



Diciembre de 2018

“DIAGNÓSTICO DE LA VULNERABILIDAD DE LAS OBRAS DEL MOP Y MEDIDAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO”

INFORME FINAL



CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	- 10 -
2.	ANTECEDENTES	- 12 -
3.	METODOLOGÍA DEL ESTUDIO	- 17 -
4.	OBJETIVOS	- 19 -
4.1.	OBJETIVO GENERAL	- 19 -
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	- 19 -
5.	ALCANCE DEL ESTUDIO	- 20 -
5.1.	VULNERABILIDAD DE SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA AL CAMBIO CLIMÁTICO	- 20 -
5.2.	MEDIDAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO PARA SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA	- 21 -
5.3.	TALLERES PARTICIPATIVOS DE LA CONSULTORÍA	- 21 -
5.4.	DEFINICIONES.....	- 22 -
6.	DIAGNÓSTICO DE VULNERABILIDAD DE SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA	- 28 -
6.1.	CONCEPTUALIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD EN SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA.....	- 28 -
6.2.	RECOPIACIÓN DE DATOS HISTÓRICOS SOBRE EVENTOS HIDROCLIMÁTICOS EXTREMOS	- 32 -
6.3.	SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE EVENTOS OBSERVADOS	- 37 -
6.4.	CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE AMENAZAS	- 61 -
6.5.	ANÁLISIS DE EXPOSICIÓN DE SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA AL CAMBIO CLIMÁTICO	- 67 -
6.6.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD (AS) DE SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA	- 68 -
6.7.	VULNERABILIDAD DE SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA BASADA EN EVENTOS OBSERVADOS	- 81 -
6.8.	VULNERABILIDAD DE SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA DE CONTROL ALUVIONAL Y MANEJO DE CAUCE.....	- 81 -
6.9.	VULNERABILIDAD DE SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA DE ZONA COSTERA.....	- 85 -
6.10.	VULNERABILIDAD FUTURA DE SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA	- 87 -
7.	MEDIDAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA	- 95 -
7.1.	METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN COMPARATIVA “BENCHMARKING”	- 95 -
7.2.	CRITERIOS DEL BENCHMARKING	- 96 -
7.3.	CONCEPTUALIZACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO	- 99 -
7.4.	SISTEMATIZACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN PARA SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA	- 102 -
7.5.	MEDIDAS DE ADAPTACIÓN PARA SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA DE ZONA COSTERA E HIDRÁULICOS.....	- 109 -
8.	METODOLOGÍA DE INTEGRACIÓN DE LA RESILIENCIA CLIMÁTICA EN CICLO DE VIDA DE PROYECTOS	- 123 -
8.1.	EVALUACIÓN DE EXPOSICIÓN A LAS AMENAZAS CLIMÁTICAS	- 127 -
8.2.	IDENTIFICACIÓN DE LAS SENSIBILIDADES CLIMÁTICAS DEL PROYECTO	- 128 -
8.3.	EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD DE SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA	- 130 -
8.4.	EVALUACIÓN DEL RIESGO HIDROCLIMÁTICO EN SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA	- 131 -
8.5.	IDENTIFICACIÓN DE OPCIONES DE ADAPTACIÓN DE SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA	- 131 -
8.6.	PRIORIZACIÓN DE OPCIONES DE ADAPTACIÓN.....	- 132 -
8.7.	INTEGRACIÓN DEL PLAN DE ACCIÓN DE ADAPTACIÓN AL PROYECTO	- 135 -
9.	DESARROLLO DE CASOS DE ESTUDIO	- 136 -

9.1.	CASO 1: OBRAS FLUVIALES Y CONTROL ALUVIONAL QUEBRADA PAIPOTE, REGIÓN ATACAMA.....	- 138 -
9.2.	CASO 2: SISTEMA DE DEFENSAS FLUVIALES RÍO MATAQUITO, REGIÓN DEL MAULE	- 144 -
9.3.	CASO 3: PASEO COSTERO JUAN DE SAAVEDRA, VALPARAÍSO, REGIÓN DE VALPARAÍSO	- 155 -
9.4.	ANÁLISIS DE PROPUESTAS TÉCNICAS DE MEJORAMIENTO DE METODOLOGÍAS DE DISEÑO	- 164 -
9.5.	RESUMEN DE PROPUESTAS DE REFORMULACIÓN DE METODOLOGÍA DE DISEÑO DE SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA	- 177 -
9.6.	RESUMEN DE ALTERNATIVAS DE REFORMULACIÓN DE METODOLOGÍA DE DISEÑO DE SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA DE ZONA COSTERA.....	- 184 -
9.7.	RECOMENDACIONES DE MEJORA DE EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTOS DE SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICO Y DE ZONA COSTERA	- 186 -
10.	SISTEMAS DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA PARA SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA... -	188 -
10.1.	SISTEMAS DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA PARA SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA.....	- 189 -
10.2.	SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA PARA SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA DE ZONA COSTERA.....	- 194 -
11.	PRIORIZACIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA PARA CHILE.....	- 197 -
11.1.	CRITERIOS DE PRIORIZACIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA	- 197 -
11.2.	JUSTIFICACIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA PARA SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA DE CONTROL ALUVIONAL	- 198 -
11.3.	JUSTIFICACIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA PARA SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA DE ZONA COSTERA	- 201 -
11.4.	ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE APLICACIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA	- 203 -
11.5.	FICHA DE SISTEMA DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA PARA SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA	- 204 -
11.6.	FICHA DE SISTEMA DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA PARA SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA DE MANEJO DE CAUCE	- 205 -
11.7.	FICHA DE SISTEMA DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA PARA SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA DE ZONA COSTERA-	206 -
12.	SISTEMATIZACIÓN DE FONDOS INTERNACIONALES EN MATERIA DE CAMBIO CLIMATICO	- 212 -
12.1.	FONDOS INTERNACIONALES DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	- 212 -
12.2.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE POSTULACIÓN A FONDOS INTERNACIONALES.....	- 224 -
13.	CONCLUSIONES	- 227 -
14.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	- 228 -

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1.	Línea de tiempo hitos relevantes del CC en Chile	- 12 -
Ilustración 2.	Diagrama de metodología de estudio bajo enfoque de gestión adaptativa	- 18 -
Ilustración 3.	Relación entre la metodología de evaluación de vulnerabilidad y riesgo climático (CVRA)	- 28 -
Ilustración 4.	Caracterización de efectos asociados a eventos de origen hidroclimático periodo 2006- 2018	- 40 -
Ilustración 5.	Recurrencia de eventos extremos de origen hidroclimático periodo 2006-2018.....	- 40 -
Ilustración 6.	Distribución geográfica de amenazas con origen en eventos hidroclimáticos extremos- -	42
Ilustración 7.	Infograma sobre recurrencia de marejadas e impactos asociados	- 45 -
Ilustración 8.	Infograma sobre recurrencia de aluviones e impactos asociados	- 46 -
Ilustración 9.	Infograma sobre recurrencia de inundaciones fluviales e impactos asociados	- 47 -
Ilustración 10.	Mapa georreferenciado con eventos de Remociones en masa	- 68 -
Ilustración 11.	Proyecciones de cambios de temperatura y precipitaciones en tres periodos	- 89 -
Ilustración 12.	Proyecciones de cambios precipitaciones para el periodo 2050-2065 para un escenario RCP 8,5	- 92 -
Ilustración 13.	Diagrama de tipología de medidas de adaptación	- 103 -
Ilustración 14.	Curva de relación entre nivel de seguridad y magnitud de desastres para infraestructuras grises, verdes e híbridas.....	- 108 -
Ilustración 15.	Descripción de etapas del ciclo de vida de un proyecto.....	- 123 -
Ilustración 16.	Integración de análisis de resiliencia climática dentro del ciclo de vida de proyectos convencional.	- 124 -
Ilustración 17.	Incorporación del análisis del Cambio Climático a lo largo del ciclo de vida de proyectos	- 127 -
Ilustración 18.	Metodologías de priorización de medidas de adaptación existentes.	- 132 -
Ilustración 19.	Revestimiento de cauce post 25M zona urbana se puede apreciar el puente mecano que conecta la calle 21 de Mayo en la ciudad de Copiapó.....	- 140 -
Ilustración 20.	Inicio de la obra de encauzamiento canal de protección, se aprecia obra post evento 25M	- 140 -
Ilustración 21.	Canalón natural de quebrada Paipote y obras de “perfilamiento urbano”	- 141 -
Ilustración 22.	Mapa de cuenca de río Mataquito: (a) Localización, (b) Topografía y principales cursos de agua relacionados, (c) Localización de estaciones hidroclimáticas usadas en el estudio.	- 145 -

