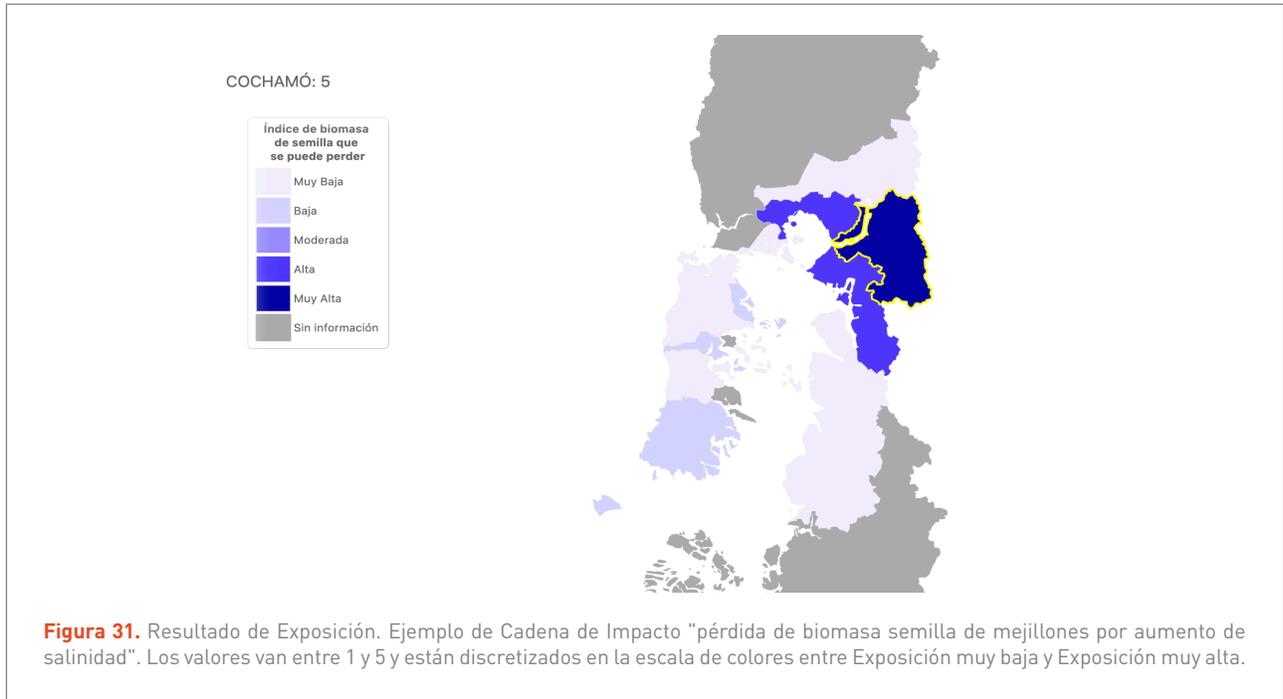
En la **Figura 30** se observa la Amenaza calculada como un índice de reducción de precipitaciones entre el clima histórico y futuro. Se observa que todas las comunas poseen un nivel de Amenaza entre alto y muy alto.

b. Resultados de Exposición

En la **Figura 31** se observa el índice de Exposición de las comunas donde se capturan las semillas. La comuna más expuesta es Cochamó (índice = 5), luego le siguen las comunas de Puerto Montt y Hualaihué. El resto muestra valores de Exposición entre bajos y muy bajos.



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

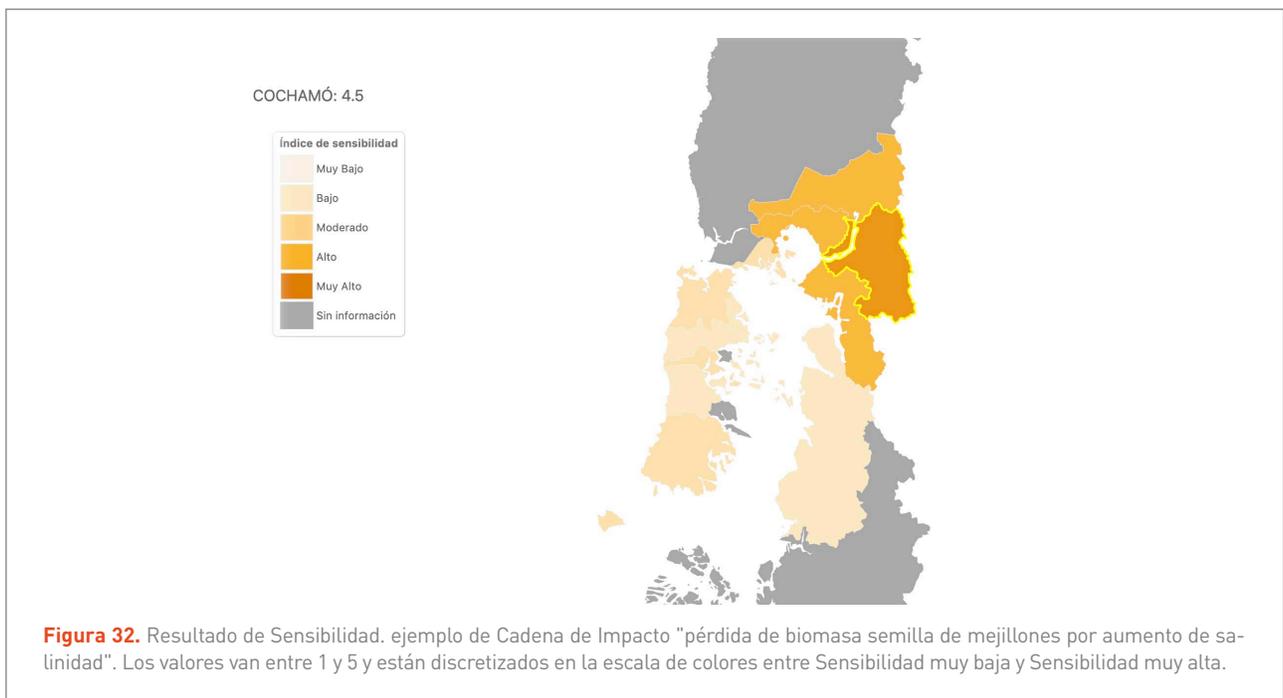


Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

c. Resultados de Sensibilidad

En la **Figura 32** se observa el índice de Sensibilidad. La comuna con mayor Sensibilidad, ante efectos del cambio climático, es la comuna de Cochamó. Las comunas de

Puerto Montt, Hualaihué y Puerto Varas presentan un índice de Sensibilidad moderado. El resto de las comunas, en Chiloé y más al Sur, poseen índices entre bajo y muy bajo.

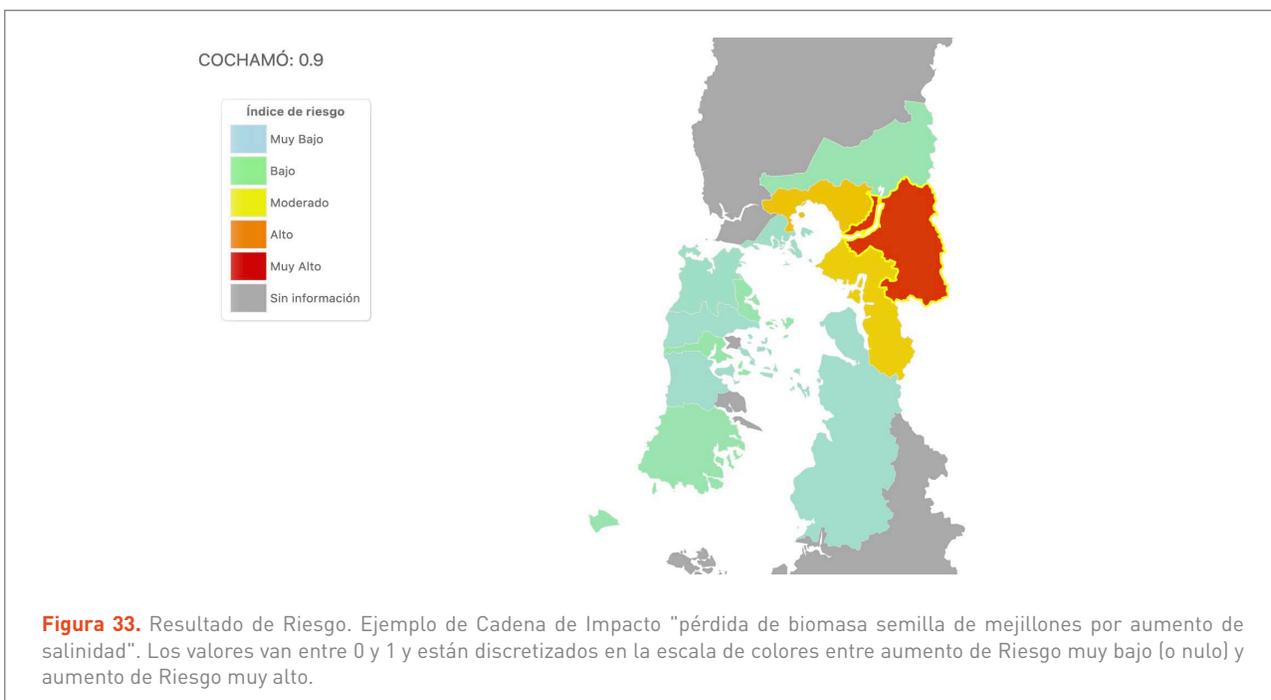


Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

d. Resultados de Riesgo

La **Figura 33** muestra que el Riesgo es máximo está en la comuna de Cochamó (0,9) y luego vienen las comunas de

Puerto Montt y Hualaihué, con Riesgo moderado. El resto de las comunas muestra Riesgo entre muy bajo y bajo.



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

6.4.5 CONCLUSIONES

En esta sección se exponen las principales conclusiones del estudio realizado en el informe sectorial de Acuicultura (Soto *et al.*, 2020). En los resultados se observa que los niveles más altos de Amenazas, sobre las pisciculturas, se encuentran en la Región de la Araucanía, cuyo origen radica en que el pronóstico de disminución de precipitaciones en esa región es mayor y, también, en que la proporción de bosques forestales es baja. Las cuencas que conservan mejor su patrimonio natural poseen una mejor resiliencia para la producción de ovas y juveniles de salmón, elemento clave para la Capacidad Adaptativa del sector. Finalmente, para la producción de salmones en fase engorda y cosecha, se observó que las ACS con mayor Riesgo de perder biomasa por incremento de parasitismo y/o incremento por FAN son aquellas ubicadas en la Región de Los Lagos.

La miticultura, por otra parte, mostró los mayores Riesgos de perder la producción de semilla de mejillones en las comunas de Cochamó y Hualaihué. La engorda de mejillones, por su parte, mostró los mayores niveles de Riesgo en las comunas de Castro y Quellón, los que se encuentran influenciados principalmente por la alta concentración de producción y por la preexistencia de FAN en los lugares. Por lo tanto, los niveles de Riesgo podrían reducirse si es que se repartiera la producción en forma más equitativa con otras comunas. Finalmente, al igual que en la salmonicultura, para trabajos a futuro se recomienda considerar la conexión entre ambos subsistemas o fases de cultivo, pues ambas son extremadamente dependientes entre sí.

6.5 PESCA ARTESANAL





6.5 PESCA ARTESANAL

6.5.1 INTRODUCCIÓN

La pesca artesanal es definida como la actividad extractiva realizada por personas naturales en forma personal, directa y habitual, que trabajan como pescadores artesanales inscritos en el Registro Pesquero Artesanal (RPA), con o sin el empleo de una embarcación artesanal (SERNAPESCA⁷). A diferencia de la pesca pelágica industrial y semi industrial, esta actividad se encuentra asociada a zonas costeras, donde ocurre interacción entre continente y océano.

En Chile, la pesca artesanal se desarrolla en 467 caletas de pescadores distribuidas a lo largo de las costas del territorio nacional, a las que se encuentran asociados 92 mil pescadores inscritos en el RPA y 12.750 embarcaciones, concentradas principalmente en la Región de Los Lagos. En el 2019, el desembarque total de pesquerías alcanzó 2,14 millones de toneladas, de la cual un 55% es pesca artesanal. En Chile, el desembarque artesanal se compone de peces, algas e invertebrados bentónicos, ordenados por cantidad de desembarque. La importancia de la pesca artesanal en Chile radica en su contribución al ámbito laboral, a las economías territoriales y al abastecimiento de productos pesqueros para consumo humano, en fresco. Es por esto que la pesca artesanal tiene gran importancia social, económica y cultural.

Existen evidencias del impacto del cambio climático en la pesca artesanal de Chile (Yañez *et al.*, 2017) y también sobre la Vulnerabilidad socioecológica de la pesca y la

acuicultura frente al cambio climático (Quiñones *et al.*, 2013). Los Riesgos de la pesca artesanal chilena, por el cambio climático, surgen de la probabilidad de perder la producción pesquera actual en relación al volumen del recurso y a las condiciones o factores que lo hacen más frágil o susceptible. Los impactos van a depender del tipo de especie, pues aquellos organismos acuáticos en vida libre buscan, se desplazan y establecen en aquellos ambientes en donde encuentran condiciones óptimas para vivir y reproducirse, algo a lo que los pesqueros móviles pueden adaptarse. En cambio, aquellas especies sésiles (las que viven adheridos a sustratos) pueden disminuir su concentración hasta desaparecer, o bien pueden ser excluidas por otras especies.

Considerando los antecedentes expuestos, en esta sección se describen los Riesgos asociados a los recursos desembarcados o cosechados a niveles relevantes para la gestión de la pesca costera. Para esto, se analizaron los forzantes climáticos atmosféricos y los recursos desembarcados o cosechados por caleta pesquera.

También, en esta sección, se sintetiza la estrategia de evaluación del Riesgo climático en Sistemas de Pesca Costera, según detalla el **Informe Proyecto ARCLim: Equipo de Pesca Costera: (Cubillos, Soto, Hernández & Norambuena, 2020)**.

6.5.2 CADENAS DE IMPACTO

Considerando los antecedentes expuestos en la introducción, se identificó una Cadena de Impacto para el objeto

Subsistema	Cadena de Impacto	Amenaza derivada del cambio climático	Exposición	Sensibilidad	Riesgo
Pesca artesanal	Pérdida de desembarque pesquero artesanal	Aumento de la temperatura del aire y reducción de la precipitación	Desembarque de peces, invertebrados y algas	Efecto combinado de indicadores de cantidad de pescadores y recursos pesqueros	Aumento del riesgo de pérdida de embarque

Tabla 16. Resumen Cadenas de Impacto Sistema Pesca Artesanal.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

⁷ <http://www.sernapesca.cl/area-trabajo/pesca-artesanal>



de este estudio, cuyo Riesgo es determinado por tres factores: (i) Amenaza, (ii) Exposición, y (iii) Sensibilidad.

6.5.3 METODOLOGÍA

La metodología utilizada va en cumplimiento del objetivo general de este estudio: elaborar mapas de Riesgo ante el cambio climático para la pesca artesanal en Chile, en especial para la salmonicultura y la mitilicultura, del Informe Sectorial de Pesca Costera (Cubillos *et al.*, 2020).

a. Región bajo análisis

La Ley General de Pesca y Acuicultura (LGPA) establece que la pesca artesanal, para realizar sus labores, tiene reservadas las primeras cinco millas desde la costa chilena. Esa zona es denominada “área de reserva para la pesca artesanal”, cuya primera milla marítima es para el uso exclusivo de embarcaciones menores a 12 metros de eslora. Dentro de estos dominios se concentran 377 caletas de pesca artesanal, las que fueron analizadas de forma individual.

Se debe tener en consideración que, si bien las caletas son el lugar físico de desembarque, donde normalmente se reúnen y a menudo habitan los pescadores, esta unidad no necesariamente representa el lugar físico donde se encuentran los recursos que se capturan.

b. Modelos utilizados

La metodología utilizada, en la mayor parte de esta sección, es el uso de la media aritmética de distintos indicadores que componen a las variables de Amenaza (cambios en temperatura y precipitación), Exposición (desembarque total y por especie) y Sensibilidad (número de pescadores y recursos pesqueros).

c. Caracterización de la Amenaza

La Amenaza se define como los cambios climáticos futuros que pudiesen afectar el desarrollo de las actividades de pesca artesanal en Chile. Para evaluar las Amenazas

climáticas se utilizaron indicadores de las tasas de cambio de la temperatura del aire y precipitación generados por el proyecto ARCLim desde datos provenientes de Modelos de Circulación General (GCM). Para la obtención de la Amenaza sobre la pesca artesanal se consideraron en el cálculo los siguientes indicadores climáticos:

- > Cambios en la temperatura
- > Cambios en la precipitación

La Amenaza climática del cambio de temperatura podría generar una reducción de la temperatura superficial del mar (TSM), debido a que el calentamiento de la atmósfera en la zona costera continental favorece un aumento de los vientos del sur, un incremento en la surgencia costera (aguas profundas suben hacia la superficie) y una disminución de la TSM. Por otro lado, la reducción de las precipitaciones podría generar un menor ingreso de nutrientes de origen superficial a la zona costera, así como también cambios en corrientes y circulación costera.

Ambos índices son proyectados hacia el año 2050 (respecto del período base histórico 1980-2010) para en las provincias costeras en donde se ubican las caletas. Los valores de Amenazas por cambio climático van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las caletas pesqueras que no muestran aumento de Amenaza hacia el futuro y 1 a las que muestran el máximo aumento de Amenaza entre ambos períodos.

d. Caracterización de la Exposición

Para la obtención de la Exposición de la pesca artesanal para el período 2007-2017, se consideraron los siguientes elementos:

- > Desembarque total de recursos en la caleta
- > Desembarque de algas
- > Desembarque de peces
- > Desembarque de invertebrados (moluscos y crustáceos)

Se realizó distintos análisis focalizados, del desembarque total (i), del desembarque de grupos (ii, iii y iv) o de sus distintas combinaciones, esto con el objetivo de identificar

las respectivas contribuciones de cada uno sobre el Riesgo. Los valores del índice de Exposición de la pesca artesanal van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las caletas menos expuestas y 1 las más expuestas frente a efectos del cambio climático.

e. Caracterización de la Sensibilidad

Para el cálculo de la Sensibilidad de la pesca artesanal se utilizaron los siguientes indicadores:

- > **Número de pescadores por caleta inscritos en el RPA el 2017:** es un indicador de dependencia e importancia de la caleta como fuente laboral de los pescadores.
- > **Recursos pesqueros (estatus):** se refiere a la tendencia del desembarque total por caleta en el periodo 2007-2017, cuya pendiente se obtuvo con un modelo lineal mixto.
- > **Recursos pesqueros (riqueza específica):** es el número de especies que fueron extraídas, por caleta, en el período 2007-2017.
- > **Recursos pesqueros (concentración):** corresponde al índice de Hirshman-Herfindahl⁸, que mide cuántos recursos diferentes son extraídos por caleta.

Con la ayuda de percentiles, y considerando la intensidad de cambio, todos los indicadores fueron escalados en una escala de 10 puntos entre 0 y 1, donde 0 es Sensibilidad nula y son las caletas más sensibles frente a efectos del cambio climático.

f. Análisis de la capacidad adaptativa

Como medidas de adaptación frente a los Riesgos climáticos inminentes sobre la pesca artesanal, se seleccionan una serie de medidas de adaptación que ayudarían a reducir la susceptibilidad o Sensibilidad de los recursos. Las medidas consideradas son:

- > Incrementar la diversidad de recursos
- > Reducir la presión pesquera sobre algunos recursos para permitirles más oportunidad de adaptación a los cambios
- > Incrementar valor agregado
- > Diseñar una gobernanza orientada hacia la descentralización de decisiones

g. Caracterización del Riesgo

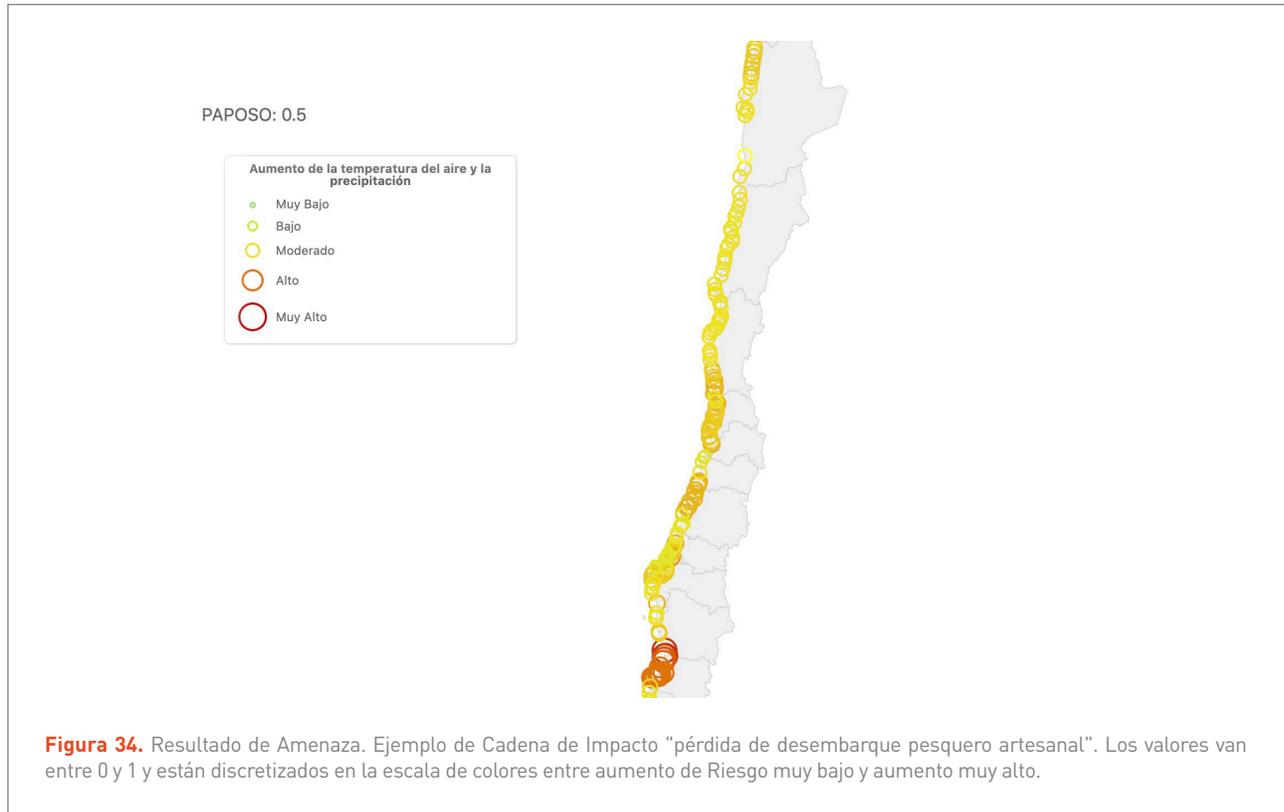
El Riesgo se cuantifica como la multiplicación de la respectiva Amenaza, Exposición y Sensibilidad, lo que significa que todos los elementos tienen el mismo peso relativo en el cálculo. El valor final de Riesgo se normaliza entre 0 y 1, donde 0 corresponde a aquellas zonas en donde no hubo aumento de Riesgo entre el período futuro y el período histórico y 1 a las zonas de máximo aumento de Riesgo entre ambos períodos.

6.5.4 RESULTADOS

a. Resultados de la Amenaza

En la **Figura 34** se observa la Amenaza sobre la pesca artesanal por aumento de temperatura y disminución de precipitación. Para su cálculo final se consideró ambos índices climáticos, sin embargo, al considerar el cálculo de la Amenaza con cada uno de ellos por separado, se observó que el factor de disminución de precipitación modula la distribución espacial de la Amenaza final, cuyos valores son bajos en el norte y aumentan hacia el sur, encontrando su máximo en la Región de Los Ríos. Mientras que el aumento de la temperatura, por su lado, mostró un patrón opuesto (disminución hacia el sur).

⁸ https://www.realidadeconomica.umich.mx/index_files/aplicacion_del_indice_hh_1.pdf



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

b. Resultados de la Exposición

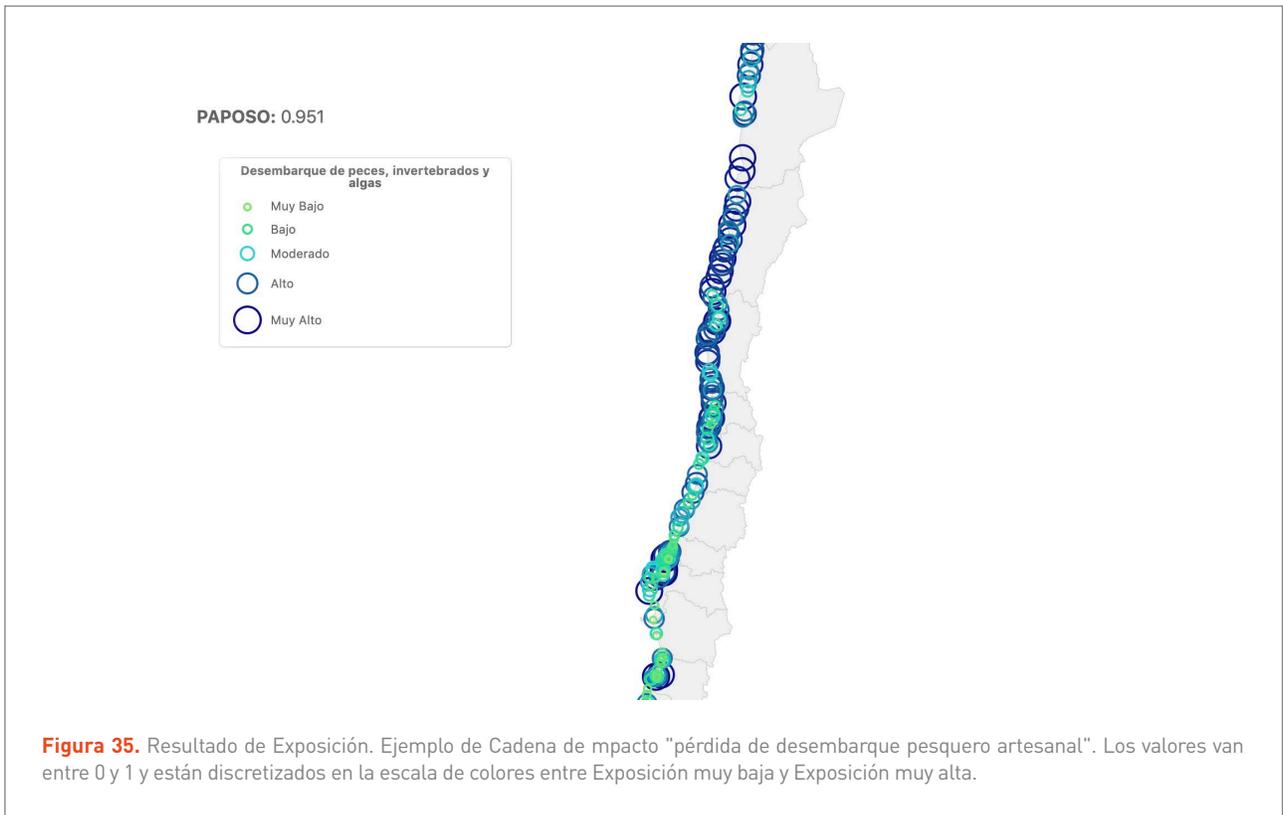
En la **Figura 35** se observa la Exposición de la pesca artesanal calculada a partir de distintos índices relevantes para su determinación. Se observó que el indicador que considera el desembarque de algas es el que más contribuye al cálculo y distribución espacial de la exposición final, cuyos valores son más altos en el norte del país y van disminuyendo hacia la zona centro y sur.

c. Resultados de la Sensibilidad

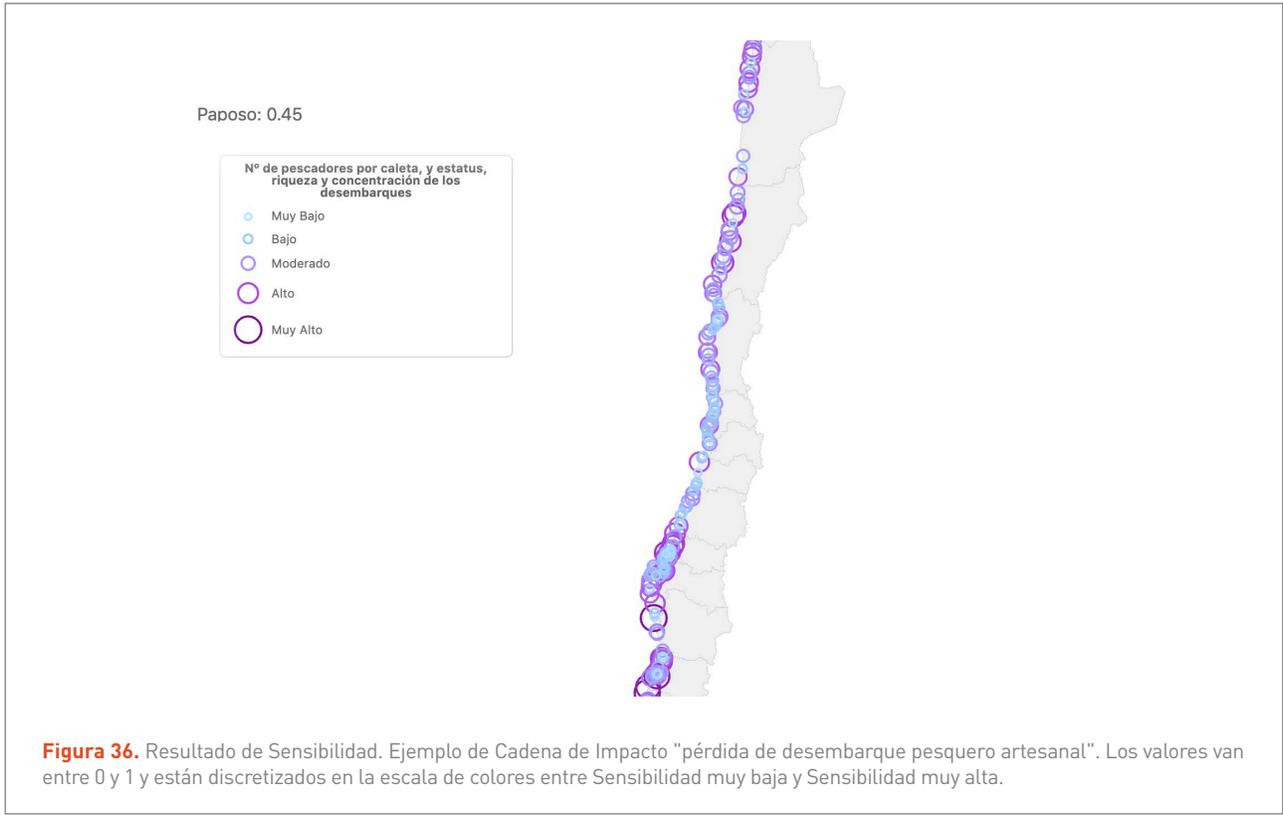
En la **Figura 36** se observa la Sensibilidad de la pesca artesanal calculada a partir de distintos índices relevantes para su determinación. Los valores son, en general, homogéneos a lo largo de la línea costera, sin embargo, los valores más altos se ubican en la Región de Los Ríos y Los Lagos.

d. Resultados del Riesgo

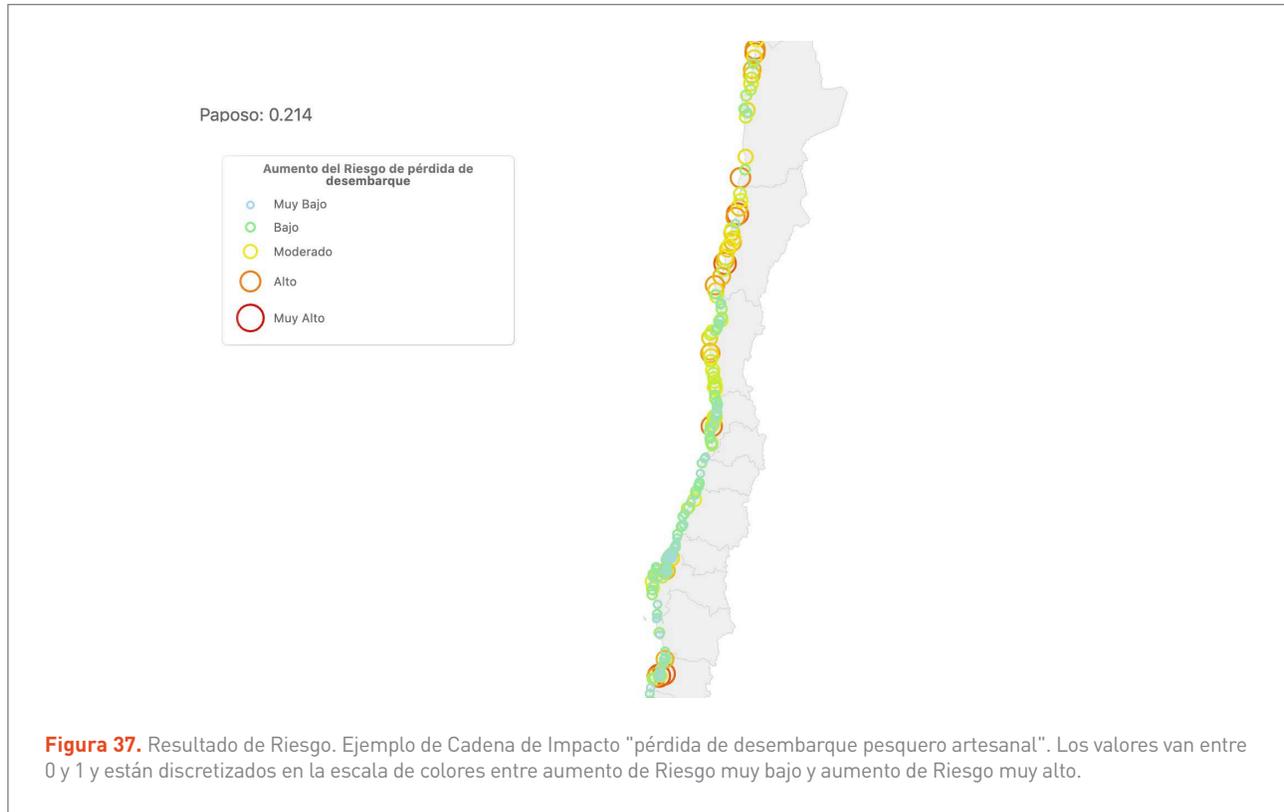
En la **Figura 37** se observa que el Riesgo tiene un patrón espacial con valores que son mayores en el norte y cada vez menores hacia el sur, con la excepción de valores altos y muy altos en la Región de Los Ríos. Esta distribución espacial es fuertemente influenciada por los altos valores de Exposición en el norte y por los altos niveles de Amenaza y Sensibilidad en la Región de Los Ríos. Dentro del cálculo de la Exposición, el desembarque de algas fue el indicador más relevante.



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

6.5.5 CONCLUSIONES

En esta sección se exponen las principales conclusiones del informe sectorial de Pesca Costera (Cubillos *et al.*, 2020), desde donde se pudieron rescatar los elementos más importantes del estudio. Los resultados muestran que las Amenazas poseen una distribución espacial en forma de gradiente que aumenta de norte a sur, que es modulada principalmente por los cambios de precipitación que ocurrirán en un futuro. La Exposición, por su parte, posee un gradiente espacial opuesto al de la Amenaza, con valores máximos en la zona norte del país. La Sensibilidad mostró valores relativamente homogéneos, aunque con algunos máximos en las regiones de Los Ríos y Los Lagos, en el sur de Chile.

El patrón de Riesgo posee una distribución espacial que se encuentra influenciada, principalmente, por el aporte de algas al desembarque, en el índice de Exposición, y por algunos valores altos de Amenaza en la Región de Los Ríos. Las caletas del Norte Grande (Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta) y del Norte Chico (Atacama-Co-

quimbo) son las que presentan mayores Riesgos. Dentro de las caletas con Riesgo sobre 0,25, 10 de ellas pertenecen a la Región de Los Lagos y 5 a la Región de Los Ríos.

Finalmente, respecto a la capacidad adaptativa de la pesca artesanal, como no es posible reducir la Amenaza climática, es más factible reducir los niveles de Sensibilidad y, así, reducir el Riesgo. Lo anterior se podría lograr aumentando la gestión de adaptación.

6.6 RECURSOS HÍDRICOS





6.6 RECURSOS HÍDRICOS

6.6.1 INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, el agua, como recurso hídrico, es considerado un bien escaso esencial para la sostenibilidad del desarrollo mundial (Santibáñez, 2017). Por esto es considerado como uno de los elementos que puede verse afectado por el cambio climático, afectando los sistemas de distribución de los recursos hídricos que salvaguardan las necesidades básicas de consumo de la población y el desarrollo de diferentes actividades productivas (Vicuña, Bustos, Calvo, Tesen, Gironás, Suárez, 2020).

Estudios globales y 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 efectos extremos como inundaciones y sequías (Vargas Ricchetti, Jerez & Mendoza, 2020).

Los fenómenos de precipitaciones extremas han desencadenado, a su vez, eventos de crecidas más extremas en ríos y consecuentes inundaciones. 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 urbano, por intervenciones de grandes ciudades, aumentando la impermeabilización del suelo y, por lo tanto, generando mayor escorrentía instantánea (Vargas *et al.*, 2020b).

Como consecuencia de lo anterior, fenómenos extremos han colapsado la red de colectores existentes, dejando a las ciudades en una condición vulnerable ante un eventual aumento en magnitud y frecuencia de estos fenómenos extremos en un futuro (Vargas *et al.*, 2020b). Por otro lado, es probable que, en los próximos 30 años, aumente la temperatura media anual (en 1,5°C) acentuando aún más las condiciones de sequía, tanto meteorológicas como hidrológicas (IPCC, 2018).

El objetivo general de esta sección es sintetizar la estrategia de evaluación del Riesgo climático en los recursos hídricos, el cual se encuentra detallado en el **Informe Proyecto ARCLim: Equipo de Hidrología (Vargas *et al.*, 2020b)** y en el **Informe Proyecto ARCLim: Equipo de Recursos Hídricos (Vicuña *et al.*, 2020)**.

6.6.2 CADENAS DE IMPACTO

Los Riesgos climáticos, identificados por este sistema de trabajo, se relacionan con precipitaciones extremas y sequía. Para ello, se identificaron las siguientes Cadenas de Impacto: i) Inundaciones urbanas, ii) Inundaciones por desborde de ríos y iii) fenómeno de sequía. En la **Tabla 16** se resume las Cadenas de Impacto desarrolladas.

6.6.3 METODOLOGÍA

La descripción de la metodología utilizada en esta sección, se encuentra más detallada en el informe Proyecto ARCLim, Atlas de Riesgo Climático en Chile: **Informe Proyecto ARCLim, Equipo de Hidrología (Vargas *et al.*, 2020b)** y del **Informe Proyecto ARCLim, Equipo de Recursos Hídricos (Vicuña *et al.*, 2020)**.

a. Región bajo análisis

Para el análisis de inundaciones por desbordes de ríos, se estudiaron 253 centros poblacionales, incluyendo villorrios, caseríos, aldeas, pueblos y ciudades. Estos centros se interceptaron con 95 puntos de aforo modelados para la actualización del Balance Hídrico Nacional, bajo un área de influencia (“buffer”) de 2 km, desde la red de drenaje declarada en la Biblioteca del Congreso Nacional (BCN). En el caso de las inundaciones en zonas urbanas, se analizaron las 40 ciudades más pobladas según censo 2017. En el caso de las sequías hidrológicas, el área de estudio se restringe a 95 cuencas, en régimen cercano a natural, y distribuidas a lo largo del país, tributando a las diferentes comunas (Vargas *et al.*, 2020b).

Subsistema	Cadena de Impacto	Amenaza derivada del cambio climático	Exposición	Sensibilidad	Riesgo
Infraestructura hidráulica y urbana	Inundaciones por desbordes de ríos	Variación de caudales extremos	Cantidad de infraestructura hidráulica dentro de potenciales áreas inundadas	Falla de la infraestructura hidráulica, en caso de que los caudales de diseño sean sobrepasados	Susceptibilidad de la infraestructura hidráulica crítica cercana al cauce principal que describe la zona urbana a sufrir los impactos frente a un desborde de río
	Inundaciones en zonas urbanas	Afectación de las comunas por inundaciones, debido al cambio en los eventos de precipitación extrema	Presencia de población y servicios críticos en cada comuna	Susceptibilidad de la población y servicios críticos a sufrir impactos	Susceptibilidad de ciudades de sufrir un impacto adverso frente a eventos de precipitación extrema y sus consecuencias
Riego superficial	Riego superficial	Variación porcentual de la precipitación media en las cuencas hidrológicas	Zonas de riego en función del requerimiento medio de agua (en m ³ /s)	Sensibilidad climática del sistema y la capacidad de ejercer la extracción deseada de recursos hídricos superficiales	Cambios en la Vulnerabilidad extrema para las zonas de riego expuestas
Disponibilidad de agua superficial	Sequías hidrológicas	Aumento de eventos de sequía, en magnitud y frecuencia	Grado de impacto en la comuna ante eventos de sequía	Susceptibilidad de las comunas a sufrir impactos producto de bajas condiciones de resiliencia	Susceptibilidad de los servicios dependientes del agua a sufrir un impacto adverso frente a variaciones de los caudales medios anuales

Tabla 17. Resumen de Cadenas de Impacto seleccionadas para el Sector Hidrología.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

En el caso de la Cadena de Impacto “riego superficial”, se analizó el Riesgo para cada zona de riego de las cuencas de los Ríos Copiapó, Limarí, Choapa, Petorca, La Ligua, Maipo y Maule (Vicuña *et al.*, 2020).

b. Modelos utilizados

Los modelos empleados por este sistema de trabajo, para determinar Amenaza, correspondieron a factores de cambio en caudales y cálculo de periodos de retorno para

la Cadena de Impacto “inundaciones por desbordes de ríos”. En el caso de “inundaciones en zonas urbanas”, se utilizó un modelo de probabilidad de falla de los colectores evaluado con diferentes tiempos de retorno. Para la Cadena “sequías hidrológicas”, se utilizó el modelo *Variable Infiltration Capacity – VIC* (Vargas *et al.*, 2020). En el caso de la Cadena “riego superficial”, se analizaron las series de caudales que reflejan la disponibilidad hídrica en las cuencas estudiadas (Vicuña *et al.*, 2020).



Para determinar la Exposición se utilizó un peso ponderado entre los indicadores desarrollados para "inundaciones por desbordes de ríos", mientras que para "sequías hidrológicas" se utilizó un procedimiento de lógica difusa. En el caso de "inundaciones en zonas urbanas", se utilizó una serie de indicadores que al combinarse de acuerdo con diferentes condiciones se determina su nivel de Exposición.

En el caso de la Sensibilidad, se utilizó la media aritmética con igual peso entre los indicadores desarrollados para la Cadena de "inundaciones por desbordes de ríos". Para la Cadena "inundaciones en zonas urbanas", se utilizó una normalización de la suma de los indicadores desarrollados. En el caso de "sequías hidrológicas" se utilizó un procedimiento de lógica difusa de un conjunto de parámetros.

Para el cálculo de Riesgo, para todas las Cadenas de Impacto, se utilizó un procedimiento de lógica difusa considerando los resultados obtenidos de Amenaza, Exposición y Sensibilidad.