Ilustración 23.	Imágenes condiciones de cauce normal río Mataquito en Licantén	- 146 -
Ilustración 24.	Inundación de evento de mayo de 1991, Cuenca río Mataquito	- 147 -
Ilustración 25.	Simulación de inundación de Mayo 2008, Río Mataquito	- 148 -
Ilustración 26.	Mapa de comparación de área de escorrentía evento mayo 202 y mayo 2008, cuenca río Mataquito	- 149 -
Ilustración 27.	Escenarios futuros de precipitaciones, temperaturas y caudales en cuenca del río Mataquito	- 151 -
Ilustración 28.	Ejemplo de sistema de monitoreo de eventos de crecidas extremas alternativos para el río Mataquito	- 154 -
Ilustración 29.	Desplazamiento de tetrápodos zona costera de la región de Valparaíso post evento Ago-2015	- 157 -
Ilustración 30.	Tabla de intervalos de recurrencia de crecidas de diseño para servicios de infraestructura	- 168 -
Ilustración 31.	Factores de seguridad para dimensionamiento de enrocados.....	- 176 -
Ilustración 32.	Evolución del periodo de retorno de 50 años de altura de ola significativa en varios puntos de estudio -	179 -
Ilustración 33.	Información sobre bases de datos y método de análisis de valores extremos	- 180 -

Índice de Tablas

Tabla 1.	Resumen de antecedentes sobre vulnerabilidad de servicios de infraestructura al CC	- 14 -
Tabla 2.	Criterios de selección de fuentes de información	- 32 -
Tabla 3.	Descripción de fuentes de información utilizadas	- 32 -
Tabla 4.	Información suministrada por los distintos actores involucrados en la consultoría	- 35 -
Tabla 5.	Criterios de organización de data histórica de eventos climáticos	- 37 -
Tabla 6.	Recurrencia de eventos extremos por región geográfica en el periodo 2006-2018	- 41 -
Tabla 7.	Criterios de organización de data histórica de eventos climáticos	- 42 -
Tabla 8.	Eventos de origen hidrológico extremo de mayor impacto en Chile, periodo 2006-2018	- 43 -
Tabla 9.	Evento Aluvional Antofagasta y Taltal, marzo del 2015	- 49 -
Tabla 10.	Evento Aluvional de río Copiapó Región de Atacama, marzo de 2015	- 50 -
Tabla 11.	Evento Aluvional de la cuenca de Huasco Región de Atacama, marzo de 2015	- 51 -
Tabla 12.	Evento Aluvional de la cuenca de del Rio Salado región de Atacama, marzo de 2015	- 53 -
Tabla 13.	Evento Aluvional Villa Santa Lucia, diciembre de 2017	- 54 -
Tabla 14.	Evento Aluvional San José del Maipo, abril de 2016	- 55 -
Tabla 15.	Vaciamiento del Lago Catchet II, 2009	- 56 -
Tabla 16.	Marejada en Arica, julio de 2013	- 58 -
Tabla 17.	Temporal Valparaíso, agosto de 2015	- 59 -
Tabla 18.	Marejada Chiloé, agosto de 2017	- 60 -
Tabla 19.	Relación entre drivers climáticos y amenazas	- 62 -
Tabla 20.	Caracterización de amenazas asociadas a servicios de infraestructura fluvial	- 65 -
Tabla 21.	Caracterización de amenazas asociadas a servicios de infraestructura de zona costera ...	- 66 -
Tabla 22.	Enfoque sistémico de los servicios de infraestructura	- 69 -
Tabla 23.	Niveles de sensibilidad de un servicio infraestructura ante drivers climáticos y no climáticos	- 70 -
Tabla 24.	Matriz de sensibilidad de obras de control aluvional ante amenazas climáticas	- 74 -
Tabla 25.	Matriz de sensibilidad de obras de manejo de cauce ante amenazas climáticas	- 75 -
Tabla 26.	Matriz de sensibilidad de obras de infraestructura de protección de zona costera ante amenazas climáticas	- 78 -
Tabla 27.	Matriz de sensibilidad de obras de infraestructura de puertos de conectividad ante amenazas climáticas	- 79 -

Tabla 28.	Matriz de sensibilidad de obras de infraestructura de playas artificiales ante amenazas climáticas	- 80 -
Tabla 29.	Matriz de vulnerabilidad de servicio de infraestructura de control aluvional	- 84 -
Tabla 30.	Matriz de vulnerabilidad de servicio de infraestructura de control aluvional	- 85 -
Tabla 31.	Matriz de vulnerabilidad de servicio de infraestructura de zona costera	- 87 -
Tabla 32.	Matriz de vulnerabilidad futura de servicios de infraestructura de control aluvional	- 93 -
Tabla 33.	Matriz de vulnerabilidad futura de servicios de infraestructura de manejo de cauce	- 93 -
Tabla 34.	Matriz de vulnerabilidad futura de servicios de infraestructura de zona costera	- 94 -
Tabla 35.	Resumen de resultados del Benchmarking	- 96 -
Tabla 36.	Tipología de medidas de adaptación para la gestión del riesgo climático	- 101 -
Tabla 37.	Ejemplos de tipología de medidas de adaptación al cambio climático en infraestructura -	104 -
Tabla 38.	Ejemplos de tipología de medidas de adaptación al cambio climático en infraestructura	- 106 -
Tabla 39.	Opciones de adaptación al cambio climático de servicios de infraestructura hidráulica .	- 118 -
Tabla 40.	Opciones ingenieriles de adaptación al cambio climático de servicios de infraestructura de zona costera -	119 -
Tabla 41.	Identificación de amenazas climáticas según tipología de proyecto	- 127 -
Tabla 42.	Resumen de sensibilidad climática de servicios de infraestructura de tipo control aluvional ...	- 129 -
Tabla 43.	Resumen de sensibilidad climática de servicios de infraestructura de tipo manejo de cauce ...	- 129 -
Tabla 44.	Resumen de sensibilidad climática de servicios de infraestructura de zona costera	- 130 -
Tabla 45.	Criterios de priorización de medidas de adaptación para un AMC	- 134 -
Tabla 46.	Resumen de comparación de alternativas de reformulación de caudales de diseño	- 177 -
Tabla 47.	Resumen de comparación de alternativas de reformulación de metodologías de dimensionamiento	- 178 -
Tabla 48.	Resumen de comparación de alternativas de reformulación de caudales de diseño	- 184 -
Tabla 49.	Resumen de medias de monitoreo y sistemas de alerta temprana para amenazas vinculadas con servicios de infraestructura de control aluvional	- 190 -
Tabla 50.	Resumen de medias de monitoreo y sistemas de alerta temprana para amenazas vinculadas con servicios de infraestructura de manejo de cauces	- 192 -
Tabla 51.	Resumen de medias de monitoreo y sistemas de alerta temprana para amenazas vinculadas con servicios de infraestructura de zona costera	- 195 -

Tabla 52.	Propuesta de criterios a para el análisis multicriterio (MCA) de priorización de medidas de monitoreo	- 198 -
Tabla 53.	Ficha de sistema de monitoreo propuestos para servicios de infraestructura hidráulico-	204 -
Tabla 54.	Ficha de sistema de monitoreo propuestos para servicios de infraestructura hidráulico-	205 -
Tabla 55.	Ficha de sistema de monitoreo propuestos para servicios de infraestructura de zona costera - 207 -	
Tabla 56.	Principales fondos internacionales de financiamiento de medidas de adaptación de infraestructura al cambio climático.....	- 214 -
Tabla 57.	Tabla comparativa de fondos para el financierito de sistemas de monitoreo y SAT para servicios de infraestructura	- 224 -

Acrónimos

CC	Cambio Climático
CCG PUC	Centro de Cambio Global de la Pontificia Universidad Católica
CIGIDEN	Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático
CR2	Centro del Clima y la Resiliencia
DGA	Dirección General de Aguas
DGOP	Dirección General de Obras Públicas
DOH	Dirección de Obras Hidráulicas
DOP	Dirección de Obras Portuarias
EC	European Commission
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MMA	Ministerio de Medio Ambiente
MOP	Ministerio de Obras Públicas
ONEMI	Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio de Interior
REM	Remociones en Masa
SAT	Sistema de Alerta Temprana
SEMAT	Secretaría Ejecutiva de Medio Ambiente y Territorio
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería
SHOA	Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada
SIG	Sistema de Información Geográfica
Tr	Periodo de Retorno

1. INTRODUCCIÓN

La infraestructura incluye una amplia variedad de sistemas que son esenciales para las prioridades de desarrollo de un país, considerando además que estas obras representan un alto costo de inversión y que a menudo están construidos para durar décadas, resulta esencial analizar cómo pueden verse afectados por el cambio climático. Los efectos de dicho fenómeno pueden llegar a manifestarse como amenazas hidrometeorológicas, con impactos que varían principalmente de acuerdo al tipo y las características de la obra de infraestructura aludida, y de acuerdo con su ubicación geográfica (exposición), lo que permite que una misma amenaza climática pueda sentirse con mayor o menor intensidad (sensibilidad climática), la conjunción de estos dos factores son los que determinan la vulnerabilidad climática de un sistema de infraestructura.

Así pues, resulta crítico integrar los impactos potenciales debidos al cambio la variabilidad climática futura como parte del diseño de programas y proyectos de desarrollo de infraestructura, a lo largo de todo el ciclo de vida de la obra. Para esto es necesario desarrollar un proceso continuo de gestión adaptativa que ayude a los responsables de la toma de decisiones, permitiéndoles entender la importancia de gestionar la vulnerabilidad, evaluar los impactos del clima, e identificar las prioridades, que finalmente les permita a los desarrolladores de políticas, escoger las medidas de adaptación apropiadas y más costo-eficientes.