En el caso de riego superficial, el análisis de Riesgo y Sensibilidad se basa en el modelo WEAP, que realiza modelación hidrológica a nivel de cuenca (Yates *et al.*, 2005), y el modelo MODFLOW, que permite la simulación de flujo subterráneo (Harbaugh *et al.*, 2000).

c. Caracterización de la Amenaza

Para estimar la Amenaza, se utilizaron diferentes metodologías según la Cadena de Impacto analizada. Mayor detalle se puede revisar Vargas *et al.*, 2020 y Vicuña *et al.*, 2020.

i. Inundaciones por desbordes de ríos

El nivel de Amenaza, en el caso de inundaciones por desbordes de ríos, se calculó a partir de la recurrencia promedio medida en años, con que un caudal de determinada magnitud es igualado o excedido (periodo de retorno). De esta manera, periodos de retorno altos implican caudales altos.

Para medir esta Amenaza, se extrajo la información desde 95 estaciones modeladas para la actualización del Balance Hídrico Nacional, calculando el periodo de retorno de 10, 25, 50 y 100 años. En base a los caudales asociados a

periodos de retorno presente (1979 a 2014) y futuro (2025 a 2060), se construyeron las curvas de caudal versus el periodo de retorno.

Luego se definieron 2 indicadores: i) factor de cambio (cociente entre el caudal futuro y el caudal presente para un mismo periodo de retorno) y ii) cambio en el periodo de retorno.

Finalmente, se calculó un índice de concordancia entre los resultados de los modelos. Los indicadores finales corresponden al promedio y/o mediana de los resultados obtenidos para los diferentes GCM (CCSM4, CSIRO - Mk3 - 6 - 0, IPSL - CM5A - LR y MIROC - ESM).

Para definir los niveles de Amenaza, tanto en el presente como en el futuro, se consideró para una crecida de:

- > T=10 años, Amenaza baja
- > T=25 años, Amenaza moderada
- > T=50 años, Amenaza alta
- > T=100 años, Amenaza severa

De esta manera, la Amenaza corresponde a la diferencia aritmética entre la Amenaza futura y la Amenaza presente.

ii. Inundaciones en zonas urbanas

Para el caso de inundaciones en zonas urbanas, el nivel de Amenaza se basa en la información extraída de GCMs (CCSM4, CSIRO - Mk3 - 6 - 0, IPSL - CM5A - LR y MIROC - ESM) y de Planes Maestros de Aguas Lluvias (PMAL).

Para obtener el nivel de Amenaza, se obtuvieron las series de tiempo de precipitación extrema para el periodo histórico (1979 a 2014) y futuro (2025 a 2060). Luego se realizó un análisis de frecuencia de las series de tiempo, calculando la precipitación asociada a los tiempos de retorno de 5, 10, 20 y 50 años.

Luego, se estudiaron los PMAL disponibles en Chile, donde se han realizado estudios, para definir la red de colectores con la cual cuenta cada comuna. Se analizó el porcentaje de falla que presentan los colectores según la precipitación de los periodos de retorno (de 5, 10 y 20 años).



De este modo, la Amenaza para cada comuna, se representa por una matriz de contingencia que integra la magnitud de un evento de precipitación diaria respecto a un

periodo de retorno y la probabilidad de falla del sistema de colectores (**Tabla 18**).

Probabilidad Falla	Período 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 18. Matriz de contingencia para determinar la Amenaza de "inundaciones en zonas urbanas".

Fuente: Adaptada de Vargas *et al.* (2020).

iii. Riego superficial

La Amenaza, para esta Cadena, se considera como los cambios en la disponibilidad del recurso hídrico para poder ejercer el uso de extracción, particularmente en la reducción en caudal o baja en napas de aguas subterráneas. Para esto, se analizaron las series de caudales que representan la disponibilidad del recurso hídrico de una cuenca. De acuerdo a las características de la cuenca analizada, se pueden obtener resultados de caudales en otras partes de la cuenca estudiada, de modo que se pueda representar Amenazas en términos de condiciones ambientales –como caudal de dilución o caudal de desembocadura–, o bien, según corresponda, se entregan resultados de acuerdo a los cambios en los niveles piezométricos (Vicuña *et al.*, 2020). Para este estudio, se consideró un periodo histórico (1980 - 2009) y se comparó con las condiciones de los escenarios futuros (2035 - 2064).

iv. Sequías hidrológicas

El nivel de Amenaza, frente a sequías hidrológicas, se basó en la información extraída de los resultados de la Actualización del Balance Hídrico Nacional. Se trabajó el modelo VIC (*Variable Infiltration Capacity*) con el que se obtuvo un rendimiento para cada unidad de grilla del país. El modelo fue calibrado con cuencas de régimen natural. Las series de caudal medio diario modelado están en una

resolución temporal diaria. Se tomó el promedio de las proyecciones de cuatro GCM (CCSM4, CSIRO - Mk3 - 6 - 0, IPSL - CM5A - LR y MIROC - ESM).

A los resultados de VIC, se agregaron los caudales para 95 cuencas distribuidas a lo largo de Chile y, con esto, se obtuvieron las series de caudales medios diarios en cada uno de los puntos para el periodo futuro.

Luego, se calculó los indicadores base asociados a las sequías: caudales medios anuales para el presente (1979 - 2014) y futuro (2025 - 2060) para cada año hidrológico, los días de sequía y días seguidos de sequía.

Para obtener la Amenaza de sequía presente, se evaluó un promedio temporal en la zona de estudio, para luego determinar las cuencas más afectadas. Se usó, como indicador base, la cantidad de días consecutivos de sequía por cuenca. Luego esto se normaliza, asignando valores entre 0 y 1.

Para obtener la Amenaza futura, se evaluaron los indicadores de cambio para el caudal medio anual asociado a la probabilidad de excedencia y los días seguidos promedio de sequía en la condición futura.

Finalmente, la información obtenida se traspasó a las comunas, desde los puntos de aforo.



d. Caracterización de la Exposición

Para obtener el valor de Exposición, se obtuvieron diferentes indicadores para cada una de las Cadenas de Impacto (Vargas *et al.*, 2020b; Vicuña *et al.*, 2020).

i. Inundaciones por desbordes de ríos

La Exposición para inundaciones por desbordes de ríos se basó en dos indicadores.

El primer indicador corresponde a la densidad de infraestructura crítica ubicada dentro de un área de influencia (*Buffer*) de 2 km respecto al cauce principal de cada zona de estudio. En este indicador se consideran diferentes factores:

- > Densidad de la red hidrométrica (estaciones de calidad de aguas, fluviométricas, meteorológicas y sedimentométricas).
- > Densidad de infraestructura de captación, almacenamiento, regulación y descarga (CAD; considerando las distintas bocatomas y tipos de centrales).
- > Densidad de infraestructura sanitaria (captaciones provenientes de canales, drenes, norias, ríos y sondeos que consideran las plantas elevadoras y de tratamiento).
- > Densidad de infraestructura vial (número de puentes construidos dentro de la zona de influencia).

El segundo indicador corresponde al porcentaje de área anegada del centro urbano, dado por el área del centro urbano que queda expuesto a inundación, representada por un *buffer* de 2 km.

De este modo, el valor de Exposición es explicado en un 70% por la densidad de infraestructura crítica y en un 30% por el porcentaje de área anegada del centro urbano.

ii. Inundaciones en zonas urbanas

Para determinar la Exposición a "inundaciones en zonas urbanas", los indicadores usados corresponden a densidad poblacional, densidad educacional y densidad de servicios críticos (hospitales públicos y privados, servicios de salud primarios y secundarios, bomberos, cuarteles de carabineros y establecimientos educacionales). De esta

manera, una comuna presenta una Exposición alta cuando la densidad poblacional y educacional es media-alta, sumándose a una cantidad media-alta de servicios críticos que puedan verse afectados ante una situación de inundaciones urbanas. Al contrario, una comuna presenta una Exposición baja cuando existe una baja-media densidad poblacional y educacional, además de una baja o casi nula infraestructura crítica disponible.

iii. Riego superficial

La Exposición de esta Cadena de Impacto corresponde a las zonas de riego en función del requerimiento de agua (en m³/s) indicado como caudal medio anual de las cuencas de los ríos Copiapó, Limarí, Choapa, Petorca, La Ligua, Maipo y Maule.

Este caudal se obtuvo evaluando los modelos para cada cuenca con los datos de forzantes climáticas, precipitación y temperatura, obtenidos de los registros históricos oficiales de la Dirección General de Aguas.

Los elementos que determinan la Exposición corresponden a los usuarios que extraen agua desde fuentes de aguas superficiales y subterráneas para distintos usos. Para esto, los usuarios poseen derechos de aprovechamiento de agua y la infraestructura hidráulica requerida para su extracción.

iv. Sequías hidrológicas

La Exposición de sequías hidrológicas, tanto para el presente como el futuro, utilizó un indicador correspondiente al logaritmo de la población residente en cada comuna. Este fue transformado a una distribución de lógica difusa, tomando valores entre 0 y 1. Para el presente se utilizó la información disponible del Censo Poblacional 2017, mientras que para el futuro se utilizó la población proyectada al año 2035, según análisis realizados por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE).

e. Caracterización de la Sensibilidad

Para obtener el valor de Sensibilidad, se obtuvieron diferentes indicadores para cada una de las Cadenas de Impacto (Vargas *et al.*, 2020b; Vicuña *et al.*, 2020).

i. Inundaciones por desbordes de ríos

El índice de Sensibilidad para inundaciones por desbordes de ríos, se construyó a partir de los siguientes indicadores:

- > **Sensibilidad media:** que presenta las obras hidráulicas respecto a periodos de retorno de diseño y evaluación, dependiendo de la magnitud de la crecida estudiada (tiempo de retorno de 25, 50 y 100 años) y
- > **Escala cualitativa de sensibilidad:** para cada centro poblacional analizado, usando la herramienta *Street View* de *Google Earth*, de tal manera que se pueda apreciar el entorno de los ríos, sus características del cauce y las obras de defensa fluvial de carácter antrópico. Las variables consideradas en este indicador son: i) presencia de defensas fluviales; ii) materialidad de las obras de defensa fluvial y puentes; iii) cercanía de casas e infraestructuras a los cauces; iv) ancho de los ríos; v) superficies de inundación; y vi) diferencias de cotas entre río y ciudad.

De este modo, el índice para cada periodo de retorno queda definido como la multiplicación entre la Vulnerabilidad media (T= 25, 50 y 100 años) y la escala de Vulnerabilidad.

ii. Inundaciones en zonas urbanas

El índice de Sensibilidad se construyó a partir de los siguientes indicadores:

- > **Sensibilidad residencial:** considera la calidad de los materiales de construcción de techos (tomando valores de 1 a 7) y paredes de las viviendas (tomando valores de 1 a 6). Además, se construyó una matriz de riesgo normalizada, donde el valor más alto es 1. Finalmente, este indicador se compone por una suma ponderada, considerando las fracciones del tipo de material de la pared y techo respecto del total de viviendas registradas, además del factor obtenido de la matriz.
- > **Sensibilidad de servicios críticos:** considera los servicios de salud primarios y secundarios, hospitales

públicos y privados, establecimientos educacionales, bomberos y cuarteles de carabineros. Para este indicador, a cada servicio se le asignó una magnitud de Sensibilidad (1, 2 o 3) asociada a su calidad (excelente, media o precaria). La Sensibilidad a nivel comunal, finalmente, se obtuvo de la suma de los servicios críticos.

Así, el índice se define como la suma de los indicadores mencionados y luego normalizado en una escala de 0 a 1.

iii. Riego superficial

Para caracterizar la Sensibilidad, se asoció una Vulnerabilidad extrema (en porcentaje) de cada zona de riego analizada. Se utilizaron los softwares WEAP y MODFLOW para obtener una modelación de las condiciones físicas y de gestión asociado al ciclo hidrológico en cuencas del país.

La información de las forzantes climáticas, precipitación y temperatura que alimentan los modelos, corresponde a los modelos generales de circulación (GCM, por sus siglas en inglés) ACCESS1-3, CanESM2, CSIRO-Mk3-6-0, inmcm4, IPSL-CM5A-MR y IPSL-CM5B-LR.

Se trabajaron dos series de tiempo que abarcan 30 años de variables climáticas simuladas. La primera corresponde al periodo histórico (1980 - 2009) y la segunda al periodo futuro (2035 -2064). En este último, se consideró el escenario de emisiones más severo, RCP8.5.

Se determinó la Vulnerabilidad (V_{media}) en cada periodo de tiempo: histórico ($V_{media-H}$) y futuro ($V_{media-F}$). El cálculo corresponde a la diferencia porcentual positiva respecto del requisito (**Ecuación 3**).

$$V_{media-F/H} (\%) \left\{ \begin{array}{l} V_{media} (\%) = \frac{Q_{requisito} - Q_{entregado}}{Q_{requisito}}; V_{media} > 0 \\ V_{media} (\%) = 0; V_{media} < 0 \end{array} \right.$$

Ecuación 3. Vulnerabilidad media en cada periodo de tiempo: histórico y futuro.



Para el análisis de todo un periodo se considera la Vulnerabilidad extrema (V_{ext-H} y V_{ext-F}), que equivale al máximo de la serie de media móvil de 6 meses de vulnerabilidades mensuales ($V_{ext-6\text{ meses}}$) (Ecuación 4 y Ecuación 5).

$$V_{ext-6\text{ meses}} (\%) = \frac{1}{6} \sum_{i=n}^{n+5} V_{media\ i}$$

Ecuación 4. Vulnerabilidad extrema en serie de 6 meses de vulnerabilidades mensuales donde: n representa el mes de análisis.

$$V_{ext-F/H} (\%) = \text{Máx} \{V_{ext-6\text{ meses}}\}$$

Ecuación 5. Vulnerabilidad extrema máxima. donde: *Máx* representa el valor máximo de la serie de vulnerabilidades mensuales.

De esta manera, la Sensibilidad corresponde al promedio de la variación porcentual relativa de las vulnerabilidades extremas de los modelos climáticos, para el periodo futuro, respecto al período histórico. Se considera la media aritmética de los resultados de los 6 GCM trabajados. Esto es calculado para cada zona de riego.

iv. Sequías hidrológicas

Tanto para los mapas presente y futuro de sequías hidrológicas, el índice se construye a partir de cuatro conjuntos de parámetros, en donde cada uno representa distintas condiciones de sensibilidad de las comunas estudiadas:

> **Condiciones de Sensibilidad territorial**, con indicadores como escasez hídrica, declaraciones de prohibición y restricción de aprovechamiento del recurso hídrico, índice de desertificación, huella hídrica y APR con derechos de agua.

> **Condiciones de Sensibilidad poblacional-socioeconómica**, con indicadores como 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.

> **Condiciones de Sensibilidad poblacional - etaria y de salud**, con indicadores como proporción de la población en la categoría de adulto mayor, proporción de población infantil y prevalencia de condiciones de Riesgo por desnutrición.

> **Condiciones de Sensibilidad demográficas**, con indicadores como 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.

Luego, los niveles de Sensibilidad se determinan según lo indicado en la **Tabla 19**.

Los cuatro conjuntos de parámetros fueron trabajados y analizados en la plataforma de lógica difusa. De esta manera, se obtuvo una distribución que varía entre 0 y 1.

Sensibilidad	Reglas
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.
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 éstas y presente Sensibilidad socioeconómica.
Baja	La comuna no presenta estrés hídrico y, al menos, una de las condiciones de Sensibilidad no se cumple en su totalidad.

Tabla 19. Reglas para determinar los niveles de Sensibilidad.

Fuente: Adaptada de Vargas et al. (2020).

f. Recomendaciones para la adaptación

A partir de lo analizado por este sistema, el equipo de trabajo sugiere que la adaptabilidad al cambio climático, ante condiciones de inundaciones en zonas urbanas, se debe mejorar y fortalecer las redes de recolección, conducción y restitución de aguas lluvias, especialmente en sectores donde aún no se tiene un saneamiento de aguas lluvias efectivo. Además, se debiera aumentar la capacidad de porteo (caudal máximo que es capaz de conducir un canal). Otra solución que permitiría aumentar la capacidad adaptativa es el establecimiento de espacios aprovechables sin población instalada, en donde se pueda almacenar la escorrentía durante las crecidas y que también cumplan con una función de espacio recreativo, como por ejemplo, parques fluviales y canchas deportivas (Vargas *et al.*, 2020b).

En el caso de inundaciones por desbordes de ríos, el equipo propone modificar leyes que actualmente instruyen a los embalses disponer de volúmenes de almacenamiento para la contención de crecidas, permitiendo reducir los daños en infraestructura de carreteras y ciudades. Además, proponen la construcción de obras de defensa fluvial (encauzamientos, enrocados de protección, muros guardarradier o parques inundables) que puedan resguardar las ciudades. Esto último, se complementa con una actualización y correcta fiscalización de planes reguladores en las ciudades, de tal manera que se prohíban las construcciones de viviendas o infraestructuras críticas cercanos a cauces de ríos (Vargas *et al.*, 2020b).

En el caso de sequías hidrológicas, la Sensibilidad se relaciona a condiciones territoriales y socioeconómicas, las cuales pueden mejorar la adaptabilidad mediante programas de gobierno. Desde el punto de vista hidrológico, las medidas que se proponen corresponden a un aumento y mejoramiento de la capacidad de regulación en ríos (especialmente en lo que respecta a agua dulce), una gestión integrada de los recursos hídricos por cuenca y potenciar la regulación natural en cuencas críticas (Vargas *et al.*, 2020b). En el caso del riego superficial, Vicuña *et al.* (2020) indican que el sistema de abastecimiento de recursos hídricos, la existencia de infraestructura de regulación (o de extracción) y su conducción definen en parte la capacidad

adaptiva. De manera complementaria, existen otros indicadores, como el tener un sistema de gestión ejercida por Organizaciones de Usuarios de Agua (OUA) a diferentes escalas, por ejemplo, juntas de vigilancia, asociación de canalistas, comunidades de aguas y/o comunidades de aguas subterráneas.

g. Caracterización del Riesgo

Para inundaciones urbanas, el Riesgo representa la susceptibilidad de las ciudades de sufrir un mayor o menor impacto adverso frente a eventos extremos y sus consecuencias. En inundaciones por desbordes de ríos, el Riesgo representa la susceptibilidad de la infraestructura hidráulica crítica cercana al cauce principal, que podría provocar impactos de diferente magnitud ante un desborde de río. En ambas Cadenas, el Riesgo se calculó como la multiplicación entre los índices de Amenaza, Exposición y Sensibilidad.

En el caso del análisis de sequías hidrológicas, se utilizó un procedimiento de lógica difusa que considera los índices de Amenaza, Exposición y Sensibilidad, y que, al combinarlos, se recoge un solo índice de Riesgo.

Para la Cadena de Impacto “riego superficial”, el Riesgo (en m³/s) se asoció a los cambios en la Sensibilidad para las diferentes zonas de riego. El Riesgo aumenta cuando disminuye el caudal, impidiendo que el uso de derecho pueda ser ejercido íntegramente. Para esto, el cálculo del Riesgo corresponde a la multiplicación de los resultados de Exposición y Sensibilidad.

6.6.4 RESULTADOS

Los resultados de Amenaza, Exposición, Sensibilidad y Riesgo de este sistema se pueden consultar y descargar desde la plataforma ARCLIM. A continuación, se presenta a modo de ejemplo, algunos resultados de la Cadena de Impacto “inundaciones por desbordes de ríos”. Para más detalle, ver el informe sectorial del equipo de Hidrología (Vargas *et al.*, 2020b) y Recursos Hídricos (Vicuña *et al.*, 2020).



a. Resultados de Amenaza

Se presenta la Amenaza como un índice en escala relativa que va de 0 a 1, en donde 0 representa una baja Amenaza y 1 representa una muy severa Amenaza. Para la Cadena de Impacto “inundaciones por desbordes de ríos” (Figura 38), se puede observar que las zonas con mayor Amenaza se encuentran desde la Región del Maule hacia el norte. Mientras que, desde la Región de Ñuble hacia el sur, se encuentra en mayor concentración zonas que presentan menor Amenaza en una escala relativa.

b. Resultados de Exposición

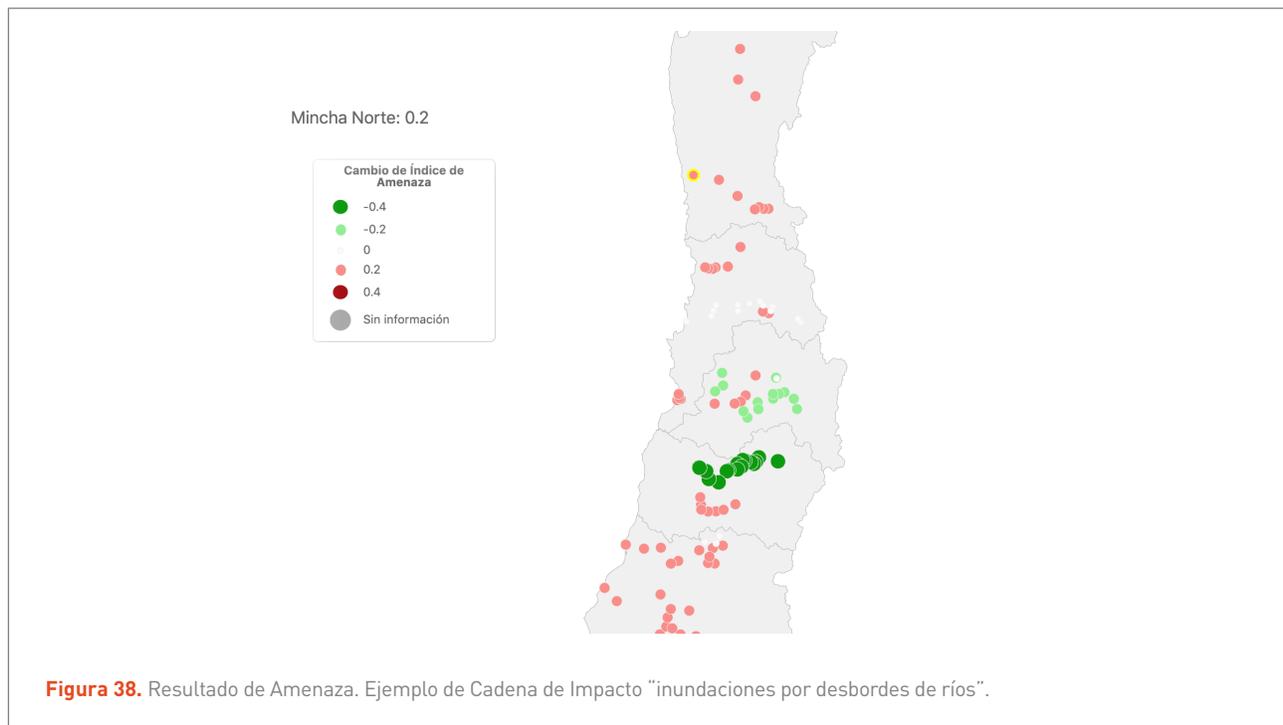
Se presenta la Exposición como un índice en escala relativa que toma valores entre 0 y 1, en donde 0 representa una baja Exposición y 1 representa una muy severa Exposición, basado en la infraestructura crítica. Para el caso de la Cadena de Impacto “inundaciones por desbordes de ríos” (Figura 39), las zonas con mayor exposición en una escala relativa se concentran entre la Región de Atacama y la Región de Valparaíso.

c. Resultados de Sensibilidad

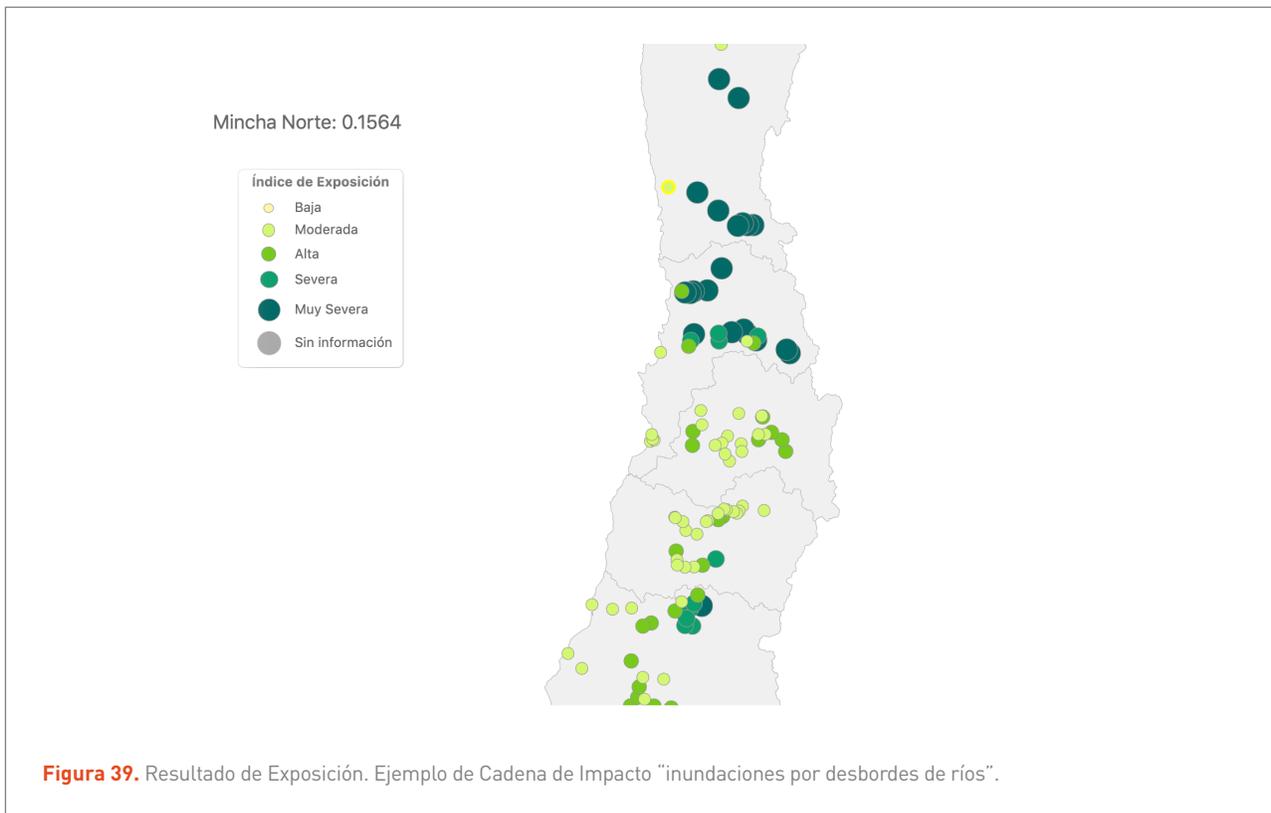
Se presenta la Sensibilidad como un índice en escala relativa que toma valores entre 0 y 1, en donde 0 representa una baja Sensibilidad, y 1 representa una muy severa Sensibilidad. Para la Cadena de Impacto “inundaciones por desbordes de ríos” (Figura 40), desde la Región del Ñuble hacia el norte, es posible ver sectores con concentraciones que indican mayor Sensibilidad.

d. Resultados de índice de Riesgo

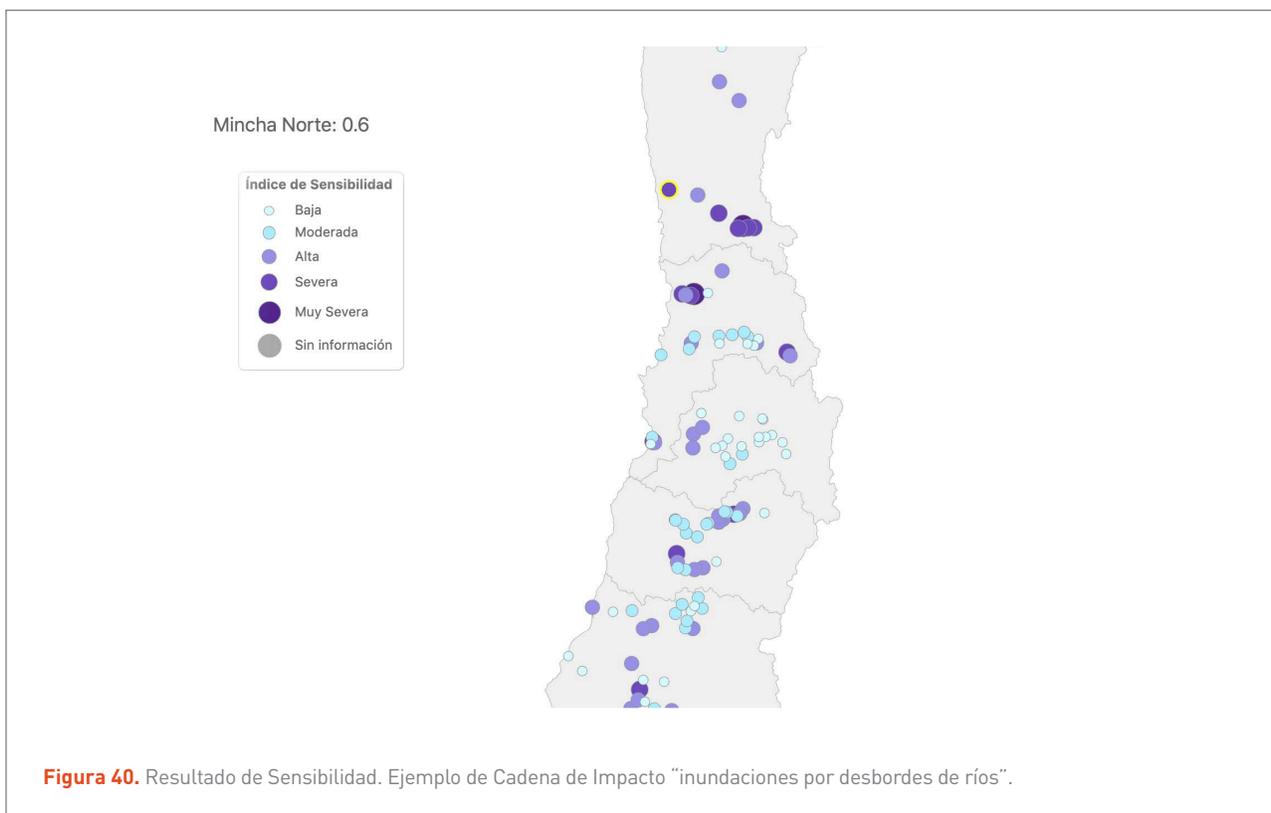
Se presenta el índice de Riesgo en una escala relativa que toma valores entre 0 y 1, en donde el 0 representa una muy bajo Riesgo y el 1 representa un muy alto Riesgo (Figura 41). En el caso de la cadena “inundaciones por desbordes de ríos”, este índice se encuentra influenciado principalmente por el índice de Amenaza y seguido por el índice de Vulnerabilidad. Entre la Región de Atacama y la Región Valparaíso, se ven los mayores niveles de Riesgo relativo, debido a la precariedad y falta de infraestructura crítica para mitigar efectos de crecida. Entre la Región del Maule y la Región del Bío-Bío, los niveles altos de Riesgo de debe principalmente a las magnitudes de las crecidas.



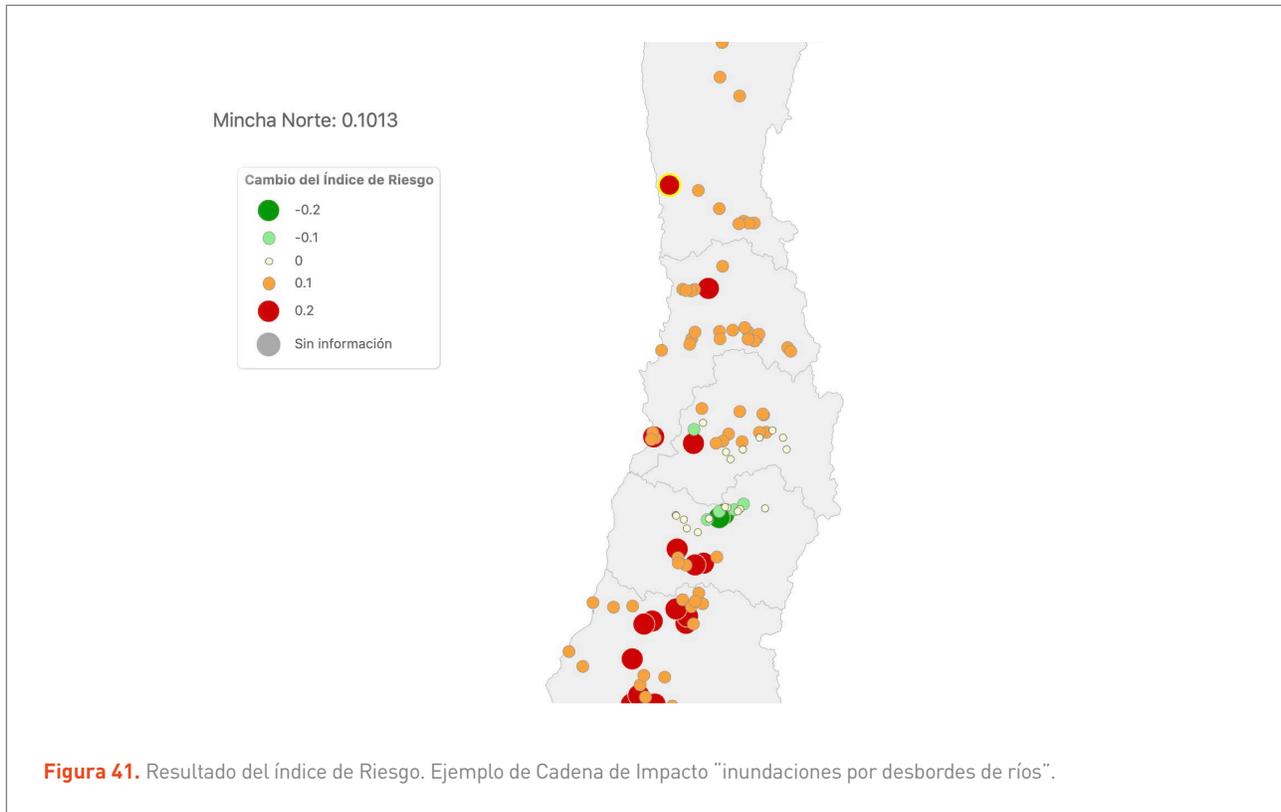
Fuente: Plataforma ARCLIM (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

6.6.5 CONCLUSIONES

Para poder evaluar el Riesgo al que se expone la población, es necesario estudiar sus características sociales, económicas y geográficas de los pobladores propensos a sufrir los efectos adversos que tengan relación al cambio climático (Vargas *et al.*, 2020b).

Los principales resultados, derivados de este estudio, indican que la magnitud de eventos de precipitación extrema aumentará en el futuro, y que los sectores con mayor Riesgo serán aquellos que posean una precaria o nula infraestructura capacitada para portear el agua a los cauces receptores o mitigar los efectos de una crecida. Es por esto, que se recomienda fortalecer y mejorar las redes de recolección, conducción y restitución de aguas lluvias ya construidas en las ciudades, además de mejorar la inspección y mantención de estas redes. En el caso de presentar desbordes de ríos, se debe resguardar la ciudad, implementar obras de defensa fluvial y diseñar infraestructura crítica para periodos de retorno altos, esto

junto con la evaluación de planes reguladores con el fin de limitar cualquier edificación cercana a los ríos (Vargas *et al.*, 2020b).

De los resultados obtenidos en sequía hidrológica, a modo general se observa que la zona centro-norte del país es la que presenta mayor Riesgo, en donde se ven proyecciones de aumento, tanto en la frecuencia de sequías como en la severidad de estas (Vargas *et al.*, 2020b).

Es importante señalar las limitaciones que presenta este sistema, en donde la disponibilidad de información es escasa, por lo que no es posible estudiar el territorio nacional en su totalidad. Como manera de superar la brecha, se espera que en el futuro exista un catastro de la red de colectores en todo el país, junto a análisis de las áreas inundables de cada comuna o ciudad. Esto para poder tener una mayor certeza de la estimación de la Amenaza. Otra brecha detectada corresponde a la incorporación en el análisis del crecimiento urbano y planes reguladores de las áreas urbanas, aspecto que no se consideró en este estudio.



Por su parte, el equipo de Vicuña *et al.* (2020), señala que el desempeño de los usuarios de agua potable y minería poseen una baja Vulnerabilidad extrema (los embalses presentes ayudan a mejorar la Vulnerabilidad del desempeño). Sin embargo, para el escenario futuro, se visualiza una disminución en los caudales anuales en la mayoría de los escenarios climáticos, lo que afectaría la disponibilidad del recurso hídrico en un futuro.

Finalmente, un mecanismo de adaptación directa corresponde al uso de aguas subterráneas a la que puedan acceder los usuarios en la actualidad. Pero, a largo plazo, se podría limitar su disponibilidad, si el consumo adicional supera la capacidad de recarga de los acuíferos.

6.7 MINERÍA



1029

H

1023

684

1023

H



6.7 MINERÍA

6.7.1 INTRODUCCIÓN

La industria minera es una actividad económica importante en todo el mundo. En Chile, en el año 2018, la minería aportó el 9,4% del PIB (SERNAGEOMIN, 2020). A nivel mundial, Chile es el primer productor de cobre y el segundo de molibdeno (SERNAGEOMIN, 2020). A nivel territorial, el rubro minero se concentra en las regiones del Norte y Centro de Chile, encontrándose la mayor parte en las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo (Rivera, Pagliero, McIntyre, Aitken & Godoy, 2020).

Las tendencias climáticas derivadas del cambio climático, sugieren que las regiones del centro y norte de Chile estarán más expuestas a sequías e inundaciones más frecuentes e intensas, representando un riesgo para la industria minera (Rivera *et al.*, 2020).

Mediante un análisis a nivel nacional, se presenta la evaluación del impacto del cambio climático para la industria minera en Chile. Para ello, se analizaron las condiciones de precipitación extrema y de sequía (Rivera *et al.*, 2020).

El objetivo general de esta sección es sintetizar la evaluación del Riesgo climático en el sector minero, el cual se encuentra detallado en el **Informe Proyecto ARCLim: Equipo de Minería** (Rivera *et al.*, 2020).

Subsistema	Subsistema	Amenaza derivada del cambio climático	Exposición	Sensibilidad	Riesgo
Faenas mineras	Inundaciones locales y deslizamientos de tierra en faenas mineras	Cambio en los eventos de precipitación extrema	Número de faenas mineras en cada cuadrícula de 5 x 5 km ²	Combinación de pendiente del terreno circundante, falta de preparación o adecuación de la infraestructura y tamaño de mina considerando horas de trabajo equivalentes	Riesgo de aumento de inundaciones locales y deslizamiento de tierra en función de la Amenaza, Exposición y Sensibilidad
	Impacto de sequía en faenas mineras	Sequía o escasez de suministro de agua para las operaciones es representada por la baja precipitación anual	Número de faenas mineras en cada cuadrícula de 5 x 5 km ² .	Combinación de no-preparación o falta de adecuación de la infraestructura considerando las diferencias entre los percentiles de precipitación extremos y el promedio, y viabilidad fuente de agua alternativa, expresada en función de la energía necesaria para bombear agua desalinizada desde la costa	Riesgo de una disminución de la seguridad hídrica en función de la Amenaza, Exposición y Sensibilidad
Relaves mineros	Inundaciones locales y deslizamientos de tierra en relaves mineros	Cambio en los eventos de precipitación extrema entre mediados de siglo (2035-2065 bajo el escenario RCP 8.5) y el clima histórico (1980-2010)	Número de tranques de relave en cada cuadrícula de 5 x 5 km ²	Combinación de pendiente del terreno circundante, no-preparación o adecuación de la infraestructura, y la condición del relave (activo, inactivo, abandonado, etc.)	Riesgo de aumento de inundaciones locales y deslizamiento de tierra en función de la Amenaza, Exposición y Sensibilidad

Tabla 20. Resumen de Cadenas de Impacto seleccionadas para el Sector Minería.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020)



6.7.2 CADENAS DE IMPACTO

Los eventos climáticos, que identificaron este sistema, corresponden a los eventos de precipitación extrema, de sequía o escasez de suministro de agua. Con esto identificado, se desarrollaron tres Cadenas de Impacto: i) Inundaciones locales y deslizamientos de tierra en faenas mineras⁹, ii) Inundaciones locales y deslizamientos de tierra en relaves mineros y iii) Impacto de sequía en faenas mineras. En **Tabla 20** se resume las Cadenas de Impacto desarrolladas.

6.7.3 METODOLOGÍA

La descripción de la metodología, utilizada en esta sección, se encuentra más detallada en el informe Proyecto ARCLim, Atlas de Riesgo Climático en Chile: Informe Proyecto ARCLim, Equipo de Minería (Rivera *et al.*, 2020).

a. Región bajo análisis

El análisis considera todo el territorio correspondiente a Chile continental para el análisis de Amenaza, Exposición y Sensibilidad para todas las Cadenas de Impacto desarrolladas en este estudio.

b. Modelos utilizados

Para determinar la Amenaza, se utilizaron los percentiles extremos (95° percentil de la precipitación diaria) para la condición de alta pluviometría, mientras que, para evaluar la condición de baja pluviometría, se utilizó el 5° percentil de la precipitación anual.

En el caso de la Sensibilidad, se utilizó una media aritmética de los factores considerados (previamente normalizados).

Finalmente, para el cálculo del Riesgo se utilizó la media aritmética entre los resultados obtenidos para Amenaza, Exposición y Sensibilidad.

c. Caracterización de la Amenaza

Para evaluar los Riesgos de deslizamientos de tierra e inundaciones locales, se realizó un análisis de precipitación pixel por pixel. Para ello, se definió la condición de alta pluviometría, como percentiles extremos, que consideran valores de precipitación diaria para el 95° percentil, siendo la Amenaza la diferencia entre la condición futura y la actual, asumiendo que los flujos y niveles de inundación son proporcionales a la precipitación.

Un segundo análisis corresponde a la baja precipitación anual, que representa la Amenaza del Riesgo de sequía o escasez de suministro de agua. Para ello, la Amenaza de baja pluviometría, fue medida por el 5° percentil de la precipitación anual total para el período en estudio, siendo el índice calculado la diferencia entre la situación futura y la condición actual.

d. Caracterización de la Exposición

Para desarrollar este índice, se utilizó la información contenida en el Atlas de faenas mineras de SERNAGEOMIN. El método de cálculo fue en función del número de faenas mineras en un área específica y se calculó utilizando una zona de suma de 5 x 5 píxeles (aproximadamente de 25 km²) alrededor de cada pixel.

e. Caracterización de la Sensibilidad

Para la Cadena “inundaciones locales y deslizamientos de tierra en faenas mineras”, el valor de Sensibilidad corresponde a la combinación entre la pendiente del terreno circundante, preparación o adecuación de la infraestructura y el tipo de mina, de acuerdo con la cantidad total de horas de trabajo equivalentes.

Para la Cadena “inundaciones locales y deslizamientos de tierra en relaves mineros”, el valor de Sensibilidad corresponde a la combinación entre la pendiente del

⁹ Obtenidas según la clasificación del “Atlas de Faenas Mineras” desarrolladas por SERNAGEOMIN.

terreno circundante, no-preparación o falta de adecuación de la infraestructura y el estado del depósito de relave.

Para la Cadena “impacto de sequía en faenas mineras”, el valor de Sensibilidad corresponde a la combinación entre la no-preparación o falta de adecuación de la infraestructura y la viabilidad de fuente de agua alternativa.

Para obtener el índice de Sensibilidad para cada Cadena analizada, cada factor fue normalizado y luego promediado.

f. Caracterización del Riesgo

El Riesgo fue calculado como la multiplicación entre la Amenaza, Exposición y Sensibilidad del sistema estudiado. La unidad de medida de la Amenaza se encuentra en milímetros, mientras que la Exposición y la Sensibilidad están normalizados entre los valores 0 y 1. En consecuencia, el resultado final es indicativo del Riesgo relativo de un área con respecto a otra.