En Chile, los eventos extremos climáticos se han acentuado en los últimos años, de acuerdo con el Centro de investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), en este sentido se han identificado los peligros hidro climáticos que en conjunto con las vulnerabilidades del territorio pueden generar riesgos de manera más recurrente. En la zona norte del país, ejemplo de ello son: (i) los aluviones del 2015 en las Regiones de Atacama y Antofagasta, (ii) las marejadas acaecidas en la zona costera (Región de Valparaíso y Coquimbo) en el mismo año. Según los modelos climáticos existentes, estos efectos serán probablemente más frecuentes e intensos en un contexto de cambio climático, por lo que será preciso contar con información oportuna respecto a los riesgos actuales y futuros por variabilidad climática, así como de la respuesta de las obras de infraestructura frente a estos eventos, permitiendo de esta forma a las autoridades correspondientes anticiparse y tomar las medidas adecuadas para la protección tanto de comunidades como como de los bienes materiales y asegurar la provisión de servicios para los cuales dicha infraestructura fue construida.

En este contexto, el Ministerio de Obras Públicas (MOP) plantea la necesidad de; (i) analizar los factores de vulnerabilidad prioritarios de la infraestructura hidráulica y de borde costero de Chile, con base a la observación y análisis de eventos pasados y sus impactos directos sobre los activos e indirectos e inducidos sobre las poblaciones, la economía y el medioambiente, (ii) desarrollar un marco metodológico, y posterior aplicación a tres (3 casos de estudio, para la

integración del componente climático en el diseño o renovación de la infraestructura hidráulica, (iii) identificar, priorizar y seleccionar medidas de adaptación adecuadas para hacer frente a las principales amenazas asociadas con el cambio climático, considerando aquellas asociadas a la infraestructura verde, apoyada en el concepto de “adaptación basada en ecosistemas”, (iv) implementar de procesos y medidas que garanticen el control y anticipación de los posibles impactos del cambio climático mediante el uso de sistemas de monitoreo remotos de control de las condiciones y desempeño de la infraestructura MOP, que permita dar alertas tempranas tanto a los entes técnicos del Ministerio como a los tomadores de decisiones frente a potenciales eventos climáticos que pudiesen ser catastróficos y (v) analizar alternativas de postulación a fondos internacionales a los que Chile podría acceder para la implementación de las medidas de adaptación (incluyendo los sistemas de monitoreo y mecanismos de alerta temprana).

Estas necesidades están claramente definidas en el Plan de Adaptación y Mitigación de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático 2017-2022, en el que se resume una serie de líneas de acción y medidas diseñadas como respuesta a los potenciales efectos de la variabilidad climática futura y con el objetivo de brindar herramientas a la institución para la priorización de acciones.

2. ANTECEDENTES

Es conocido a nivel mundial que el cambio climático es un fenómeno real y la comunidad científica internacional ha concluido que la variabilidad climática en las últimas décadas es en parte causada por actividades antropogénicas. A la fecha es, el cambio climático es, sin lugar a dudas, uno de los principales problemas al que se enfrenta la humanidad; pues pone en riesgo su existencia. El clima en el planeta no ha dejado de cambiar desde que se formó la atmósfera primigenia. El panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) recientemente publicó un reporte en el que comunica sobre los hallazgos de científicos que afirman que la actividad industrial humana está provocando el aumento de la temperatura global del planeta (IPCC, 2014).

En particular en el caso de Chile, los eventos se han acentuado en los últimos años, según lo señalado en la infografía elaborada por el Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), eventos hidroclimáticos que han causado desastres en todo el territorio, con especial severidad en los impactos en la zona norte y centro del país. Ejemplo de esto son los aluviones del 2015 en las regiones de Antofagasta y Atacama y las marejadas acontecidas en el borde costero en las regiones de Valparaíso y Coquimbo también en el mismo año.

Ante estos efectos del Cambio Climático, el gobierno de Chile no ha permanecido indiferente, es así como se han discutido, creado e implementado una serie de políticas públicas sectoriales afines con este tema. En tal sentido, en la siguiente ilustración, se describen una serie de actividades e hitos relevantes:



Ilustración 1. Línea de tiempo hitos relevantes del CC en Chile
Fuente: Elaboración propia.

En un contexto nacional, el eje temático de cambio climático se ha profundizado bajo un enfoque de adaptación, mediante el desarrollo de una serie de planes sectoriales, que han sido aprobados por el Consejo de Ministros para la Sustentabilidad, como se mencionan a continuación:

- Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2014),
- Plan de Adaptación al Cambio Climático Sector Silvoagropecuario (2013),
- Plan de Adaptación al Cambio Climático Sector Biodiversidad (2014),
- Plan de Adaptación al Cambio Climático Sector Pesca y Acuicultura (2015),
- Plan de Adaptación al Cambio Climático Sector Salud (2016),
- Plan de Mitigación y Adaptación de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático (2017-2022).

La ejecución de estos amerita el involucramiento de distintos actores y autoridades, en el caso del sector de infraestructura resulta importante la participación de autoridades centrales con competencias en la materia como son; MOP, DGOP, SEMAT, DOP y DOH, quienes tendrán un rol fundamental en el desarrollo de este estudio, considerando la información y experiencia existente en relación a la gestión adaptativa frente al cambio climático.

En relación con el objetivo del plan Mitigación y Adaptación de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático (2017-2022), se destaca el desarrollo compuesto por tres (3) ejes estratégicos:

- Eje de adaptación,
- Eje de mitigación,
- Eje de gestión del conocimiento,

En particular, en el presente estudio el MOP a través de la DGOP y SEMAT ha solicitado abordar el ámbito de adaptación, donde la temática de análisis y comprensión se delimita a las siguientes líneas de acción y sus respectivas medidas como se describe a continuación:

- a) Línea de acción 1: Cambios metodológicos para incorporar la gestión del riesgo hidrológico futuro en la evaluación, diseño y planificación de servicios de infraestructura:
 - Incorporación de cambios metodológicos en la etapa de desarrollo de obras de infraestructura en zonas costeras.
 - Incorporación de cambios metodológicos en la etapa de diseño de obras de infraestructura asociadas a la conectividad y de protección del territorio que se pueden verse afectadas por eventos extremos de origen hidrometeorológicos.
 - Generar programas de protección del territorio frente a lluvias intensas.
- b) Línea de acción 2: Monitoreo de amenazas:
 - Mejoras en monitoreo de caudales extremos.
 - Mejoras en monitoreo de amenazas costeras.

- c) Línea de acción 3: Monitoreo de vulnerabilidad de la infraestructura:
- Revisión periódica de obras fluviales, de drenaje y viales.
 - Incorporación de monitoreo semi-continuo del impacto de obras de infraestructura costera.

Considerando todos estos puntos mencionados, SEMAT dependiente de la DGOP ha propuesto la realización del presente estudio denominado: “Diagnóstico de la Vulnerabilidad de las Obras MOP y Medidas de Adaptación al Cambio Climático” a fin de lograr un fortalecimiento institucional para la adaptación de los proyectos del MOP frente al fenómeno global de cambio climático.

Previamente el MOP en conjunto con otros actores han desarrollado una serie de estudios, que sirven de antecedentes para el presente informe, aportando información sobre amenazas, climáticas, eventos observados, proyecciones climáticas futuras e impactos identificados. La siguiente tabla resume algunos de estos estudios más relevantes.

Tabla 1. Resumen de antecedentes sobre vulnerabilidad de servicios y obras de infraestructura al CC

Fuente Primaria	Descripción	Referencia
Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin)	Registro dinámico de los principales desastres relacionados con peligros geológicos (remociones en masa, inundaciones, aluviones entre otros) desde el año 1981 hasta 2017.	(Sernageomin, 2017)
Universidad de Valparaíso (U. de Valparaíso)	Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile desde 1823 hasta el 2015	(U. de Valparaíso, 2016)
Universidad de Valparaíso (U. de Valparaíso)	Atlas de Oleaje	(U. de Valparaíso, 2018)
Dirección de Obras Portuarias (DOP)	Asesoría en evaluación de riesgos de infraestructura costera en un contexto de cambio climático	(DOP, 2018)
Ministerio del Medio Ambiente (MMA)	Tercera comunicación nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC)	(MMA, 2016a)
Ministerio del Medio Ambiente (MMA)	Tercer Reporte de estado de Medio Ambiente en Chile, Sección de desastres	(MMA, 2017)
Ministerio del Medio Ambiente (MMA)	Base Digital Clima, Estudio desarrollado por INFODEP para la elaboración de la “Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático”	(MMA, 2016b) y (MMA, 2018)

Ministerio del Medio Ambiente (MMA) a requerimiento del CIGIDEN	Propuesta de un portafolio de medidas para elaborar el plan de adaptación al cambio climático para la infraestructura	(MMA, 2014)
Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior (ONEMI)	Informes Estadísticos Semestrales de la ONEMI	(ONEMI, 2018)
Centro para la Investigación del Clima y la Resiliencia Universidad de Chile (CR2 U. de Chile)	Plataforma de simulaciones climáticas	(CR2, 2018)
Centro de Cambio Global Universidad Católica de Chile (CCG PUC)	Adaptación al cambio climático de la infraestructura pública en Chile	(CCG, 2012)
Centro de Cambio Global Universidad Católica de Chile (CCG PUC) / Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria	Marco Estratégico para la adaptación de la infraestructura al Cambio Climático	(CCG, 2013)
Centro de Cambio Global Universidad Católica de Chile (CCG PUC).	Enfoque metodológico para evaluar la adaptación en la infraestructura pública del MOP	(CCG, 2012)
Dirección General de Aguas (DGA)	Atlas del Agua	(DGA, 2016)
Instituto Nacional de Hidráulica (INH) y Dirección de Planeamiento del MOP	Análisis de requerimientos a largo plazo en infraestructura hídrica	(INH, 2016)
Sistema de Emergencia del MOP (SIEMOP) de la UGIT de la DGOP	Base de datos de emergencias MOP	(SIEMOP, 2018)

Fuente: Elaboración propia.

Además de los antecedentes resumidos, también se han considerado una serie de caracterizaciones y análisis de los eventos hidrológicos extremos relevantes ocurridos en el territorio nacional en los últimos 12 años, con el objetivo de contar con datos que permitan identificar las variables y factores que afecten la sensibilidad de determinados servicios de infraestructura y por ende su vulnerabilidad.

Finalmente se destaca que, en el 2015, Chile y Ecuador se adjudicaron fondos para un proyecto del *Adaptation Fund*, para el programa de reducción de vulnerabilidad climática y riesgo de inundación en zonas costeras urbanas y semiurbanas en ciudades de Latinoamérica, el programa tiene por objetivo reducir la vulnerabilidad climática asociada a inundaciones en tres ciudades costeras haciendo foco en adaptación basado en riesgos, construcción de redes de colaboración, y desarrollo de una cultura de adaptación. El proyecto hace foco en los peligros hidrometeorológicos de aluviones en Antofagasta y Taltal en Chile y Esmeraldas en Ecuador. Al finalizar el programa se espera que se hayan mejorado las condiciones habilitantes para sostener la reducción de riesgos de desastres, mejoramiento de la capacidad adaptativa.

3. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

El enfoque metodológico del estudio considera el modelo de gestión adaptativa, que ayuda a los responsables e instituciones involucrados en el ciclo de vida de una obra, a prepararse para la administración y/o manejo integral del riesgo asociado al cambio climático. Para esto se han identificado una serie de etapas, como se describen a continuación:

- i. Establecimiento del contexto de desarrollo y enfoque,
- ii. Mejoramiento de la comprensión de la vulnerabilidad,
- iii. Identificación y evaluación y selección de opciones de adaptación,
- iv. Diseño de medidas, así como el seguimiento de su desempeño,
- v. Ejecución de medidas de adaptación y monitoreo.

En este sentido, este estudio comprende el desarrollo de los ítems ii, iii y iv, correspondientes al mejoramiento de la comprensión de la vulnerabilidad así como la identificación, y diseño de medidas de adaptación; para esto se desarrollará un proceso en el cual se analizará la vulnerabilidad de los activos y servicios de infraestructura que estos brindan, en base a eventos observados y prospección de eventos futuros, se seleccionarán una serie de medidas para mejorar la resiliencia de la infraestructura, partiendo de la premisa que la identificación y diseño de medidas de adaptación siempre es más efectivo cuando se realiza como parte integral del ciclo de vida de un proyecto.

De acuerdo con el enfoque de gestión adaptativa planteado, se destaca que para garantizar el éxito de cada una de las medidas adaptación implementadas, será necesario desarrollar medidas complementarias de monitoreo y evaluación del desempeño. Para esto se identificarán y propondrán las medidas de monitoreo y sistemas de alerta temprana (SAT) en función de la vulnerabilidad de cada uno de los tipos de servicios de infraestructura analizados.

En el siguiente diagrama se plantea una serie de actividades para el desarrollo del estudio, y como estas

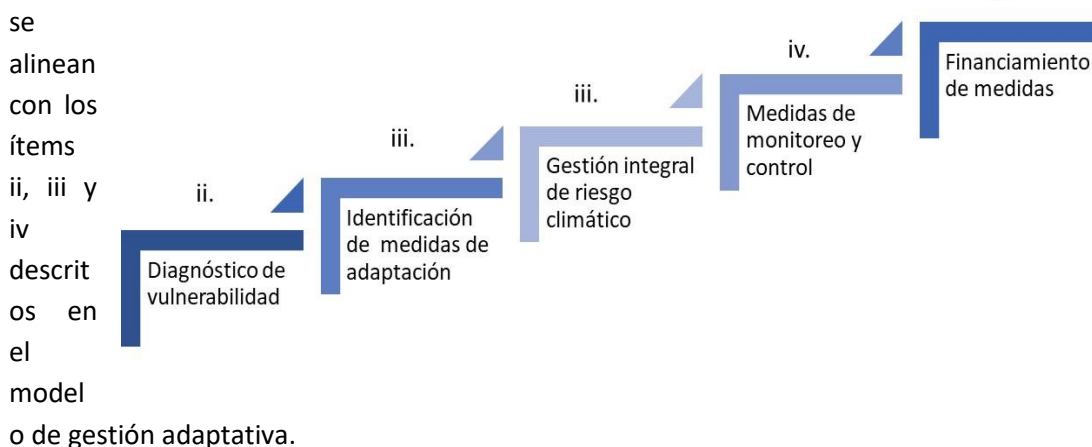


Ilustración 2. Diagrama de metodología de estudio bajo enfoque de gestión adaptativa
Fuente: Elaboración propia.

Allí se puede identificar que para alcanzar el objetivo de mejoramiento de la comprensión de la vulnerabilidad (ii), se desarrollará un diagnóstico de vulnerabilidad, por otra parte, para identificar evaluar y seleccionar las mejores opciones de adaptación (iii), se prevé realizar un proceso sistémico de identificación de medidas de adaptación y su respectivo análisis de riesgos, y finalmente para diseñar las medidas de adaptación y hacer seguimiento de su desempeño (iv) se prevé identificar y priorizar las medidas más atingentes, identificación de mecanismos de monitoreo y potenciales fuentes de financiamiento.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Proponer medidas de adaptación en el subsector de infraestructura hidráulica (control aluvional, manejo de cauce) y portuaria (zona costera) frente a eventos climáticos de carácter extremos, todo ello en el marco del incremento de la resiliencia climática.

4.2. Objetivos Específicos

- a) Efectuar una recopilación de los eventos extremos (precipitación intensa, tormentas cálidas, olas de calor, sequías y marejadas) acontecidos en los últimos 10 años en el país y la afectación a la comunidad en relación a los servicios de infraestructura que presta el MOP.
- b) Analizar el impacto social, económico y ambiental, producto de eventos climáticos extremos en la infraestructura de control aluvional, manejo de cauces e infraestructura portuaria costera, considerando los costos de reparación de dichas obras.
- c) Efectuar una sistematización de soluciones de ingeniería para protección de borde costero, control aluvional, manejo de cauces para mitigar los efectos del cambio climático, considerando además de soluciones tradicionales aquellas basadas en infraestructura verde y/o servicios.
- d) Realizar a través de tres (3) casos de estudio representativos, una propuesta metodológica para incluir el riesgo de diseño de infraestructura hidráulica (control aluvional y cauce) y protección de borde costero.
- e) Proponer las distintas alternativas de monitoreo remoto y en línea de infraestructura aludida, con sus costos asociado. Para ello se debe sistematizar las diferentes tecnologías existentes a nivel nacional y mundial.
- f) Analizar la factibilidad de postulación a fondos internacionales.

5. ALCANCE DEL ESTUDIO

5.1. Vulnerabilidad de servicios de infraestructura al Cambio Climático

De acuerdo con la metodología y los objetivos planteados para este estudio, se establece como alcance, en primer lugar, el mejoramiento de la comprensión de la vulnerabilidad climática de servicios de infraestructura. Para esto se desarrollará de un análisis de vulnerabilidad bajo el enfoque metodológico establecido en el *Working Group II Fifth Assessment Report del IPCC (WGII AR5)*, que consta de distintos procesos como se establecen más adelante. Para este análisis se realizará una revisión de data histórica de eventos hidroclimáticos ocurridos en Chile en un periodo de 12 años (2006-2018), con el objetivo de determinar la exposición de los servicios de infraestructura a las amenazas como, remociones en masa y/o aluviones, marejadas e inundaciones (Ver definiciones en sección 5.4).

De acuerdo al argumento científico del IPCC (2007) no se consideran dentro del proceso de recopilación y análisis de información de eventos observados, los datos asociados a eventos marítimos tipo: tsunamis, mareas astronómicas, ni variables morfológicas del litoral, o eventos de remociones en masa que hayan sido gatillados por sismos o erupciones volcánicas, ya que los mismos no están correlacionados directamente con el cambio climático y sus variables hidrológicas, ambientales, jurídicas y sociales exceden las competencias de los autores. (ej. Variaciones Transientes, Variación Cíclica Regular o Irregular)

En función de los datos de eventos hidrometeorológicos recopilados, se hará un análisis de datos con el fin de determinar cuáles han sido definidos como eventos catastróficos ya sea por vía constitucional de acuerdo la descripción del “Estado de Catástrofe” (Ver definiciones 5.4), o ya sea de acuerdo con la valoración cualitativa de impactos.