6.7.4 RESULTADOS

Los resultados de Amenaza, Exposición, Sensibilidad y Riesgo de este sistema, se pueden consultar y descargar desde la plataforma ARCLim. A continuación, se presenta a modo de ejemplo, algunos resultados de la Cadena de Impacto “inundaciones locales y deslizamientos de tierra en faenas mineras”, con un acercamiento que permite visualizar entre la Región de Antofagasta y la Región de Coquimbo.

A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos del Riesgo debido al cambio climático. Para más detalle ver el informe sectorial del equipo de Minería (Rivera *et al.*, 2020).

a. Resultados de Amenaza

Para las Cadenas de Impacto que analiza “inundaciones locales y deslizamientos de tierra” se obtiene la Amenaza en condiciones de alta pluviometría. Los resultados se presentan como cambio en la precipitación medida en mm, en donde resultados negativos indican que existe una disminución de las precipitaciones extremas bajo un escenario de cambio climático (**Figura 42**).

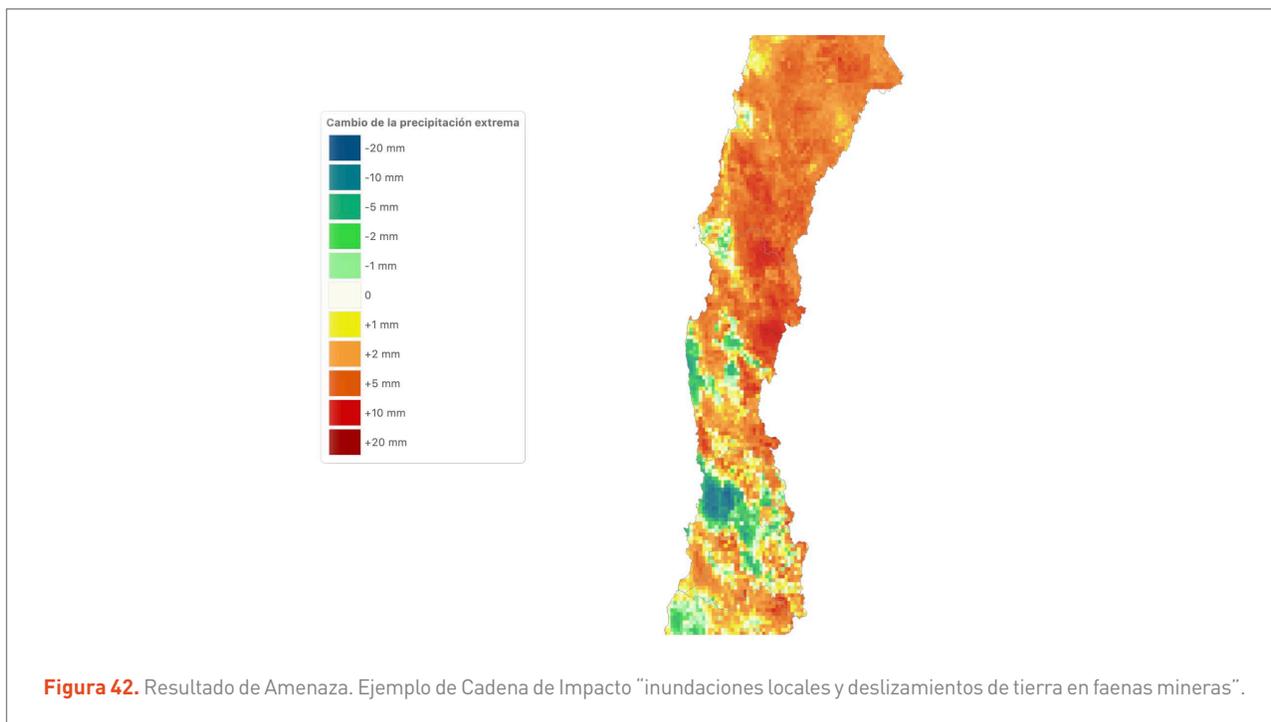


Figura 42. Resultado de Amenaza. Ejemplo de Cadena de Impacto “inundaciones locales y deslizamientos de tierra en faenas mineras”.

Fuente: Plataforma ARCLim [Ministerio del Medio Ambiente, 2020].



En general, se observa que zonas extremas del país se verán más afectadas por precipitaciones extremas en el futuro, como consecuencia del cambio climático.

Por otro lado, se obtiene el resultado de Amenaza para la condición de sequía en faenas mineras, en donde valores negativos indican que las condiciones futuras serán más secas que las condiciones actuales. En general, se presenta mayor Amenaza en la zona centro sur, hacia el sector cordillerano.

b. Resultados de Exposición

Se presenta la Exposición, para faenas mineras y relaves mineros, en una escala relativa que va de Exposición muy bajo a muy alto (Figura 43). De los resultados obtenidos, se puede observar que las faenas mineras y relaves mineros se encuentran en mayor concentración en la zona norte y centro del país.

c. Resultados de Sensibilidad

Se presenta la Sensibilidad en una escala relativa que va desde una Sensibilidad muy bajo a muy alto (Figura 44). En

lo presentado para inundaciones locales y deslizamientos de tierra en condiciones de alta precipitación, es posible observar que la Sensibilidad es mayor en la depresión intermedia, mientras que la zona menos sensible se ubica en la alta montaña, esto debido a la mayor preparación que poseen las minas en estas zonas.

Para el caso de deslizamientos, se debe considerar que estos se producen por una combinación entre la capacidad de infiltración del suelo y el estado de saturación del suelo. Si se requiriera un análisis detallado, se deben considerar estos factores, además del tipo de suelo del sitio a analizar.

En el caso de la Sensibilidad obtenida, en condición de sequía en faenas mineras, los resultados obtenidos indican que las zonas con mayor Sensibilidad corresponden a la zona cordillerana y pre-cordillerana del país. En la zona norte, esta mayor Sensibilidad se ve influenciada por la baja viabilidad de fuente de agua alternativa, mientras que, hacia la zona sur, la mayor Sensibilidad se ve influenciada por la no-preparación o falta de adecuación de la infraestructura.

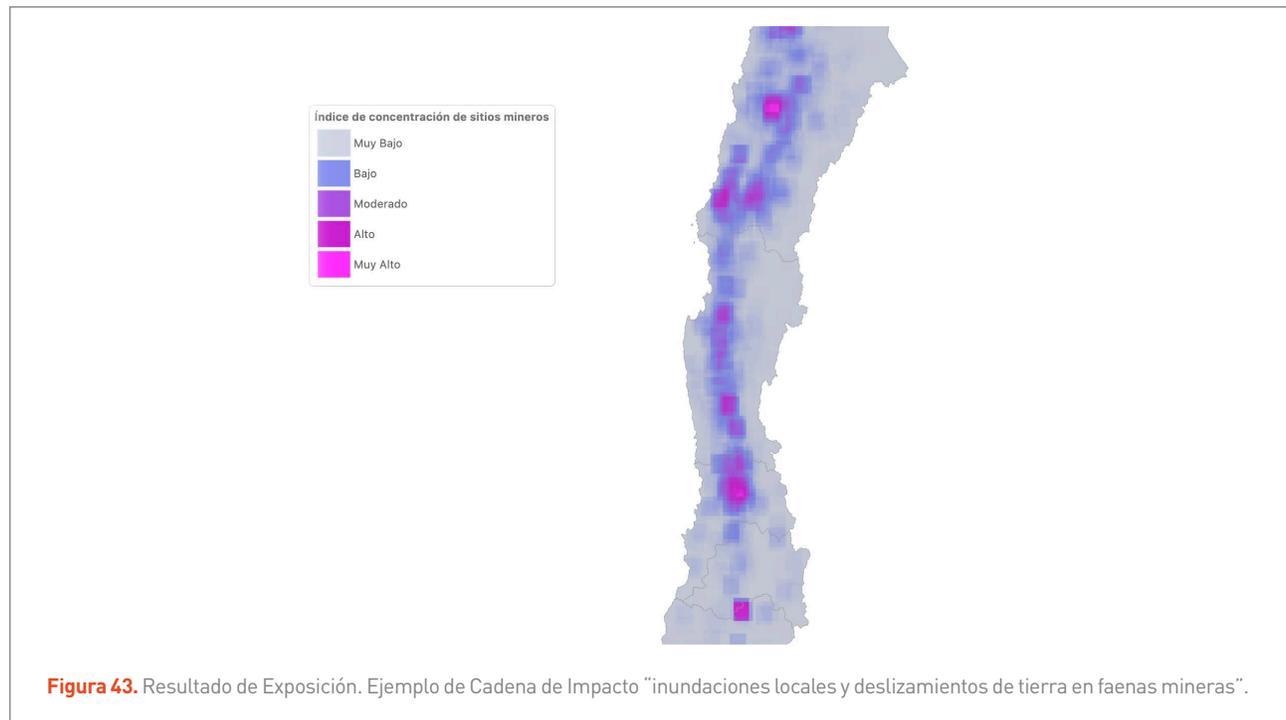
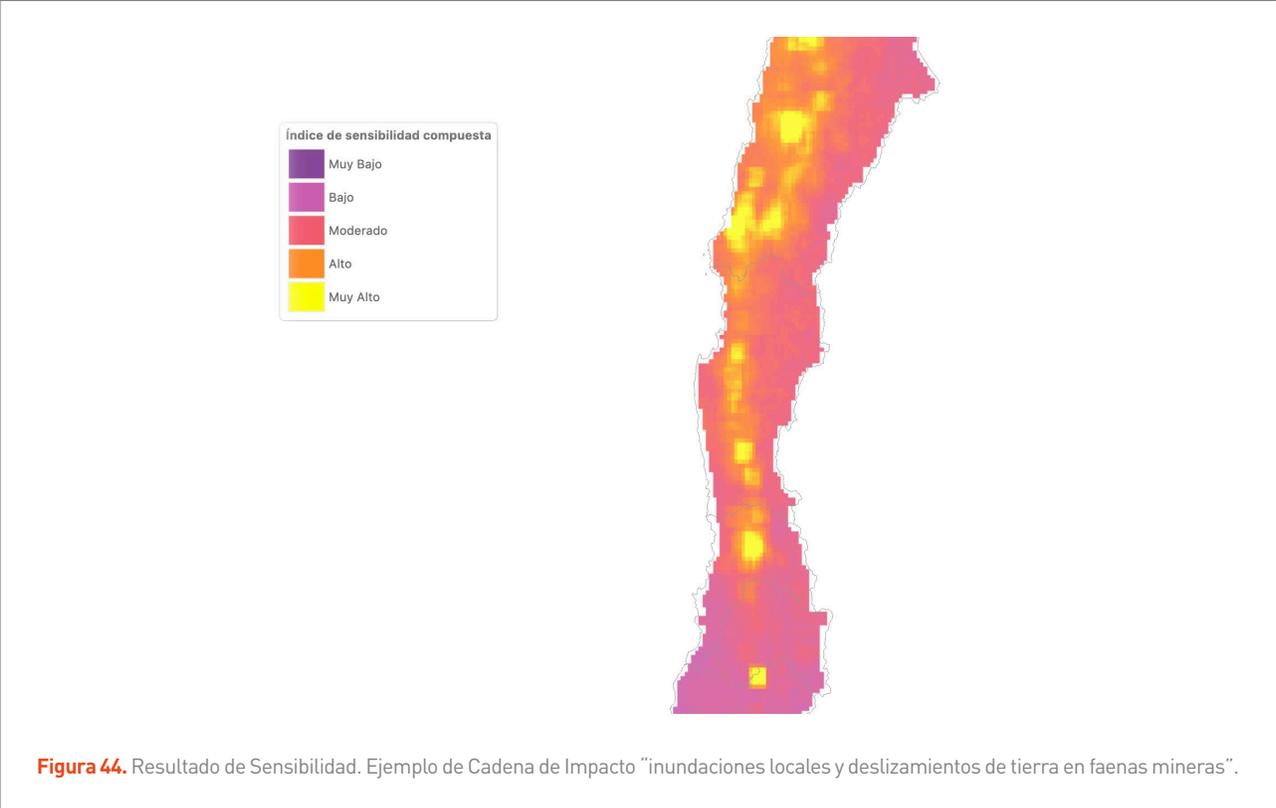
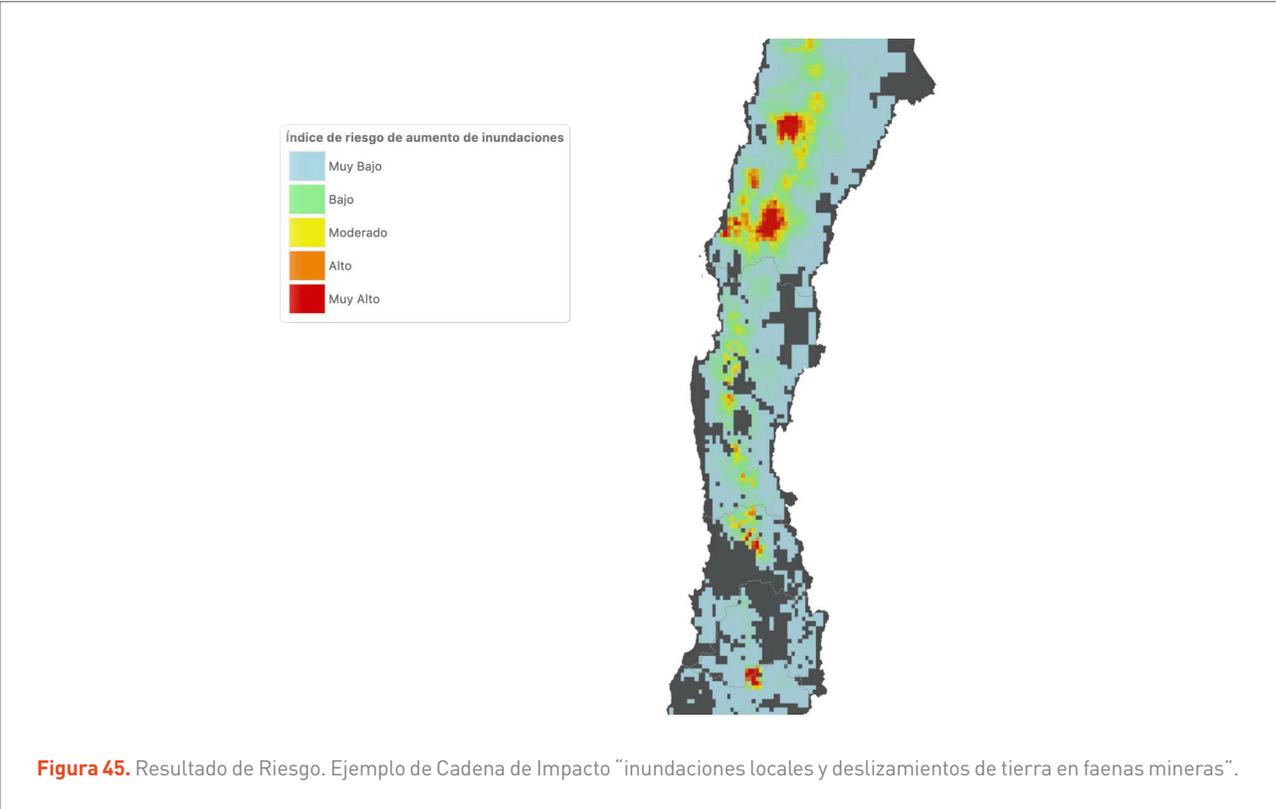


Figura 43. Resultado de Exposición. Ejemplo de Cadena de Impacto “inundaciones locales y deslizamientos de tierra en faenas mineras”.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



d. Resultados de índice de Riesgo

Se presenta el índice de Riesgo como la multiplicación entre la Amenaza, la Sensibilidad y la Exposición, tanto en condiciones de alta pluviometría (para analizar inundaciones locales y deslizamientos de tierra) como de baja pluviometría (para analizar sequía en faenas mineras). La escala va desde un Riesgo muy bajo a un Riesgo muy alto (Figura 45).

Cuando se analiza la condición de alta pluviometría, el sector con mayor Riesgo se ubica en la zona centro norte del país hacia la depresión intermedia (Región de Atacama). Por otro lado, si se analiza la condición de baja pluviometría, el sector con mayor Riesgo se ubica en la zona centro sur del país hacia el sector costero (Región de Biobío).

6.7.5 CONCLUSIONES

La metodología propuesta consideró, tanto las condiciones actuales de clima como futuras (periodo 2035-2065 bajo condiciones de cambio climático), permitiendo estimar el Riesgo de las mineras debido al cambio climático (Rivera *et al.*, 2020).

De lo analizado en este trabajo, se puede desprender que la Sensibilidad de las operaciones mineras está influenciada fuertemente por las condiciones locales y operativas de cada minera, de modo que, el nivel de Sensibilidad, dependerá de la infraestructura propia de la operación (Rivera *et al.*, 2020).

La falta de preparación en la industria minera puede tener, como consecuencia, una disminución de la productividad y Riesgos en la salud, por lo que se requiere de mayor investigación para precisar las dinámicas a escalas espaciales menores, además de un esfuerzo concertado y colaborativo entre la industria, las comunidades aledañas y otros sectores productivos (Rivera *et al.*, 2020).

Como limitaciones de este trabajo, se pueden mencionar que solo es considerada como "Exposición" la infraestructura local del sitio minero, la resolución espacial del análisis es grueso y algunos factores locales no considerados (como por ejemplo la protección contra inundaciones y/o el mantenimiento de la infraestructura). En caso de necesitar un análisis más preciso, es posible el uso de modelos de resolución a escala de metros y modelamiento hidrológico de crecidas para cada faena (Rivera *et al.*, 2020).

6.8 TURISMO





6.8 TURISMO

6.8.1 INTRODUCCIÓN

La industria del turismo ha mostrado un crecimiento relacionado con el aumento de turistas extranjeros en la última década, quienes son atraídos, principalmente, por los paisajes naturales de nuestro país. Esta industria contribuye positivamente a la economía nacional, aportando con un 3,3% al PIB de manera directa, y con un 10,1% de manera indirecta y es una fuente de empleo que representa el 4,4% del total nacional (Ministerio del Medio Ambiente, 2019), lo que enfatiza la importancia de estudiar los Riesgos asociados a cambios en el clima sobre el turismo en Chile.

Los destinos turísticos se definen como aquellos espacios geográficos que están conformados por un conjunto de atractivos turísticos naturales y culturales que motivan el desplazamiento de turistas y el desarrollo de actividades turísticas (ACT). Los atractivos turísticos, por su parte, son aquellos elementos o lugares de interés cuyo rol es motivar la elección del destino turístico, por lo tanto, constituyen una motivación en la afluencia de visitantes y turistas al lugar donde se encuentran (SERNATUR, 2016). Considerando lo anterior, el rol del clima en el turismo es determinante, pues define si existen buenas condiciones para que los visitantes conozcan, accedan y valoricen los distintos atractivos turísticos.

Según sus características geográficas, vocación y atractivos turísticos, los distintos destinos turísticos del país se categorizan por tipos: litoral, urbano, rural y de naturaleza, de montaña, lacustres y fluviales, insulares (Ministerio del Medio Ambiente, 2019). Estas definiciones cubren un amplio espectro de atractivos, entornos geográficos, condiciones socioeconómicas y culturales a lo largo del país, lo cual deja en evidencia el carácter multisectorial de la industria.

Dada la dependencia de la industria del turismo en los atractivos naturales de Chile, se ha evidenciado que una de las principales Amenazas del turismo en Chile se

encuentran relacionadas con cambios en el clima, específicamente de temperatura, precipitación y ocurrencia de eventos extremos climáticos (Ministerio del Medio Ambiente, 2019). Los impactos pueden ser múltiples y dependen directamente del producto turístico que se esté evaluando, cuyas consecuencias pueden generar una redistribución geográfica y temporal (estacional) de los flujos de visitantes, lo que podría provocar el cierre de empresas y medios de subsistencia. Lo anterior pone en Riesgo a la industria del turismo nacional, lo que conlleva un impacto social sobre las localidades y familias que dependen del rubro.

En la presente sección se sintetiza la estrategia de evaluación del Riesgo climático en el sector Turismo, según detalla el informe **Informe Proyecto ARclim: Equipo de Turismo (Gibbs & Meza, 2020) y el Informe Proyecto ARclim: Equipo de Zonas Costeras (Winckler, Contreras-López, Larraguibel, Mora, Esparza, Agredano, Martínez & Torres, 2020)**.

6.8.2 CADENAS DE IMPACTO

Considerando los antecedentes expuestos en la introducción, en particular sobre la diversidad de territorios y los diferentes atractivos turísticos naturales que existen en Chile, en este estudio se analizaron cuatro Cadenas de Impacto. La elección se realizó a partir de un análisis en donde se identificaron varios subsistemas del sector turismo pero que, finalmente, por representatividad y por disponibilidad de datos, se seleccionaron tres. Este sistema consideró, además, un subsistema del grupo de Zonas Costeras (Informe Sectorial de Zonas Costeras, Winckler *et al.*, (2020)).

En la **Tabla 21** se observan los subsistemas abordados en este estudio cuyo Riesgo es obtenido a través de Cadenas de Impacto en función de tres factores determinantes: (i) Amenaza, (ii) Exposición, y (iii) Sensibilidad.

Subsistema	Cadena de Impacto	Amenaza derivada del cambio climático	Exposición	Sensibilidad	Riesgo
Bosques nativos	Pérdida de atractivo turístico por incendios forestales	Aumento de Riesgo de incendios de bosque nativo	Demanda turística en comunas con atractivos de riqueza natural	Índice de dependencia del desarrollo comunal con los atractivos de riqueza natural	Pérdida de patrimonio turístico y paisaje natural debido al riesgo de incendios en bosques nativos
Centros de esquí	Pérdida de atractivo turístico invernal en centros de alta montaña	Disminución de la nieve acumulada	Demanda turística en centros de esquí en temporada alta.	Diversidad turística en torno a centros de esquí en temporada baja	Pérdida de atractivo turístico en centros invernales de esquí
Relaves mineros	Pérdida de atractivo turístico en los destinos de sol y playa	Riesgo de erosión de playas	Demanda turística en temporada alta de sol y plata	Diversidad de oferta turística de sol y playa en temporada baja	Pérdida de atractivo turístico de sol y playa
	Erosión de playas	Probabilidad de aumento de cambio en la cota de inundación	Área de superficie de las playas estudiadas	Índice de Sensibilidad compuesto	Erosión de la línea de costa

Tabla 21. Resumen Cadenas de impacto Sistema Turismo.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

6.8.3 METODOLOGÍA

La metodología utilizada responde al objetivo general de evaluar el Riesgo climático en el sector de Turismo en Chile. Para más detalles revisar el informe sectorial del Equipo de Turismo (Gibbs & Meza, 2020) y Zonas Costeras (Winckler *et al.*, 2020).

a. Región bajo análisis

El área de estudio es diferente para cada Cadena de Impacto, según los objetivos y características que tenga cada atractivo turístico. Para el análisis de Riesgo de "pérdida de atractivo turístico por incendios forestales" se considera a todo el territorio de Chile continental, desde las regiones de Arica y Parinacota a Magallanes, agrupados a nivel comunal. Para el Riesgo de "pérdida de atractivo turístico invernal, en centros de alta montaña", se consi-

deran 17 centros de invierno a lo largo de Chile, ubicados en la cordillera de los Andes.

Para el cálculo del Riesgo de "pérdida de atractivo turístico en los destinos de sol y playa", se consideraron 34 playas asociadas a destinos turísticos, las cuales cuentan con la información necesaria para su cálculo de Riesgo.

Finalmente, para el cálculo de Riesgo de "erosión de playas", se consideraron 45 playas, donde no todas clasificaron como destinos turísticos del país.

b. Modelos utilizados

En la Cadena de Impacto de pérdida de atractivo turístico por incendios forestales se utilizaron, como Amenazas, los valores de aumento de Riesgo de la Cadena de Impacto de "incendios en bosques nativos" (Sección 6.2). Siguiendo la



misma metodología, en la Cadena de Impacto de “pérdida de atractivo turístico en los destinos de sol y playa”, se utilizaron, como Amenazas los valores de aumento de Riesgo de la Cadena de Impacto de “erosión de playas”.

Finalmente, la Cadena de Impacto de “erosión de playas” consideró, como Amenaza, el cambio en la cota de inundación obtenido del estudio “Determinación del Riesgo de los Impactos del Cambio Climático en las Costas de Chile” (Winckler *et al.*, 2019).

Por otro lado, el cálculo de la Exposición asigna puntuación a las respectivas zonas, en donde se encuentran los atractivos turísticos, bajo distintos criterios para cada Cadena de Impacto.

Finalmente, los cálculos de Sensibilidad utilizaron medias aritméticas en todas las Cadenas de Impacto, donde cada cual utilizó distintos factores que disonan Sensibilidad a los respectivos subsistemas.

c. Características de la Amenaza

i. Amenazas de pérdida de atractivo turístico por incendios forestales

El cálculo de la Amenaza provino del Riesgo de “pérdida de bosque nativo por aumento de incendios forestales”. El efecto indirecto del cambio climático sobre este atractivo turístico natural ya se indicó en la sección de bosques nativos (Sección 6.2). Finalmente, se calculó la Amenaza para el clima futuro (2030-2060) y para el período histórico (1980-2010), cuya diferencia determinó el cambio de la Amenaza como el aumento de Riesgo de incendios en bosques nativos entre ambos períodos. Los valores de Amenaza van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las comunas que no muestran un aumento de la Amenaza hacia el clima futuro y 1 corresponde a las comunas donde hay mayor aumento de Amenaza a futuro (aumento de Riesgo de incendios forestales en bosques nativos).

ii. Amenazas de pérdida de atractivo turístico invernal en centros de alta montaña

Se considera como Amenaza en centros de alta montaña a la disminución del promedio de nieve acumulada debido

al cambio climático, específicamente por el aumento de temperaturas y de la altura de la isoterma cero. Los datos de nieve se obtuvieron a través de datos de precipitación cuando la temperatura es menor a cero. Para el cálculo acumulado, se sumaron todos los eventos de precipitación sólida en un mes, una estación o un año. Finalmente, se calculó la Amenaza para el clima futuro (2030-2060) y para el período histórico (1980-2010), cuya diferencia determinó el cambio de la Amenaza como la disminución de la nieve acumulada entre ambos períodos.

Los valores de Amenaza están en porcentajes y van entre 0 y -100, donde 0 corresponde a los centros de esquí, que no muestran disminución de la nieve acumulada hacia el clima futuro, y el -100 que corresponde a los centros de esquí donde hay una mayor disminución de la nieve acumulada a futuro (mayor aumento de Amenaza).

iii. Amenazas de pérdida de atractivo turístico en los destinos de sol y playa

Corresponde a la Amenaza indirecta que sufren los destinos de tipología litoral, de sol y playa, por Riesgo de erosión de playas en el clima futuro (evaluado por el grupo de Zonas Costeras). El cálculo de la Amenaza se realizó considerando los atractivos turísticos (sitios naturales tipo costa y subtipo playa o balneario, cuyo catastro fue realizado el 2019, por SERNATUR), destinos turísticos y estadística de alojamiento de turistas (datos mensuales entre el 2014 y 2018 basados en la Encuesta Mensual de Alojamiento Turístico (EMAT) aplicada por el Instituto Nacional de Estadísticas - INE). Finalmente, se calculó la Amenaza para el clima futuro (2030-2060) y para el período histórico (1980-2010), cuya diferencia determinó el cambio de la Amenaza como el aumento de Riesgo de erosión de playas entre ambos períodos.

Los valores de Amenaza van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a los balnearios que no muestran un aumento de la Amenaza hacia el clima futuro y el 1, que corresponde a los balnearios donde hay un mayor aumento de la Amenaza (aumento de Riesgo de erosión en las playas).

iv. Amenazas de erosión de playas

Se considera como Amenaza a la erosión de playas produ-

cida por la combinación entre el aumento del nivel del mar y el cambio de las propiedades del oleaje (marejadas). Los cálculos de probabilidad de aumento de cambio de cota de inundación fueron realizados por el MMA (Winckler *et al.*, 2019a), de donde se obtuvo la Amenaza para el clima futuro (2026-2045) y para el período histórico (1985-2004), cuya diferencia determinó el cambio de la Amenaza como el aumento de la cota de inundación entre ambos períodos. Ellos indican que este aumento se debe, principalmente, al aumento del nivel del mar y, en menor medida, a cambios en la marea meteorológica y el oleaje. Los valores de Amenaza van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a los balnearios que no muestran un aumento de la Amenaza hacia el clima futuro y 1, que corresponde a los balnearios donde hay un mayor aumento de la Amenaza (aumento de la cota de inundación).

d. Características de la Exposición

i. Exposición de atractivo turístico a incendios forestales

Para el cálculo de la Exposición se consideran las comunas que cuentan con áreas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado (SNASPE), santuarios de la naturaleza, Áreas Protegidas Privadas (APP), Zonas de Interés Turístico (ZOIT) y destinos turísticos. El valor de la Exposición se obtuvo en función de tres indicadores:

- > **La población flotante en las comunas a las que pertenecen las unidades territoriales expuestas:** corresponde a la suma del número de pernoctantes y de visitas diarias por razones de turismo en una comuna. Se considera la estimación obtenida del año 2019.
- > **Las ventas de empresas del sector Turismo en las comunas vinculadas:** consideran los datos obtenidos de la estadística de ventas (UF) según actividad (ACT) del año 2017, por región y comuna. Las ACT turísticas consideradas son: alojamiento turístico, actividades de provisión de alimentos y bebidas, actividades de agencias de viaje y otros servicios de reserva.
- > **El porcentaje de la superficie comunal asociada a las áreas de interés turística mencionadas:** se define como el porcentaje de superficie comunal abarcado

por las áreas de interés turístico relacionadas con la naturaleza (SNASPE, APP, ZOIT, etc).

La Exposición es el resultado de la suma ponderada de los tres factores normalizados, otorgando un 33,34% de peso relativo al indicador de superficie y 33,33% a los otros dos factores. Los valores van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las comunas menos expuestas (Exposición nula) y 1 a las comunas más expuestas a incendios forestales.

ii. Exposición de atractivo turístico de centros de alta montaña

La Exposición de los atractivos turísticos de centros de alta montaña, o centros de esquí, considera, en su cálculo, la distribución de los centros de esquí identificados como atractivos turísticos en la base de datos de SERNATUR, específicamente en la categoría de montaña y subtipo nevados. En esta base de datos se reconocen un total de 17 centros de esquí.

Sumado a lo anterior, la metodología indica que para cada centro de esquí se debe identificar un destino turístico y, con eso, contabilizar las visitas. Sin embargo, de los 17 centros inscritos, sólo 13 cumplieron con este criterio. Por otro lado, los centros de esquí de la comuna de Lo Barnechea (La Parva, Farellones, Valle Nevado y El Colorado), se tuvieron que agrupar como uno sólo en este estudio, esto por falta de información individual de cada centro. Luego de este procesamiento, la base de datos consideró un total de 14 centros de esquí.

Para estos 14 puntos seleccionados, el valor de la Exposición se obtuvo considerando la demanda en temporada alta con mayor llegada de pasajeros a destinos turísticos vinculados a los centros de esquí (entre junio y septiembre). La estadística mensual, utilizada para el cálculo del índice de Exposición, surge de la información de arribo de pasajeros a establecimientos de alojamiento turístico, según destino turístico, para el período entre el 2014 y 2018.

Para finalizar, se debe hacer un supuesto para determinar qué porcentaje de estas visitas, en temporada de invierno, son motivadas principalmente para ir a los centros turísticos relacionados. Los valores de Exposición van entre 0



y 1, donde 0 son los centros de esquí menos expuestos (Exposición nula) y 1 son los centros más expuestos a efectos del cambio climático sobre la demanda turística en temporada alta.

iii. Exposición de atractivo turístico de los destinos de sol y playa

La Exposición del atractivo turístico de los destinos de sol y playa se define sobre la distribución de playas de tipología natural. Se consideró un total de 34 playas correspondientes a 20 comunas del territorio nacional. Sobre estos lugares, se estima la Exposición en función de la demanda actual en temporada alta de sol y playa, calculado según la llegada de pasajeros a sus centros de alojamiento durante los meses de enero y febrero. Se cuenta con información entre los años 2014 y 2018.

Para poder contar con una aproximación de las llegadas hay que considerar que las playas deben estar asociadas a un destino turístico. Una vez asociado, se debe hacer un supuesto para determinar qué porcentaje de estas visitas, en temporada de verano, son motivadas para ir a las playas, lo que finalmente define la Exposición de la manera más realista posible. Los valores de Exposición van entre 0 y 1, donde 0 son los balnearios menos expuestos (Exposición nula) y 1 los balnearios más expuestos a efectos del cambio climático sobre la demanda en temporada alta en destinos de sol y playa.

iv. Exposición de playas

La Exposición de las playas frente a cambios de erosión, se estimó calculando el área superficial de las playas consideradas en el área de estudio, que correspondió a 600 Ha de playas. La ficha de Exposición de cada playa contempló los siguientes parámetros: ID de playa, nombre de la playa, latitud, longitud, comuna, región, tipo (industrial, urbana, periurbana, rural), longitud, área, tasa de cambio (m/año), categoría (acreción, estable, erosión), forma planta, orientación del frente de playa (°), zona de surf + zona de swash, longitud onda de cusps (m), tipo zona de rompiente, barra tipo, barra forma, drenaje, campos dunares y sedimento. Los valores de Exposición van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las playas menos expuestas (Exposición nula) y 1 a las playas más expuestas a efectos del cambio climático.

e. Características de la Sensibilidad

i. Sensibilidad a la pérdida de atractivo turístico por incendios forestales

La Sensibilidad ante la pérdida de atractivo turístico por la generación y propagación de incendios forestales se definió en base al desarrollo comunal relacionado con los atractivos de riqueza natural, a partir de dos indicadores:

- > **Dependencia del empleo comunal con la industria de turismo:** este indicador se obtuvo a partir del número de trabajadores dependientes informados, según comuna y actividades (ACT), cuantificados el año 2017. Las ACT turísticas consideradas son: alojamiento turístico, actividades de provisión de alimentos y bebidas, actividades de agencias de viaje y otros servicios de reserva.
- > **Diversidad del sector:** este indicador se obtuvo a partir de datos de la presencia comunal de atractivos turísticos distintos a la categoría "naturaleza", como una aproximación a la identificación de la diversidad de la oferta y dependencia respecto de dicha categoría de atractivo.

Finalmente, la Sensibilidad se obtuvo como la suma ponderada de los dos factores normalizados, otorgando un 50% de peso relativo a cada uno. Los valores de Sensibilidad van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las comunas menos sensibles (nula Sensibilidad) y 1 a las comunas más sensibles a los efectos del cambio climático sobre la dependencia del desarrollo comunal con los atractivos de riqueza natural.

ii. Sensibilidad de atractivo turístico en centros de alta montaña

La Sensibilidad de centros de alta montaña, considerada como la diversidad de oferta en temporada baja, se obtuvo a partir de dos indicadores:

- > **Presencia de otros atractivos turísticos, distintos a los centros de esquí:** indicador estimado a partir de la presencia de atractivos turísticos en las comunas

donde se emplazan los centros de esquí, que no dependen de la categoría “sitios naturales”, y que específicamente no pertenezcan al tipo “montaña” ni subtipo “área nevada”. Esta información fue facilitada por SERNATUR (2019).

- > **Demanda en temporada baja:** indicador estimado a partir de la estadística de llegadas de pasajeros en temporada de verano (enero y febrero) a los destinos donde existen centros de esquí.

Finalmente, la Sensibilidad se calculó como el promedio entre ambos factores, asignando de esta manera un 50% de peso relativo a cada uno. Los valores de Sensibilidad van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a los centros de esquí menos sensibles (nula Sensibilidad) y 1 a los centros de esquí más sensibles a efectos del cambio climático sobre la diversidad de oferta en temporada baja. En suma, los centros de montaña más (menos) sensibles al cambio climático son los que basan la mayor (menor) parte de su operación en actividades asociadas a la nieve.

iii. Sensibilidad de atractivo turístico en los destinos de sol y playa

La Sensibilidad de los destinos de sol y playa, considerada como la diversidad de oferta en temporada baja, comprende la combinación de dos factores:

- > **Presencia de otros atractivos turísticos, distintos a los subtipos “balnearios”:** diversidad de oferta estimada a partir del total de atractivos turísticos distintos del tipo “costa” y subtipo “playa o balneario”.
- > **Demanda en temporada baja:** factor estimado a partir de la estadística de llegadas registradas de turistas en temporada de invierno, desde junio a septiembre, a los destinos asociados a las playas estudiadas.

Finalmente, la Sensibilidad se calculó como el promedio entre ambos factores, asignando de esta manera un 50% de peso relativo a cada uno. Los valores de Sensibilidad van entre 0 y 1, donde 0 son los balnearios menos sensibles (nula) y 1 los balnearios más sensibles a efectos del cambio climático sobre la diversidad de la oferta turística

en temporada baja. En suma, los destinos de sol y playa más (menos) sensibles al cambio climático son los que basan la mayor (menor) parte de su operación en actividades que se realizan directamente en la zona costera.

iv. Sensibilidad de playas

Para el cálculo de la Sensibilidad de playas se utilizaron dos índices: i) índice de Sensibilidad estructural y ii) tasa de erosión normalizada.

- > **Sensibilidad estructural:** consideró, en su cálculo, el tipo de rompiente (TR), la existencia de drenaje (DR) y la existencia de dunas (Du). Como no se conoce la importancia relativa de cada una, el valor de Sensibilidad estructural es el promedio de las tres.
- > **Tasa de erosión normalizada:** es un valor que varía entre 0 y 1, donde 0 representa acreción y el estado estable, mientras que la erosión y erosión alta serían valores mayores a 0.

Como no se conoce la importancia relativa entre ambos índices, la Sensibilidad se calculó como el promedio aritmético entre ambos índices, asignando de esta manera un 50% de peso relativo a cada uno. Los valores de Sensibilidad van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las playas menos sensibles (nula Sensibilidad) y 1 a las playas más sensibles a efectos del cambio climático.

f. Características del Riesgo

El Riesgo se cuantificó como la multiplicación de la Amenaza (A), la Sensibilidad (S) y la Exposición (E), de igual manera para todas las Cadenas de Impacto. Al depender de la Amenaza, el Riesgo también se determinó como un cambio entre el período histórico (1980-2010) y el clima futuro (2030-2060). Los valores de cambio de Riesgo entre ambos períodos van entre 0 y 1, donde 0 corresponde al cambio de Riesgo nulo y 1 al cambio de Riesgo máximo por efectos del cambio climático.



6.8.4 RESULTADOS

Según los resultados que se encuentran en la plataforma, aquí se presenta, a modo de ejemplo, la Amenaza, Exposición, Sensibilidad y Riesgo de la Cadena de Impacto: pérdida de atractivo turístico en alta montaña. Para más detalles ver el Informe Sectorial de Turismo (Gibbs & Meza, 2020) y Zonas Costeras (Winckler *et al.*, 2020).

g. Resultados de la Amenaza

En la **Figura 46** se observa el aumento de la Amenaza de los centros de esquí considerados en el estudio, en función de la disminución de la nieve acumulada entre el período histórico y el período futuro. Se puede apreciar que, en los 14 centros de esquí evaluados, la Amenaza va desde alta a muy alta, con reducciones del promedio de la acumulación de nieve entre el 43% y el 75%.

h. Resultados de la exposición

En la **Figura 47** se observa la Exposición de los centros de esquí evaluados en función de la demanda turística en temporada alta. Los centros más expuestos fueron los de

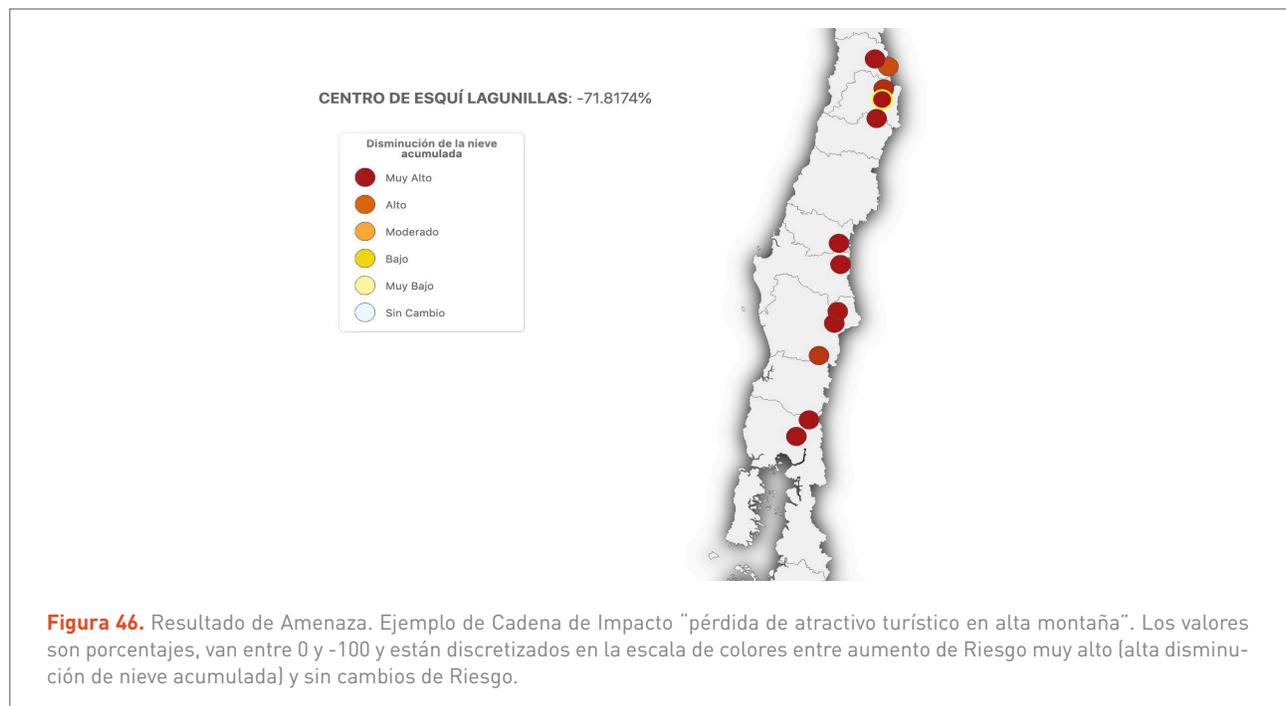
la comuna de Lo Barnechea (La Parva, Farellones, Valle Nevado y El Colorado), Mirador, Osorno, Antillanca y Portillo, con una exposición alta.

i. Resultados de la Sensibilidad

En la **Figura 48** se observa la Sensibilidad de los centros de esquí, estimada en función de una aproximación de la diversidad de oferta turística en temporada baja. Los centros de esquí más sensibles fueron El Arpa y Antuco, mientras que el menos sensible fue el centro Mirador. Esto último se podría explicar porque las llegadas fuera de temporada se mantienen altas en temporada baja. El resto de los centros presentaron Sensibilidad moderada a alta.

j. Resultados del Riesgo

En la **Figura 49** se observa el aumento de Riesgo de pérdida de atractivo turístico en centros invernales de esquí. El centro de Antuco muestra el menor valor de Riesgo, mientras que Antillanca y los centros de la comuna de Lo Barnechea poseen el mayor Riesgo. Los otros centros se encuentran entre Riesgo moderado a alto, a , de Arpa y Chapa Verde que poseen Riesgo bajo.