Para el desarrollo del análisis de impactos de los eventos catastróficos ocurridos, se considerarán los impactos sociales, económicos y medioambientales de acuerdo con la información disponible en fuentes primarias y secundarias por evento. Para el impacto económico se considerarán los costos por pérdidas de viviendas, infraestructura y/o afectación de capacidad o servicios que brindan las obras, así como costos de reparación por daños y servicios no prestados; en cuanto al impacto social, se considerarán fatalidades, lesionados, damnificados, albergados, atención hospitalaria, enfermedades, saneamiento de zonas afectadas entre otras posterior al evento; y finalmente, en relación al impacto ambiental se considerará la afectación de la biodiversidad y sobre la calidad y cantidad de recursos naturales como agua, suelo y aire.

El estudio cuenta con un análisis exploratorio de vulnerabilidad basado en eventos observados y futuros, de los servicios de infraestructura hidráulicos y de zona costera; considerando por una parte la organización territorial propuesta en el Atlas del Agua de la DGA, que plantea la

agregación del territorio en Macrozonas, de acuerdo con sus particularidades orográficas, hidrográficas y climáticas identificadas en Chile (Ver definiciones en sección 5.4) y además los estudios y modelos numéricos, que plantean escenarios futuros del cambio climático, en un *downscaling* para el país.

5.2. Medidas de adaptación al Cambio climático para servicios de infraestructura

Dentro del alcance del estudio se encuentra, la identificación y evaluación de las mejores prácticas y/o medidas de adaptación de servicios de infraestructura al cambio climático, en un contexto nacional e internacional (*Benchmarking*). Con el fin de valorar dichas prácticas a través de un proceso de priorización y selección que sea consistente con el análisis de vulnerabilidad de servicios de infraestructura desarrollado previamente

Por otra parte, en el estudio se encontrará el análisis de tres (3) casos de estudio, que serán definidos bajo acuerdo con las respectivas direcciones de obras portuarias y de obras hidráulicas (DOP/DOH), y contendrá un diagnóstico metodológico, una propuesta con recomendaciones para mejorar el diseño de la obra frente al riesgo climático futuro, y una descripción técnica y conceptual de potenciales medidas de adaptación adicionales identificadas. A continuación, se mencionan los casos de estudio considerados:

- Paseo costero el paseo Juan de Saavedra en la V región,
- Obras de control de aluviones en la quebrada de Paipote la cuenca del río Copiapó, III región,
- Obras de manejo de cauce y defensas fluviales del río Mataquito ubicado en la VII región.

Finalmente, considerando que, a lo largo del ciclo de vida de una obra, se identifican distintos factores de sensibilidad climática característicos del servicio de infraestructura, este estudio plantea la importancia hacer foco en el desarrollo de medidas de adaptación que apunten a la reducción de las sensibilidades estáticas o propias de la infraestructura, y que por su naturaleza se encuentran dentro del ámbito de acción del MOP.

5.3. Talleres participativos de la consultoría

Durante el desarrollo de este estudio se han desarrollado dos talleres con el objetivo de validar tanto las metodologías de identificación de medidas de adaptación y oportunidades de mejora en la metodología de diseño como la validación de los resultados obtenidos, específicamente el taller 1, denominado “Factores de sensibilidad de servicios de infraestructura frente al Cambio Climático”, en el que participaron los expertos de la DOP y DOH, tuvo por objetivo la validación de la metodología y el resultado de las matrices de sensibilidad desarrolladas para cada tipo de servicio de infraestructura.

Por otra parte, el taller 2, denominado, “Medidas de adaptación de servicios de infraestructura al Cambio Climático”, ha tenido por objetivo validar la metodología para identificar las principales medidas de adaptación estructurales o no de los servicios de infraestructura portuaria, zona costera, control aluvional, y defensas fluviales en un contexto de variabilidad climática, basándose en la experiencia y el juicio de los expertos técnicos de la DOH y DOP. (Ver anexo 14.2)

5.4. Definiciones

Para comprender y uniformizar los términos más relevantes sobre el cambio climático, vulnerabilidad, catástrofe, servicio de infraestructura y medidas de adaptación, resulta necesario conocer y comprender algunas de las definiciones más relevantes en la conceptualización del estudio, como se describen a continuación:

Adaptación: Es el proceso de acostumbramiento al clima actual o esperado, y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación tiene por objeto moderar o evitar el daño o aprovechar las oportunidades beneficiosas (IPCC, 2014). La adaptación es una medida que permite reducir la vulnerabilidad de las personas, la infraestructura y los ecosistemas a los cambios climáticos actuales, así como permite evitar o reducir el impacto que se pudiera presentar como consecuencia de dichos fenómenos climáticos.

Aluvión: Un aluvión es un flujo de barro donde el agua arrastra el material suelto (detritos) por una ladera, quebrada o cauce. Puede viajar muchos kilómetros desde su origen, aumentando su caudal a medida que avanza pendiente abajo transportando rocas, hojas, ramas, árboles y otros elementos, alcanzando gran velocidad (ONEMI, 2018).

Cambio Climático: Es la variación del estado del clima, identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos periodos de tiempo, generalmente decenios o periodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmosfera o del uso del suelo (IPCC, 2014).

Capacidad de adaptación: De acuerdo con IPCC (2014), se describe la capacidad de adaptación como la capacidad de un sistema para ajustarse al cambio climático (incluida la variabilidad del clima y los fenómenos extremos) para moderar los daños potenciales, aprovechar las oportunidades, o para hacer frente a las consecuencias. La capacidad de adaptación no tiene un enfoque único en tal sentido es importante precisar algunas de las dimensiones clave

disponibles en la literatura como son: Conocimiento, Tecnología, Instituciones, Economía, entre otras.

Catástrofe: Suceso de origen natural o provocado por el hombre que causa alteraciones intensas en las personas, bienes, servicios o medio ambiente, que excede la capacidad de respuesta de la comunidad afectada (ONEMI, 2018).

Ciclo de vida de un proyecto: El ciclo de vida de un proyecto es aquel que comprende las etapas de; planificación, prefactibilidad, factibilidad, diseño, ejecución, operación y mantenimiento o conservación.

Fenómenos Climáticos Extremos: Los fenómenos climáticos extremos, se definen cómo aquellos eventos hidrometeorológicos que se caracterizan por representar condiciones máximas o mínimas en las variables hidrometeorológicas (por ejemplo: marea, precipitación, temperatura, etc.) de forma periódica dentro de un ciclo determinado y tienen capacidad de generar pérdidas humanas o económicas, (IPCC, 2014).

Exposición: La presencia de las personas, los medios de vida, ecosistemas, los servicios, infraestructura o activos económicos, localizados en sitios y entornos que podrían verse afectados de manera adversa (IPCC, 2014). Por lo tanto, la exposición es el grado en que un sistema de infraestructura se pone en contacto con las condiciones climáticas o los impactos climáticos específicos y la probabilidad que este estrés afecte a la infraestructura.

Grado de redundancia: Dotar al sistema de infraestructura de elementos/componentes estructurales, equipamientos de forma replicada/repetida y/o proveer de interconexión con otros sistemas, para así aumentar la fiabilidad del conjunto ante la ocurrencia de situaciones adversas, permitiendo así que se asegure el desempeño del servicio del sistema/infraestructura y se desarrolle su adecuado funcionamiento mediante la operación de elementos/componentes/sistemas paralelos replicados. (Echaveguren, T. 2016).

Impactos: Efectos, consecuencias o resultados sobre la infraestructura, ecosistemas y asentamientos humanos, derivados de los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos y del cambio climático. Los impactos se gestan debido a la interacción de los cambios climáticos o fenómenos climáticos peligrosos que ocurren dentro de un periodo de tiempo específico y la vulnerabilidad de un sistema de infraestructura expuesto (IPCC, 2014). En la actualidad existen un gran número de impactos del cambio climático identificados, los cuales pueden variar por región, por sector de la sociedad, por esto resulta necesario precisar las condiciones de borde para cada estudio de adaptación.

Infraestructura Gris: Corresponde a las soluciones de infraestructura tradicionales construidas con hormigón, acero, ladrillo u otros materiales antropogénicos. Este tipo de infraestructura cumple con fines específicos para el bienestar de la sociedad, pero en un contexto de cambio climático puede que no integre sinergias de mitigación y adaptación al cambio climático, sin favorecer por ejemplo a la reducción de gases de efecto invernadero, o disminución de la temperatura de islas de calor en zonas urbanas, o en el ciclo de vida de los proyectos al fomentar el uso de materiales fabricados mediante procesos antropogénicos contaminantes con una importante huella ecológica (Acclimatise, 2018).

Infraestructura mixta o integrada: Así como existe la infraestructura verde y gris (ver puntos anteriores), existe también lo que se denomina infraestructura integrada, debido a cómo su nombre lo dice, integra componentes de infraestructura gris con infraestructura verde. Un ejemplo utilizado normalmente, es el uso de manglares combinados con barreras semipermeables, para reducir el nivel de erosión costero (Acclimatise, 2018).

Infraestructura Verde: Infraestructura verde corresponde a un conjunto de elementos de distintas escalas reconocidas por sus formas típicas y por brindar servicios ecosistémicos de soporte, provisión, regulación y bienestar. Algunos ejemplos de infraestructura verde pueden ser: eco-parques, eco-jardines, eco-humedales, eco-estuarios, etc. Este tipo de infraestructura en un contexto de cambio climático puede integrar sinergias de mitigación y adaptación al cambio climático para contribuir a una mejor calidad de vida de la población, contrarrestando impacto por aluviones, brindando protección contra inundaciones, resguardo ante marejadas, etc. (Acclimatise, 2018).