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

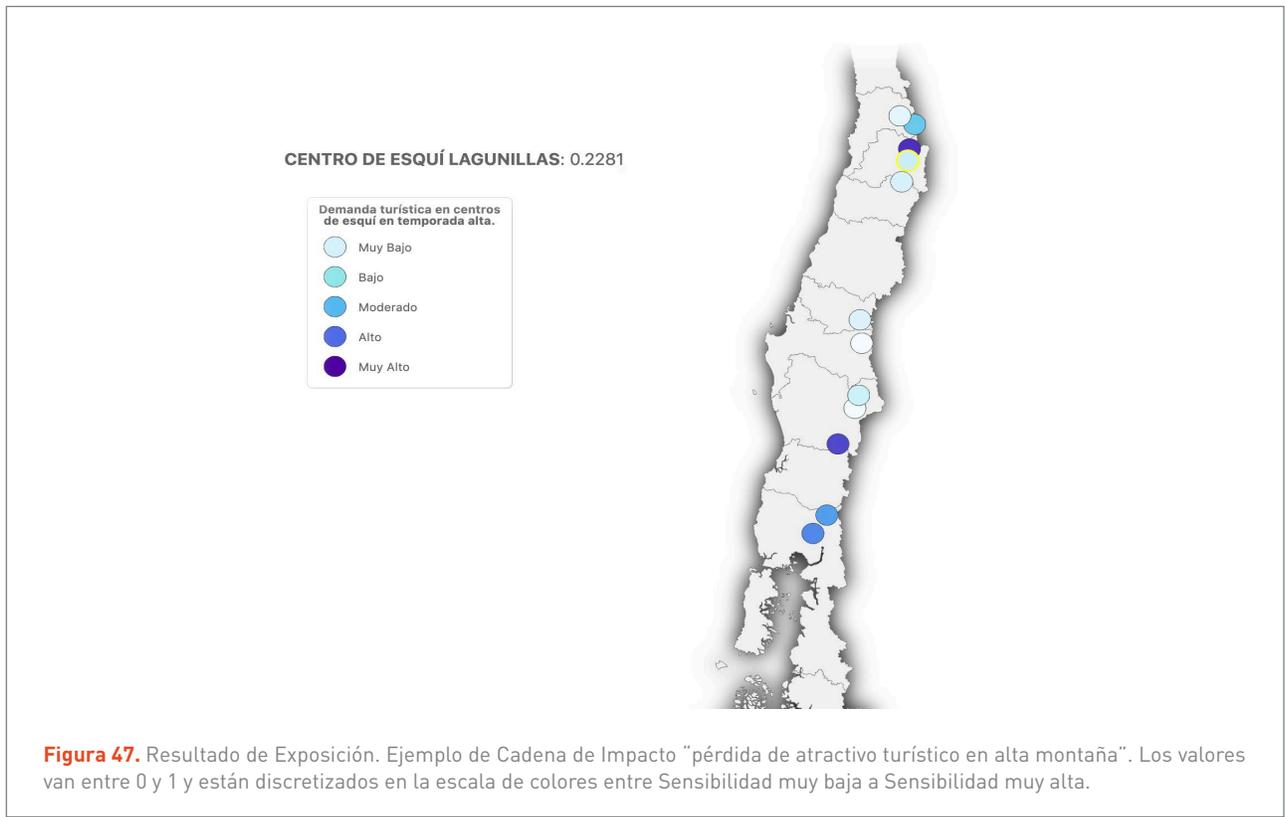


Figura 47. Resultado de Exposición. Ejemplo de Cadena de Impacto “pérdida de atractivo turístico en alta montaña”. Los valores van entre 0 y 1 y están discretizados en la escala de colores entre Sensibilidad muy baja a Sensibilidad muy alta.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

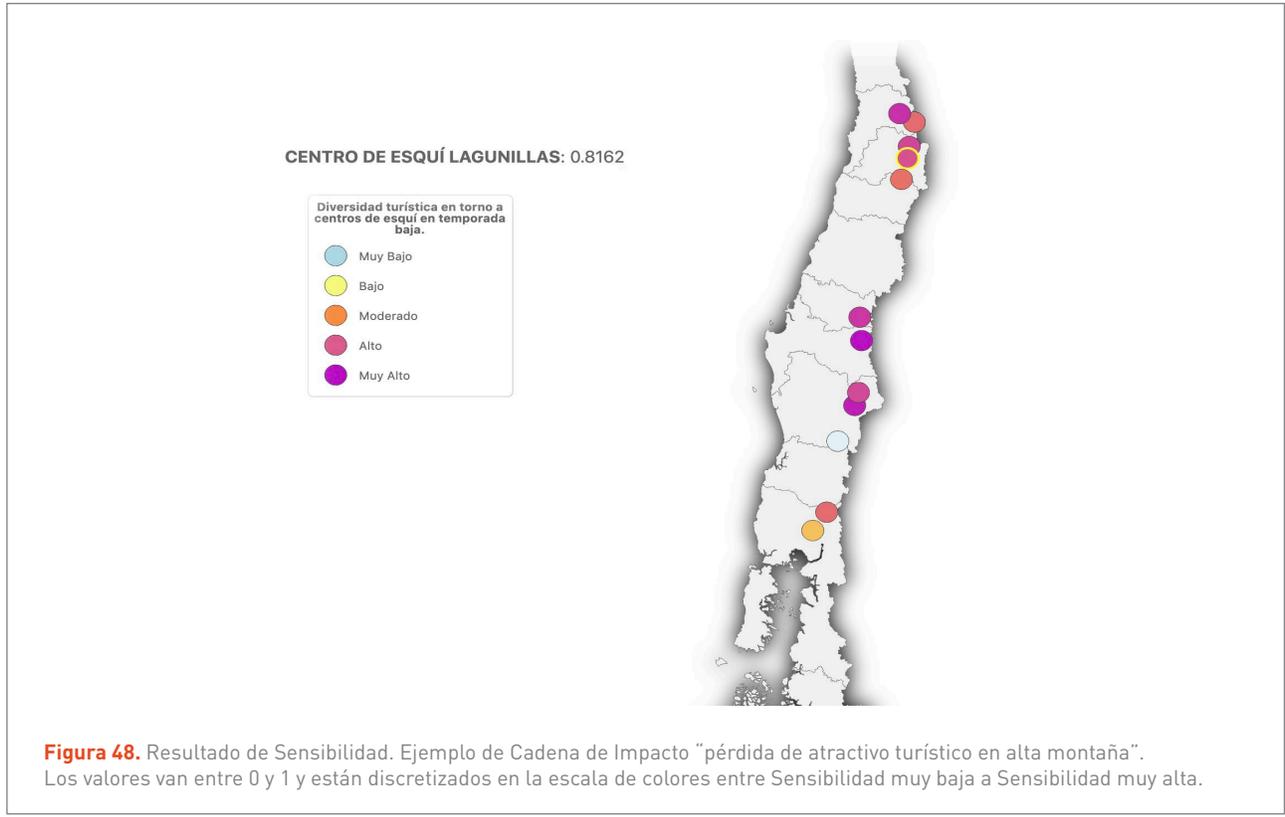
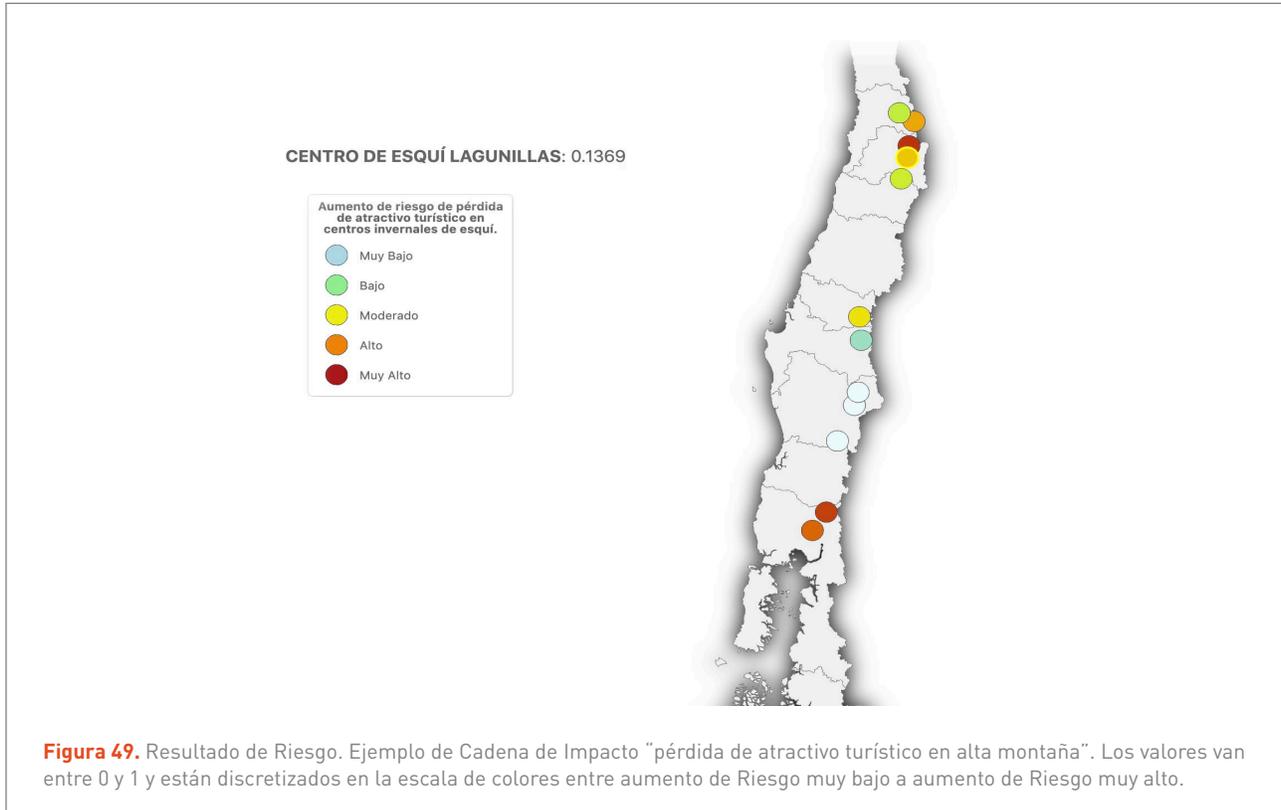


Figura 48. Resultado de Sensibilidad. Ejemplo de Cadena de Impacto “pérdida de atractivo turístico en alta montaña”. Los valores van entre 0 y 1 y están discretizados en la escala de colores entre Sensibilidad muy baja a Sensibilidad muy alta.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

6.8.5 CONCLUSIONES

A continuación se presentan algunas conclusiones sobre el sistema turismo, abordado en los informes sectoriales realizados por el Equipo de Turismo y el Equipo de Zonas Costeras del proyecto ARCLim (Gibbs & Meza, (2020) y Winckler *et al.*, (2020), respectivamente).

Se ha observado una inmensa variedad de destinos y atractivos turísticos en Chile, donde cada uno de ellos se encuentra amenazado por distintos potenciales impactos del cambio climático. Las consecuencias de un clima cambiante pueden significar una redistribución espacial y temporal de los visitantes, lo que conlleva impactos socioeconómicos que afectarían principalmente a los trabajadores, empresas e ingresos del sector turismo. Sin embargo, la mayoría de los cálculos realizados, como las contribuciones de diferentes atractivos turísticos, utilizaron información en base a supuestos gruesos, relativos a su relación con los elementos analizados.

Hacia el futuro, es recomendable considerar el uso de otros indicadores que permitan identificar de mejor manera entre distintos atractivos turísticos y que permitan determinar con certeza las distintas Amenazas que afectarán a cada uno. También es necesario que, en un futuro ejercicio, se analice el Riesgo de otros subsistemas del sector turismo considerando, principalmente, la relación de la industria con los resultados de Riesgo de otros sectores determinantes en la oferta turística. Lo anterior permitiría desarrollar un análisis de Riesgo integral del sector turismo en Chile, a partir de un trabajo colaborativo multisectorial.

6.9 BIODIVERSIDAD





6.9 BIODIVERSIDAD

6.9.1 INTRODUCCIÓN

El sistema biodiversidad, analizado en este trabajo, se define como las especies de flora y fauna presentes en el territorio continental de Chile, las que interactúan formando ecosistemas. El análisis de esta sección se basa en el trabajo plasmado en el **Informe Proyecto ARCLim: Biodiversidad (Plischoff & Uribe, 2020)**.

Como sociedad, dependemos estrechamente de los seres vivos para desarrollarnos, tanto en sistemas naturales como manejados por el ser humano, donde los diversos impactos del clima sobre estos cobra vital relevancia.

Uno de los impactos más estudiados del cambio climático sobre la biodiversidad es el efecto en la distribución geográfica de especies y ecosistemas, donde ya existen respuestas claramente visibles (Walther *et al.*, 2002). Así, en los límites más fríos de la distribución, las especies se mueven de manera latitudinal o hacia los polos, mientras que en las zonas más cálidas los límites de distribución se están contrayendo por temperaturas que no son tolerables, moviéndose a zonas de mayor altitud (Pecl *et al.*, 2017).

Al cambiar la distribución geográfica de las especies, las comunidades y ecosistemas deben reestructurarse, afectando a los servicios ecosistémicos brindados al ser humano (Schröter *et al.*, 2005). Sin embargo, el movimiento de las especies dependerá de las interacciones que sostiene con otros organismos y del grado de intensidad de éstas (Plischoff & Uribe, 2020).

Este trabajo analizó los impactos, tanto en flora como en fauna, en el territorio continental de Chile, por los efectos del cambio climático sobre las precipitaciones y la temperatura media anual. Para esto se utilizaron dos enfoques metodológicos complementarios (Plischoff & Uribe, 2020). El primero se basa en la tolerancia climática de distintas especies para determinar, a partir de los cambios en variables del clima, el Riesgo al cambio climático para cada una y a nivel de ecosistema. El segundo enfoque se centra

en un modelo de la distribución espacial de especies de flora y fauna, que utilizó, como variables explicativas, los factores climáticos históricos, lo cual fue proyectado a futuro, obteniendo una potencial distribución debido al efecto del cambio climático.

6.9.2 CADENAS DE IMPACTO

Para este sistema se analizaron cuatro Cadenas de Impacto. La primera corresponde a la pérdida de fauna por cambios de precipitación, donde se estudió la tolerancia de las distintas especies en cuadrantes de 5km² a la precipitación anual histórica y se comparó con la proyección futura de esta variable climática. La segunda corresponde a la pérdida de fauna por cambios de temperatura, tomando nuevamente en consideración la tolerancia de las distintas especies de fauna, esta vez a la temperatura media anual. De manera análoga se analizaron las Cadenas de Impacto de pérdida de flora por cambios de precipitación, y pérdida de flora por cambios de temperatura.

Adicionalmente se estudió el impacto, específicamente en la distribución geográfica, de ciertas especies de flora y fauna, analizando su movimiento espacial a un futuro esperado, a partir de la distribución actual y de la proyección de las variables climáticas. Sin embargo, esto no se encuentra reflejado en los mapas de la plataforma.

A continuación, en la **Tabla 22**, se resume las Cadenas de Impactos de este sistema, que se representan en los mapas de Riesgo de la plataforma ARCLim.

Subsistema	Amenaza derivada del cambio climático	Exposición	Vulnerabilidad	Riesgo
Fauna	Cambios en precipitación anual en el futuro con respecto a la histórica	Grado de pérdida de la vegetación natural que ha experimentado la comuna en los últimos 30 años	Multiplicación entre el margen de seguridad (Sensibilidad) y la capacidad adaptativa de las especies	Riesgo a la pérdida de la diversidad de especies animales por el cambio en la precipitación promedio anual
Fauna	Cambios en la temperatura media anual en el futuro con respecto a la histórica	Grado de pérdida de la vegetación natural que ha experimentado la comuna en los últimos 30 años	Multiplicación entre el margen de seguridad (Sensibilidad) y la capacidad adaptativa de las especies	Riesgo a la pérdida de la diversidad de especies animales producto del cambio futuro en la temperatura promedio anual
Flora	Cambios en precipitación anual entre el clima actual y el futuro	Grado de pérdida de la vegetación natural que ha experimentado la comuna en los últimos 30 años	Multiplicación entre el margen de seguridad (Sensibilidad) y la capacidad adaptativa de las especies	Riesgo a la pérdida de la diversidad de especies vegetales por el cambio en la precipitación promedio anual
Flora	Cambios en la temperatura media anual en el futuro con respecto a la histórica	Grado de pérdida de la vegetación natural que ha experimentado la comuna en los últimos 30 años	Multiplicación entre el margen de seguridad (Sensibilidad) y la capacidad adaptativa de las especies	Riesgo a la pérdida de la diversidad de especies vegetales por el cambio en la temperatura promedio anual

Tabla 22. Resumen Cadenas de Impacto Sistema Biodiversidad.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

6.9.3 METODOLOGÍA

k. Región bajo análisis

El territorio analizado en este sistema corresponde a Chile continental.

l. Modelos utilizados

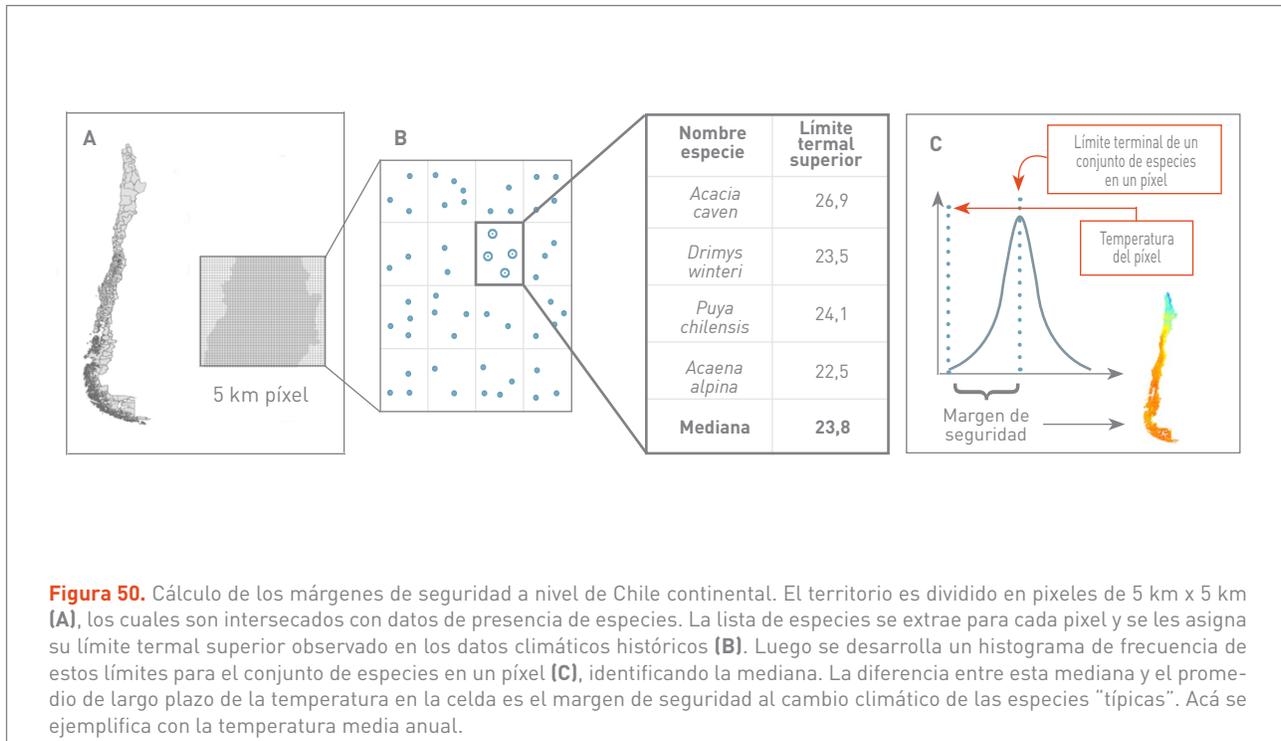
Como se comentó en la sección 6.9.2 (Cadenas de Impacto), se realizó un ejercicio para estudiar el impacto en la distribución geográfica de las especies, lo cual no se incluyó en los mapas de la plataforma. Para esto se realizó una modelación para seis especies de flora y una especie de fauna en el software Maxent 3.3.6 (Phillips *et al.*, 2006), utilizando la distribución actual de especies y usando como variables explicativas los factores climáticos (temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, radiación solar y precipitación), y proyectando la distribución potencial a futuro (Plissock & Uribe, 2020).

Adicionalmente para el análisis del índice de Vulnerabilidad, se utilizó la metodología de cálculo de márgenes de seguridad y capacidad adaptativa al cambio climático (Gallagher *et al.*, 2019). Para esto, se dividió el territorio de Chile continental en píxeles de 5 km x 5 km, resolución a la que son entregados los datos climáticos del presente proyecto, y para cada uno se registraron las especies presentes de las bases de datos del Global Biodiversity Information Facility (GBIF)¹⁰ y de la Botanical Information and Ecological Network (BIEN)¹¹. En total, se incorporaron 181.000 registros para 3.686 especies de flora, y 184.368 registros para 580 especies de fauna (Plissock & Uribe, 2020).

Luego, para cada especie, se extrajeron los valores máximos de precipitación y temperatura en todo el territorio partir de los datos climáticos del presente proyecto. Después, para cada cuadrante se calculó la mediana de estos límites superiores entre todas las especies, y se definió el margen de seguridad como la diferencia entre esta mediana y el promedio de la variable climática (temperatura

¹⁰ <https://www.gbif.org/>

¹¹ <https://bien.nceas.ucsb.edu/bien/>



Fuente: Modificado de Gallagher *et al.* 2019.

o precipitación) histórica en el largo plazo (Figura 50). A partir de la Sensibilidad, la Vulnerabilidad se define como la multiplicación del margen de seguridad y la capacidad adaptativa, explicada en el siguiente apartado de cada especie (Plissock & Uribe, 2020).

m. Caracterización de la Amenaza

En general, la Amenaza se definió como la diferencia entre el clima actual, representado por los datos entre 1980 y el 2010, y el futuro, obtenidos por la proyección del proyecto ARCLim para el periodo 2035-2065. Así, para las Cadenas de Impacto definidas por cambios en la precipitación, el índice se calculó restando el promedio anual actual a el futuro. Luego, el índice se normalizó en todas las comunas, dejando con valor 1,0 a la comuna con la mayor Amenaza, y con 0,0 a la con menor (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

Para las Cadenas de Impacto definidas por los cambios en temperatura, el índice se calculó como la diferencia entre la temperatura media anual del periodo futuro y

la temperatura media anual histórica. El índice luego se normalizó para todas las comunas estudiadas, dejando la comuna con mayor Amenaza con el valor igual a 1,0, y la con menor Exposición con valor cero (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

n. Caracterización de la Exposición

La Exposición, a la Amenaza climática, se definió para todas las Cadenas de Impacto de la misma manera, esto es, el porcentaje de la superficie de los ecosistemas con vegetación natural remanente, obtenido a partir de la evaluación de Riesgo de los ecosistemas terrestres de Chile (Plissock, 2015). Luego, el índice se normalizó para todas las comunas estudiadas, dejando la comuna con mayor Exposición con el valor igual a 1,0, y la con menor Exposición con valor cero (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

o. Caracterización de la Vulnerabilidad

Para el cálculo de la Vulnerabilidad se utilizó la metodología explicada en la sección 6.9.3 (modelos utilizados).

p. Análisis sobre la capacidad adaptativa

La capacidad adaptativa se define como la amplitud de nicho¹², y se estima como el promedio observado de la amplitud de condiciones climáticas, tanto para temperatura como para precipitaciones (Gallagher *et al.*, 2019). Así, una especie con una mayor amplitud, dentro de su rango de distribución, tendrá una mayor capacidad de adaptación al cambio climático. Por el contrario, especies con una amplitud más reducida (i.e., especialistas ecológicos), podrían tener que buscar condiciones que se asemejen más a un conjunto de dependencias ecológicas específicas, limitando su respuesta adaptativa.

Cabe destacar que la capacidad adaptativa no se refleja en algún mapa propio, para esto dentro de la plataforma, sino que afecta al índice de Vulnerabilidad que, a su vez, multiplica la Sensibilidad por la capacidad adaptativa.

q. Caracterización del Riesgo

El cálculo del índice del Riesgo se determinó de manera análoga, para todas las Cadenas de Impacto, como el promedio entre la Amenaza, la Exposición y la Vulnerabilidad. Este valor representa “la desviación de los márgenes climáticos actuales respecto al futuro que podrían soportar el conjunto de especies de flora y fauna en un píxel de 5 km” (Plissock & Uribe, 2020). Luego, el índice se normaliza para todas las comunas estudiadas, dejando la comuna con mayor Exposición con el valor igual a 1,0, y a la con menor Exposición con valor cero (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

6.9.4 RESULTADOS

Los resultados del análisis de este sistema, se encuentran en la plataforma web de ARCLim. Adicionalmente, se puede descargar la base de datos en formato Excel o en un archivo GeoJSON.

En esta sección se presentan ejemplos de los resultados para la Cadena de Impacto “pérdida de fauna por cambios de precipitación”.

a. Resultados de Amenaza

En la **Figura 51** se puede ver un ejemplo de resultados para el índice de Amenaza. Los valores más altos se concentran en la zona centro sur del país, disminuyendo considerablemente hacia la Región de Aysén y la Región de Magallanes. Destacan las comunas de Chaitén y Hualaihué en la Región de Los Lagos, con un índice de valor 0,7114 y 0,7464 respectivamente.

b. Resultados de Exposición

En la **Figura 52** se puede ver un ejemplo de resultados para el índice de Exposición. Nuevamente, los valores más altos se concentran en la zona centro sur, donde existe un mayor nivel de degradación de la vegetación natural. Salvo algunas excepciones, en la zona cordillerana, la gran mayoría de las comunas se encuentra dentro de las categorías alta y muy alta. 57% de las comunas de la Región del Maule, 86% de las comunas de la Región del Ñuble, 70% de las comunas de la Región del Biobío, 72% de las comunas de la Región de la Araucanía, y 33% de las comunas de la Región de Los Ríos tienen su índice de Exposición en la categoría muy alta.

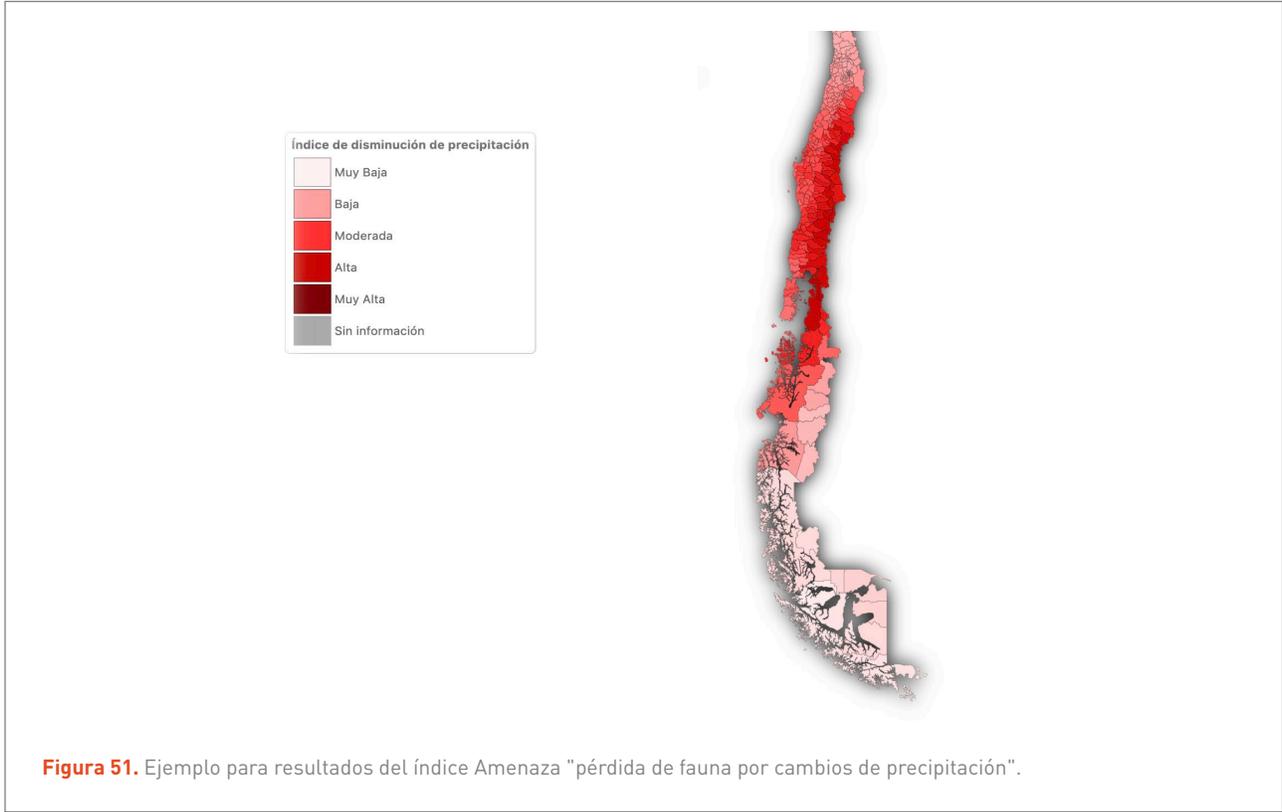
c. Resultados de Vulnerabilidad

En la **Figura 53** se puede ver un ejemplo de resultados para el índice de Vulnerabilidad. Acá se representa, en colores más oscuros, una mejor capacidad adaptativa combinada con un mayor margen de seguridad. Así, se nota que la tendencia es una potencial mejor respuesta en las zonas cordilleranas y en las regiones de Los Lagos y Aysén.

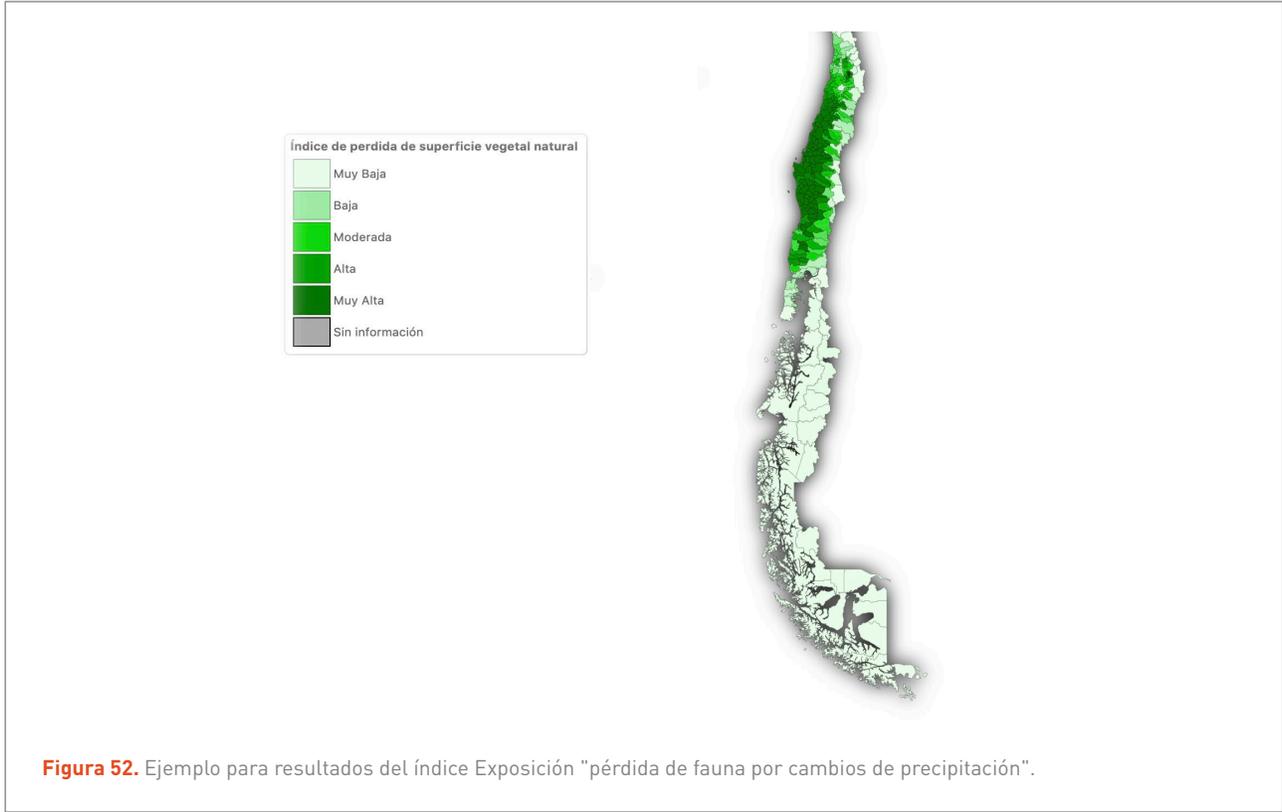
d. Resultados de Riesgo

En la **Figura 54** se puede ver un ejemplo de los resultados para el índice de Riesgo. El Riesgo más alto, a nivel comparativo, está concentrado en las comunas entre la Región del Ñuble y la Región de Los Ríos. Destacan las comunas de Quilaco, en Biobío, y Villarrica, en La Araucanía, con índices de 0,8752 y 0,8556, respectivamente.

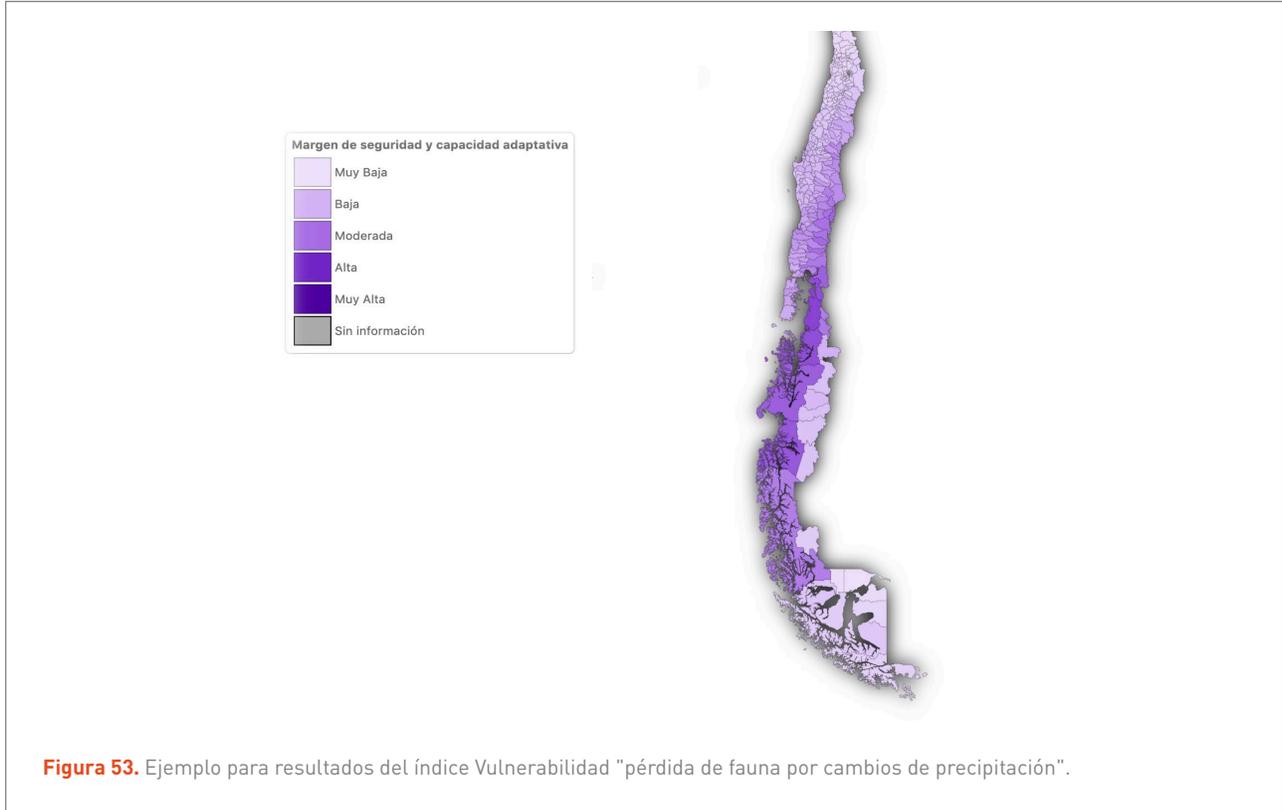
¹² La amplitud de nicho se define como el grado de especialización de cada especie (Román-Palacios & Román-Valencia, 2015).



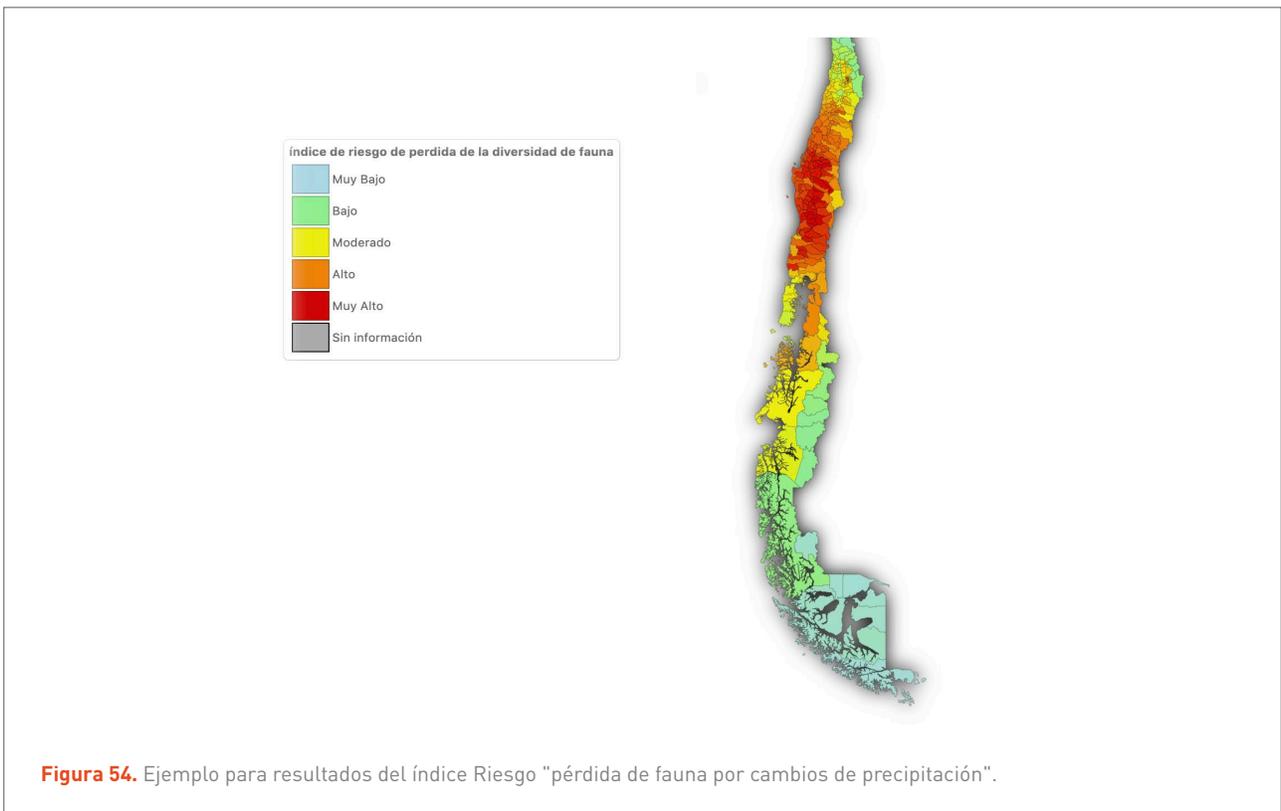
Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



6.9.5 CONCLUSIONES

La zona centro sur de Chile continental se identifica como la zona con un mayor Riesgo al cambio climático, el cual se interpreta como una menor capacidad de las especies de flora y fauna para persistir en las zonas de su actual distribución. Así, las especies que actualmente se encuentran en la zona centro sur serían las más afectadas negativamente por el cambio climático (Pliscoff & Uribe, 2020).

Este trabajo se realizó sobre un nivel de organización de la biodiversidad (especies), dos grupos taxonómicos (flora vascular y animales vertebrados), y solo para especies terrestres. Así, como desafío a futuro se espera poder incluir el nivel genético y grupos taxonómicos como flora no vascular e invertebrados, además de especies marinas o dulceacuícolas.

6.10 SALUD Y BIENESTAR HUMANO





6.10 SALUD Y BIENESTAR HUMANO

6.10.1 INTRODUCCIÓN

El concepto de “bienestar humano” se entenderá como un estado de satisfacción personal y de comodidad, que abarca conceptos como salud, bienestar económico, bienestar cultural, y otros. Un asentamiento humano, como concepto, es un sitio específico donde se establecen varias viviendas o refugios habitados.

El sistema compuesto por las personas y los asentamientos humanos en que habitan, es afectado por los efectos directos del cambio climático sobre el ser humano y los asentamientos, y se basa en el trabajo plasmado en diferentes informes del proyecto: **Informe Proyecto ARCLim: Zonas Costeras (Winckler, Contreras-López, Larragubel, Mora, Esparza, Agredano, Martínez, Torres, 2020)**, **Informe Proyecto ARCLim: Asentamientos Humanos (Urquiza, Billi, Calvo, Amigo, Navea, Monsalve, Álamos, Neira, Rauld, Allendes, Arrieta, Barrera, Basoalto, Cárdenas, Contreras, Fleischmann, Horta, Labraña, Larragubel, Muñoz, Oyarzún, Palacios, Peña, Plass, Prieto, Salinas, Smith, Vargas, Videla, & Winckler, 2020)**, **Informe Proyecto ARCLim: Salud (Cifuentes, Quiroga, Valdés & Cabrera, 2020)** y el **Informe Proyecto ARCLim: Ciudades (Henríquez, Qüense, Contreras, Guerrero, Smith & González, 2020)**.

El cambio climático tiene diversos efectos directos sobre el ser humano y su entorno, afectando el acceso a servicios críticos como agua potable, deteriorando de las condiciones de vivienda, e, incluso, generando un aumento en casos de muertes prematuras.

Así, por ejemplo, el efecto del cambio climático sobre el mar incide tanto en su nivel como en la frecuencia de las marejadas y produce inundaciones en zonas bajas litorales de los asentamientos costeros, lo que a su vez conlleva un Riesgo a la seguridad de las personas y vehículos (Winckler *et al.*, 2020). Además, las ciudades pueden sufrir inundaciones, debido al aumento de las

precipitaciones intensas y su efecto en el desbordamiento de ríos y otros cuerpos de agua. Esto se ha podido ver en la macrozona norte, particularmente en las regiones de Arica y Parinacota y Atacama, donde, combinado con los efectos de remociones en masa, se han producido impactos catastróficos en los territorios (Deuman, 2018).

Adicionalmente, el cambio en la temperatura producido por el cambio climático tiene efectos en la salud de la población. En particular, la evidencia científica asocia el efecto directo de la temperatura en la salud de la población a dos efectos principales (Smith *et al.*, 2014): i) el cambio en la temperatura media y ii) el cambio en la ocurrencia de temperaturas extremas, en particular de olas de calor. El cambio de temperatura también genera un aumento en la intensidad de las islas de calor urbano, afectando la calidad de vida en las ciudades (Henríquez *et al.*, 2020).

Con respecto a las olas de calor, se espera un incremento en la frecuencia e intensidad de fenómenos de calor extremo, lo cual se ha correlacionado con impactos directos en las tasas de morbilidad y mortalidad (Park & Kim, 2018; Patel *et al.*, 2019; Ramamurthy *et al.*, 2017). Para Chile, se espera una mayor ocurrencia de condiciones de calor extremo, especialmente en la zona norte del país, así como en las comunas costeras del centro-norte y en los valles centrales de la zona centro y centro-sur (Urquiza *et al.*, 2020).