Infraestructura brown: Actividades asociadas al movimiento de tierra por rellenos y dragados en playas y cauces de ríos y elementos de protección ribereña erosionados o colmatados. (Acclimatise, 2018).

Inundación: Una inundación corresponde a un rápido ascenso del nivel del agua, generando caudales inusuales que cubren o llenan superficies de terreno que normalmente son secas, estas pueden ser fluviales o costeras (ONEMI, 2018).

Macrozonas hídricas: Para una mejor comprensión de la información hídrica presente en el Atlas del agua de la DGA, se optó por agrupar las regiones en cuatro grandes zonas, denominadas macrozonas, debido a sus factores hidrográficos, orográficos y climáticos, atributos que mantienen cierta afinidad y coherencia. Ellas son: Macrozona Norte, Macrozona Centro, Macrozona Sur y Macrozona Austral (DGA, 2016).

Marejada: Es un oleaje que se manifiesta en las zonas costeras, por efecto del viento local o generado en otro lugar del océano. Las olas pueden viajar cientos o miles de kilómetros, afectando durante varios días a las distintas actividades marítimas: transferencia de carga, navegación costera, pesca, buceo, deportes y recreación. Se califican como “Anormales”, cuando el fenómeno tiene características diferentes a los valores promedio de oleaje (altura, dirección, período), por lo que pueden ingresar a las bahías y puertos, generando severos daños a la infraestructura costera, además de inundaciones por sobrepasos, reducción de playas, cortes de tránsito y suspensión de otras actividades (ONEMI, 2018).

Paskoff (2010), define las marejadas como “eventos de olas de gran altura formadas por fuertes vientos en el área oceánica o en condiciones locales y que se propagan fuera de la zona de generación llegando a las costas de Chile”. Cuantitativamente, se consideran marejadas a olas con altura a partir de los 0.50 metros, según la Escala de Douglas, utilizada a nivel mundial para clasificar el estado del mar, es decir, por debajo de los 0.50 metros se puede considerar al oleaje como “Normal” y por encima de los 0.50 metros se puede considerar como “Anormal”. En Chile, se tienen registros de daños confirmados para olas con altura significativa superior a los 3 metros (DOP, 2015). Este umbral de daño corresponde al nivel de “Marejadas Gruesas” según la escala anteriormente mencionada, ubicada entre los 2.50 y 4.00 metros de altura de ola.

Obras de Manejo de Cauce: Entre las obras de manejo de cauces se incluyen las de defensa y protección de riberas, defensas longitudinales, espigones, obras de protección en estribos de puentes y de control aluvional (DOH, 2012).

Peligro: Es la ocurrencia potencial de un evento físico natural o provocado por el hombre, o un impacto físico, que puede causar la pérdida de vidas, lesiones u otros impactos negativos sobre la salud de las personas, naturaleza, prestación de servicios e infraestructura. El peligro en el contexto de cambio climático se refiere a los acontecimientos o tendencias físicas que están relacionados con el clima o sus impactos físicos (IPCC, 2014). El peligro será entonces una condición potencial de producir un daño sobre algún elemento del sistema de infraestructura o la afectación del servicio que estos prestan.

Pérdida y Daños: Se definen las pérdidas y daños, como la pérdida de cualidades físicas, prácticas o económicas a los recursos de una sociedad o un individuo. El IPCC, considera que las pérdidas pueden ser clasificadas en humanas, si existen muertes o heridos, económicas si hace referencia a daños en infraestructura, productividad o competencia de las actividades económicas (IPCC, 2014).

Resiliencia: Es la capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales para hacer frente a un evento, tendencia o perturbación peligrosa, para responder o reorganizarse de

manera que mantengan su función esencial, identidad y estructura, conservando al mismo tiempo su capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación (IPCC, 2014). Entonces, un sistema de infraestructura será resiliente cuando al ser sometido a condiciones de estrés por la presencia de un fenómeno del cambio climático tendrá la capacidad de recuperarse y mantener su operación, funcionalidad y su integridad estructural.

Riesgos: Es el potencial de generar impactos o consecuencias cuando un sistema de infraestructura está en situación de peligro y donde el resultado es incierto. El riesgo se representa a menudo como la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos y la generación de impactos o consecuencias adversas. El riesgo resulta de la interacción de la vulnerabilidad, la exposición y el peligro. El término riesgo se utiliza principalmente para hacer referencia a los riesgos de los impactos del cambio climático (IPCC, 2014). Por lo tanto, el riesgo caracteriza tanto la probabilidad de que ocurra el evento, como la consecuencia o efecto de éste.

Sensibilidad: El grado en que un sistema se ve afectado, de manera adversa o beneficiosa, por la variabilidad o el cambio climático. El efecto puede ser directo (por ejemplo: un cambio en el rendimiento del cultivo en respuesta a un cambio en la media, rango o variabilidad de la temperatura) o indirecto (por ejemplo, daños causados por un aumento en la frecuencia de inundaciones costeras debido al aumento del nivel del mar), (IPCC, 2014).

Servicio de infraestructura: Los servicios de infraestructura corresponden tanto a las funcionalidades como a las prestaciones que una obra pública debe proveer durante su fase de operación. Entendiéndose las funcionalidades como los principales propósitos de la obra, por lo tanto, se definen los servicios por tipología de obras MOP que se describen a continuación (MOP, 2017):

Servicios de infraestructura de zona costera: Corresponde a todos aquellos servicios y programas relacionados con infraestructura portuaria o de mejoramiento de borde costero como se lista a continuación (MOP, 2017):

- Infraestructura de Mejoramiento del Borde Costero: contribuye al desarrollo social, de recreación y turismo, a través de la provisión de servicios de infraestructura en el borde costero, fluvial y lacustre.
- Infraestructura Portuaria de Conectividad: asegura la conectividad marítima de zonas aisladas y el intercambio modal de transporte marítimo-terrestre.
- Infraestructura Portuaria de Ribera: mejora los estándares de protección de la ciudadanía de zonas ribereñas, marítimas y fluviales en riesgo por la acción de mareas y oleaje, a través de la provisión de servicios de infraestructura de protección de ribera.

- Infraestructura Portuaria para Turismo y Deportes Náuticos: facilita el turismo nacional e internacional, a través de la provisión de infraestructura portuaria adecuada a los estándares internacionales de esta industria.
- Infraestructura Portuaria Pesquera Artesanal: mejora las condiciones de productividad, operación, seguridad, higiene y turismo asociado a la actividad pesquera artesanal.
- Playas artificiales: como estrategia de mejoramiento de borde costero y fortalecimiento turístico, convirtiendo playas no aptas para el baño su fuerte oleaje, en playas aptas para baño y nado recreacional, compuestas generalmente por tres elementos principales, la playa, obras de contención y áreas de equipamiento.

Servicio de Infraestructura hidráulica de control Aluvional: La DOH define dentro de sus productos estratégicos relacionados con los servicios de infraestructura hidráulica de control aluvional y de manejo de cauces los siguientes (MOP, 2017):

- Defensas fluviales.
- Encauzamiento de riberas.
- Control aluvional.
- Revisión técnica en la definición de deslindes de cauces.
- Planes maestros de obras de manejo de cauces.
- Entrega de autorización técnica para la extracción de áridos en cauces.

Vulnerabilidad: Corresponde a la propensión o predisposición de la infraestructura a verse afectada negativamente. La vulnerabilidad abarca una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad, fragilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad para hacer frente y adaptarse (IPCC, 2014). De esta manera, la vulnerabilidad describe el grado de susceptibilidad y falta de resiliencia a la que un sistema de infraestructura se encuentra frente a los efectos adversos del cambio climático.

6. DIAGNÓSTICO DE VULNERABILIDAD DE SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA

Esta sección, comprende el desarrollo de un análisis de vulnerabilidad en base a eventos observados, que parte desde la conceptualización de la vulnerabilidad de servicios de infraestructura, continua con un análisis de exposición, que contempla una sistematización de los eventos climáticos extremos y sus principales efectos, así como el impacto que éstos han tenido en el medio económico, social y medioambiental presentado en forma de infografías, luego analiza los distintos factores de sensibilidad propios de un servicio de infraestructura y finaliza con un análisis de vulnerabilidad exploratorio desarrollado a través de matrices cualitativas.

6.1. Conceptualización de la vulnerabilidad en servicios de infraestructura

Para conceptualizar la vulnerabilidad climática de los servicios de infraestructura, es importante, en primer lugar, comprender el contexto en el que se desarrolla, y su interacción con otras variables tanto internas como externas. Para esto, y tomando en consideración la metodología *Working Group II Fifth Assessment Report del IPCC (WGII AR5)*, en donde se establece que para que un desastre ocurra, tienen que concurrir tres aspectos claves como son; la amenaza o peligro climático, el sistema de infraestructura expuesto a dicha amenaza, y la vulnerabilidad de dicho sistema (Ver Ilustración 3).