Finalmente, a futuro, se prevé una reducción en los recursos renovables de agua superficiales y subterráneas, aumentos en la frecuencia e intensidad de sequías a finales del siglo XXI e, incluso, disminuciones en la calidad del agua por mayor concentración de contaminantes durante la sequía. A nivel nacional, se ha observado cómo megasequía ha impactado con déficits de precipitaciones que van desde el 25 al 45% en el centro de Chile (Garreaud *et al.*, 2017), afectando la seguridad hídrica de la población.

6.10.2 CADENAS DE IMPACTO

Los impactos del Cambio Climático sobre este sistema son múltiples y complejos. En los trabajos de los equipos mencionados en el punto anterior, fue posible identificar

18 Cadenas de Impacto. En particular, el informe del equipo de Salud (Cifuentes *et al.*, 2020), realizó un análisis cualitativo de 8 Cadenas pero, si bien tienen una gran relevancia, no fue posible modelarlas ni analizarlas cuantitativamente en el marco de este proyecto. Para más información se puede consultar los informes específicos: Cifuentes *et al.*, 2020; Henríquez *et al.*, 2020; Urquiza *et al.*, 2020; Winckler *et al.*, 2020.

En este trabajo, se clasificaron las Cadenas de Impacto en subsistemas en función de las tipologías de amenazas climáticas. En particular fue posible analizar 3 tipos que afectan de forma distinta el bienestar humano: i) eventos climáticos extremos, ii) temperaturas medias y iii) seguridad hídrica.

i. Eventos climáticos extremos

El cambio climático trae consigo una mayor frecuencia en eventos climáticos extremos, tales como marejadas y lluvias intensas, las cuales impactan tanto a las personas como a la infraestructura de los asentamientos. A continuación, se describen las dos cadenas que forman parte de este subsistema.

- > **Anegamiento de asentamientos costeros:** el cambio climático afecta el nivel del mar y los patrones de marejadas, los cuales a su vez pueden derivar en inundaciones de zonas bajas litorales de los asentamientos costeros.
- > **Inundaciones:** el aumento de eventos de precipitación intensa origina un aumento del caudal de ríos y otros cuerpos de agua, lo que genera un desborde de agua hacia superficies que normalmente se encuentran secas y que usualmente comprenden población e infraestructura de asentamientos. Además, se genera un impacto por acumulación de agua, lo cual depende de la infraestructura de obras de evacuación y drenaje diseñadas para evacuar el escurrimiento originado por este. Esta Cadena de Impacto difiere de la del sistema de Recursos Hídricos, la cual se enfoca el impacto sobre la infraestructura, en cambio la presente incorpora elementos relacionados con las personas, como la vulnerabilidad social entre otras, enfocando

el riesgo en el factor humano, además de incorporar la resiliencia con un enfoque sistémico en el análisis.

ii. Temperaturas medias

El cambio climático está dado, principalmente, por un aumento en las temperaturas medias de la tierra y por cambios en los eventos extremos relacionado a este factor, como son las heladas o las olas de calor. Estos cambios afectan de diversas maneras la calidad de vida de las personas.

Así, este subsistema fue analizado desde distintas perspectivas. Por un lado, se analizó el impacto en las temperaturas en las ciudades (isla de calor urbana), el impacto en el confort térmico percibido por las personas (disconfort térmico ambiental), el impacto en la salud de las personas por la disminución del frío (efectos de las heladas en ciudades) y el impacto en la salud en las personas por el aumento de temperaturas (mortalidad prematura neta por cambio de temperatura, mortalidad prematura por calor y efecto olas de calor en salud humana).

- > **Mortalidad prematura neta por cambio de temperatura:** la temperatura tiene un efecto sobre las muertes prematuras en la población, ya sea por un cambio en la temperatura media o por un cambio en la ocurrencia de temperaturas extremas (ola de calor). En esta cadena, se cuantificó el aumento de casos probables de muerte prematura, incluyendo el efecto de disminución de muertes por una disminución de frío extremo.
- > **Mortalidad prematura por calor:** este impacto es igual al anterior, pero solo cuantifica el aumento de muertes, sin considerar el efecto positivo de disminución de frío.
- > **Efecto olas de calor en salud humana:** como resultado del cambio climático, se espera un incremento en la frecuencia e intensidad de fenómenos de calor extremo, lo cual se correlaciona con impactos directos en las tasas de morbilidad y mortalidad. En esta cadena se analiza, cualitativamente, el aumento en el Riesgo por un aumento en la frecuencia de olas de calor.



- > **Disconfort térmico ambiental:** el aumento de temperaturas provoca condiciones de disconfort térmico, tanto al interior de las edificaciones como en los espacios exteriores como plazas, parques y espacios públicos en general. Se analizó, de manera cualitativa, el aumento del Riesgo por disconfort térmico.
- > **Efectos de las heladas en ciudades:** es el efecto en la salud de las personas por el cambio en la cantidad de días al año con temperaturas mínimas bajo los 0°C. Se analizó, de manera cualitativa, la disminución y aumento del Riesgo por disminución o aumento de heladas.
- > **Efectos de la isla de calor urbana:** el cambio en las temperaturas y los vientos afectan la intensidad de la isla de calor urbano, la que es, además, dependiente de la superficie urbana.

iii. Seguridad Hídrica

El cambio climático genera un aumento en los episodios de sequía meteorológica, los cuales tienen un impacto directo en el acceso a agua de uso doméstico, tanto en zonas rurales como urbanas. Se definieron dos cadenas para este subsistema:

- > **Seguridad hídrica doméstica urbana:** los eventos de sequía esperados, generan efectos adversos sobre la seguridad hídrica urbana a nivel doméstico.
- > **Seguridad hídrica doméstica rural:** los eventos de sequía esperados, generan efectos adversos sobre la seguridad hídrica rural a nivel doméstico.

Subsistema	Cadena de Impacto	Amenaza	Exposición	Sensibilidad	Riesgo
Eventos Climáticos Extremos	Anegamiento de asentamientos costeros	Cambio en la cota de inundación, por una combinación de aumento del nivel de mar y aumento de intensidad de las marejadas	Tamaño de los emplazamientos con zonas litorales bajas, medido por el número de viviendas	Promedio normalizado entre densidad poblacional, densidad de vivienda, fracción de tipos de vivienda (casa, departamento en edificio o precaria)	Riesgo de mayor anegación de asentamientos costeros, calculado como la multiplicación de la Amenaza, la Sensibilidad y la Exposición
	Inundaciones	Variación en la incidencia de inundaciones, por desborde de colectores entre el clima presente y futuro	Población urbana que se proyecta residir en distintas comunas del país, para 2035	Presencia de condiciones poblacionales o territoriales, que aumentan la susceptibilidad de la comuna a sufrir impactos adversos de inundaciones	Variación en la disposición a registrar impactos de salud a consecuencia de inundaciones, por desborde de colectores, entre el periodo presente y el futuro
Temperaturas Y Bienestar Humano	Mortalidad prematura neta por cambio de temperatura	Cambio en el promedio anual de la temperatura máxima diaria, entre el clima histórico y futuro	Población urbana que se proyecta para el año 2050	Cantidad de muertes por causas no accidentales esperadas al año 2050, sin considerar un aumento de la temperatura producto del cambio climático	Cantidad de muertes netas por causas no accidentales esperadas al año 2050, considerando un aumento de temperatura por efecto del cambio climático
	Mortalidad prematura por calor	Cambio en el promedio anual de la temperatura máxima diaria durante el periodo con respecto al promedio de la temperatura máxima observada en el pasado, para los meses con aumento de mortalidad	Población comunal proyectada al año 2050	Cantidad de muertes, por causas no accidentales, esperadas al año 2050, sin considerar un aumento de la temperatura producto del cambio climático	Cantidad de muertes por causas no accidentales esperadas al año 2050, considerando un aumento de temperatura por efecto del cambio climático

Subsistema	Cadena de Impacto	Amenaza	Exposición	Sensibilidad	Riesgo
Temperaturas Y Bienestar Humano	Efecto olas de calor en salud humana	Variación en la incidencia de olas de calor, entre el clima histórico y futuro	Población (urbana y rural) que se proyecta residir en distintas comunas del país, para el año 2035	Presencia de condiciones poblacionales o territoriales que aumentan la susceptibilidad, de la comuna, a sufrir impactos adversos de olas de calor	Variación en el Riesgo de impactos de salud a consecuencia de olas de calor, entre el periodo histórico y el futuro.
	Disconfort térmico ambiental	Índice <i>Humidex</i> , que integra la temperatura y la humedad relativa del aire, para el mes más cálido del año (enero), durante el periodo nocturno	Porcentaje de población infantil (0-5 años) y adulta mayor (sobre los 65 años), respecto del total de la población de cada ciudad de Chile	Índice de Vulnerabilidad social (SoVI), construido en base a factores socioeconómicos y demográficos de la población urbana	Aumento de Riesgo de las diversas ciudades de experimentar disconfort térmico ambiental, debido al calor y la humedad en los meses de verano
	Efectos de las heladas en ciudades	Índice de heladas (FD0), que corresponde al promedio de días en que la temperatura mínima es igual o inferior a 0°C, considerando, en este caso, la estación de invierno (junio, julio y agosto)	Población urbana total para cada ciudad de Chile	Índice de Vulnerabilidad social (SoVI), construido en base a factores socioeconómicos y demográficos de la población urbana	Cambio del Riesgo de las diversas ciudades de Chile a experimentar los efectos adversos de las heladas, entre el periodo histórico y futuro
	Efectos de la isla de calor urbana	Intensidad máxima del efecto de isla de calor urbana (ICU)	Población urbana total para cada ciudad de Chile	Índice de Vulnerabilidad social (SoVI), construido en base a factores socioeconómicos y demográficos de la población urbana	Aumento de Riesgo asociado al impacto de la intensidad del fenómeno de isla de calor urbana (ICU) para las diferentes ciudades de Chile
Seguridad Hídrica	Seguridad hídrica doméstica urbana	Variación en la incidencia de sequías meteorológicas entre el clima histórico y futuro	Población urbana que se proyecta residir en distintas comunas del país, en 2035	Presencia de condiciones demográficas, socioeconómicas y de infraestructura hídrica, que aumentan la susceptibilidad de la comuna a sufrir impactos adversos en su seguridad hídrica doméstica urbana	Variación en impactos negativos en la salud de la población urbana de cada comuna, entre el periodo histórico y el futuro, debido al cambio de incidencia de sequías meteorológicas y la evapotranspiración potencial
	Seguridad hídrica doméstica rural	Variación en la incidencia de sequías meteorológicas entre el clima histórico y futuro	Población rural que se proyecta residir en distintas comunas del país, en 2035	Presencia de condiciones demográficas, socioeconómicas y de infraestructura hídrica que aumentan la susceptibilidad de la comuna a sufrir impactos adversos en su seguridad hídrica doméstica rural	Variación en impactos negativos en la salud de la población rural de cada comuna, entre el periodo histórico y el futuro, debido al cambio de incidencia de sequías meteorológicas y la evapotranspiración potencial

Tabla 23. Resumen de Cadenas de Impacto para el Sistema Salud y Bienestar Humano.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



6.10.3 METODOLOGÍA

a. Región bajo análisis

Para la Cadena de Impacto “anegamiento de asentamientos costeros”, se analizaron puntualmente 433 asentamientos humanos emplazados en las 100 comunas costeras de Chile continental y las 2 comunas insulares (Rapa Nui y Juan Fernández).

Para las Cadenas de Impacto “inundaciones”, “efectos olas de calor en salud humana”, “seguridad hídrica doméstica urbana”, “seguridad hídrica doméstica rural”, “mortalidad prematura neta por cambio de temperatura”, y “mortalidad prematura por calor”, se analizaron todas las comunas de Chile continental.

Para las Cadenas de Impacto “discomfort térmico ambiental”, “efectos de las heladas en ciudades”, y “efectos de la isla de calor urbana”, el análisis se hizo a nivel de ciudades con poblaciones sobre los 50.000 habitantes y de capitales regionales, lo que incluyó, además, a Coyhaique y a la localidad de Hanga Roa, en Isla de Pascua.

b. Modelos utilizados para cada Cadena de Impacto

i. Anegamiento de asentamientos costeros

Para esta Cadena de Impacto, dos fenómenos se modelaron a futuro, el nivel medio del mar, y el aumento en las marejadas. El detalle de esta modelación se puede ver en el **Informe Determinación del Riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile** (Winckler, Contreras-López, Vicuña, *et al.*, 2019). En resumen, se utilizaron seis modelos de oleaje y 21 modelos para el nivel del mar, con lo que se obtuvo la mediana temporal de la cota de inundación para los años 2026-2045, y luego se restó la mediana temporal de la misma variable para el periodo 1985-2004, obteniendo la variación por el cambio climático para cada uno de estos modelos. Finalmente, se calculó una mediana entre los modelos.

ii. Inundaciones, efecto olas de calor en salud humana, seguridad hídrica doméstica urbana, seguridad hídrica doméstica rural

Para la construcción de los índices de Amenaza, Exposición, Sensibilidad, y Riesgo, se utilizó la metodología *fuzzy logic* para las Cadenas de Impacto “inundaciones”, “efecto olas de calor en salud humana”, “seguridad hídrica doméstica urbana”, y “seguridad hídrica doméstica rural”. Esta se basó en un análisis, semi-cualitativo, para relativizar los índices en un rango entre 0 y 1, cuyos resultados fueron interpretados como puntajes relativos con respecto a la distribución en todas las comunas del país (Urquiza *et al.*, 2020).

Para el índice de Exposición, se utilizó el logaritmo de la población de las comunas, ya sea rural, urbana o ambas, según la Cadena de Impacto analizada. Al usar la función de logaritmo se logró normalizar el análisis, disminuyendo las diferencias entre comunas de pocos miles de habitantes con las ciudades de un millón o más. Así, las localidades más pequeñas no quedaron invisibilizadas, cuantitativamente (Urquiza *et al.*, 2020).

Adicionalmente, se construyó un índice de capacidad de respuesta para cada comuna, a partir de la disponibilidad de servicios de urgencia y capacidad de respuesta institucional presentes en las comunas. A partir de este índice y el de Sensibilidad (explicado en cada una de las Cadenas de Impacto), se construyó el índice de Vulnerabilidad que posee cada comuna (Urquiza *et al.*, 2020):

- > Valores altos, en aquellas comunas que cuentan con elevada Sensibilidad y reducida capacidad de respuesta.
- > Valores medios, en aquellas comunas que cuentan con elevada Sensibilidad, pero también elevada capacidad de respuesta.
- > Valores bajos, en aquellas comunas que cuentan con baja Sensibilidad, independiente de su capacidad de respuesta.

Niveles de Riesgo		Amenaza Alta	Amenaza Media	Amenaza Baja
Vulnerabilidad Alta	Exposición Alta	Riesgo Alto	Riesgo Alto	Riesgo Bajo
	Exposición Media	Riesgo Alto	Riesgo Alto	Riesgo Bajo
	Exposición Baja	Riesgo Alto	Riesgo Alto	Riesgo Bajo
Vulnerabilidad Media	Exposición Alta	Riesgo Alto	Riesgo Medio	Riesgo Bajo
	Exposición Media	Riesgo Medio	Riesgo Medio	Riesgo Bajo
	Exposición Baja	Riesgo Medio	Riesgo Medio	Riesgo Bajo
Vulnerabilidad Baja	Exposición Alta	Riesgo Medio	Riesgo Medio	Riesgo Bajo
	Exposición Media	Riesgo Bajo	Riesgo Bajo	Riesgo Bajo
	Exposición Baja	Riesgo Bajo	Riesgo Bajo	Riesgo Bajo

Tabla 24. Definición del índice de Riesgo según la Amenaza, Exposición y Vulnerabilidad – Cadenas de Impacto "inundaciones", "efecto olas de calor en salud humana", "seguridad hídrica doméstica urbana" y "seguridad hídrica doméstica rural".

Fuente: Informe Proyecto ARCLim, Equipo de Asentamientos Humanos (Urquiza *et al.*, 2020).

Con respecto al valor numérico y la interpretación de los índices, la **Tabla 25** resume las categorías utilizadas:

Valor del índice	Significado
0 a 0,199	Muy bajo
0,2 a 0,399	Bajo
0,4 a 0,599	Moderado
0,6 a 0,799	Alto
0,8 a 1	Muy alto

Tabla 25. Valores de los índices y su interpretación – Cadenas de Impacto de "inundaciones", "efecto olas de calor en salud humana", "seguridad hídrica doméstica urbana" y "seguridad hídrica doméstica rural".

Fuente: Informe Proyecto ARCLim, Equipo de Asentamientos Humanos (Urquiza *et al.*, 2020).

iii. Mortalidad prematura neta por cambio de temperatura y mortalidad prematura por calor

Para calcular la mortalidad, a partir de un aumento en la temperatura, se utilizó curvas de Exposición - respuesta. Para esto, se ajustaron datos históricos de mortalidad y temperaturas máximas, realizando un cruce entre la

información de las estaciones meteorológicas de la Dirección Meteorológica de Chile, y los datos de mortalidad publicados por el MINSAL. Luego, por medio de regresiones matemáticas, se obtuvo las funciones exposición-respuesta¹³.

Adicionalmente, se estudió el efecto que tienen las olas de calor, de manera aislada, sobre el aumento de mortalidad, agregando una variable binaria al modelo de regresión. Finalmente, solo para la Cadena de Impacto "mortalidad prematura neta por cambio de temperatura", se incluyó el efecto de los días fríos sobre la mortalidad prematura.

El modelo que predijo la cantidad de muertes diarias, es definido como una curva de Riesgo y se expresa con la siguiente ecuación (Cifuentes *et al.*, 2020):

$$\log E(Y_t) = a + B_1 Hw_t + B_2 T_{t,l} + B_3 H_{t,l} + B_4 Cw_t + NS (Fecha, n/año) + DOW_t$$

Ecuación 6. Modelo de regresión de Poisson para cálculo de muertes.

¹³ Se considero la mortalidad del día y siguientes al evento.



Donde,

- > β es el coeficiente de cada variable¹⁴,
- > HW_t es la variable categórica que indica si se está en un periodo de olas de calor,
- > CW_t es la variable categórica que indica si se está en un periodo de olas de frío,
- > $T_{t,l}$ es la “base cruzada” (cross-basis) de temperatura y la distribución de su efecto retrasado (*lag*),
- > $H_{t,l}$ es la base cruzada de humedad,
- > $NS(Fecha,n/año)$ es la fecha suavizada por medio de una spline natural con n grados de libertad anuales ,
- > DOW_t es el día de la semana, y
- > Y_t es la cantidad de muertes en el día t.

Este análisis se realizó para las ciudades chilenas con, al menos, 100.000 habitantes, a excepción de San Pedro de Atacama y Diego de Almagro, las que también fueron incluidas, obteniendo 30 ciudades en total. La razón de trabajar en conurbaciones con más habitantes es que, utilizar poblaciones menores implica pocas muertes, lo que agrega una alta variabilidad en los datos (Cifuentes *et al.*, 2020). Así, para cada una de las ciudades estudiadas, se construyó una de estas curvas de Riesgo.

Después, se generaron 6 grupos de comunas para todo el país, donde cada uno tiene una curva de Riesgo, construida a partir de las curvas de las ciudades pertenecientes a ese grupo. El detalle metodológico de esta conversión, de las curvas de cada ciudad a cada una de las comunas, puede verse en el informe del equipo de salud (Cifuentes *et al.*, 2020).

Finalmente, a partir de las curvas construidas, se cuantificaron los casos de muertes prematuras por aumento en el promedio de temperaturas máximas diarias, el aumento en la frecuencia de olas de calor, y el aumento en la frecuencia de olas de frío (solo para Cadena de Impacto de “mortalidad prematura neta por cambio de temperatura”). Así, se consideraron 2 periodos para comparar y determinar el cambio en el número de muertes atribuible

al cambio climático, el periodo base entre 1980 y 2010, y el periodo futuro entre 2035 y 2065.

Matemáticamente, esto se calculó para cada comuna - mes donde c corresponde a cada comuna y m a cada mes del año. Así, la variación del Riesgo relativo (ΔRRR) por efectos de olas de calor, se obtuvo a partir de la multiplicación del coeficiente obtenido de las curvas de Riesgo (β , en la) por la diferencia en el número de días con olas de calor entre el escenario base y futuro ($HW_{CC}^{c,m} - HW_{base}^{c,m}$).

A su vez, el cambio en el Riesgo relativo por la variación de la temperatura, se estimó como la diferencia del Riesgo relativo para la temperatura futura y el Riesgo relativo para la temperatura base ($\Delta RRR(T_{base}^{c,m}, \Delta T_{CC}^{c,m})$). Esto, multiplicado por la tasa de incidencia ($IR^{c,m}$) y la población comunal (Población^c) da cuenta de la variación de los casos de mortalidad por efecto del aumento de temperaturas futuras.

$$\Delta Casos_{CC}^c = Población^c \times \sum_{m=meses} IR^{c,m} \times (\Delta RRR(T_{base}^{c,m}, \Delta T_{CC}^{c,m}) + \beta^{HW}(HW_{CC}^{c,m} - HW_{base}^{c,m}))$$

Ecuación 7. Estimación de la variación de casos de muerte prematura por la variación en temperaturas a causa del cambio climático.

iv. Disconfort térmico ambiental, efectos de las heladas en ciudades, y efectos de la isla de calor urbana

Para estas Cadenas de Impacto, se modeló el aumento a futuro de la superficie de suelo urbano para Chile continental y Hanga Roa, con el objetivo de estimar la población urbana al año 2065, la cual se consideró como dependiente de la superficie urbana disponible y, además, para estimar la intensidad de la isla de calor urbana (ICU).

Para esto, se utilizó un módulo de predicción de cambio de uso de suelo del modelo IDRISI¹⁵ llamado *Land Change*

14 Este coeficiente corresponde a la incógnita a estimar.

15 <https://clarklabs.org/terrset/idrisi-gis/>

Modeler, el cual realizó un análisis de cambio de uso de suelo urbano entre años conocidos (1992 y 2017) y lo proyectó a futuro, a partir de ciertas variables explicadoras como la distancia a ciudades principales, densidad poblacional y distancia a red vial estructurante, entre otras. El resultado, es una proyección de la superficie urbana al año 2065.

Luego, se hizo una regresión lineal entre la población urbana (variable dependiente) y la superficie urbana, obteniendo una proyección de la población al año 2065 para las ciudades dentro del análisis, es decir, con una población mayor a 50.000 habitantes al 2017, más Coyhaique y Hanga Roa.

c. Caracterización de la Amenaza

i. Anegamiento de asentamientos costeros

La Amenaza se calculó como el cambio en la cota de inundación, lo cual se modeló según lo explicado en la sección .

ii. Inundaciones

Para el índice de Amenaza, se utilizó el indicador de inundación del Informe de Hidrología del presente proyecto (Vargas et al., 2020b), el cual integra variables de precipitación relacionada con la probabilidad de falla de los colectores, erodabilidad del suelo, altura y otras.

iii. Efecto olas de calor en salud humana

El índice de Amenaza se construyó a partir de cuatro indicadores (Tabla 26).

Indicador	Descripción
Días extremadamente cálidos	Número promedio de días en un año con temperaturas máximas > 34°
Olas de calor 25°	Número promedio de ocurrencias en un año de 3 días consecutivos con temperatura máximas > 25°
Olas de calor 28°	Número promedio de ocurrencias en un año de 3 días consecutivos con temperatura máximas > 28°
Olas de calor 30°	Número promedio de ocurrencias en un año de 3 días consecutivos con temperatura máximas > 30°

Tabla 26. Indicadores que componen el índice de Amenaza de la Cadena de Impacto "efecto olas de calor en salud humana".

Fuente: Informe Proyecto ARCLIM, Equipo de Asentamientos Humanos (Urquiza et al., 2020)

Se tomaron distintas temperaturas para poder tener una mejor representación de las distintas condiciones climáticas del país (Urquiza et al., 2020). Esos datos fueron obtenidos de las modelaciones climáticas del presente proyecto para los periodos de 1980-2010 y 2035-2065. La categorización del índice de Amenaza, a partir de los indicadores mencionados, se resume en la siguiente tabla:



Niveles de Amenaza		Alta Frecuencia Olas de calor > 25°		Media Frecuencia Olas de calor > 25°		Baja Frecuencia Olas de calor > 25°	
		Muchos días cálidos (>34°)	Pocos días cálidos (>34°)	Muchos días cálidos (>34°)	Pocos días cálidos (>34°)	Muchos días cálidos (>34°)	Pocos días cálidos (>34°)
Alta Frecuencia Olas de calor >30°	Alta Frecuencia Olas de calor >28°	Alta	Alta	Alta	Alta	Media	Media
	Media Frecuencia Olas de calor >28°	Alta	Alta	Alta	Alta	Media	Media
	Baja Frecuencia Olas de calor >28°	Alta	Alta	Alta	Alta	Media	Media
Media Frecuencia Olas de calor > 30°	Alta Frecuencia Olas de calor >28°	Alta	Alta	Alta	Alta	Media	Media
	Media Frecuencia Olas de calor >28°	Alta	Alta	Alta	Media	Baja	Baja
	Baja Frecuencia Olas de calor >28°	Media	Media	Media	Baja	Media	Media
Baja Frecuencia Olas de calor >30°	Alta Frecuencia Olas de calor >28°	Alta	Alta	Alta	Alta	Media	Media
	Media Frecuencia Olas de calor >28°	Media	Media	Media	Baja	Baja	Baja
	Baja Frecuencia Olas de calor >28°	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja

Tabla 27. Categorías del índice de Amenaza – Cadena de Impacto “efecto olas de calor en salud humana”.

Fuente: Informe Proyecto ARCLim, Equipo de Asentamientos Humanos (Urquiza *et al.*, 2020).

iv. Seguridad hídrica doméstica rural y seguridad hídrica doméstica urbana

La Amenaza, se definió como una combinación entre la frecuencia de periodos de sequía meteorológica –definidos como aquellos que poseen menos del 75% de precipitación acumulada del periodo de referencia– y el aumento de la evapotranspiración potencial (Urquiza *et al.*, 2020). Ambos indicadores se obtuvieron de los resultados de las modelaciones del actual proyecto. La clasificación del indicador de Amenaza es la siguiente:

- > Una comuna presenta una **Amenaza alta** cuando tiene una elevada frecuencia de sequía y a la vez un elevado índice de evapotranspiración.
- > Una comuna tiene **Amenaza media** cuando, al tener una elevada frecuencia de sequía, solo cuenta con un índice de evapotranspiración moderado. O al revés, cuando al contar con un índice de evapotranspiración elevado, presenta una frecuencia de sequía moderada.
- > Una comuna tiene **Amenaza baja** cuando presenta valores reducidos, ya sea en la frecuencia de sequía o bien el índice de evapotranspiración.

v. Mortalidad prematura neta por cambio de temperatura y mortalidad prematura por calor

Esta Amenaza fue definida como el aumento en el promedio de temperaturas máximas diarias y el aumento en la frecuencia de olas de calor. El aumento se definió comparando el clima histórico para el periodo 1980-2010 y el clima futuro para el periodo 2035-2065. Todos los datos de temperatura fueron obtenidos del presente proyecto.

Las olas de calor se definieron como periodos de duración de, al menos, tres días consecutivos donde se superó el percentil 98 de las temperaturas máximas diarias del periodo entre 1981 y 2010 (Cifuentes *et al.*, 2020).

Adicionalmente, y solo para la Cadena de Impacto “mortalidad prematura neta por cambio de temperatura”, se incluyó el efecto de los días de frío extremo, definidos como días con temperaturas mínimas bajo en percentil 5 de las temperaturas mínimas diarias del periodo entre 1981 y 2020.

vi. Disconfort térmico ambiental

Este índice de Amenaza fue calculado a partir del índice de calor *Humidex*, el cual representa el confort ambiental

en espacios abiertos, considerando el efecto de calentamiento percibido por la falta de evaporación de humedad corporal. El índice se definió como:

$$HUMIDEX = T + \frac{5}{9} * (e - 10)$$

Ecuación 8. Definición del índice Humidex.

Donde,

- > e es la presión de vapor ($6,112 * 10^{(7,5 * T / (T + 237,7))} * (H/100)$),
- > T es la temperatura del aire (° C), y
- > H la humedad (%)

Luego, el índice se clasificó según la siguiente tabla:

<i>Humidex</i>	Estado
20 - 29	Confortable
30 - 39	Algún disconfort
40 - 45	Gran disconfort
> 45	Peligro

Tabla 28. Interpretación del índice *Humidex*.

Fuente: Informe ARCLim, equipo ciudades (Henríquez *et al.*, 2020).

El índice fue calculado para el punto urbano correspondiente a la zona más cálida, de acuerdo con la temperatura de emisión superficial nocturna promedio de verano, calculada sobre las imágenes satelitales MODIS nocturna (00:00 hrs) disponibles para la estación de verano, entre los años 2008 y 2018 (Henríquez *et al.*, 2020).

vii. Efectos de las heladas en ciudades

Para el cálculo del índice de Amenaza, se utilizó el índice FDO, el cual se definió como el promedio de la suma total al año de los días dentro del periodo de invierno (junio - agosto) donde se registró un descenso térmico igual o menor a 0°C, denominados “días con heladas”.

El índice se calculó para el punto urbano correspondiente a la zona más cálida, de acuerdo con la temperatura de emisión superficial nocturna promedio de verano, cal-

culada sobre las imágenes satelitales MODIS nocturna (00:00 hrs) disponibles para la estación de verano, entre los años 2008 y 2018 (Henríquez *et al.*, 2020). Las temperaturas usadas son las proyectadas por el actual proyecto.

viii. Efectos de la isla de calor urbana

La cuantificación de la intensidad del efecto de la ICU fue realizada con la siguiente ecuación:

$$\Delta T_{u-r} = \frac{P^{0,27}}{4 * (\underline{u})^{0,56}}$$

Ecuación 9. Intensidad de la ICU.

Fuente: Informe ARCLim, equipo ciudades (Henríquez *et al.*, 2020).

Donde,

- > ΔT_{u-r} es la diferencia máxima de temperatura entre el campo y ciudad en grados Celsius,
- > P es la población urbana, y
- > \underline{u} es la velocidad del viento en m/s a una altura de 10 metros en un área no urbana

La población urbana, del periodo actual, se obtuvo del Censo del 2017 (INE, 2018) y la proyectada al 2065 a partir del método descrito anteriormente. La velocidad del viento se obtuvo a partir de los datos climáticos del presente proyecto.

Además, para hacer la comparación, se debió seleccionar un punto urbano y otro rural. El punto urbano correspondió a la zona más cálida, de acuerdo con la temperatura de emisión superficial nocturna promedio de verano, calculada sobre las imágenes satelitales MODIS nocturna (00:00 hrs) disponibles para la estación de verano, entre los años 2008 y 2018 (Henríquez *et al.*, 2020).

El punto rural fue definido considerando el punto urbano definido (Henríquez *et al.*, 2020), y que se encuentre:

- > en la misma zona climática de Köppen,
- > a distancia equivalente de cursos y cuerpos de agua,
- > a distancia equivalente de la costa (ciudades costeras),
- > a diferencia no mayor a 200 metros en altitud,



- > cumpliendo con el contexto rural que rodea a la ciudad,
- > no situado en un fondo de quebrada o humedal
- > en un área rural según escenario de modelación 2065, y
- > considerando que ciudades conurbadas pueden tener el mismo punto.

Para cuantificar el efecto de la ICU a futuro, se consideró la definición ya mencionada, pero se le sumó la diferencia de temperatura máxima diaria promedio entre el periodo presente y el futuro:

$$\Delta TCC_{u-rCC} = \frac{P^{0,27}}{4 * [u]^{0,56}} + \Delta TXx$$

Ecuación 10. Cálculo del efecto de la ICU, agregando el efecto del cambio climático.

Fuente: Informe ARCLim, equipo ciudades (Henríquez *et al.*, 2020)

Donde,

- > ΔTCC_{u-r} es la diferencia máxima de temperatura entre el campo y ciudad en grados Celsius, incluyendo el efecto de cambio climático,
- > P es la población urbana,
- > u es la velocidad del viento en m/s a una altura de 10 metros en un área no urbana, y
- > donde ΔTXx es la diferencia entre el promedio de la temperatura máxima diaria futura y el promedio de la temperatura máxima diaria presente, en grados Celsius.

d. Caracterización de la Exposición

i. Anegamiento de asentamientos costeros

La Exposición se calculó como el número de habitantes de cada asentamiento costero, según el Censo del 2017 (INE, 2018). Luego, el índice se normaliza, dejando con valor 1,0 al asentamiento con la mayor población y 0,0 al de menor población.

ii. Inundaciones

La Exposición se calculó como el logaritmo del número de habitantes en zonas urbanas para cada comuna, según el Censo del 2017 (INE, 2018). Luego, se llevó a una distribución *fuzzy* con rango entre 0 y 1. Para la Exposición a

futuro, se calculó el logaritmo de la población urbana de cada comuna, para el año 2035, según la proyección del Instituto Nacional de Estadísticas.

iii. Efecto olas de calor en salud humana

La Exposición se definió como el logaritmo de la población total de las comunas. Para la Exposición actual se utilizaron los datos del Censo del 2017 (INE, 2018) mientras que, para la Exposición a futuro, se utilizó la proyección de la población al 2035 según la proyección del Instituto Nacional de Estadísticas. Estos índices se llevaron a una distribución *fuzzy* con rango entre 0 y 1.

iv. Seguridad hídrica doméstica rural

La Exposición fue calculada como el logaritmo del número de habitantes en zonas rurales para cada comuna, según el Censo del 2017 (INE, 2018). Luego, se llevó a una distribución *fuzzy* con rango entre 0 y 1. Para la Exposición a futuro, se calculó el logaritmo de la población rural de cada comuna para el año 2035, según la proyección del Instituto Nacional de Estadísticas.

v. Seguridad hídrica doméstica urbana

La Exposición fue calculada como el logaritmo del número de habitantes en zonas urbanas para cada comuna, según el Censo del 2017 (INE, 2018). Luego, se lleva a una distribución *fuzzy* con rango entre 0 y 1. Para la Exposición a futuro, se calculó el logaritmo de la población urbana de cada comuna para el año 2035, según la proyección del Instituto Nacional de Estadísticas.

vi. Mortalidad prematura neta por cambio de temperatura y mortalidad prematura por calor

La Exposición se definió como la cantidad de habitantes en cada comuna al año 2050. Para esto, se utilizó la proyección de la población del Instituto Nacional de Estadísticas.

vii. Disconfort térmico ambiental

La Exposición fue definida como el porcentaje de la población total de la ciudad que representa la población infantil entre 0 y 5 años, sumada a la población de adultos mayores, 65 años o más (Henríquez *et al.*, 2020). Los datos se obtuvieron del Censo del 2017 (INE, 2018), considerando la población urbana comunal.



viii. Efectos de las heladas en ciudades y efectos de la isla de calor urbana

La Exposición se definió como la población urbana en las ciudades analizadas, proyectada al 2065, como se explicó anteriormente.

e. Caracterización de la Sensibilidad

i. Anegamiento de asentamientos costeros

Para el cálculo de la Sensibilidad se generó un indicador que refleja distintas características de los asentamientos humanos que los hacen más sensible a la Amenaza estudiada (Winckler *et al.*, 2020):

- > **Tipo de asentamiento:** mientras más rural, más sensible. Por ejemplo, un caserío es más sensible que una ciudad.
- > **Existencia de manzanas censales a menos de 10 metros sobre el nivel del mar:** si existen, aumenta la Sensibilidad.
- > **Densidad poblacional normalizada por la densidad máxima:** mientras mayor densidad poblacional, más sensible.
- > **Densidad de viviendas normalizadas:** mientras mayor densidad de viviendas, mayor Sensibilidad.
- > **Fracción de habitantes por vivienda:** mientras más habitantes por vivienda promedio en un asentamiento, mayor Sensibilidad.

Cada una de estas variables tomó un valor numérico y, con ellos, se obtuvo el promedio aritmético para cada asentamiento. Finalmente, el índice fue normalizado, dejando con valor 1,0 al asentamiento con la mayor Sensibilidad y con valor 0,0 al de menor Sensibilidad.

ii. Inundaciones

Para construir el índice de Sensibilidad, se consideraron 18 indicadores distintos, agrupados en 3 dimensiones: i) presencia de grupos vulnerables, ii) condiciones de la vivienda y iii) condiciones territoriales. Luego, se realizó

una agregación *fuzzy* de estos indicadores, para relativizar el índice a nivel nacional (Urquiza *et al.*, 2020).

iii. Efecto olas de calor en salud humana

Para construir el índice de Sensibilidad, se consideraron 15 indicadores distintos, agrupados en 5 dimensiones: i) condiciones territoriales que incidan en la generación de islas de calor urbana, ii) cantidad de empleos sensibles al aire libre, iii) condiciones de Sensibilidad poblacional en términos socioeconómicos, iv) condiciones de Sensibilidad poblacional en términos etarios y de salud, y v) otras condiciones de Sensibilidad poblacional (Urquiza *et al.*, 2020). Luego, se realizó una agregación *fuzzy* de estos indicadores para relativizar el índice a nivel nacional.

iv. Seguridad hídrica doméstica rural

Para construir este índice de Sensibilidad, se consideraron 15 indicadores distintos, agrupados en 4 dimensiones: i) condiciones territoriales que reflejan condiciones actuales de demanda y uso del agua, ii) condiciones socioeconómicas (pobreza, educación y acceso a la red de agua potable), iii) condiciones de Sensibilidad poblacional, en términos etarios y de salud, y v) otras condiciones demográficas, como hogares con mujeres jefas de hogar, población migrante, población de pueblos originarios y hacinamiento (Urquiza *et al.*, 2020). Luego, se realizó una agregación *fuzzy* de estos indicadores, para relativizar el índice a nivel nacional.

v. Seguridad hídrica doméstica urbana

Para construir este índice de Sensibilidad, se consideraron 18 indicadores distintos, agrupados en 4 dimensiones: i) presencia de grupos vulnerables, ii) condiciones de los hogares, iii) características de los servicios sanitarios, y iv) condiciones territoriales relacionadas principalmente a la gestión y demanda del agua (Urquiza *et al.*, 2020). Luego, se realizó una agregación *fuzzy* de estos indicadores, para relativizar el índice a nivel nacional.

vi. Mortalidad prematura neta por cambio de temperatura y mortalidad prematura por calor

Esta Sensibilidad corresponde a la tasa de incidencia base de muertes para cada comuna, es decir, la cantidad de muertes por causas no accidentales esperadas al año



2050, sin considerar un aumento de la temperatura producto del cambio climático.

vii. Disconfort térmico ambiental, efectos de las heladas en ciudades, y efectos de la isla de calor urbana

Para el cálculo del índice de Sensibilidad de este grupo, se utilizó el índice de Vulnerabilidad Social - SoVI (Cutter *et al.*, 2003), el que permitió cuantificar y zonificar variables que suelen tener un uso cualitativo, tales como género, nivel socioeconómico y empleo, entre otras (Henríquez *et al.*, 2020). En particular, para la construcción de este índice, se utilizaron 31 variables, de las cuales 25 son variables base que se utilizaron en las tres Cadenas de Impacto, mientras que seis variables son específicas y se utilizaron en alguna de las cadenas.

El índice SoVI entrega valores normalizados en una escala comparativa para la zona de estudio. El detalle metodológico se puede ver en el informe del Equipo de Ciudades (Henríquez *et al.*, 2020).

f. Análisis sobre la capacidad adaptativa

i. Inundaciones

La adaptación apunta a la calidad de la infraestructura (colectores de aguas lluvias, embalses, alcantarillados, sumideros, etc.) como un elemento fundamental para que los territorios puedan reaccionar rápidamente frente a los Riesgos de inundaciones (Urquiza *et al.*, 2020). Además, se debe aumentar el conocimiento de los lugares de mayores Riesgos y la identificación de los espacios susceptibles de inundaciones, lo que permitirá responder a las inundaciones de mejor manera, tanto a mediano como a largo plazo.

Adicionalmente, debe existir una mejora a la hora de planificar el crecimiento y ordenamiento territorial de los asentamientos, para una mejor respuesta y adaptación frente a las inundaciones. Finalmente, se identifica como relevante la coordinación horizontal de los territorios, entendida como la capacidad de incorporar a distintos actores en el proceso de decisión de respuestas ante la Amenaza (Urquiza *et al.*, 2020).

ii. Efecto olas de calor en salud humana

Para la adaptación, un factor clave es la infraestructura de vivienda, específicamente en el nivel de aislación térmica, junto a la mejora de la normativa asociada. Adicionalmente, las áreas verdes y la cobertura vegetaciones de los territorios son un factor central para la capacidad de respuesta y adaptación frente a las olas de calor (Urquiza *et al.*, 2020).

iii. Seguridad hídrica doméstica rural

La educación en los territorios determina la capacidad de respuesta y adaptación que las comunidades rurales pueden poseer ante periodos de escasez hídrica, permitiendo, además, establecer redes de comunicaciones, entre la población y las autoridades, para conseguir soluciones. Adicionalmente, existe una necesidad de mejora en políticas públicas relacionadas al aumento de programas de agua potable rural con derechos de agua (Urquiza *et al.*, 2020).

iv. Seguridad hídrica doméstica urbana

Se identifica como central para la adaptación a la infraestructura de calidad disponible, que logre mejorar la gestión y distribución, tratamiento y almacenamiento de agua, permitiendo de este modo respuestas rápidas ante riesgos derivados de episodios de inseguridad hídrica doméstica urbana (Urquiza *et al.*, 2020). Además, se necesita aumentar el conocimiento sobre la disponibilidad de agua en los territorios, así como su demanda, para planificar acciones ante escenarios de inseguridad hídrica doméstica que atiendan a los requisitos de los usuarios.

Adicionalmente, es necesario incorporar sistemas tecnológicos y de innovación, ya que permiten diversificar las fuentes de agua y los tratamientos para potabilizarla, permitiendo así superar episodios de escasez. Finalmente, se identifica como necesaria una mejora en la gobernanza, que haga más fácil implementar planes integrales de adaptación ante la amenaza de sequía (Urquiza *et al.*, 2020).

v. Mortalidad prematura neta por cambio de temperatura y mortalidad prematura por calor

La adaptación a los cambios de temperatura puede ser fisiológica, tecnológica, o en base a infraestructura. El primer caso se refiere a la capacidad del ser humano de soportar mayores o menores temperaturas con el tiempo,

cambio que no tendría consenso respecto a cuánto demora en ocurrir (Cifuentes *et al.*, 2020). Por otra parte, los cambios tecnológicos se relacionan con la adquisición de elementos que ayudan a paliar el efecto climático, como equipos de climatización o la aislación térmica en edificaciones. Finalmente, los cambios en infraestructura, se refieren desde la capacidad de atención en los centros de salud, hasta la existencia de espacios para refugiarse.

Por la dificultad de encontrar una metodología sólida, o un conjunto de datos que sirviera para el análisis, la capacidad adaptativa no fue considerada en el análisis cuantitativo, por lo que no se ve reflejada en los resultados de los mapas.

g. Caracterización del Riesgo

i. Anegamiento de asentamientos costeros

Para esta Cadena de Impacto, el Riesgo fue calculado como la multiplicación de la Amenaza, la Sensibilidad, y la Exposición.

ii. Inundaciones, efecto olas de calor en salud humana, seguridad hídrica doméstica urbana, seguridad hídrica doméstica rural

Para este caso, el cálculo del Riesgo se realizó según la metodología explicada anteriormente.

iii. Mortalidad prematura neta por cambio de temperatura y Mortalidad prematura por calor

El Riesgo, corresponde a la cantidad de muertes prematuras a causa del aumento de temperatura por cambio climático. Su cálculo se realizó según la metodología explicada anteriormente.

iv. Disconfort térmico ambiental, efectos de las heladas en ciudades, y efectos de la isla de calor urbana

El índice de Riesgo se calculó con el promedio de los índices normalizados¹⁶ de Amenaza, Exposición y Sensibilidad.