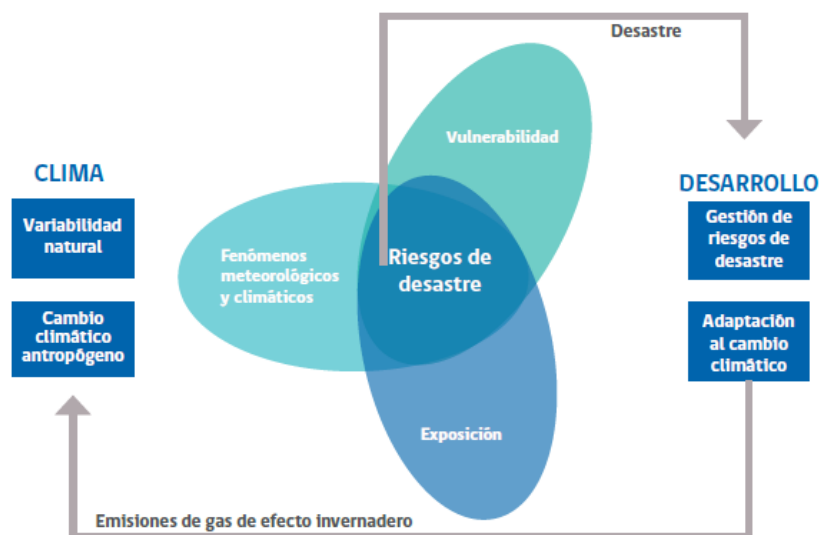


Ilustración 3. Relación entre la metodología de evaluación de vulnerabilidad y riesgo climático (CVRA)
Fuente: Plan de Adaptación y Mitigación CC del MOP 2017-2022

Como se ha indicado, la vulnerabilidad es una variable que es analizada de forma unilateral o aislada y no representa la comprensión total del riesgo del cambio climático para un sistema en particular; en tal sentido se requiere de un análisis que recoja información sobre otras variables internas de la vulnerabilidad como son: sensibilidad y capacidad adaptativa, y externas: amenaza y exposición.

En consideración al planteamiento hecho, se establece que, para el desarrollo del análisis de vulnerabilidad de servicios de infraestructura, se tomarán en cuenta aquellos factores que determinan su sensibilidad climática y que se encuentran inherentes al sistema, y su interacción con la exposición a las amenazas climáticas. De acuerdo con *European Commission* (2016), la vulnerabilidad de servicios de infraestructura se define como el producto de la sensibilidad por la exposición, como se indica en la siguiente fórmula:

$$V = S \times E$$

Donde,

- S = es el grado de sensibilidad del servicio de infraestructura
- E = es la exposición a la amenaza climática]
- V=Vulnerabilidad climática.

El enfoque de vulnerabilidad que se considerará en el desarrollo del análisis previsto en este estudio se basa en un enfoque integrado de riesgo-vulnerabilidad, que combina características de la vulnerabilidad interna propias de un sistema de infraestructura con su exposición a los factores de riesgo biofísico externo (Lampis, 2012).

6.1.1. Evaluación de vulnerabilidad en servicios de infraestructura

Previo al desarrollo conceptual de la evaluación de vulnerabilidad en servicios de infraestructura, resulta indispensable en primer lugar describir los distintos tipos de sistemas de infraestructura a evaluar, delimitados a un contexto geográfico y un enfoque temporal específico. En tal sentido se plantea la evaluación de los servicios de infraestructura hidráulica de control aluvional y manejo de cauces e infraestructura portuaria como, puertos de conectividad, puertos pesqueros artesanales y obras de zona costera de forma transversal en todo el territorio de Chile agrupado en cuatro (4) grandes macrozonas hídricas de acuerdo a la definición establecida por la DGA en su Atlas del Agua (Ver definiciones sección 5.4).

Por otra parte, el enfoque temporal, comprende la evaluación de vulnerabilidad bajo un enfoque de análisis de exposición retrospectivo (eventos observados) y se complementará con un análisis de vulnerabilidad prospectivo, con el fin de aportar un enfoque integral en el proceso de identificación y selección de medidas de adaptación.

Para efectos del presente informe se desarrolla un análisis de vulnerabilidad de tipo exploratorio, este tipo de análisis se caracteriza por centrarse en varios temas, que cubren un área grande con una resolución espacial baja para la recopilación de datos y la inclusión únicamente de tendencias aproximadas del clima para el futuro. Estos por lo general se basan principalmente en la opinión de expertos, la literatura y datos existentes (GIZ, 2016).

6.1.2. Vulnerabilidad retrospectiva

De acuerdo con la GIZ (2016), la vulnerabilidad no es una característica medible de un sistema, es un concepto en desarrollo que expresa la compleja interacción de los diferentes factores que determinan la susceptibilidad de un sistema a los impactos del cambio climático. Sin embargo, no hay una regla fija que defina cuáles son los factores por considerar, ni los métodos utilizados para cuantificarlos. Es por esto, que se habla de “evaluar” en vez de “medir” la vulnerabilidad.

Para efectos de este estudio, se establece que el objetivo de desarrollar una evaluación de vulnerabilidad es hacer foco en la identificación de “puntos críticos” de acuerdo a los eventos observados en los últimos 15 años (por ejemplo, un área geográfica específica o un servicio de infraestructura específico, que pudiera verse gravemente afectado por el cambio climático en relación a otros que no). Otro de los objetivos de desarrollar un análisis de vulnerabilidad en este estudio, es el de identificar los puntos de entrada para la intervención, es decir detectar aquellos factores que subyacen a la vulnerabilidad de un sistema y que pudiesen servir como punto de partida para la identificación de las intervenciones de adaptación adecuadas.

6.1.3. Vulnerabilidad prospectiva

Considerando que los escenarios futuros en el clima, y el efecto que tendrán, no se pueden predecir con precisión; los investigadores del clima generalmente hablan de escenarios de cambio climático o proyecciones en lugar de predicciones. En tal sentido cualquier evaluación de los impactos y la vulnerabilidad futura al cambio climático está cargada de incertidumbres tomando en cuenta los siguientes planteamientos:

- La magnitud del cambio climático depende de las futuras emisiones de gases de efecto invernadero que son desconocidas,
- Los diversos modelos climáticos producen resultados diferentes,
- Los fenómenos climáticos extremos, que a menudo son altamente relevantes para las evaluaciones del impacto climático, son más difíciles de proyectar que los de comienzo lento, con tendencias a largo plazo,
- Finalmente, los cambios futuros impulsados por factores no climáticos en el medio natural, socioeconómico e institucional (por ejemplo, crecimiento de la población) son volátiles, aumentando la incertidumbre de las evaluaciones de vulnerabilidad.

Abordar esta incertidumbre es crucial en el diseño de medidas adaptativas y la evaluación de la vulnerabilidad (GIZ, 2016). Sin embargo, las incertidumbres en las proyecciones del cambio climático no deben servir de argumento para la inacción. Hay un alto nivel de confianza sobre

los resultados de los modelos, que establecen que el clima va a cambiar seriamente incluso con un descenso importante de las emisiones de gases de efecto invernadero debido a la inercia existente en el sistema. Por lo tanto, se sabe lo suficiente para evitar postergar las acciones que hagan frente al cambio climático. Este análisis de vulnerabilidad prospectivo considerará el uso de los escenarios climáticos planteados en La Tercera Comunicación Nacional de Chile ante la CMNUCC (2016) para el periodo 2.031-2.050.

6.1.4. Vulnerabilidad focalizada/casos prácticos

Este estudio, comprende el desarrollo de un análisis de vulnerabilidad focalizado (casos prácticos) acordados con la contraparte técnica, y además se buscó fomentar la participación de los actores involucrados a través de talleres. El objetivo del análisis focalizado es concentrar esfuerzos en casos delimitados a una unidad espacial de mayor resolución y a un servicio de infraestructura específico en un periodo de tiempo definido. De acuerdo con lo planteado, los tres (3) casos más representativos considerando la recurrencia histórica, el nivel de desarrollo de los proyectos, y el impacto que las amenazas climáticas tuvieron sobre el medio socioeconómico y medioambiental, se definen a continuación:

- Obras fluviales y manejo de cauce, quebrada Paipote, Región de Atacama,
- Sistema de defensas fluviales río Mataquito, Región del Maule,
- Paseo Costero Juan de Saavedra, Valparaíso, Región de Valparaíso.

El objetivo de la evaluación de vulnerabilidad focalizada es determinar el nivel de vulnerabilidad de cada uno de los casos prácticos, a través de un diagnóstico, que permitirá identificar oportunidades de mejora en relación a la metodología de diseño aplicada y las medidas de adaptación y/o soluciones planteadas para enfrentar las amenazas climáticas futuras.

Entendiendo, que la variable climática futura puede dar lugar a fallas en el sistema, por umbrales que alguna vez se consideraron excepcionales pero aceptables y que se volvieron normales e inaceptables. Para esto resulta necesario establecer criterios que permitan a los proyectos funcionar dentro de márgenes más estrechos, entre la operación "normal" y los umbrales "críticos" (*European Commission*, 2016). La no consideración de estos nuevos umbrales puede manifestarse en la disminución de la eficiencia del servicio de infraestructura y proporcionar un margen de acción reducido, antes de que se tengan que abordar medidas de gestión drásticas y por ende más costosas.