6.10.4 RESULTADOS

Los resultados del análisis de este sistema se encuentran en la plataforma web de ARCLim. Adicionalmente, se puede descargar la base de datos en formato Excel o en un archivo GeoJSON.

En esta sección se presentan ejemplos de los resultados para la Cadena de Impacto “anegamiento de asentamientos costeros”, donde se aprecia un mayor Riesgo en las regiones de Antofagasta, Valparaíso y Biobío, aunque con alta variabilidad entre asentamientos costeros en función de su Exposición y Sensibilidad.

a. Resultados de Amenaza

En la **Figura 55** se puede ver un ejemplo de resultados para el índice de Amenaza. La probabilidad de aumento de la cota de inundación es mayor hacia la zona sur, especialmente en las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.

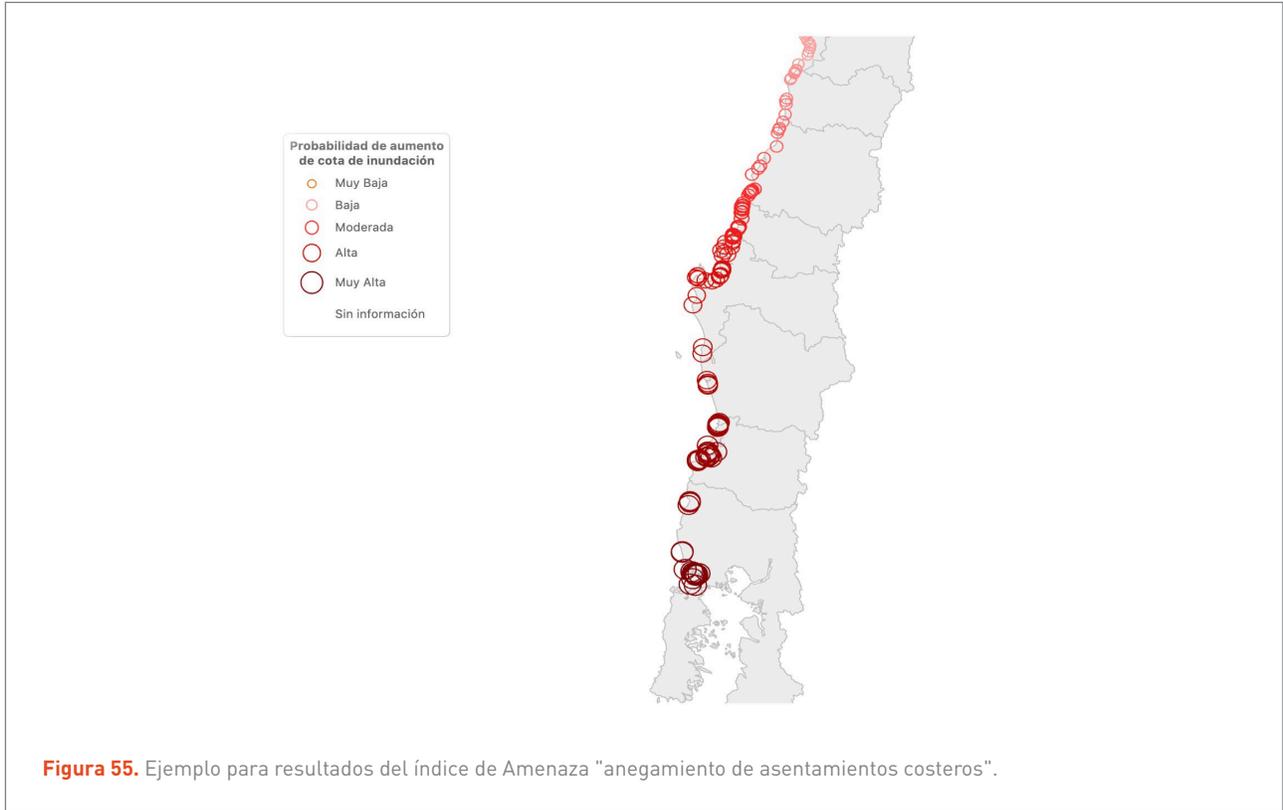
b. Resultados de Exposición

En la **Figura 56** se puede ver un ejemplo de resultados para el índice de Exposición. Al representar la cantidad de habitantes en cada asentamiento, no es posible distinguir una tendencia clara en el mapa.

c. Resultados de Riesgo

En la **Figura 57** se puede ver un ejemplo de resultados para el índice de Riesgo. En ella, destaca la Región del Biobío con muchos asentamientos y con un índice dentro de las categorías alto y muy alto. Esto es fuertemente influenciado por la cantidad de habitantes en esa zona. Asimismo, también se observa a ciudad de Valdivia con un índice dentro de la categoría muy alto.

¹⁶ Para el detalle metodológico de la normalización de los índices, ver el informe del equipo de ciudades (Henríquez *et al.*, 2020).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

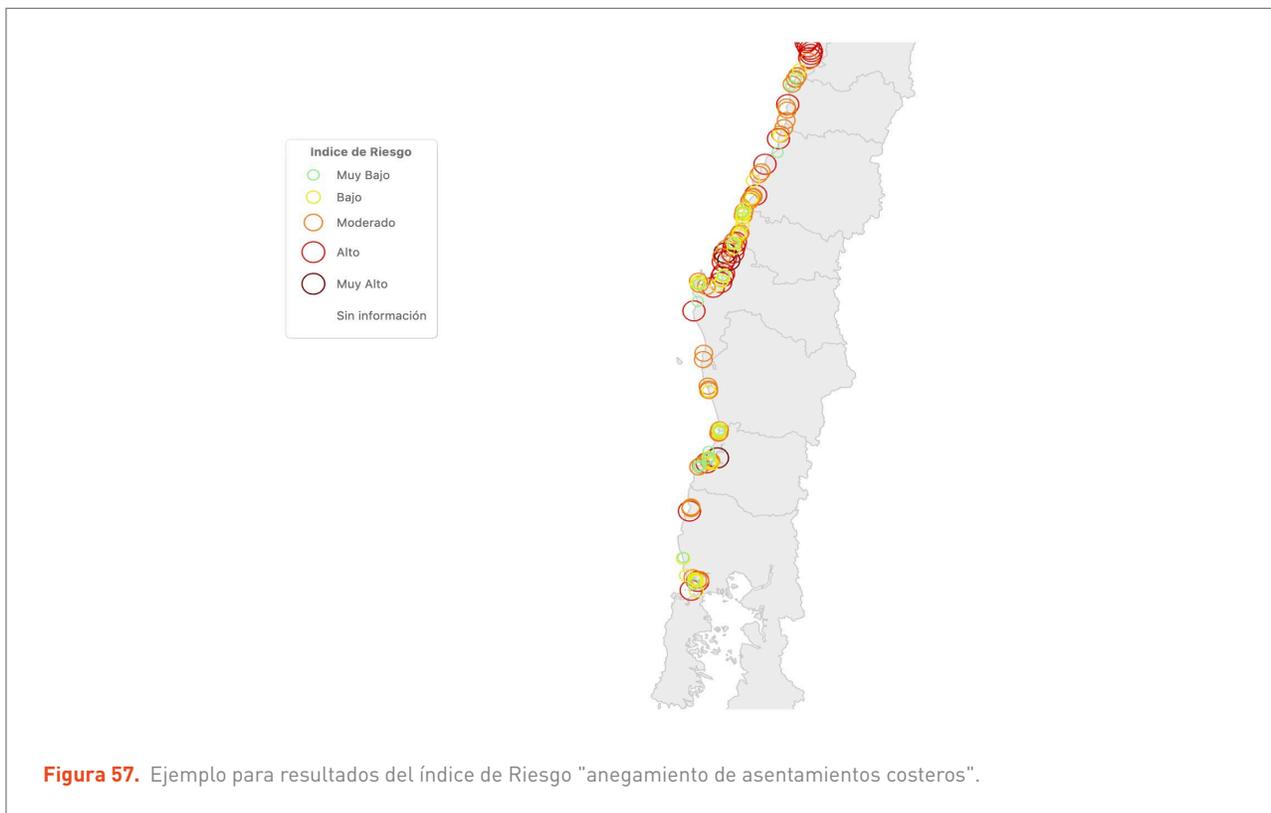


Figura 57. Ejemplo para resultados del índice de Riesgo "anegamiento de asentamientos costeros".

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

6.10.5 CONCLUSIONES

El cambio climático ya afecta significativamente nuestro país (CR², 2015), y se combina con condiciones de Vulnerabilidad preexistentes, tanto socioeconómicas (pobreza, desigualdad, y la segregación territorial), como socio-ecológicas (contaminación, degradación de ecosistemas o sobreexplotación de recursos). Además, la gradual intensificación de este fenómeno en el futuro, producirá consecuencias tanto en términos del agravamiento de los actuales Riesgos, como de la extensión de las zonas afectadas, fenómenos ante los cuales es preciso prepararse ahora (Urquiza *et al.*, 2020).

El análisis de este sistema es un aporte para entender los efectos del cambio climático en el componente humano, dejando en evidencia la gran variedad de Amenazas y su heterogeneidad del efecto sobre el Riesgo en las distintas zonas geográficas de Chile.

En esta heterogeneidad de los resultados, a nivel nacional, resalta la importancia del análisis, a nivel zonal. Por ejemplo, para la Cadena de Impacto "mortalidad prematura neta por cambio de temperatura", se observa cómo en el norte del país hay una tendencia a contar con un mayor número de muertes causadas por el cambio climático durante todo el año, mientras que, en la zona centro y centro sur del país, se observa un efecto estacional, en que el aumento de las temperaturas en la temporada fría permitiría evitar una fracción de las muertes (Cifuentes *et al.*, 2020).

Adicionalmente, una serie de brechas fueron identificadas para este sistema. Primero, para la Cadena de Impacto "anegamiento de asentamientos costeros" se pueden agregar indicadores que tomen en cuenta el equipamiento e infraestructura comunal, como establecimientos de seguridad, salud, educación y servicios (Winckler *et al.*, 2020).

Además, existen una serie de desafíos pendientes para el levantamiento de información sobre el impacto de las olas



de calor, seguridad hídrica doméstica urbana, seguridad hídrica doméstica rural, e inundaciones. En primer lugar, existe una brecha considerable en términos de disponibilidad de datos a escala comunal y nacional que permitan evaluar el Riesgo de manera robusta. Así, los resultados de este trabajo no deben ser considerados como representaciones exactas de las condiciones de Riesgo y Vulnerabilidad climática en Chile, sino, más bien, como un *proxy* (Urquiza *et al.*, 2020). Más aún, existe un escaso grado de desarrollo de información que permita realizar un análisis a escala comunal impidiendo la toma de decisiones a nivel local de manera informada. Estas brechas de información tienden a hacerse más marcadas en el nivel subcomunal, dejando en evidencia, adicionalmente, una importante desigualdad en la disponibilidad y accesibilidad de información en las distintas comunas del país (Urquiza *et al.*, 2020).

Por otro lado, falta una integración de los resultados de distintas Cadenas de Impacto para evaluar el Riesgo en

asentamientos humanos en su conjunto a nivel nacional (Urquiza *et al.*, 2020), impidiendo la toma de decisiones desde una mirada sistémica y holística.

Finalmente, se destaca la importancia de avanzar en esfuerzos para recopilar, sistematizar y hacer disponible la variedad de indicadores secundarios existentes en el país. Dichos esfuerzos debiesen concretarse en la forma de una plataforma o portal web, que contenga un repositorio de información. Este repositorio debería poder ser consultado y alimentado por una variedad de actores –públicos, privados, académicos–, y contener un catálogo indizado –y lo más posible georreferenciado– de datos, estudios e informaciones actualizadas respecto de un conjunto de sistemas y variables de interés en términos de riesgo climático, así como catastros de Exposición e indicadores que permitan evaluar la Vulnerabilidad y resiliencia de distintos territorios.

6.11 INFRAESTRUCTURA COSTERA





6.11 INFRAESTRUCTURA COSTERA

6.11.1 INTRODUCCIÓN

Chile cumple con siete de los nueve criterios de Vulnerabilidad del cambio climático enunciados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, Oficina de Cambio Climático, 2014), y uno de ellos es el de áreas costeras de baja estatura. Las costas de Chile son altamente vulnerables a los efectos del cambio climático, tanto en sus sistemas naturales (humedales, estuarios, deltas, dunas, playas, acantilados, etc.) como en sus sistemas humanos (inundación de asentamientos humanos, efectos sobre la operación de puertos, efectos sobre la operación de caletas, daños sobre obras particulares, etc.). Los principales efectos del cambio climático sobre las costas del país son el alza del nivel del mar, cambios en patrones de oleaje, el potencial hidrógeno (pH) y cambios en la temperatura de la columna de agua, entre otros factores (Winckler *et al.*, 2019).

La denominada “infraestructura costera” corresponde a los sistemas humanos que se encuentran emplazados en las zonas costeras, y serán objeto de análisis en esta sección. Dentro de la alta variedad de sistemas de infraestructura costera, se seleccionaron dos: i) las caletas arte-

sanales y ii) los puertos estatales. En ambos, la Amenaza climática es el cierre por marejadas, porque se ha demostrado que la frecuencia de marejadas ha sido alterada por el cambio climático en toda la costa continental de Chile, aumentando su frecuencia y, por lo tanto, la Amenaza de la operación de caletas y puertos (Martínez *et al.*, 2018; Winckler, Contreras-López, Vicuña, *et al.*, 2019a).

En la presente sección se sintetiza la estrategia de evaluación del Riesgo climático de Sistemas de infraestructura costera, según detalla el informe **Informe Proyecto ARClím: Equipo de Zonas Costeras (Winckler, Contreras-López, Larraguibel, Mora, Esparza, Agredano, Martínez, Torres, 2020)**.

6.11.2 CADENAS DE IMPACTO

Considerando los antecedentes expuestos en la introducción, para este estudio se identificaron dos Cadenas de Impacto. Un atributo común entre ellas, para medir el impacto del cambio climático en ambas Cadenas, es el “*downtime*”, que corresponde a la porción de tiempo en el cual la infraestructura debe permanecer cerrada debido a la ocurrencia de condiciones climáticas adversas a su operación. En la **Tabla 29** se observan los subsistemas abordados en este estudio, cuyo Riesgo es obtenido a través

Subsistema	Cadena de Impacto	Amenaza derivada del cambio climático	Exposición	Sensibilidad	Riesgo
Caletas de pescadores	Aumento de <i>downtime</i> en caletas de pescadores	Aumento de frecuencia de oleaje	Número de pescadores multiplicado por el número de embarcaciones inscritas en cada caleta	Efecto combinado de la Sensibilidad operacional (exposición del pescador) y de la Sensibilidad estructural (grado de proyección y servicio de cada caleta)	Aumento de <i>downtime</i> operacional
Puertos estatales	Aumento de <i>downtime</i> en puertos estatales	Cambio en frecuencia de marejadas	Obtenido a partir la carga transferida, que considera exportaciones e importaciones por cada puerto	Cierre de puertos ante acción de marejadas, obtenido de certificados de cierre de puerto	Aumento de <i>downtime</i> operacional

Tabla 29. Resumen Cadenas de Impacto para el Sistema Infraestructura Costera.

Fuente: Plataforma ARClím (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

de Cadenas de Impacto en función de tres factores determinantes: (i) Amenaza, (ii) Exposición, y (iii) Sensibilidad.

6.11.3 METODOLOGÍA

a. Región bajo análisis

El área de estudio es diferente, según la Cadena de Impacto a considerar. Para el análisis de *downtime* en caleta de pescadores, se analizaron 545 caletas de forma individual, en donde trabajan un total inscrito de 24.806 mujeres y 114.764 hombres en el rubro de la pesca artesanal. Las actividades extractivas, que se realizan en las caletas, incluyen buceo, recolección y pesca (Winckler, Contreras-López, *et al.*, 2019; Winckler, Contreras-López, Vicuña, *et al.*, 2019c). La geomorfología de las costas chilenas facilita la Exposición de las caletas a agentes oceánicos pues en su mayoría se encuentran abiertas hacia el Océano Pacífico.

Por otra parte, para estimar el *downtime* de puertos, se analizaron 8 puertos del Sistema Portuario Estatal, expuestos directamente al Océano Pacífico de forma individual. El sistema portuario de Chile cumple un rol estratégico para la integración comercial con el mundo, pues es responsable del 90% del comercio internacional de Chile. Los puertos estatales considerados en el estudio, son Arica, Iquique, Antofagasta, Coquimbo, Valparaíso, San Antonio, San Vicente y Mejillones.

b. Modelos utilizados

En este estudio se utilizó la probabilidad de excedencia del límite operacional del oleaje en las caletas pesqueras y puertos estatales escogidos para el análisis. Mediante este cálculo, se obtiene el *downtime* en ambos subsistemas.

El cálculo de la Exposición se obtuvo del inventario de Exposición del estudio “Determinación del Riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile”, desarrollado por el Ministerio del Medio Ambiente (Winckler, Contreras-López, Vicuña, *et al.*, 2019a, 2019c). Finalmente, para el cálculo de la Sensibilidad, se utilizó una combinación de indicadores relevantes con el fin de

determinarla en cada subsistema, cuya importancia relativa se distribuyó de igual forma para todas, mediante el cálculo del promedio aritmético.

c. Caracterización de la Amenaza

La metodología utilizada responde al objetivo general que consiste en evaluar el Riesgo climático sobre actividades de pesca artesanal en caletas y operación de puertos. Para más detalles revisar el informe sectorial del Equipo de Zonas Costeras (Winckler *et al.*, 2020).

i. Amenazas en caletas de pesca artesanal

La Amenaza sobre caletas de pesca artesanal proviene principalmente de los episodios de fuerte oleaje y marejadas que se producen durante eventos de mal tiempo atmosférico. Durante estos episodios se detienen las actividades de la pesca artesanal, lo que se traduce en grandes pérdidas y menos ingresos para los pescadores. Por esto, la Amenaza se define como el período de tiempo durante el cual las condiciones del mar no permiten la realización de actividades pesqueras (*downtime* de pesca).

Para el análisis se utilizó una base de datos de oleaje en aguas profundas disponible cada 2° de latitud entre Arica y el Canal de Chacao, la que luego es interpolada estadísticamente para obtener los datos en la ubicación de las caletas del país. Considerando que la altura umbral de operación es 2 metros, el *downtime* de pesca se calculó como la probabilidad de excedencia del límite operacional, y sus valores van entre 0 (100% de operación) y 1 (0% de operación).

La Amenaza se calculó en cada caleta, como la diferencia entre la probabilidad de *downtime* de la proyección climática (Pp: 2026-2045, bajo un escenario RCP8.5) y del período histórico (Ph: 1985-2004), en la forma:

$$A = Pp - Ph, \quad -1 \leq A \leq 1$$

Ecuación 11. Cálculo de Amenaza del sistema “infraestructura costera”



Finalmente, en la plataforma, los valores de Amenaza van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las caletas que no muestran un aumento de la Amenaza hacia el clima futuro y 1 corresponde a las caletas donde hay mayor aumento de Amenaza o aumento de frecuencia de oleaje a futuro. Cabe mencionar que el cálculo final de la Amenaza fue obtenido sólo para 302 caletas, ubicadas entre Arica y Purránque (en la Región de Los Lagos). Las caletas al sur de este dominio no se consideraron en el cálculo porque las proyecciones de oleaje no se encuentran disponibles para los mares interiores de Chiloé y la zona de fiordos de las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes.

ii. Amenazas en puertos estatales

La Amenaza sobre puertos estatales se manifiesta en el impacto asociado a la pérdida de disponibilidad de sitios de atraque debido al aumento de oleaje en los puertos expuestos al Océano Pacífico, por concepto de cambio climático. El cálculo se realiza considerando el período de tiempo durante el cual las condiciones del mar no permiten la operación de naves y, para esto, se utiliza la estadística de oleaje en el acceso de puertos (Winckler, Contreras-López, Vicuña, *et al.*, 2019b). Considerando que el límite operacional de la altura significativa de oleaje es 1.5 metros, el *downtime* se obtiene como la probabilidad de excedencia del límite operacional, cuyos valores van entre 0 (100% de operación) y 1 (0% de operación). Finalmente, la Amenaza se obtiene como la diferencia entre el *downtime* de la proyección climática (2026-2045) y el *downtime* del período histórico (1985-2004).

Los valores de Amenaza van entre -1 y 1, donde -1 corresponde a los puertos que muestran una mayor disminución de la Amenaza hacia el clima futuro y 1 corresponde a los puertos donde hay mayor aumento de Amenaza o aumento de frecuencia de marejadas a futuro.

d Caracterización de la Exposición

i. Exposición en caletas de pesca artesanal

La Exposición de caletas de pesca artesanal se definió en base al inventario de Exposición del estudio "Determinación del Riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile", desarrollado por el Ministerio del

Medio Ambiente (Winckler, Contreras-López, Vicuña, *et al.*, 2019a, 2019c). En dicho informe se define Exposición como el número de pescadores multiplicado por el número de embarcaciones inscritas en cada caleta. Cabe destacar que las regiones de Biobío y Los Lagos son las que destacan en concentración de pescadores artesanales. Se descartan las caletas ubicadas en aguas interiores de las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes y Antártica Chilena. Las fichas de Exposición por caleta, se pueden encontrar en el inventario de Exposición desarrollado por el MMA. Los valores de Exposición van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las caletas pesqueras menos expuestas (exposición nula) y 1 a las más expuestas frente a efectos del cambio climático.

ii. Exposición de puertos estatales

La Exposición de puertos estatales se obtuvo a partir de datos de la carga transferida (Q), que considera exportaciones e importaciones por cada puerto en el año 2018 (Winckler, Contreras-López, Vicuña, *et al.*, 2019b). Dada la gran variación de Q entre puertos, el índice de Exposición se calculó utilizando el logaritmo de Q , normalizado por el máximo valor a nivel nacional. Los valores de Exposición van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a los puertos estatales menos expuestos (Exposición nula) y 1 a los más expuestos frente a efectos del cambio climático.

$$E = \log(Q) / \max\{\log(Q)\}, \quad 0 \leq E \leq 1$$

Ecuación 12. Cálculo de Exposición en función de la carga transmitida.

e. Caracterización de la Sensibilidad

i. Sensibilidad en caletas de pesca artesanal

La Sensibilidad fue calculada como una combinación entre la Sensibilidad operacional (S_o) y la Sensibilidad estructural (S_e). Ambos índices van entre 0 (muy sensible) y 1 (poco sensible).

> **Sensibilidad operacional (S_o):** incluye, en su cálculo, variables de Exposición relativas al tipo de pescador artesanal presente en la caleta y a sus embarcaciones (fracción de navegantes, fracción de embarcaciones mayores y capacidad organizativa - AMERB). Mientras me-

nor es el número de pescadores que navegan y mayor es el número de embarcaciones, menor es su Sensibilidad.

- > **Sensibilidad estructural (Se):** incluye, en su cálculo, variables que definen el grado de protección y servicios con que cuenta la caleta (ruralidad de la caleta, existencia de obras de abrigo, muelle o rampla, existencia de abrigo natural, etc).

Para más detalles sobre la obtención de cada variable utilizada en el cálculo de las sensibilidades, se recomienda revisar el Informe Sectorial del Equipo de Zonas Costeras (Winckler *et al.*, 2020).

La Sensibilidad final se cuantificó como el promedio entre la Sensibilidad operacional y la Sensibilidad estructural de cada caleta. Los valores de Sensibilidad van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a las caletas menos sensibles (nula) y 1 a las caletas más sensibles a efectos del cambio climático.

ii. Sensibilidad de puertos estatales

La Sensibilidad de los puertos estatales se obtuvo considerando los cierres de puertos ante la acción de marejadas. Para esto, se consideró la cantidad de horas de cierre de puertos (Dh) a partir de la estadística histórica obtenida de certificados de cierre de puerto (2015, 2016 y 2017) y de una base de datos de cierres proporcionada por SERVIMET (2007 a abril del 2017). Los valores de Sensibilidad van entre 0 y 1, donde 0 corresponde a los puertos menos sensibles (nula) y 1 a los puertos más sensibles a efectos del cambio climático.

$$S = Dh/\max\{Dh\}, \quad 0 \leq S \leq 1$$

Ecuación 13. Cálculo de sensibilidad en función de las horas de cierre de puertos.

f. Caracterización del Riesgo

Para ambas Cadenas de Impacto o subsistemas, el Riesgo se obtuvo a partir de la multiplicación de la Amenaza, la Exposición y la Sensibilidad. Como en el cálculo de la Amenaza se consideró el cambio entre el período futuro (2026-2045,

bajo escenario RCP8.5) y el período histórico (1985-2004), el Riesgo, sobre las caletas de pesca artesanal y los puertos estatales, consideró también ese cambio y se definió como el índice de Riesgo de aumento de *downtime* operacional. Los valores de cambio de Riesgo, entre ambos períodos, van entre 0 y 1, donde 0 corresponde al cambio de Riesgo nulo y 1 al cambio de Riesgo máximo por efectos del cambio climático.

6.11.4 RESULTADOS

Según los resultados que se encuentran en la plataforma, aquí se presenta, a modo de ejemplo la Amenaza, la Exposición, la Sensibilidad y el Riesgo de la Cadena de Impacto "aumento de *downtime* en caletas de pescadores". Para más detalles ver el informe sectorial de Zonas Costeras (Winckler *et al.*, 2020).

a. Resultados de la Amenaza

En la **Figura 58** se observan los valores de aumento de Amenaza en caletas de pescadores. Los valores máximos se concentran en la zona centro y norte del país.

b. Resultados de la Exposición

En la **Figura 59** se observan los valores del índice de Exposición en caletas de pescadores. Los máximos valores se encuentran principalmente en la Región del Biobío y en el mar interior de Chiloé. El resto de las caletas posee bajos valores de Exposición.

c. Resultados de la Sensibilidad

En la **Figura 60** se observan los valores del índice de Vulnerabilidad o Sensibilidad en caletas pesqueras. La Sensibilidad tiene una distribución geográfica relativamente homogénea a lo largo del país.

d. Resultados del Riesgo

En la **Figura 61** se observan los valores de aumento de Riesgo en diferentes caletas pesqueras. Considerando los resultados anteriores, el Riesgo de las caletas es más alto en la zona central de Chile, por la fuerte influencia de la Amenaza en esa zona.

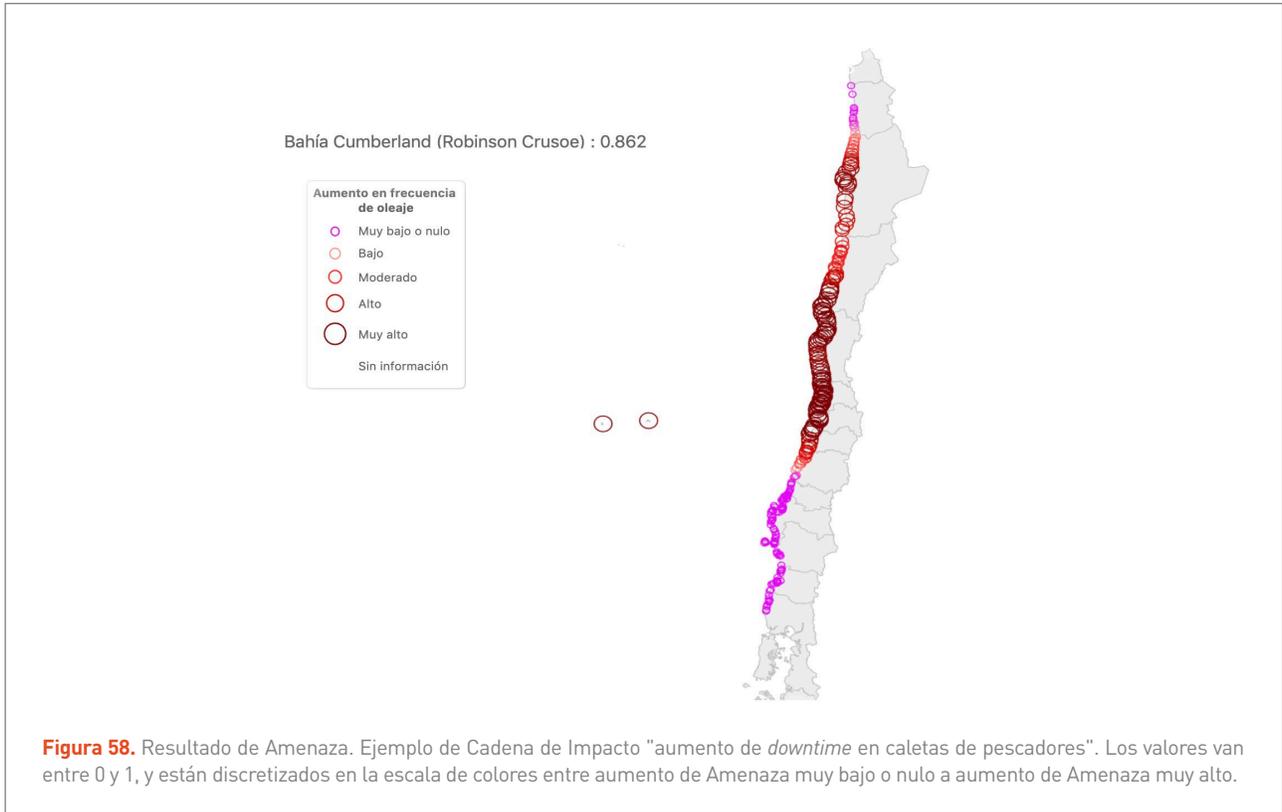


Figura 58. Resultado de Amenaza. Ejemplo de Cadena de Impacto "aumento de *downtime* en caletas de pescadores". Los valores van entre 0 y 1, y están discretizados en la escala de colores entre aumento de Amenaza muy bajo o nulo a aumento de Amenaza muy alto.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

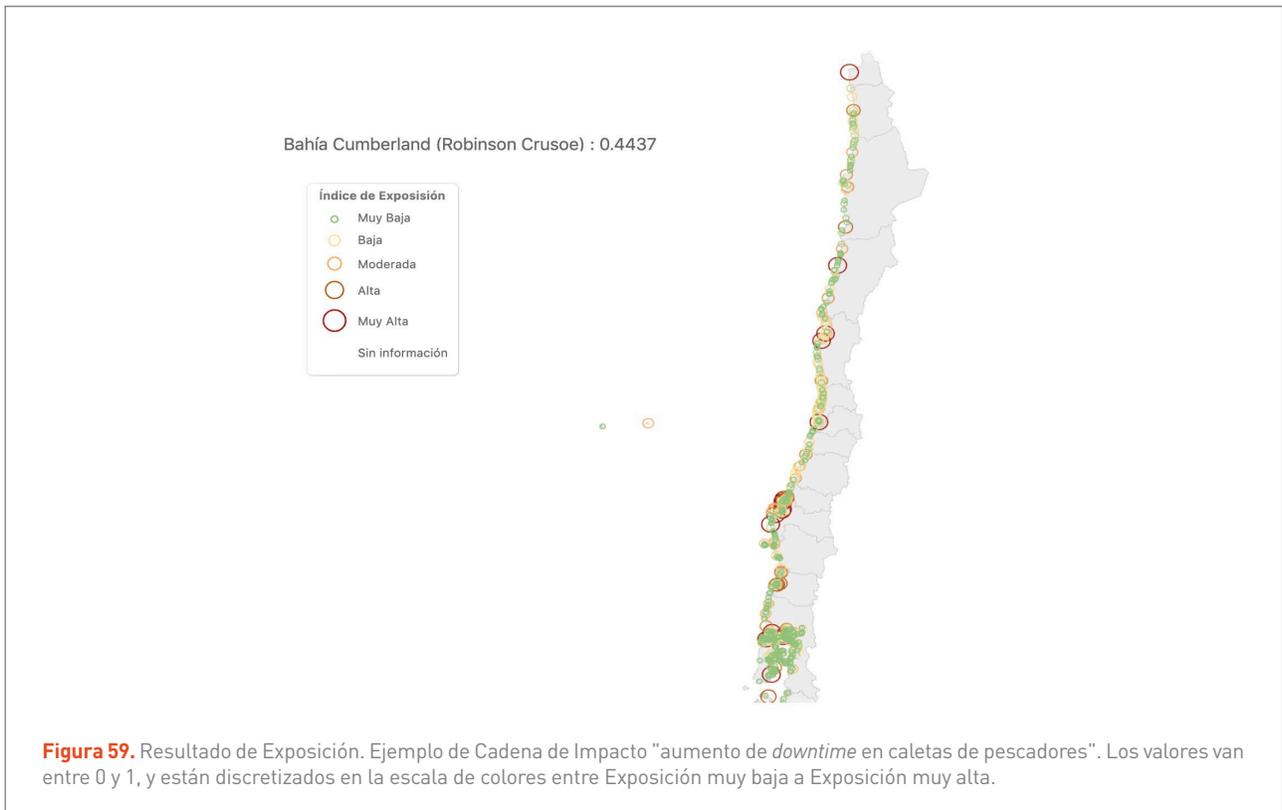
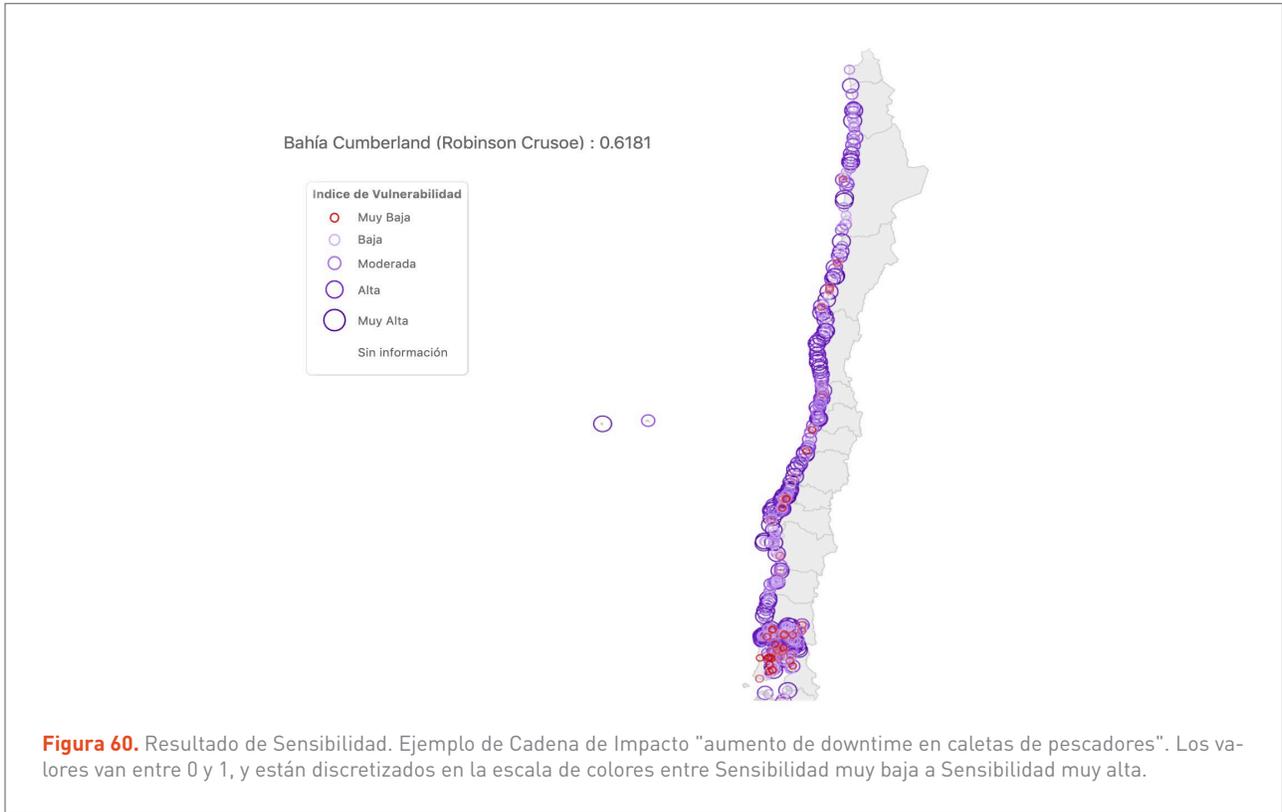
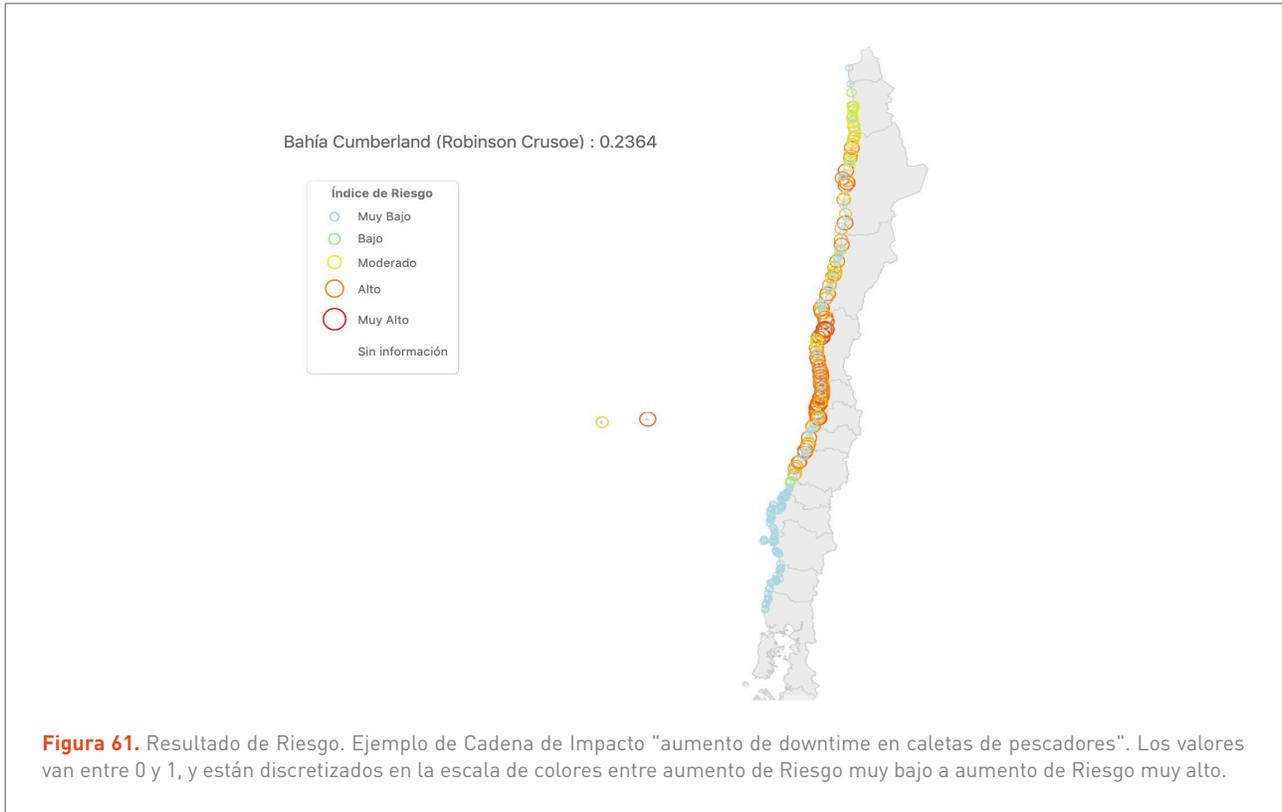


Figura 59. Resultado de Exposición. Ejemplo de Cadena de Impacto "aumento de *downtime* en caletas de pescadores". Los valores van entre 0 y 1, y están discretizados en la escala de colores entre Exposición muy baja a Exposición muy alta.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



6.11.5 CONCLUSIONES

Las Amenazas, de ambas Cadenas de Impacto, provienen del cese de sus actividades por presencia de marejadas (o *downtime*). Los resultados de la Amenaza son más concluyentes sobre las caletas pesqueras que sobre los puertos, pues estos últimos poseen poca densidad de puntos sobre la misma área de estudio (costas de Chile). Por lo cual, es difícil generar conclusiones generales en los puertos como se hace con las caletas de pesca artesanal. Sin perjuicio de lo anterior, la Amenaza sobre las caletas de pesca artesanal es mayor en el centro y norte del país, mientras que los puertos tienen su máximo Riesgo en el puerto de San Antonio.

El puerto de San Antonio, además, es aquel que posee la máxima Exposición, en conjunto con el puerto de Valparaíso. Los puertos del norte (Iquique y Arica) muestran la Exposición más baja. Las caletas de pesca artesanal muestran en general poca Exposición, con la excepción de algunas caletas que se encuentran altamente expuestas, principalmente ubicadas en la Región del Biobío y en el mar interior de Chiloé.

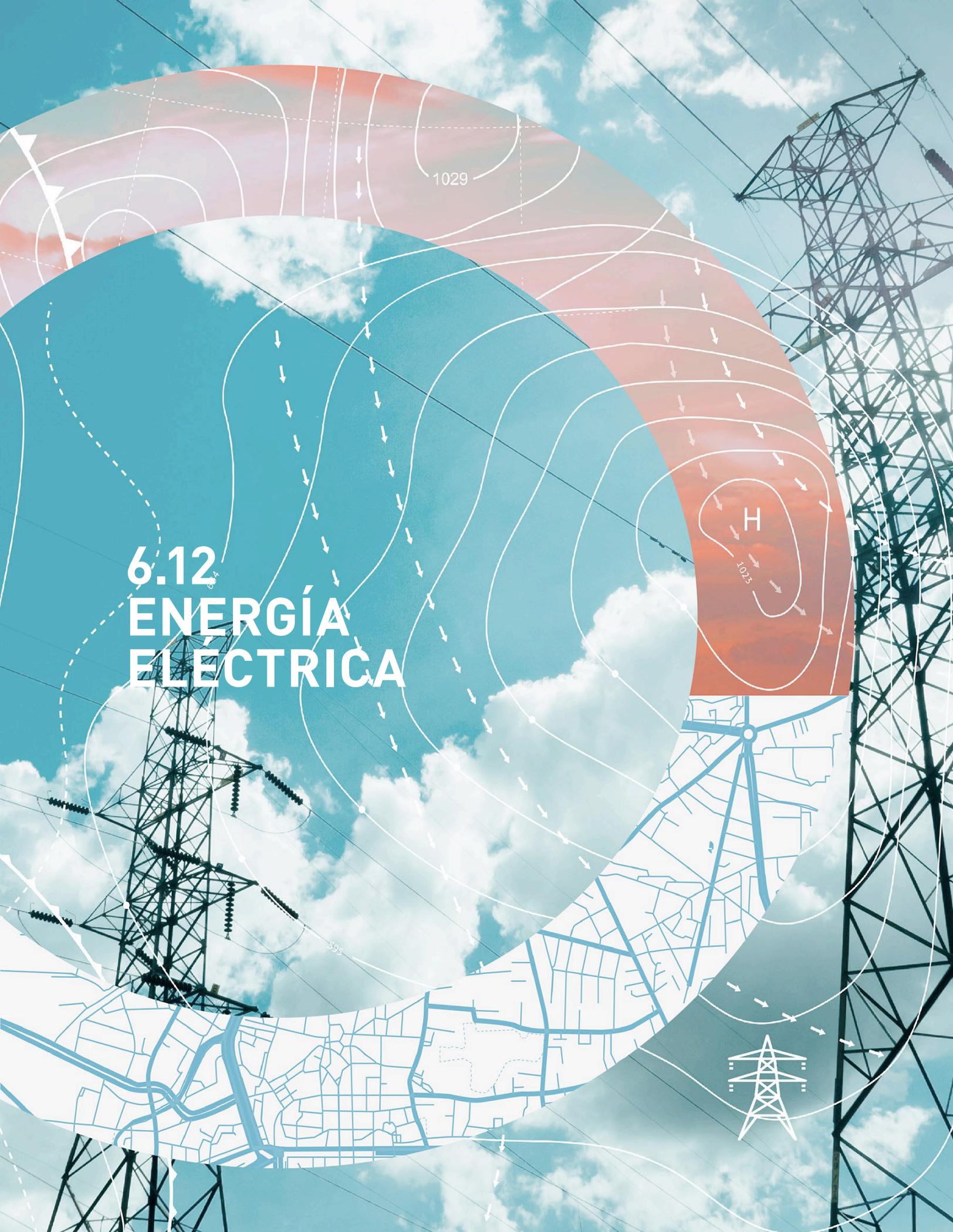
La Sensibilidad, en ambas Cadenas de Impacto, se observa relativamente homogénea a lo largo de la línea costera del País.

Finalmente, el Riesgo de las caletas de pesca artesanal es mayor en la zona centro y norte del país, por influencia de la Amenaza en ese cálculo. En los puertos, los resultados son diferentes para cada caso, sin mostrar un patrón espacial, por la poca cantidad de puntos considerados.

Es importante mencionar que, en este estudio, se podrían mejorar algunos aspectos, si es que se quisiera profundizar en él a futuro. Estos aspectos se encuentran relacionados, principalmente, con las metodologías utilizadas en algunos cálculos. Por ejemplo, en las estimaciones de la Amenaza no fue posible propagar el oleaje de aguas profundas a aguas someras en cada caleta, pues para realizar este cálculo se requieren batimetrías locales para cada caleta de pesca artesanal y, además, se estima que los cálculos podrían tomar por lo menos 300 días de esfuerzo computacional.

Por otra parte, se podría establecer la importancia relativa de los componentes utilizados como indicadores al momento de calcular la Sensibilidad, porque, en este estudio, se ha considerado que todos poseen el mismo peso relativo, lo que en primer orden nos da un resultado útil pero no del todo exacto. Para esto, se debe realizar un trabajo por cada caleta, realizando entrevistas y/o talleres con los pescadores.

6.12 ENERGÍA ELÉCTRICA





6.12 ENERGÍA ELÉCTRICA

6.12.1 INTRODUCCIÓN

La electricidad tiene un rol fundamental en nuestras actividades diarias y dependemos de ella para suplir una serie de necesidades básicas y secundarias. Además, la generación eléctrica está fuertemente ligada a la actividad económica, existiendo una correlación entre el PIB, la generación eléctrica, y la demanda eléctrica, tal como se muestra en la **Figura 62**.

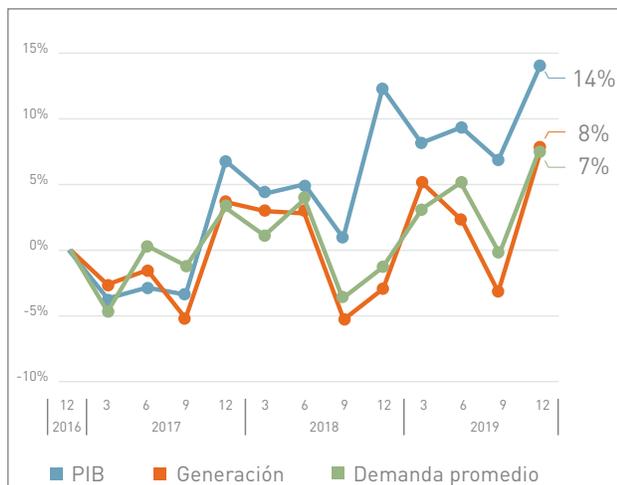


Figura 62. Variación porcentual del PIB, generación eléctrica y demanda promedio entre los años 2016 y 2019 para el SEN.

Fuente: Reporte Energético Financiero (Comisión Nacional de Energía, 2020b).

El análisis de este sistema está basado en el trabajo plasmado en detalle en el **Informe Proyecto ARCLim: Sistema Eléctrico** (Lorca, Sauma & Tapia, 2020).

Es indispensable comprender cómo, dónde y cuánto impactará el cambio climático al sistema eléctrico, con el objetivo de preparar las estrategias para enfrentarlo.

Cada uno de los subsistemas del sistema de infraestructura eléctrica pueden ser objeto de impactos climáticos que afecten su normal funcionamiento. Estos subsistemas son: generación, transmisión y distribución.

En primer lugar, pueden ocurrir variaciones que afecten a los insumos utilizados para el proceso de generación eléctrica, como la variación de la velocidad y dirección de los vientos, la variación de radiación solar, y la variación de la disponibilidad del recurso hídrico (Lorca *et al.*, 2020).

En segundo lugar, la transmisión y distribución eléctrica también sufren alteraciones en la operación por cambios en factores climáticos, tales como el aumento en la cantidad de días de altas temperaturas, lo que afecta la capacidad máxima de transmisión de electricidad por el cambio en la longitud de las redes que implica cambios en los factores de seguridad (Moreira *et al.*, 2006).

Para este trabajo, el análisis se limitó al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), el cual excluye a los sistemas medianos de Aysén y Magallanes y las zonas insulares, tales como Isla de Pascua y el Archipiélago de Juan Fernández¹⁷. Así, para este sistema, se analizaron de manera independiente, cuatro posibles Amenazas a la red eléctrica (Lorca *et al.*, 2020):

- 1. Cambio en el recurso hidrológico:** variación en el nivel de los embalses de las centrales hidroeléctricas y los afluentes de las centrales de pasada debido a las variaciones en las precipitaciones y patrones de deshielo.
- 2. Aumento de temperaturas:** impacto sobre las redes de transmisión por un aumento de temperaturas que implica una reducción en la cantidad máxima de corriente a transportar y un cambio en la demanda eléctrica por sistemas de climatización.
- 3. Variación de la radiación solar:** impacto del cambio de la radiación solar en la generación eléctrica de plantas solares.
- 4. Variación del recurso eólico:** impacto del cambio de la velocidad del viento en la generación eléctrica en centrales eólicas.

¹⁷ Un análisis simplificado de los impactos del cambio climático sobre la infraestructura energética insular



6.12.2 CADENAS DE IMPACTO

Se consideraron 4 Cadenas de Impacto a analizar en este sistema, las que se resumen en la **Tabla 30**. El detalle del cálculo de las Amenazas se detalla en la sección 6.12.3, Metodología.

A continuación, se explica brevemente la justificación de la inclusión de estas Cadenas de Impacto.

Primero, para la Cadena de Impacto representada por la Amenaza “disminución en la generación de energía hidroeléctrica”, su inclusión está relacionada a los impactos que se están viendo en el día de hoy en Chile en términos hídricos. En específico, se habla de que estamos viviendo una megasequía, la cual afecta desde la Región de Coquimbo hasta La Araucanía, desde el año 2010, con un déficit en las precipitaciones de alrededor de un 30% (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)², 2015). Esto tiene una incidencia directa en la generación hidroeléctrica por una menor disponibilidad en los afluentes y en los embalses, lo que podría generar un impacto económico importante en

el futuro, debiendo reemplazar esta energía por otras alternativas que pudiesen ser más caras (Lorca *et al.*, 2020).

En segundo lugar, un efecto conocido del cambio climático es el “cambio en las temperaturas y aumento de días con temperaturas extremas”. Este factor puede tener un impacto en la transmisión eléctrica, asociado a un cambio físico en las líneas. En específico, un aumento en la temperatura ambiental disminuye la capacidad máxima de corriente que puede transportar una línea de transmisión, lo que puede implicar que otras líneas deban suplir energía faltante, con costos marginales más altos (Lorca *et al.*, 2020).

Finalmente, las energías renovables han ido cobrando más relevancia en los últimos años, tanto en Chile como en el resto del mundo, especialmente las de generación solar y eólica. A su vez, estas son dependientes de recursos naturales que tendrán variaciones a futuro, según las proyecciones climáticas, como son la radiación solar y la velocidad del viento, lo que es analizado por separado para cada Cadena de Impacto.

Subsistema	Cadena de Impacto	Amenaza	Exposición	Sensibilidad	Riesgo
Transmisión eléctrica	1. Impacto de aumento de temperatura en la transmisión eléctrica	Aumento de la temperatura	Demanda eléctrica comunal a la red	Cambios en los costos de la electricidad	Inclinación de las comunas a registrar cambios sistemáticos en la red eléctrica (reflejado principalmente por las variaciones de los costos marginales promedio) en consecuencia del aumento de temperaturas percibida sobre las líneas de transmisión
	2. Impactos de disminución del recurso hídrico	Disminución de la energía generada en centrales hidroeléctricas	Demanda eléctrica comunal a la red	Cambios en los costos de la electricidad	Riesgo de las comunas a registrar cambios sistemáticos en la red eléctrica (reflejado principalmente por las variaciones de los costos marginales promedio) a consecuencia de la disminución del recurso hídrico en el sistema
Generación eléctrica	3. Impacto del cambio en radiación solar	Cambio en la radiación solar	Demanda eléctrica comunal a la red.	Cambios en los costos de la electricidad	Inclinación de las comunas a registrar cambios sistemáticos en la red eléctrica (reflejado principalmente por las variaciones de los costos marginales promedio) en consecuencia de la variación de la radiación solar en el sistema
	4. Impacto de disminución del recurso eólico	Cambio en la velocidad del viento	Demanda eléctrica comunal a la red	Cambios en los costos de la electricidad	Inclinación de las comunas a registrar cambios sistemáticos en la red eléctrica (reflejado principalmente por las variaciones de los costos marginales promedio) en consecuencia de la variación de la velocidad media de los vientos en el sistema

Tabla 30. Resumen de Cadenas de Impacto para el Sistema Energía Eléctrica.

Fuente: Elaboración en base al informe del equipo de Sistema Eléctrico (Lorca *et al.*, 2020) y plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



6.12.3 METODOLOGÍA

a. Modelo general

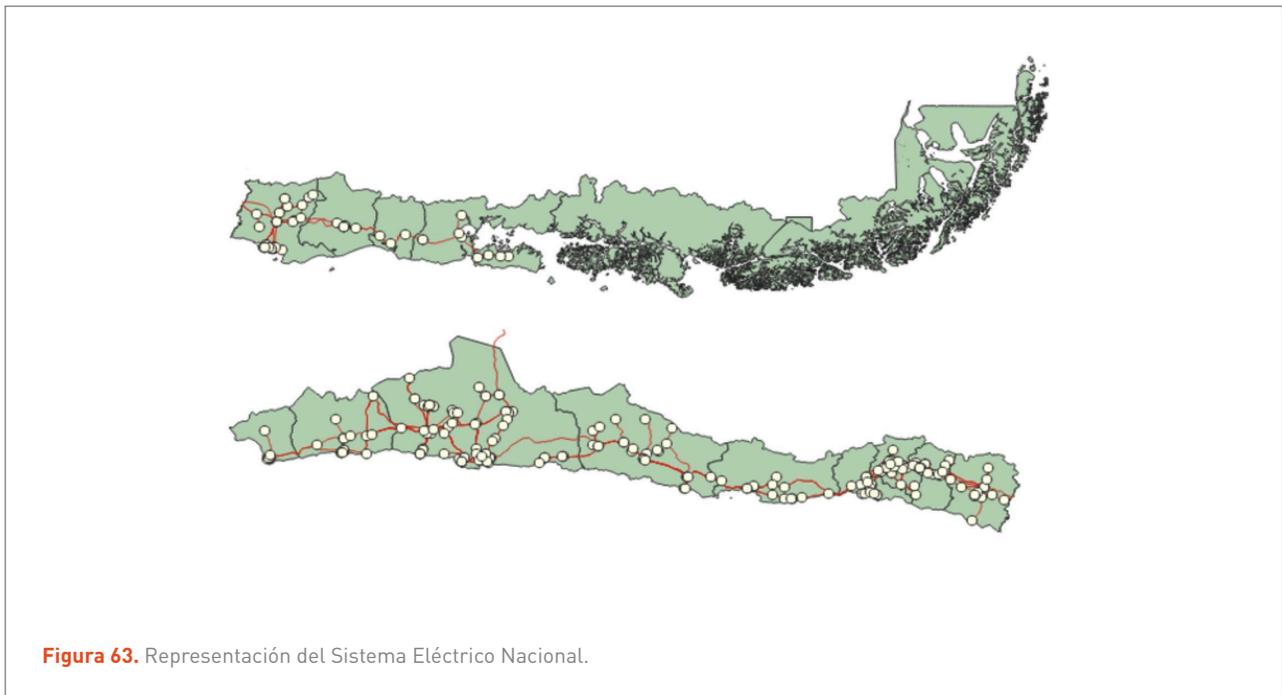
Para representar la Amenaza, la Exposición, la Sensibilidad, y el Riesgo en cada mapa, se construyó una representación matemática de la red eléctrica de Chile, es decir, un modelo. En términos simples, este modelo permite saber qué unidades de generación y a qué costo marginal suministrarán potencia a la red para suplir la demanda energética en cada hora del año, lo que también es conocido como un “modelo de comisionamiento de las unidades” (*unit commitment*). Así, para seleccionar las unidades generadoras que operan, se considera minimizar el costo de la energía inyectada bajo distintas restricciones técnicas para poder operar, tales como límites técnicos de capacidad, límites de rampas y tiempos de encendido y apagado, balance de energía, etc. (Lorca *et al.*, 2020).

Este modelo entregó el cálculo de la Amenaza y la Sensibilidad para las Cadenas de Impacto del subsistema de

generación eléctrica (ver **Tabla 30**) a partir de variables climáticas que inciden en cómo se comportará el sistema eléctrico. Además, con este modelo se calculó la sensibilidad para todas las cadenas, que en este sistema se representa como el cambio en los costos marginales para cada comuna.

La red chilena se representa en la **Figura 63**. La red incluye 278 subestaciones, 393 líneas de transmisión y 443 unidades generadoras. Cabe destacar que solo se incluyeron las subestaciones con un nivel de voltaje desde los 110kV hasta los 500kV basado en la información técnica y georreferenciación de la CNE (Comisión Nacional De Energía, 2019).

Además, se hizo una proyección de las unidades generadoras que operarán. Así, y dado que la matriz energética de Chile se encuentra actualmente en un proceso de descarbonización¹⁸, se consideró, en la modelación, el retiro de las centrales en base a carbón entre el 2035 y el 2065 (Lorca *et al.*, 2020). Sin embargo, solo parte de



Fuente: Lorca *et al.*, 2020.

¹⁸ <https://www.energia.gob.cl/mini-sitio/plan-de-descarbonizacion-de-la-matriz-electrica>

esta descarbonización está incluida en el modelo, ya que para retirar el 100% de las centrales, se debe asumir la integración de nuevas tecnologías, además de estimar los costos asociados a estas para el largo plazo, lo que es sumamente complejo y escapa del alcance del proyecto (Lorca *et al.*, 2020).

Con respecto a los datos climáticos de entrada, que alimentan al modelo y que generan impactos en la generación y transmisión, se consideraron los resultados del proyecto, los cuales contienen las condiciones históricas, entre los años 1980 y 2009, y las condiciones climáticas futuras, entre los años 2035 y 2065, modeladas bajo el escenario RCP8.5. Sin embargo, estos datos tienen una granularidad temporal diaria¹⁹, mientras que el modelo del sistema eléctrico requiere que los datos sean horarios para poder representar los perfiles²⁰ de demanda y oferta de energía en distintos momentos del día, lo que influye en cómo el sistema opera y cuáles son sus costos. Además, se requieren de los perfiles horarios, de la disponibilidad del recurso hídrico, de la radiación solar y de la velocidad y dirección del viento.

Para obtener estos perfiles se utilizaron datos horarios históricos, pero, por limitaciones computacionales, no fue posible representar cada hora del año, ya que los tiempos de simulación habrían sido excesivos (Lorca *et al.*, 2020). Para resolver esto, se utilizó el concepto de "semana representativa". Así, se analizaron todas las semanas del año y, para cada estación, se seleccionó solo una, como representativa (4 en total), a través de métodos estadísticos, para poder contar con los perfiles horarios mencionados (Mena *et al.*, 2019; Verástegui *et al.*, 2019). Así, se trabajó con un perfil real para estas variables, representando de manera más fiel las variaciones horarias en el sistema, que son relevantes al momento de analizar cómo influye el clima en él.

Para la demanda de energía, se consideran los datos del consumo eléctrico real del año 2018, lo que se obtuvo

del Coordinador Eléctrico Nacional. Para la proyección se consideró el crecimiento anual regional obtenido del Informe Preliminar de Previsión de Demanda 2019-2039 de la CNE (Lorca *et al.*, 2020). Luego, esta información se llevó a nivel horario, con los perfiles para las semanas representativas según lo explicado anteriormente.

Con respecto a los resultados del modelo, estos quedaron a nivel de subestación²¹. Para poder conocer los valores a nivel comunal, se asignó un porcentaje de participación de la subestación en cada comuna, a partir de las demandas eléctricas comunales.

Finalmente, para la modelación de cada Cadena de Impacto, se consideró el resto de las variables como constantes. Por ejemplo, al modelar el impacto en la generación hidroeléctrica, la disponibilidad del recurso solar y eólico se mantuvieron según sus datos históricos, sin considerar los efectos del cambio climático. Esto se realizó con el objetivo de conocer el efecto de cada cadena en particular.

b. Cálculo de la Amenaza

La Amenaza se calculó a partir de las variables climáticas que impactan al sistema eléctrico. La Amenaza es particular para Cadena de Impacto, como se explica a continuación.

i. Disminución del recurso hídrico

Para esta Cadena de Impacto se consideró, como Amenaza, la disminución de generación de energía hidroeléctrica en el futuro con respecto al promedio histórico, debido a una disminución en los afluentes y como consecuencia en el nivel de agua embalsada de los principales sistemas hídricos con generación eléctrica (Lorca *et al.*, 2020).

Los datos utilizados como entrada para el modelo de las proyecciones de estos parámetros hidrológicos, fueron obtenidas del informe del grupo de trabajo de Recursos Hídricos **Informe Proyecto ARCLIM: Recursos Hídricos**.

¹⁹ Granularidad temporal diaria se refiere a que la resolución más pequeña de la información es a nivel de días.

²⁰ El "perfil" se refiere a la forma de la curva en el día (o semana), o a qué porcentaje del total está en cada hora.

²¹ Una subestación es un tipo de infraestructura eléctrica que eleva o disminuye el voltaje según las necesidades de transmisión.



(Vicuña, Bustos, Calvo, Tesen, Gironás, Suárez, 2020), el cual consideró los sistemas hídricos entre el río Aconcagua y el río Baker para el periodo 2030-2060. Luego, para la proyección al 2065, se utilizó una regresión lineal simple (Lorca *et al.*, 2020).

Este trabajo entrega los caudales mensuales de los afluentes, por lo que se tuvo que llevar a un perfil horario según la selección de un mes representativo para cada época del año (4 en total). Adicionalmente, entrega los factores de planta mensuales para las centrales de embalse. Con este dato es posible ingresar al modelo la cantidad máxima de agua a liberar, siendo la optimización la que indica si se descarga según el factor de planta o menos. Finalmente, el nivel de los afluentes depende de los parámetros climáticos como también de la operación de los embalses, ya que existen centrales de pasada aguas abajo de los embalses, lo cual también es representado en el modelo. De esta manera se conoce, para cada central hidroeléctrica del SEN, la variación porcentual en la generación con respecto al clima histórico. Este número se normaliza, por lo que el índice representa la variación relativa con respecto al total de las centrales analizadas. Así el índice se representa a nivel de unidad generadora y no comunal.

ii. Aumento de temperaturas

El aumento de las temperaturas impacta a las líneas de transmisión, ya que la temperatura afecta las propiedades físicas de los metales. Así, frente un aumento en la temperatura, las líneas se alargan, lo que a su vez hace que la cantidad de energía que puedan transportar sea menor. Técnicamente, la variable que se ve impactada es el límite térmico de las líneas, esto es, la corriente máxima que puede circular por un conductor eléctrico sin que este sobrepase una temperatura de operación dentro de los requerimientos de seguridad (Castellanos-Bustamante, 2014).

Así, se modela el flujo máximo de potencia, el cual depende de la corriente para todas las líneas de transmisión

incluidas, para las distintas temperaturas diarias pasadas y proyectadas por el proyecto a futuro y según los perfiles horarios de temperatura obtenidos de las semanas representativas. El dato del límite térmico de cada línea se obtiene de la página infotécnica de la CNE (Comisión Nacional De Energía, 2020a), presente entre los rangos de 0°C a 45°C y con una granularidad de 2,5°C, por lo que se interpola para las temperaturas que no estén dentro de estos segmentos (Lorca *et al.*, 2020).

De esta manera, se calcula la Amenaza como el aumento en la cantidad de días en que alguna de las líneas que conecta a la comuna alcanza una temperatura ambiente sobre los 30°C (Lorca *et al.*, 2020).

iii. Cambio en radiación solar

La radiación solar afecta directamente la generación eléctrica en las plantas fotovoltaicas, lo que se modeló con la siguiente ecuación²²:

$$P_{wt} = rad_{wt} * \eta_w * a_w$$

Ecuación 14. Generación eléctrica en plantas fotovoltaicas.

Donde p_{wt} es la potencia generada por la unidad w en el periodo t , η es la eficiencia de los paneles, rad_{wt} es la radiación solar en la unidad w en el periodo t , y a es el área total de paneles fotovoltaicos. Así, mientras mayor radiación, mayor es la potencia entregada por la planta, y viceversa.

Al igual que con el resto de las variables climáticas, para la radiación solar se tienen las proyecciones del periodo futuro con una granularidad diaria, por lo que se trabajó con semanas representativas seleccionadas de datos históricos (Lorca *et al.*, 2020). Con ello se obtuvo el perfil de generación horario para todas las centrales.

²² Adaptado de (Nguyen & Le, 2014).

La Amenaza entonces, se calculó como “el porcentaje de cambio en la capacidad de generación de las plantas solares debido a la radiación media recibida” (Lorca *et al.*, 2020). Adicionalmente, en el mapa se presenta un índice relativo, mostrando el porcentaje de cambio con respecto a todas las centrales solares del SEN. Así, el índice es a nivel de unidad generadora y no comunal.

iv. Variación de la velocidad media del viento

La velocidad del viento también afecta directamente la generación eléctrica en las plantas eólicas, pero con la diferencia de que se necesita una velocidad mínima para que las turbinas funcionen, sin sobrepasar tampoco una velocidad máxima. Además, solo generan el máximo posible (potencia nominal) cuando se alcanza una velocidad denominada rather speed (Lorca *et al.*, 2020).

Al igual que con el resto de las variables climáticas, para la velocidad del viento se tienen las proyecciones del periodo futuro con una granularidad diaria, por lo que se trabajó con semanas representativas seleccionadas de datos históricos (Lorca *et al.*, 2020). Con ello, se obtiene el perfil de generación horario para todas las centrales.

De esta manera, la Amenaza se calculó como “el porcentaje de cambio de capacidad de generación de las plantas eólicas debido a variaciones en la velocidad media de los vientos percibida por los aerogeneradores” (Lorca *et al.*, 2020). Adicionalmente, en el mapa se presenta un índice relativo, mostrando el porcentaje de cambio con respecto a todas las centrales eólicas del SEN. Así, el índice es a nivel de unidad generadora y no comunal.

c. Cálculo de la Exposición y capacidad adaptativa

La Exposición se relaciona con la concentración de demanda eléctrica por comuna: mientras más energía eléctrica se consume de la red, mayor será la Exposición de la zona a la Amenaza definida. Así, el índice se calculó con la demanda total anual de cada comuna, dividida por la demanda total anual del sistema eléctrico analizado (Lorca *et al.*, 2020). La demanda se obtuvo según lo explicado en la sección anterior, Modelo general.

Adicionalmente, la capacidad adaptativa para este sistema, se definió como la generación eléctrica descentralizada de sistemas PMGD y Net Billing, en conjunto con el proyecto “Techo Solar” del Ministerio de Energía. De esta manera, la Exposición, representada por la demanda eléctrica de la red, se modificó al restarle la energía generada localmente en cada comuna (Lorca *et al.*, 2020).

Cabe destacar que la capacidad adaptativa no se representa por sí sola en un mapa, sino que se incorpora dentro del mapa de Exposición.

d. Cálculo de la Sensibilidad

Para este sistema, la Sensibilidad se define igual para todas las Cadenas de Impacto, esto es, el cambio en el costo marginal promedio que perciben las comunas. Cabe destacar que, para el cálculo de la Sensibilidad en la Cadena de Impacto “aumento de temperatura sobre líneas de transmisión”, también se incorporó el efecto que tiene la temperatura sobre el cambio en la demanda eléctrica. Para explicar esta relación, se construyó una regresión lineal entre la temperatura y la demanda eléctrica históricas, que luego fue utilizada usando las temperaturas proyectadas por el proyecto para obtener el cambio en la demanda. Para la demanda eléctrica histórica fueron utilizados datos del 2018 del Coordinador Eléctrico Nacional (Coordinador Eléctrico Nacional, 2018) y de la Comisión Nacional de Energía (Comisión Nacional De Energía, 2018). La temperatura, para el año 2018, se obtuvo de la Dirección Meteorológica de Chile (Dirección Meteorológica de Chile, 2018). Finalmente cabe destacar que, este procedimiento se realizó para cada una de las subestaciones consideradas del sistema, sin considerar una tasa de aumento en el consumo de aire acondicionado u otro tipo de controlador de temperatura (Lorca *et al.*, 2020).

e. Cálculo del Riesgo

El Riesgo, para este sistema, se puede interpretar como la tendencia relativa de las comunas a registrar cambios sistemáticos en la red eléctrica en consecuencia del aumento de temperaturas percibida sobre las líneas de transmisión (Ministerio del Medio Ambiente, 2020). Este índice se



calcula con la multiplicación de los índices de Exposición y Sensibilidad. Finalmente, el índice se vuelve a relativizar entre todas las comunas, quedando el 1 para la comuna con el mayor Riesgo, y 0 para la comuna con Riesgo menor.

6.12.4 RESULTADOS

a. Resultados para Amenaza

Como ejemplo, en la **Figura 64** se muestra el mapa de la Amenaza para la Cadena “aumento de temperatura sobre líneas de transmisión para una zona de Chile”. Para esta Cadena destaca la comuna de Calama, con un índice valor 1, representando un aumento en la frecuencia de las olas de calor (días sobre 30°C) en un 51%. Pica, comuna vecina al norte, presenta un índice con valor 0,956, equivalente a un 48,7% de aumento en la frecuencia de olas de calor. Más al sur, destacan las comunas de la Región del Ñuble, con valores desde 0,328 para San Fabián (16,7% de aumento de olas de calor) y hasta 0,403 para las comunas de Cobquecura, Quirihue, Ninhue, y San Nicolás, representando un 20,5% de aumento en días con temperaturas sobre 30°C en las zonas donde pasan sus líneas de transmisión.

A su vez, en la **Figura 65** se muestran los resultados para la Cadena de Impacto “disminución del recurso hídrico”, la que tiene efecto desde la Región de O’Higgins hacia sur. La central El Toro, en la Región del Biobío, presenta el valor 1 en el índice, equivalente a una disminución promedio de un 30,5%, mientras que la central San Ignacio, en la Región del Maule, toma un valor de 0,994, representando una disminución de un 30,4%.

b. Resultados para Exposición

En la **Figura 66** se muestra el resultado del índice de Exposición, el cual es igual para todas las Cadenas de Impacto, ya que depende de la demanda de energía proyectada según lo explicado en la sección Modelo general. Destaca la comuna de Santiago, con valor 1, lo que implica que es la comuna que más demanda energía del SEN, y Las Condes, con 0,75. En el norte de Chile destaca la comuna de Antofagasta, con un índice de 0,43.

c. Resultados para Sensibilidad

La **Figura 67** muestra un ejemplo para los resultados del indicador de Sensibilidad para la Cadena de Impacto “aumento de temperaturas sobre líneas de transmisión”. Destaca un grupo de comunas de la provincia del Limarí, en la Región de Coquimbo, las cuales tienen un índice con valor 1, equivalente a un aumento en el costo marginal promedio de 35,5 USD/MWh. Estas comunas son: Ovalle, Río Hurtado, Monte Patria, Combarbalá y Punitaqui.

Adicionalmente, justo al norte de este grupo, las comunas de Coquimbo, Andacollo, Paiguano, Vicuña y La Serena presentan un índice con valor 0,64, lo que representa un aumento en 22,8 USD/MWh en promedio.

Finalmente, destacan las comunas de Constitución, Penco, San Rafael, Talca, Maule, San Javier y Empedrado, donde el índice toma un valor de -0,52, lo que implica una disminución en los costos marginales promedio en 18,3 USD/MWh. Estas se representan en el mapa en color amarillo.

d. Resultados para Riesgo

Finalmente, la **Figura 68** muestra un ejemplo para los resultados del índice de Riesgo para la Cadena “aumento de temperaturas sobre líneas de transmisión”. Destaca la comuna de Calama, con un valor del índice de 1, siendo la comuna con el Riesgo más alto del SEN, lo que se puede interpretar como la que sufrirá el mayor impacto combinado entre el aumento de los costos marginales y la cantidad de demanda de la comuna con respecto al resto de las comunas que consumen energía del SEN. En la zona norte también destaca la comuna de Iquique, con un Riesgo de 0,348. En la zona central destacan varias comunas de la Región Metropolitana, como Las Condes, Santiago, Maipú y Quilicura, con índices de Riesgo de valores 0,513, 0,69, 0,372 y 0,335, respectivamente.

Finalmente, las comunas de Talca, Penco, Maule, San Javier y Constitución presentan índices con valores negativos. Esto se debe a que verán una disminución de sus costos marginales por los cambios de temperatura, sufriendo una disminución del riesgo comunal.

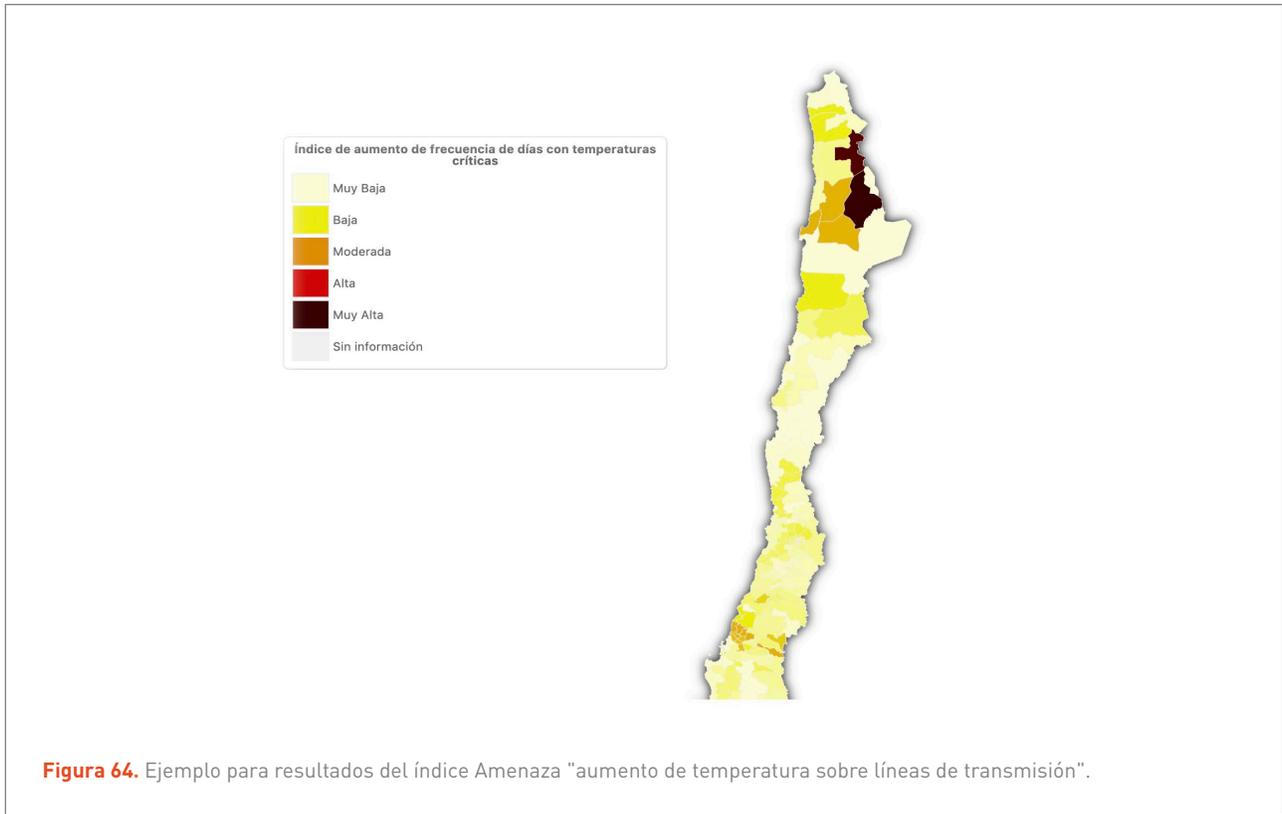


Figura 64. Ejemplo para resultados del índice Amenaza "aumento de temperatura sobre líneas de transmisión".

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

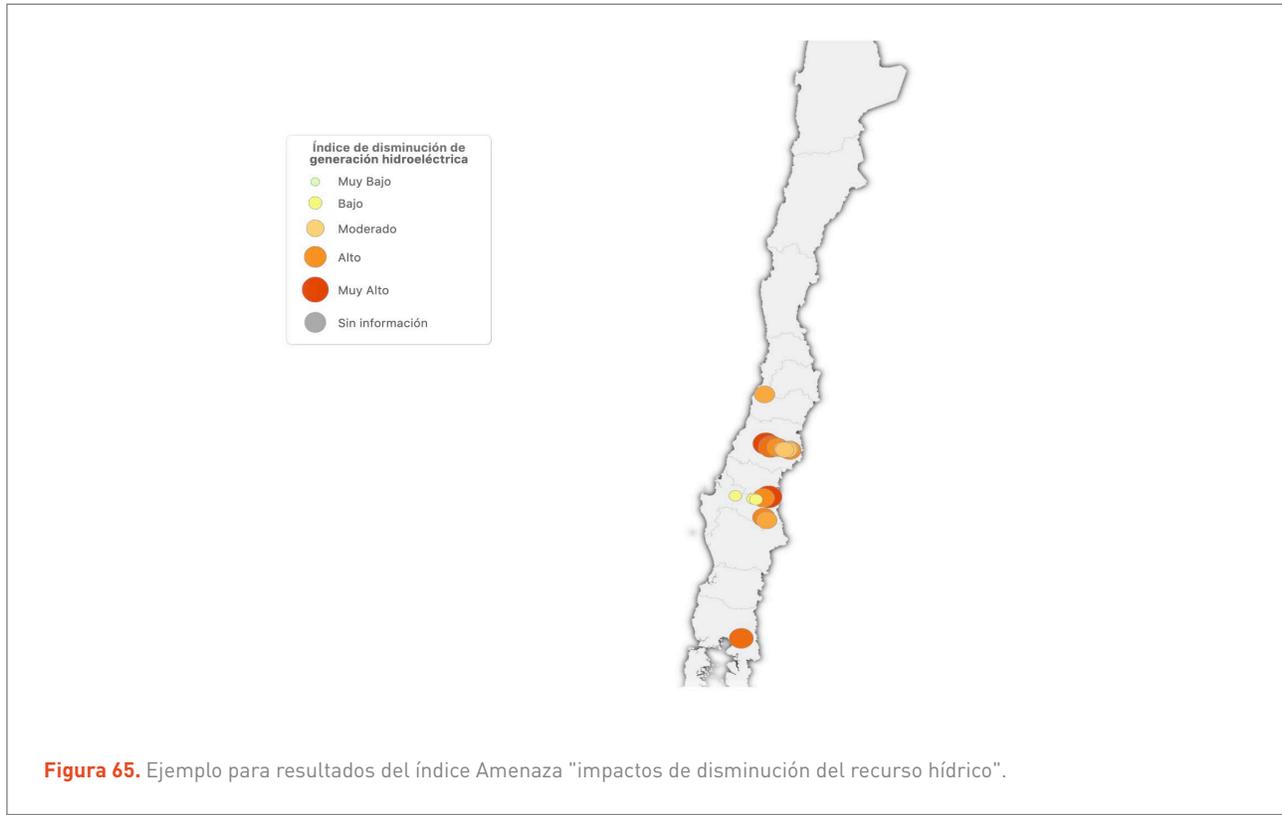


Figura 65. Ejemplo para resultados del índice Amenaza "impactos de disminución del recurso hídrico".

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

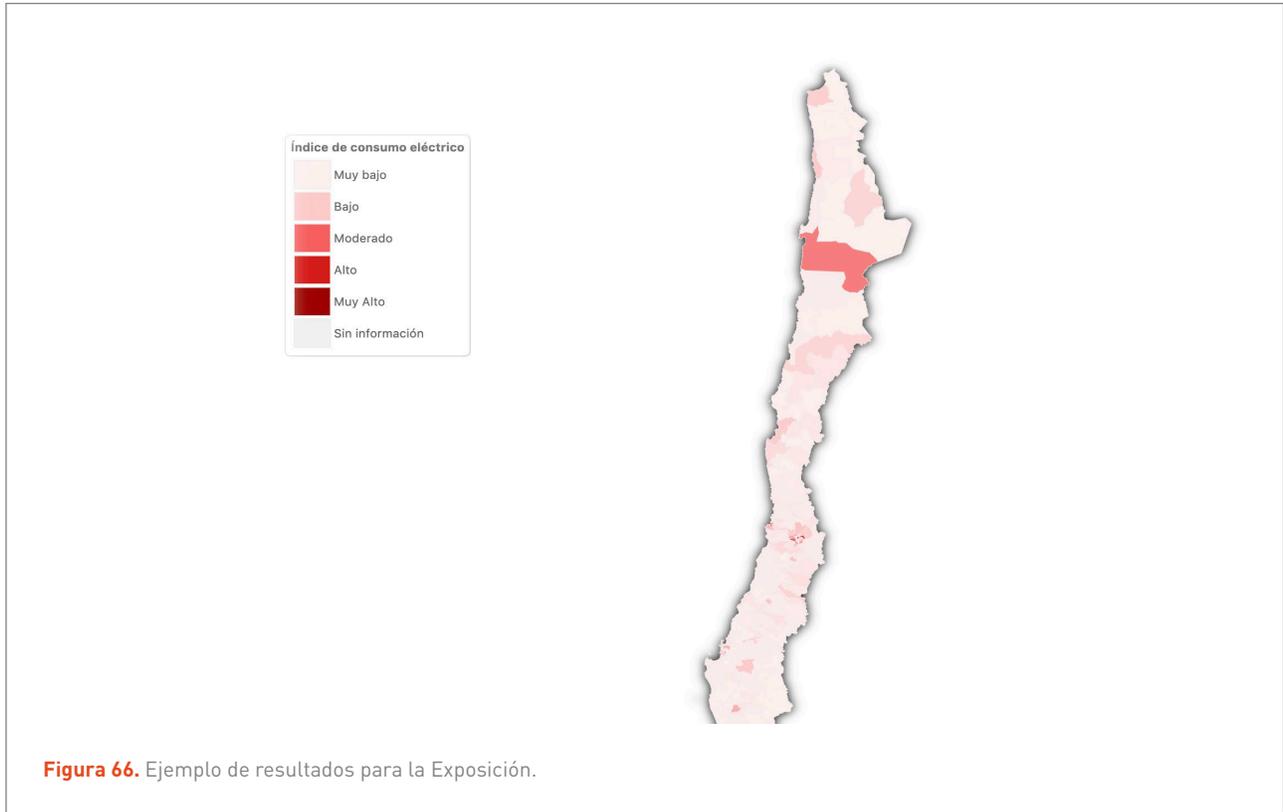


Figura 66. Ejemplo de resultados para la Exposición.

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

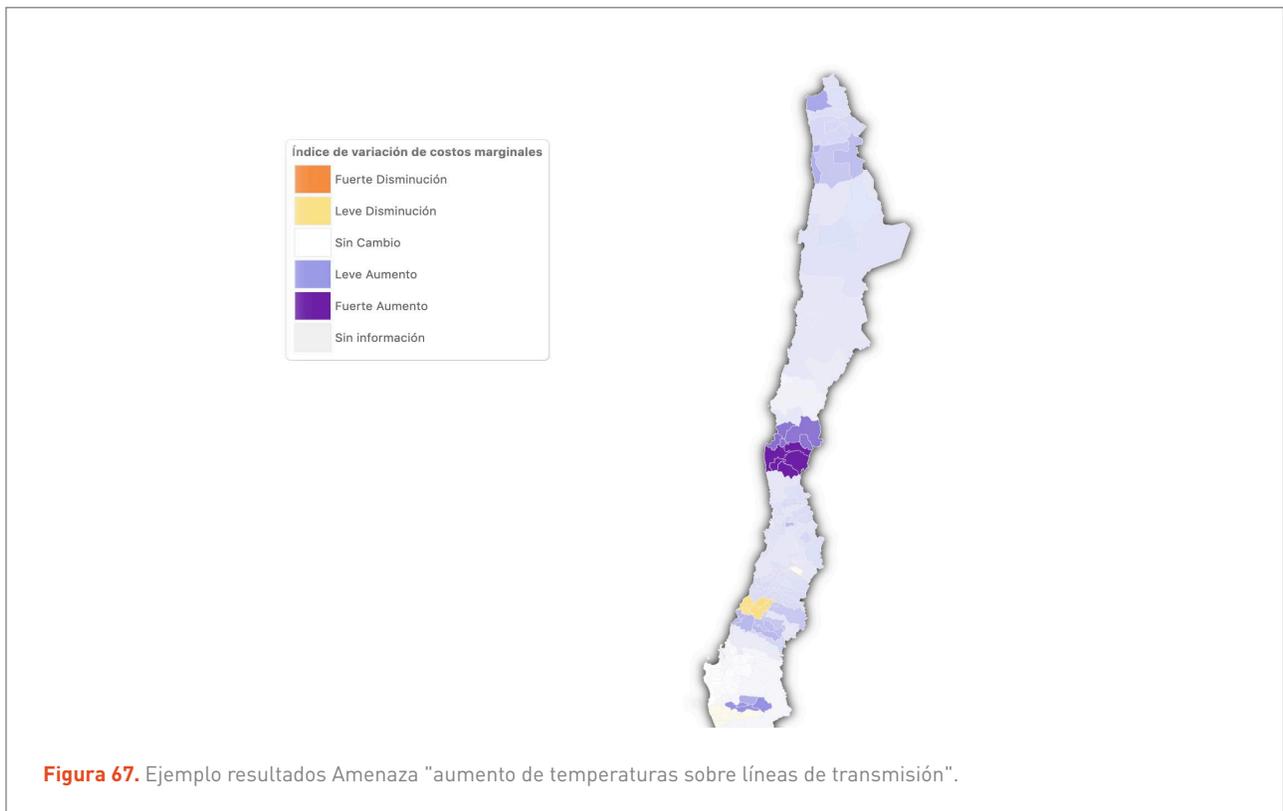
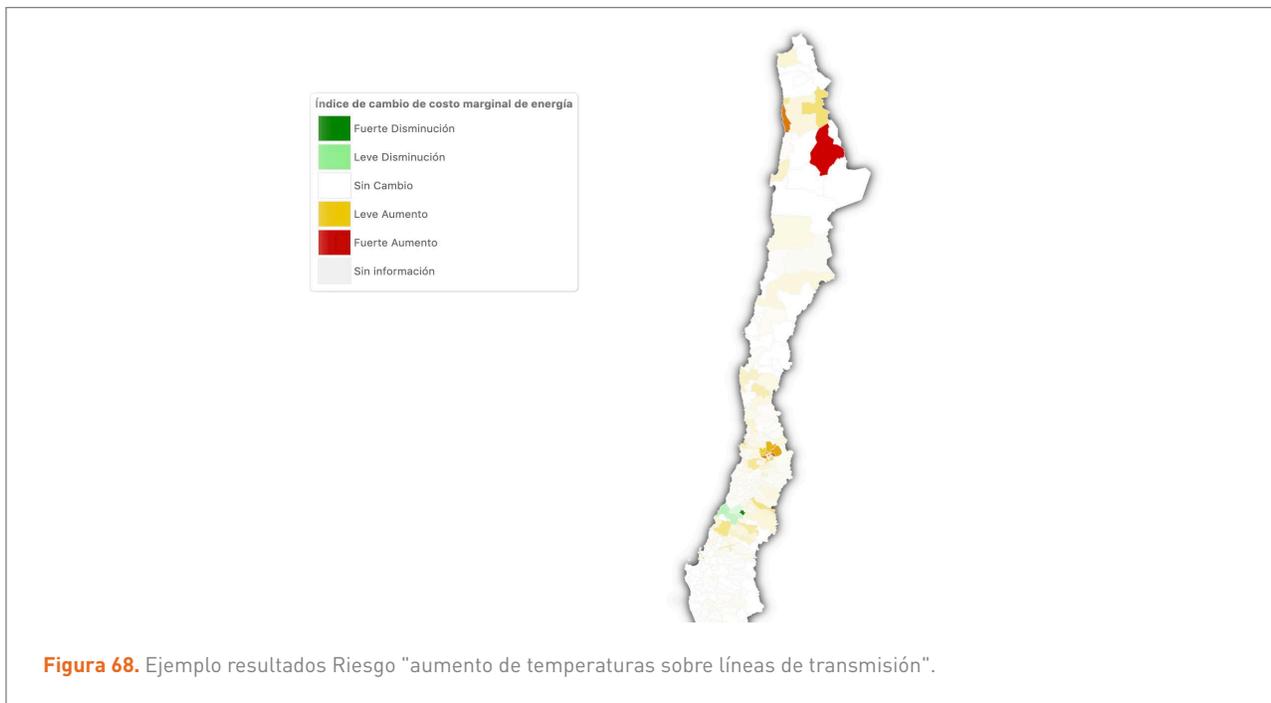


Figura 67. Ejemplo resultados Amenaza "aumento de temperaturas sobre líneas de transmisión".

Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).



Fuente: Plataforma ARCLim (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

6.12.5 CONCLUSIONES

El cambio climático puede tener diversos efectos en el SEN, tanto en el sistema de generación como en el de transmisión. La disminución del recurso hídrico tiene el mayor impacto sobre la red eléctrica, generando un aumento promedio en los costos marginales de un 25,6% (Lorca *et al.*, 2020). A su vez, las Cadenas de Impacto, tanto de cambio en la radiación solar como la disponibilidad del recurso eólico, muestran una disminución de los costos marginales promedio.

Los resultados de este sistema permiten tener una idea general de cómo afectaría el cambio climático a nivel comunal, por distintos factores. Sin embargo, se requiere un nivel de precisión mayor, a escala comunal, ya que el ejercicio de asignar consumo comunal a las distintas sub-estaciones no es tan preciso (Lorca *et al.*, 2020). Además, es importante considerar los impactos a nivel de distribución, lo que no fue parte de este análisis.

Adicionalmente, estos efectos son muy heterogéneos (Lorca *et al.*, 2020), tanto dentro de una misma Cadena de

Impacto a nivel geográfico, como entre distintas Cadenas de Impacto, lo que no permite obtener una conclusión general a nivel país del efecto del cambio climático sobre el sistema eléctrico. Así, por ejemplo, la disminución del recurso hídrico afecta principalmente a la zona centro y sur, sin tener una mayor relevancia en la zona norte. Por el contrario, el aumento de temperaturas aumenta el Riesgo en las comunas del norte y de la Región Metropolitana, sin afectar de manera importante al sur del país, incluso teniendo efectos positivos en algunas comunas de la Región del Maule.

A nivel de medidas de adaptación, se puede mitigar el efecto de las temperaturas en las líneas de transmisión, analizando aspectos constructivos de éstas y de las torres, como también construir líneas redundantes o soterrando segmentos (Lorca *et al.*, 2020). Finalmente, debido al impacto sobre la generación eléctrica, se espera complementar de mejor manera la generación renovable y el almacenamiento de energía, aumentando la flexibilidad del sistema.

Es recomendable, en el futuro, ampliar el análisis para sistemas medianos (Aysén y Magallanes) y zonas insulares.



7

SÍNTESIS DE DESAFÍOS

El trabajo realizado en este proyecto buscó generar una herramienta que consolidara el estado de arte de lo que es el análisis de Riesgos asociados al cambio climático, contando con la colaboración de 103 investigadores y 27 instituciones, utilizando una metodología y escenarios climáticos comunes. Pese a este esfuerzo, es posible identificar desafíos y oportunidades para continuar actualizando y robusteciendo la Plataforma ARCLim.

En primer lugar, existe la posibilidad de seguir extendiendo el análisis de nuevas Cadenas de Impacto. Producto de las características del cambio climático, es posible identificar decenas de Cadenas de Impacto adicionales. De hecho, muchos sistemas identificaron otros Riesgos climáticos pero no fue posible abordarlos en este ejercicio por falta de información, herramientas, tiempo y/o recursos. A modo de ejemplo, (Cifuentes *et al.*, 2020) describió 9 Cadenas de Impactos asociadas a salud que no se modelaron en este ejercicio. De igual manera, para el sistema agricultura, no fue posible la incorporación de eventos climáticos extremos (olas de calor, sequías, heladas e inundaciones), cambios de uso de suelo y deforestación y factores culturales en las proyecciones futuras (Meza *et al.*, 2020). Complementariamente, existen Cadenas de Impacto relacionadas entre sistemas, las que se pueden explorar ahora que se cuenta con un marco común de trabajo.

En segundo lugar, es necesaria una integración de los resultados de distintas Cadenas de Impacto para evaluar las interacciones de diferentes Amenazas climáticas de manera conjunta y el Riesgo agregado para sistemas y/o territorios específicos. Por ejemplo, falta una integración de los resultados de distintas Cadenas de Impacto para evaluar el Riesgo en asentamientos humanos en su conjunto a nivel nacional (Urquiza *et al.*, 2020), impidiendo la toma de decisiones desde una mirada sistémica y holística.

En tercer lugar, es relevante la generación y actualización continua de la información disponible para realizar análisis de Riesgo, siendo este un elemento transversal para todos los sistemas. Por ejemplo, se espera que un futuro exista un catastro de la red de colectores en todo el país, junto a un análisis de las áreas inundables de cada comuna o ciudad (Vargas *et al.*, 2020); o en las estimaciones de la Amenazas costeras donde no fue posible propagar el oleaje de aguas profundas a aguas someras en cada caleta, pues, para realizar este cálculo, se requieren batimetrías locales para cada caleta de pesca artesanal, además de estimar que los cálculos podrían tomar, por lo menos, 300 días de esfuerzo computacional (Winckler *et al.*, 2019).

En cuarto lugar, es posible mejorar los análisis y herramientas utilizadas. Esto puede ser mediante mejoras en



la precisión, resolución y análisis de las incertidumbres de las Cadenas de Impacto analizadas. Por ejemplo, se requiere un nivel de precisión mayor a escala comunal, ya que el ejercicio de asignar consumo comunal a las distintas subestaciones no es tan preciso. Además, es importante considerar los impactos a nivel de distribución, lo que no fue parte de este análisis. (Lorca *et al.*, 2020). Parte de las Cadenas de Impacto utilizó métodos cualitativos, por lo que no deben ser considerados como representaciones exactas de las condiciones de Riesgo y Vulnerabilidad climática en Chile, sino más bien un *proxy* (Urquiza *et al.*, 2020).

En quinto lugar, existe la posibilidad de incorporar la capacidad adaptativa como elemento de la Vulnerabilidad para algunas Cadenas de Impacto. Esto debe realizarse teniendo en cuenta la metodología utilizada en la evaluación actual de Riesgo, porque la incorporación de capacidad adaptativa debe ser consistente con el resto de los elementos de la Cadena de Impacto.

En sexto lugar, se requiere avanzar en la caracterización de las acciones de adaptación al cambio climático. El presente trabajo se enfocó principalmente en el impacto del cambio climático en ausencia de adaptación, sin embargo, evaluar la efectividad de medidas/acciones de adaptación para disminuir el Riesgo climático, resulta relevante para generar estrategias nacionales, territoriales y sectoriales de adaptación al cambio climático.

La caracterización de los Riesgos asociados al cambio climático es, sin lugar a dudas, un trabajo continuo, dado que existen múltiples Riesgos de distintas tipologías. La modelación de muchos de estos es altamente sofisticada, ya que la información disponible va evolucionando.

Estos aspectos hacen necesario mantener un trabajo constante en la actualización y robustecimiento de las herramientas.

8

CONCLUSIONES

El presente proyecto generó resultados que constituyen una mirada parcial de los Riesgos del cambio climático en distintos sectores, tanto productivos como de servicios o bienestar, que pretenden ser un insumo relevante para las capacidades nacionales, territoriales y sectoriales de adaptación al cambio climático, pero en ningún caso representan la evaluación final o completa de la Vulnerabilidad y del Riesgo climático del país.

Para el sistema **Agricultura**, es posible estimar el cambio en los rendimientos de diferentes subsistemas agrícolas, dado los modelos matemáticos y agronómicos. Los resultados obtenidos de este estudio varían entre un subsistema y otro. Para cultivos anuales, se estima que todos presentarán un nivel de Riesgo producto del cambio climático. En general, si el cultivo se produce bajo riego, el mayor Riesgo se ve en zonas costeras y del centro-norte del país, mientras que, si es en secano, el mayor Riesgo se encuentra en el sector cordillerano de la zona sur. Con respecto a las praderas y capacidad de carga animal, los resultados no muestran un Riesgo significativo en la productividad asociado al cambio climático. Para frutales, se estima que la tendencia posiciona la zona costera y la depresión intermedia como las áreas de mayor Riesgo entre las regiones de Coquimbo y el Biobío. Por otro lado, se estima un aumento en el rendimiento en la zona precordillerana desde la Región de La Araucanía hacia el sur (Meza *et al.*, 2020).

Para el sistema **Salud y Bienestar Humano**, el cambio climático ya está afectando significativamente nuestro país (CR², 2015), y se combina con condiciones de Vulnerabilidad socio-económicas preexistentes, tales como la pobreza, la desigualdad, y la segregación territorial. A esto se suman condiciones socio-ecológicas, como la contaminación, la degradación de ecosistemas, la sobreexplotación de recursos, etc. Además, la gradual intensificación de este fenómeno en el futuro, producirá consecuencias tanto en términos del agravamiento de los actuales Riesgos, como de la extensión de las zonas afectadas, fenómenos ante los cuales es preciso prepararse ahora (Urquiza *et al.*, 2020). Existe heterogeneidad en los resultados a nivel nacional, lo que resalta la importancia del análisis a nivel zonal. Por ejemplo, para la Cadena de Impacto “mortalidad prematura neta por cambio de temperatura”, se observa cómo en el norte del país hay una tendencia a contar con un mayor número de muertes causadas por el cambio climático durante todo el año, mientras que, en la zona centro y centro sur del país, se observa un efecto estacional, donde el aumento de las temperaturas en la temporada fría permitiría evitar una fracción de las muertes (Cifuentes *et al.*, 2020).

Para el sistema de **Bosques Nativos**, se observó que, entre las regiones de Los Lagos y Magallanes, se encuentra un régimen de Riesgo bajo en comparación a las otras zonas del país. Sin embargo, las zonas de los bosques nativos más expuestos a Riesgos climáticos son coincidentes con



aquellas que contienen bosques de mayor valor de conservación para el país, ubicados en la cordillera de la costa y en la depresión intermedia, entre la Región de Coquimbo y la Región de Los Lagos, y además se encuentran en áreas sensibles ante incendios forestales, pues coinciden con las áreas de mayor densidad demográfica (Miranda *et al.*, 2020).

Para el sistema **Acuicultura** se encuentran los niveles más altos de Amenazas sobre las pisciculturas que se encuentran en la Región de la Araucanía, cuyo origen radica en que el pronóstico de disminución de precipitaciones es mayor allí; y también en que la proporción de bosques forestales es baja. Las cuencas que conservan mejor su patrimonio natural poseen una mejor resiliencia para la producción de ovas y juveniles de salmón, elemento clave para la capacidad adaptativa del sector. Finalmente, para la producción de salmones en fase engorda y cosecha, se observó que las áreas de concesiones de salmicultura con mayor Riesgo de perder biomasa por incremento de parasitismo y/o incremento por floraciones algales nocivas (FAN), son aquellas ubicadas en la Región de Los Lagos. La miticultura, por otro lado, mostró los mayores Riesgos de perder la producción de semilla de mejillones en las comunas de Cochamó y Hualaihué. La engorda de mejillones, por su parte, mostró los mayores niveles de Riesgo en las comunas de Castro y Quellón, los que se encuentran influenciados principalmente por la alta concentración de producción y por la preexistencia de FAN. Por lo tanto, los niveles de Riesgo podrían reducirse si es que se repartiera la producción en forma más equitativa con otras comunas.

Para el sistema **Recursos Hídricos**, los resultados indican que la magnitud de eventos de precipitación extrema aumentará en el futuro, y que los sectores con mayor Riesgo serán aquellos que poseen una precaria o nula infraestructura capacitada para portear el agua a los cauces receptores o mitigar los efectos de una crecida. Es por esto que se recomienda fortalecer y mejorar las redes de recolección, conducción y restitución de aguas lluvias ya construidas en las ciudades, además de mejorar la inspección y mantenimiento de estas redes. En el caso de presentar desbordes de ríos, la ciudad se debe resguardar, implementando obras de defensa fluvial y diseñando infraestructura crítica para periodos de retorno altos, esto, junto con la evaluación de

planes reguladores con el fin de limitar cualquier edificación cercana a los ríos. De los resultados obtenidos en sequía hidrológica, a modo general, se observa que la zona centro-norte del país es la que presenta mayor Riesgo, en donde se proyecta un aumento de sequía, tanto en su frecuencia como en su severidad (Vargas *et al.*, 2020b).

Para el sistema **Minería**, se puede desprender que la Sensibilidad de las operaciones mineras está influenciada fuertemente por las condiciones locales y de operación de cada minera, de tal modo que el nivel de Sensibilidad dependerá de la infraestructura propia de la operación. La falta de preparación en la industria minera puede tener, como consecuencia, una disminución de la productividad y Riesgos en la salud, por lo que se requiere de mayor investigación para precisar las dinámicas a escalas espaciales menores, además del esfuerzo concertado y colaborativo entre la industria, las comunidades aledañas y otros sectores productivos (Rivera *et al.*, 2020).

Para el sistema **Turismo**, se ha observado una inmensa variedad de destinos y atractivos turísticos en Chile, donde cada uno de ellos se encuentra amenazado por diferentes potenciales impactos del cambio climático. Las consecuencias de un clima cambiante podrían significar una redistribución espacial y temporal de los visitantes, lo que conlleva impactos socioeconómicos que afectan principalmente a los trabajadores, empresas e ingresos del sector turismo. Sin embargo, la mayoría de los cálculos realizados, como las contribuciones de diferentes atractivos turísticos, utilizaron información en base a supuestos gruesos, relativos a su relación con los elementos analizados (Gibbs & Meza, 2020; Winckler *et al.*, 2020).

Para el sistema de **Pesca Costera**, los resultados muestran que las Amenazas poseen una distribución espacial en forma de gradiente, que aumenta de norte a sur, y que es modulada principalmente por los cambios de precipitación que ocurrirán en un futuro. La Exposición, por su parte, posee un gradiente espacial opuesto al de la Amenaza, con valores máximos en la zona norte del país. La Sensibilidad mostró valores relativamente homogéneos, aunque con algunos máximos en las regiones de Los Ríos y Los Lagos, en el sur de Chile. El patrón de Riesgo posee una distribución espa-

cial que se encuentra influenciada, principalmente, por el aporte de algas al desembarque en el índice de Exposición, y por algunos valores altos de Amenaza en la zona de la Región de Los Ríos. Las caletas del Norte Grande (Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta) y Norte Chico (Atacama-Coquimbo) presentan mayores Riesgos. Dentro de las caletas con Riesgo sobre 0,25, 10 pertenecen a Los Lagos y 5 caletas a la Región de Los Ríos (Cubillos *et al.*, 2020).

Para el sistema **Biodiversidad**, la zona centro sur de Chile continental se identifica como la zona con un mayor Riesgo al cambio climático, el cual se interpreta como una menor capacidad de las especies de flora y fauna para persistir en las zonas de su actual distribución. Así, las especies que actualmente se encuentran en la zona centro sur serían las más afectadas negativamente por el cambio climático (Plissock & Uribe, 2020).

Para el sistema de **Plantaciones Forestales**, respecto a los efectos directos del cambio climático y en base a la evidencia actual, no se observa un efecto de los cambios de temperatura y precipitación en la productividad fotosintética de las plantaciones forestales de las últimas décadas. Sin embargo, de mantenerse las condiciones actuales en relación a las tendencias de precipitación y temperatura, las plantaciones forestales podrían sufrir consecuencias a futuro. (Miranda *et al.*, 2020).

Para el sistema **Infraestructura Costera**, las Amenazas de ambas Cadenas de Impacto provienen del cese de sus actividades por presencia de marejadas o *downtime*. Los resultados de la Amenaza son más concluyentes sobre las caletas pesqueras que sobre los puertos, pues estos últimos poseen poca densidad de puntos sobre la misma área de estudio (costas de Chile), por lo cual, es difícil elaborar conclusiones generales en los puertos como se hace con las caletas de pesca artesanal. Sin perjuicio de lo anterior, la Amenaza sobre las caletas de pesca artesanal es mayor en el centro y norte del país, mientras que los puertos tienen su máximo Riesgo en el puerto de San Antonio. La Sensibilidad, en ambas Cadenas de Impacto, se observa relativamente homogénea a lo largo de la línea costera del país. Por su parte, el Riesgo de las caletas de pesca artesanal es mayor en la zona centro y norte del país, por influencia de la

Amenaza en el cálculo, y en los puertos los resultados son diferentes para cada caso, sin mostrar un patrón espacial por la poca cantidad de puntos considerados (Winckler *et al.*, 2019).

Para el sistema **Energía Eléctrica**, el cambio climático puede tener diversos efectos en el Sistema Eléctrico Nacional, tanto en el sistema de generación como en el de transmisión. La disminución del recurso hídrico tiene el mayor impacto sobre la red eléctrica, generando un aumento promedio en los costos marginales de un 25,6%. A su vez, las Cadenas de Impacto, tanto de cambio en la radiación solar, como la disponibilidad del recurso eólico, muestran una disminución de los costos marginales promedio. Adicionalmente, estos efectos son muy heterogéneos (Lorca *et al.*, 2020), dentro de una misma Cadena de Impacto a nivel geográfico y entre distintas Cadenas de Impacto, lo que no permite obtener una conclusión general a nivel país del efecto del cambio climático sobre el sistema eléctrico. Así, por ejemplo, la disminución del recurso hídrico afecta principalmente a la zona centro y sur, sin tener una mayor relevancia en la zona norte. Por el contrario, el aumento de temperaturas aumenta el Riesgo en las comunas del norte y de la Región Metropolitana, sin afectar de manera importante al sur del país, incluso teniendo efectos positivos en algunas comunas de la Región del Maule. A nivel de medidas de adaptación, se puede mitigar el efecto de las temperaturas en las líneas, analizando aspectos constructivos de éstas y de las torres, como también construir líneas redundantes o soterrando segmentos. Finalmente, debido al impacto sobre la generación eléctrica, como estrategia se espera complementar de mejor manera la generación renovable y el almacenamiento de energía, aumentando la flexibilidad del sistema (Lorca *et al.*, 2020).

Como se mencionaba en la sección anterior, existen múltiples desafíos en materia de caracterización de los Riesgos climáticos para Chile, pero sin duda la Plataforma ARCLIM representa un hito significativo para mejorar la comprensión de los desafíos del cambio climático y facilita la construcción de estrategias de adaptación, a escala nacional, regional, comunal y sectorial.



9

REFERENCIAS

AGRIMED. (2008). *Análisis de la vulnerabilidad del sector agropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile, frente a escenarios de cambio climático*. Universidad de Chile, CONAMA.

AGRIMED. (2017). *Portafolio de medidas de adaptación al cambio climático*. [http://www.fondefriesgos.agrimed.cl/contenido.asp?id=6&Titulo=Componente Adaptaci%F3n](http://www.fondefriesgos.agrimed.cl/contenido.asp?id=6&Titulo=Componente%20Adaptaci%F3n)

Aguayo, R., León-Muñoz, J., Vargas-Baecheler, J., Montecinos, A., Garreaud, R., Urbina, M., Soto, D., & Iriarte, J. L. (2019). *The glass half-empty: climate change drives lower freshwater input in the coastal system of the Chilean Northern Patagonia*. *Climatic Change*, 155(3), 417–435. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02495-6>

Andueza, I., Miranda, A., Carrasco, J., González, M., Mentler, R., Moletto, Í., Altamirano, A., & Lara, A. (2020). *Informe Proyecto ARCLim: Capacidad Adaptativa de Bosques Nativos y Plantaciones Forestales*. 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 Internati.

Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413–421. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>

Castellanos-Bustamante, R. (2014). Determinación de límites de transmisión en sistemas eléctricos de potencia. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 15(2), 271–286. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1405-77432014000200010&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Castellaro, G., Morales, L., Ahumada, M., & Barozzi, A. (2010). Simulation of Dry Matter Productivity and Water Dynamics in a Chilean Patagonian Range. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 70(3). <https://doi.org/10.4067/S0718-58392010000300009>



- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. (2015). *Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. <http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf>
- Cifuentes, L. A., Quiroga, D., Valdes, J., & Cabrera, C. (2020). *Informe Proyecto ARCLim: Salud*. Centro de Cambio Global UC y DICTUC/Greenlab 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 Internati.
- Comisión Nacional De Energía. (2018). *Retiros de Energía de Clientes Libres · Comisión Nacional de Energía*. <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/257032/retiros-de-energia-de-clientes-libres/>
- Comisión Nacional De Energía. (2019). *Geo Portal CNE*. <http://energiamaps.cne.cl/>
- Comisión Nacional De Energía. (2020a). CEN- Infotecnica. <https://infotecnica.coordinador.cl/>
- Comisión Nacional De Energía. (2020b). *Reporte Energético Financiero*. https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2020/05/RT_Financiero_v20201T.pdf
- CONAF. (2011). *Catastro de los recursos vegetacionales nativos de Chile: Monitoreo de cambios y actualizaciones período 1997 - 2011*.
- CONAF. (2018). *Catastro Vegetacional*. <https://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/catastro-vegetacional/>
- CONAF. (2020). *Catastro Vegetacional*. <https://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/catastro-vegetacional/>
- Coordinador Eléctrico Nacional. (2018). *Demanda Real | Coordinador Eléctrico Nacional*. <https://www.coordinador.cl/operacion/graficos/operacion-real/demanda-real/>
- Cubillos, L., Soto, D., Hernández, A., & Norambuena, R. (2020). *Informe Proyecto ARCLim: Pesca Costera*. COPAS Sur-Austral, Universidad de Concepción e INCAR 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 Gesellscha.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>
- Déqué, M., Rowell, D. P., Lüthi, D., Giorgi, F., Christensen, J. H., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., de Castro, M., & van den Hurk, B. (2007). An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, 81(S1), 53–70. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9228-x>
- Deuman. (2018). *Diagnóstico de la vulnerabilidad de las obras del MOP y medidas de adaptación al cambio climático*. Ministerio de Obras Públicas. http://www.dgop.cl/centro_documental/Documents/VulnerabilidadObrasMOPyMedidasdeAdaptacionalCCMOP.pdf
- Dirección Meteorológica de Chile. (2018). *Datos, totales y promedios para la estación*. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/index/productos/RE3008>
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J. H., Willett, K. M., Aguilar, E., Brunet, M., Caesar, J., Hewitson, B., Jack, C., Klein Tank, A. M. G., Kruger, A. C., Marengo, J., Peterson, T. C., Renom, M., Oria Rojas, C., Rusticucci, M., ... Kitching, S. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(5), 2098–2118. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50150>
- Elith, J., Leathwick, J. R., & Hastie, T. (2008). A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, 77(4), 802–813. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2008.01390.x>



- Esri. (2016). *ArcGIS (Versión 10.5)*.
- FAO. (2020). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020*. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>
- Gallagher, R. V., Allen, S., & Wright, I. J. (2019). Safety margins and adaptive capacity of vegetation to climate change. *Scientific Reports*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44483-x>
- Ganteaume, A., & Syphard, A. D. (2018). Ignition Sources. In Ganteaume, A. and Syphard, A. D.: *Ignition Sources, in Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, edited by S. L. Manzello, (pp. 1–17). Springer International Publishing, Cham.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Gibbs, M., & Meza, R. (2020). *Informe Proyecto ARCLim: Turismo. AKUTERRA 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)*.
- GIZ, & EURAC. (2017). *Risk Supplement to the Vulnerability Sourcebook. Guidance on how to apply the Vulnerability Sourcebook's approach with the new IPCC AR5 concept of climate risk*. Bonn: GIZ.
- Gobierno de Chile. (2020). *Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile. Actualización 2020*.
- Gómez-González, S., González, M. E., Paula, S., Díaz-Hormazábal, I., Lara, A., & Delgado-Baquerizo, M. (2019). Temperature and agriculture are largely associated with fire activity in Central Chile across different temporal periods. *Forest Ecology and Management*, 433, 535–543. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.041>
- González, M. E., Gómez-González, S., Lara, A., Garreaud, R., & Díaz-Hormazábal, I. (2018). The 2010–2015 Megadrought and its influence on the fire regime in central and south-central Chile. *Ecosphere*, 9(8), e02300. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2300>
- González, M. E., Muñoz, A. A., González-Reyes, Á., Christie, D. A., & Sibold, J. (2020). Fire history in Andean Araucaria–Nothofagus forests: coupled influences of past human land-use and climate on fire regimes in north-west Patagonia. *International Journal of Wildland Fire*, 29(8), 649. <https://doi.org/10.1071/WF19174>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Harbaugh, A., Banta, E., Hill, M., & McDonald, M. (2000). MODFLOW-2000, The US Geological Survey Modular Ground-Water Model-User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. In Open-file Report 00-92. wipp.energy.gov.
- Heilmayr, R., Echeverría, C., Fuentes, R., & Lambin, E. (2016). A plantation-dominated forest transition in Chile. *Applied Geography*, 75, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.07.014>
- Henríquez, C., Quense, J., Contreras, P., Guerrero, N., Smith, P., & González, F. (2020). *Informe Proyecto ARCLim: Ciudades. Centro de Cambio Global UC, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y CEDEUS coordinado por Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y Centro*



- de Cambio Global UC para el Ministerio del Medio Ambiente.
- INE. (2018). *Censo de Población y Vivienda 2017*. Instituto Nacional de Estadísticas.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White [eds.]). Cambridge University Press.
- IPCC. (2018). *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*.
- Karl, T. R., Nicholls, N., & Ghazi, A. (1999). CLIVAR/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary. In *Weather and Climate Extremes* (pp. 3–7). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9265-9_2
- Lara, A., Urrutia-Jalabert, R., Reyes, R., González, M. E., Miranda, M., Altamirano, A., & Zamorano-Elgueta, C. (2019). Bosques Nativos. En: Informe País, Estado del Medio Ambiente en Chile. In *Instituto de Asuntos Públicos. Centro de Análisis de Políticas Públicas. Universidad de Chile. Santiago, Chile*. <http://www.inap.uchile.cl/publicaciones/159662/informe-pais-estado-del-medio-ambiente-en-chile-2018,2019>. <http://www.inap.uchile.cl/publicaciones/159662/informe-pais-estado-del-medio-ambiente-en-chile-2018,2019>.
- León-Muñoz, J., Urbina, M. A., Garreaud, R., & Iriarte, J. L. (2018). Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). *Scientific Reports*, 8(1), 1330. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19461-4>
- Lewis, S. L., Wheeler, C. E., Mitchard, E. T. A., & Koch, A. (2019). Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon. *Nature*, 568(7750), 25–28. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-01026-8>
- Lorca, Á., Sauma, E., & Tapia, T. (2020). *Informe Proyecto ARCLim: Sistema Eléctrico. Centro Energía UC y Centro de Cambio Global UC 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*.
- Luebert, F., & Plischoff, P. (2006). *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*. Editorial universitaria.
- Maraun, D. (2016). Bias Correcting Climate Change Simulations - a Critical Review. *Current Climate Change Reports*, 2(4), 211–220. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0050-x>
- Martínez, C., Contreras-López, M., Winckler, P., Hidalgo, H., Godoy, E., & Agredano, R. (2018). Coastal erosion in central Chile: A new hazard? *Ocean & Coastal Management*, 156, 141–155. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.07.011>
- McWethy, D. B., Pauchard, A., García, R. A., Holz, A., González, M. E., Veblen, T. T., Stahl, J., & Currey, B. (2018). Landscape drivers of recent fire activity (2001–2017) in south-central Chile. *PLOS ONE*, 13(8), e0201195. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201195>
- Mena, R., Escobar, R., Lorca, Á., Negrete-Pincetic, M., & Olivares, D. (2019). The impact of concentrated solar power in electric power systems: A Chilean case study. *Applied Energy*, 235, 258–283. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.088>
- Meza, F., Morales, D., González, D., Duarte, K., Jara, V., & Saldaña, P. (2020). *Informe Proyecto ARCLim: Agricultura. Centro de Cambio Global UC 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 Zusamm.*
- Ministerio de Agricultura, & Ministerio del Medio Ambiente. (2013). *Plan de Adaptación al Cambio Climático Sector Silvoagropecuario*. Gobierno de Chile. https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2015/02/Plan_Adaptacion_CC_S_Silvoagropecuario.pdf
- Ministerio de Economía Fomento y Turismo, & Ministerio del Medio Ambiente. (2015). *Plan de Adaptación al Cambio Climático para Pesca y Acuicultura*. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2016/12/Plan-Pesca-y-Acuicultura-CMS.pdf>
- Ministerio de Obras Públicas, & Ministerio del Medio Ambiente. (2017). *Plan de adaptación y mitigación de los servicios de infraestructura al cambio climático 2017-2022*. Gobierno de Chile.
- Ministerio de Salud, & Ministerio del Medio Ambiente. (2016). *Plan de Adaptación al Cambio Climático Sector Salud*.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2014). *Plan de Adaptación al Cambio Climático Sector Biodiversidad*. <http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/PDF008.pdf>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2019). *Plan de Adaptación al Cambio Climático del sector Turismo en Chile*.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2020). *Proyecto ARCLim*. arclim.mma.gob.cl
- Ministerio del Medio Ambiente, & Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2018). *Plan de Adaptación al Cambio Climático para Ciudades 2018-2022*.
- Miranda, A., Altamirano, A., Cayuela, L., Lara, A., & González, M. (2017). Native forest loss in the Chilean biodiversity hotspot: revealing the evidence. *Regional Environmental Change*, 17(1), 285–297. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-1010-7>
- Miranda, A., Carrasco, J., González, M., Mentler, R., Moletto, Í., Altamirano, A., & Lara, A. (2020). *Informe Proyecto ARCLim: Bosques Nativos y Plantaciones Forestales*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Universidad de La Frontera, Instituto de Sistemas Complejos de Ingeniería, Universidad de Chile y Universidad Austral de Chile.
- MMA. (2016). *Tercera Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*.
- Molina, A., Falvey, M., & Rondanelli, R. (2017). A solar radiation database for Chile. *Scientific Reports*, 7(1), 14823. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13761-x>
- Molinet, C., Díaz, M., Marín, S. L., Astorga, M. P., Ojeda, M., Cares, L., & Asencio, E. (2017). Relation of mussel spatfall on natural and artificial substrates: Analysis of ecological implications ensuring long-term success and sustainability for mussel farming. *Aquaculture*, 467, 211–218. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.019>
- Moreira, F. S., Ohishi, T., & da Silva Filho, J. I. (2006). *Influence of the thermal limits of transmission lines in the economic dispatch*. 6 pp.-. <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1709590>
- Muñoz, R. C., Falvey, M. J., Arancibia, M., Astudillo, V. I., Elgueta, J., Ibarra, M., Santana, C., & Vásquez, C. (2018). Wind Energy Exploration over the Atacama Desert: A Numerical Model-Guided Observational Program. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(10), 2079–2092. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0019.1>
- Nguyen, D. T., & Le, L. B. (2014). Optimal Bidding Strategy for Microgrids Considering Renewable Energy and Building Thermal Dynamics. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(4), 1608–1620. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2313612>
- Oficina de Cambio Climático, M. del M. A. (2014). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático [Climate Change Adaptation National Plan]*. 56.



- Oficina de Cambio Climático, & Ministerio del Medio Ambiente. (2014). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático Chile* [pp. 1–55].
- Olden, J. D., Lawler, J. J., & Poff, N. L. (2008). Machine Learning Methods Without Tears: A Primer for Ecologists. *The Quarterly Review of Biology*, 83(2), 171–193. <https://doi.org/10.1086/587826>
- Panofsky, H. A., & Brier, G. W. (1968). Some Applications of Statistics to Meteorology. *Earth and Mineral Sciences Continuing Education, College of Earth and Mineral Sciences*.
- Park, J., & Kim, J. (2018). Defining heatwave thresholds using an inductive machine learning approach. *PLOS ONE*, 13(11), e0206872. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206872>
- Patel, D., Jian, L., Xiao, J., Jansz, J., Yun, G., & Robertson, A. (2019). Joint effect of heatwaves and air quality on emergency department attendances for vulnerable population in Perth, Western Australia, 2006 to 2015. *Environmental Research*, 174, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.04.013>
- Pecl, G. T., Araújo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C., Chen, I. C., Clark, T. D., Colwell, R. K., Danielsen, F., Evengård, B., Falconi, L., Ferrier, S., Frusher, S., Garcia, R. A., Griffis, R. B., Hobday, A. J., Janion-Scheepers, C., Jarzyna, M. A., Jennings, S., ... Williams, S. E. (2017). Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. In *Science* (Vol. 355, Issue 6332). American Association for the Advancement of Science. <https://doi.org/10.1126/science.aai9214>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Pliscoff, P. (2015). *Aplicación de los criterios de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) para la evaluación de riesgo de los ecosistemas terrestres de Chile*.
- Pliscoff, P., & Uribe, D. (2020). *Informe Proyecto ARCLim: Biodiversidad. Centro de Cambio Global UC 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 Zusa*.
- Quiñones, R., Salgado, H., Montecinos, A., Dresdner, J., & Manuela Venegas, M. (2013). Evaluación de potenciales impactos y reducción de la vulnerabilidad de la pesca al cambio climático El caso de las pesquerías principales de la zona centro-sur de Chile. En: *Cambio climático, pesca y acuicultura en américa latina (LA): Potenciales impactos y desafíos para la adaptación. In Actas de Pesca y Acuicultura. No. 29. Roma, FAO.* [pp. 355–355].
- Ramamurthy, P., González, J., Ortiz, L., Arend, M., & Moshary, F. (2017). Impact of heatwave on a megacity: An observational analysis of New York City during July 2016. *Environmental Research Letters*, 12(5), 054011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6e59>
- Rivera, D., Pagliero, L., McIntyre, N., Aitken, D., & Godoy, A. (2020). *Informe Proyecto ARCLim: Minería. Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería de la Universidad del Desarrollo, Centre for Water in the Minerals Industry, Sustainable Minerals Institute de la University of Queensland, Sustainable Minerals*.
- Román-Palacios, C., & Román-Valencia, C. (2015). Hábitos tróficos de dos especies sintópicas de carácidos en una quebrada de alta montaña en los Andes colombianos. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 86(3), 782–788. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2015.06.009>
- Salas, C., Donoso, P. J., Vargas, R., Arriagada, C. A., Pedraza, R., & Soto, D. P. (2016). The Forest Sector in Chile: An Overview and Current Challenges. *Journal of Forestry*, 114(5), 562–571. <https://doi.org/10.5849/jof.14-062>



- Santibáñez, F. (2017). El cambio climático y los recursos hídricos de Chile. In *AGRICULTURA CHILENA: Reflexiones y Desafíos al 2030* (pp. 147–178).
- Schröter, D., Cramer, W., Leemans, R., Prentice, I. C., Araújo, M. B., Arnell, N. W., Bondeau, A., Bugmann, H., Carter, T. R., Gracia, C. A., De La Vega-Leinert, A. C., Erhard, M., Ewert, F., Glendining, M., House, J. I., Kankaanpää, S., Klein, R. J. T., Lavorel, S., Lindner, M., ... Zierl, B. (2005). Ecology: Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*, 310(5752), 1333–1337. <https://doi.org/10.1126/science.1115233>
- SERNAGEOMIN. (2020). *Anuario de la Minería de Chile 2019*. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- SERNATUR. (2016). *Informe De Gestión 2016*.
- Smith, K. R., Woodward, A., Campbell-Lendrum, D., Chaddoe, D. D., Honda, Y., Liu, Q., Olwoch, J. M., Revich, B., & Sauerborn, R. (2014). Human Health: Impacts, Adaptation, and Co-Benefits. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 709–754).
- Soto, D., León-Muñoz, J., Molinet, C., Soria-Galvarro, Y., Videla, J., Opazo, D., Díaz, P., Tapia, F., & Segura, C. (2020). *Informe Proyecto ARCLim: Acuicultura. INCAR, Universidad de Concepción, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Universidad Austral de Chile, INFOP, Universidad de Los Lagos, e INTEMIT coordinado por Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia*.
- Soto, Doris, León-Muñoz, J., Dresdner, J., Luengo, C., Tapia, F. J., & Garreaud, R. (2019). Salmon farming vulnerability to climate change in southern Chile: understanding the biophysical, socioeconomic and governance links. *Reviews in Aquaculture*, 11(2), 354–374. <https://doi.org/10.1111/raq.12336>
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Alexander, L. V., Allen, S. K., Bindoff, N. L., Bréon, F.-M., Church, J. A., Cubasch, U., Emori, S., Forster, P., Friedlingstein, P., Gillett, N., Gregory, J. M., Hartmann, D. L., Jansen, E., Kirtman, B., Knutti, R., Kumar, K. K., ... Xie, S.-P. (2013). Technical Summary. In Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.), *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (pp. 31–116). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.005>
- Stöckle, C., Nelson, R., & Kemanian, A. (2003). *CropSyst (Version 4.14.10)*. <http://modeling.bsyse.wsu.edu/rnelson/registration/cropsyst.htm>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. a. (2009). A Summary of the CMIP5 Experiment Design. *World*, 1–33. http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/Taylor_CMIP5_design.pdf
- Thiemeßl, M. J., Gobiet, A., & Heinrich, G. (2012). Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*, 112(2), 449–468. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0224-4>
- Urquiza, A., Billi, M., Calvo, R., Amigo, A., Navea, J., Monsalve, T., Álamos, N., Neira, C., Rauld, J., Allendes, Á., Arrieta, D., Barrera, V., Basoalto, J., Cárdenas, M., Contreras, M., Fleischmann, M., Horta, D., Labraña, J., Larragubel, C., ... Winckler, P. (2020). *Informe Proyecto ARCLim: Asentamientos Humanos. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Red de Pobreza Energética, Iniciativa ENEAS: Energía, Agua y Sustentabilidad y Núcleo de Estudios Sistémicos Transdisciplinarios*.
- Van Wagendonk, J. W. (2006). Fire as a physical process. Fire in California's Ecosystems. University of California Press, Berkeley, USA, 38–57.



- Vargas, X., Ricchetti, F., Jerez, C., & Mendoza, P. (2020a). *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 Deuts.*
- Vargas, X., Ricchetti, F., Jerez, C., & Mendoza, P. (2020b). *Informe Proyecto ARCLim: Hidrología.*
- Verástegui, F., Lorca, Á., Olivares, D. E., Negrete-Pincetic, M., & Gazmuri, P. (2019). An Adaptive Robust Optimization Model for Power Systems Planning With Operational Uncertainty. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(6), 4606–4616. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2917854>
- Vicuña, S., Bustos, E., Calvo, C., Tesen, K., Gironás, J., & Suárez, F. (2020). *Informe Proyecto ARCLim: Recursos Hídricos. Centro de Cambio Global UC 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.*
- Viña, A., McConnell, W. J., Yang, H., Xu, Z., & Liu, J. (2016). Effects of conservation policy on China's forest recovery. *Science Advances*, 2(3), e1500965. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500965>
- Wall, E., & Smit, B. (2005). Climate Change Adaptation in Light of Sustainable Agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 27(1), 113–123. https://doi.org/10.1300/J064v27n01_07
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., Fromentin, J. M., Hoegh-Guldberg, O., & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. In *Nature* (Vol. 416, Issue 6879, pp. 389–395). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/416389a>
- Winckler, P., Contreras- López, M., Vicuña, S., Larraguibel, C., Mora, J., Esparza, C., Salcedo, J., Gelcich, S., Fariña, J. M., Martínez, C., Agredano, R., Melo, O., Bambach, N., Morales, D., Marinkovic, C., & Pica, A. (2019). Volumen 2: Exposición de zonas costeras. In *Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile* (Issue a).
- Winckler, P., Contreras-López, M., & Castilla, J. (2019). Impactos y Adaptación en Océanos y Zonas Costeras. In *Cambio Climático en Chile: Ciencia, Mitigación y Adaptación*. (pp. 423–457).
- Winckler, P., Contreras-López, M., Larraguibel, C., Mora, J., Esparza, C., Agredano, R., Martínez, C., & Torres, I. (2020). *Informe Proyecto ARCLim: Zonas Costeras. Universidad de Valparaíso, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Pontificia Universidad Católica de Chile, coordinado por Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y Centro de Cambio Global UC.*
- Winckler, P., Contreras-López, M., Vicuña, S., Larraguibel, C., Mora, J., Esparza, C., Salcedo, J., Gelcich, S., Fariña, J. M., Martínez, C., Agredano, R., Melo, O., Bambach, N., Morales, D., Marinkovic, C., & Pica, A. (2019a). Volumen 1: Amenazas. In *Determinación del riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile*. Ministerio del Medio Ambiente.
- Winckler, P., Contreras-López, M., Vicuña, S., Larraguibel, C., Mora, J., Esparza, C., Salcedo, J., Gelcich, S., Fariña, J. M., Martínez, C., Agredano, R., Melo, O., Bambach, N., Morales, D., Marinkovic, C., & Pica, A. (2019b). Volumen 5: Vulnerabilidad y riesgo en puertos. In *Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile*.
- Winckler, P., Contreras-López, M., Vicuña, S., Larraguibel, C., Mora, J., Esparza, C., Salcedo, J., Gelcich, S., Fariña, J. M., Martínez, C., Agredano, R., Melo, O., Bambach, N., Morales, D., Marinkovic, C., & Pica, A. (2019c). Volumen 7: Vulnerabilidad y Riesgo en Caletas Pesqueras. In *Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile*.
- Yañez, E., Lagos, N. A., Norambuena, R., Silva, C., Letelier, J., Muck, K.-P., San Martín, G., Benítez, S., Broitman,



- B. R., Contreras, H., & otros. (2017). Impacts of climate change on marine fisheries and aquaculture in Chile. *Climate Change Impacts on Fisheries and Aquaculture*, 239–332.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21 -A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water International*, 30 (4), 487–500.
- Zhao, C., Liu, B., Xiao, L., Hoogenboom, G., Boote, K. J., Kassie, B. T., Pavan, W., Shelia, V., Kim, K. S., Hernandez-Ochoa, I. M., Wallach, D., Porter, C. H., Stockle, C. O., Zhu, Y., & Asseng, S. (2019). A SIMPLE crop model. *European Journal of Agronomy*, 104, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.009>
- Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., Hernández, H. J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G. S., Radke, J. D., & Gong, P. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 183, 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.016>