6.1.5. Vulnerabilidad y adaptación al Cambio Climático

Finalmente, se plantea que las necesidades de adaptación de un servicio de infraestructura se encuentran estrechamente relacionadas con su ubicación geográfica, con el tipo de servicio que brindan, y con el tipo de la amenaza al que se encuentra expuesto. Una planificación eficaz y estratégica de adaptación se lleva a cabo mediante la identificación de aquellos sistemas que se verán más afectados por los impactos adversos del cambio climático (análisis de vulnerabilidad).

Se destaca además que, dentro de la discusión de adaptación al cambio climático, el concepto de “vulnerabilidad” puede ayudar a entender lo que hay detrás de los impactos adversos del cambio climático y además facilitar el proceso de identificación de puntos críticos que son más susceptibles al mismo. En este sentido una de las maneras más eficaces para identificar y priorizar las intervenciones o medidas de adaptación es llevar a cabo una evaluación de la vulnerabilidad. (GIZ, 2016)

6.2. Recopilación de datos históricos sobre eventos hidroclimáticos extremos

El análisis de vulnerabilidad basado en eventos observados comprende actividades como la identificación de una serie de fuentes de información, a las que se le aplicará una serie de criterios de selección, con el fin de facilitar el proceso recopilación y sistematización de datos históricos sobre eventos hidroclimáticos extremos ocurridos en Chile. Por otra parte, se desarrollarán una serie de reuniones, con el fin de formalizar la solicitud de datos y alinear las expectativas con relación a los objetivos del estudio.

6.2.1. Criterios para seleccionar las fuentes de información

En esta sección, se describen los principales criterios a utilizar para seleccionar y ordenar información, a continuación, el resumen de dichos criterios:

Tabla 2. Criterios de selección de fuentes de información

Criterio	Descripción
Confiabilidad	Fuentes Primarias de Información, ejemplo instituciones que dentro de sus roles desarrollan estudios con fines académicos, instituciones de gestión de desastres y monitoreo de eventos.
Pertinencia	Relevancia en relación con el territorio y tipo de eventos objeto de estudio.
Detalle	Que las fuentes contengan datos lo suficientemente desagregados como para realizar los análisis necesarios de acuerdo con el objeto de estudio del informe.
Temporalidad	Que los datos se encuentren dentro del periodo de tiempo objeto de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Considerando la diversidad de fuentes oficiales y no oficiales de información, que pudiesen sesgar los resultados de la base de datos de eventos, se han aplicado los criterios de selección descritos, con el objetivo seleccionar fuentes de información precisas, que apunten a responder las interrogantes de este estudio.

6.2.2. Descripción de las Fuentes de Información:

A continuación, se describen las fuentes de información utilizadas para la recolección de datos sobre eventos históricos, y las principales características de dichas fuentes:

Tabla 3. Descripción de fuentes de información utilizadas

Fuente Primaria	Descripción	Datos y análisis
Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin)¹	Registro dinámico de los principales desastres relacionados con peligros geológicos (remociones en masa, inundaciones, aluviones entre otros) desde el año 1981 hasta 2017.	Datos de pérdidas humanas y económicas de los desastres, así como principales variables climáticas que los generaron, recopilación de datos sobre eventos asociados a Remociones en Masa e inundaciones fluviales
Universidad de Valparaíso	Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile desde 1823 hasta el 2015	Duración, Año, Región, impacto, intensidad, la Universidad de Valparaíso que se alimenta de los reportes del Servicio Meteorológicos de la Armada de Chile, para la compilación de datos asociados a inundaciones costeras
MMA	Tercer Reporte de estado de Medio Ambiente en Chile, Sección de desastres	Fuente de información secundaria con datos agregados sobre Inundaciones, sequías y desprendimientos de tierra para el periodo comprendido entre 1906 y 2016.
ONEMI	Repositorio ONEMI / Informes Estadísticos Anuales / Informes Técnicos / Análisis multisectoriales	Informe Estadístico Anual: Contiene la información agregada en forma de datos estadísticos en relación de todos los eventos de origen natural como antrópico, con implicancias en personas, sus bienes o el medio ambiente en los distintos territorios de Chile, También contiene un capítulo de Estadística de los impactos como un compendio nacional de datos de eventos según origen y tipo registrado / Informes específicos / Análisis científico de eventos
ONG Desinventar	Registro histórico de desastres en Chile entre 1970 y 2015	Base de datos usada como referente para comparar y complementar, las fuentes de información oficial, y así desarrollar una matriz consolidada de datos históricos de eventos hidrometeorológicos extremos ocurridos en el periodo entre 2006 y 2015.
SHOA	Statistical weather and climate information	Información de alertas meteorológicas de índole marítimas. Enfoque preventivo y de pronóstico con foco en navegación
Biblioteca del Congreso de Chile (BCN)	Decretos supremos de declaración de zonas de catástrofe por desastres naturales	Se incorporó la revisión de decretos en donde se declaran las zonas de catástrofe o afectadas por catástrofes naturales de origen hidrometeorológico de acuerdo en el periodo delimitado en la base de datos de la Biblioteca Nacional del Congreso de Chile

¹ <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Primer-Catastro-Nacional-Desastres-Naturales.pdf>



Ministerio de Obras Públicas

Diagnóstico de la Vulnerabilidad de infraestructura y Medidas de Adaptación al Cambio Climático

Fuente: Elaboración propia.

6.2.3. Reuniones de trabajo con actores involucrados

Las reuniones de trabajo fueron de índole informativo, y fue el escenario en donde se formalizó el inicio de la consultoría y se alinearon expectativas sobre los objetivos de esta. Estas reuniones sirvieron para presentar resultados preliminares de la base de datos sobre eventos históricos desarrollada a través de una revisión bibliográfica. Por otra parte, se presentó información general de la consultoría como, la planificación general, y el estatus de esta a la fecha de la presentación. Además, en esta etapa se generaron discusiones y aportes de los actores que asistieron a las reuniones, disponibles en los anexos **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..4.**

Para el desarrollo de las reuniones, se realizó una pauta de indagación, que facilitó el proceso de recolección de las aportaciones y comentarios de los participantes. Esta información se encuentra detallada en el anexo 14.10. A continuación, se presenta una lista de las distintas entidades que participaron en las reuniones de trabajo.

- Secretaría Ejecutiva de Medio Ambiente y Territorio - SEMAT
- Dirección de Obras Portuarias - DOP
- Dirección de Obras Hidráulicas - DOH
- Dirección General de Aguas - DGA
- Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública -ONEMI
- Instituto Nacional de Hidráulica - INH
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo – MINVU
- PUC- CCG (Sebastián Vicuña y Patricio Winckler)
- SERNAGEOMIN,
- CR2 Universidad de Chile

Dentro de los principales acuerdos y compromisos tratados en las reuniones de trabajo, se encontró el de compartir con el equipo consultor una serie de documentos, estudios y reportes que permitiesen caracterizar los eventos hidroclimáticos que tuvieron efectos catastróficos y establecer una relación causa efecto entre el cambio climático, sus efectos y su interacción con los servicios de infraestructura aludidos. A continuación, se resumen los reportes e información compartida por los actores involucrados.

Tabla 4. Información suministrada por los distintos actores involucrados en la consultoría

Actor involucrado	Documentos/Reportes	Descripción
DOH/DOF	a. Plan Atacama, b. Caracterización de aluviones de Taltal, Rio Salado, Copiapó, ocurridos entre el 24 y 26 de marzo de 2015 en Antofagasta, c. Caracterización aluvional de la cuenca hidrográfica de del río Huasco	a. Plan Atacama: Plan desarrollado por el MOP después de los eventos del 2015, en el que se establecen una serie de soluciones técnicas e ingenieriles, para previsión de impactos negativos sobre la población en caso de ocurrencia de desastres naturales de tipo aluvión de inundación. b. Caracterización aluvional: Análisis de carácter técnico y científico en donde se describen las particularidades climatológicas,

	<p>ocurrida entre el 14 y 25 de marzo de 2015 en Atacama, d. Minutas técnicas sobre emergencias asociadas a flujos de detritos, El Loa, Iquique, agosto de 2015.</p>	<p>meteorológicas, hidrológicas, geológicas y topográficas que definieron el evento catastrófico, así como la descripción detallada de sus impactos y la respuesta de las obras de infraestructura diseñadas en principio para protección de las comunidades, también comprende una descripción y análisis de los impactos sociales y económicos asociada a esta clase de eventos.</p> <p>c. Minutas técnicas: Resumen técnico que aborda una descripción de las características del flujo de detritos en particular, estableciendo causas que potenciaron su impacto sobre servicios de infraestructura afectados.</p>
DOP	<p>a. <i>Paper</i> sobre las condiciones extremas del temporal del 8 de agosto de 2015, en la bahía de Valparaíso,</p> <p>b. Estudio de comportamiento de la costa de la V región,</p> <p>c. Datos de oleaje histórico del SHOA, frente al puerto de Valparaíso entre julio y diciembre de 2015,</p> <p>d. Minutas de emergencias por marejadas de Borde costero de Arica julio 2013, Valparaíso junio de 2017, noviembre 2017 Valparaíso, julio y agosto 2017 Chiloé,</p> <p>e. Informes de emergencia de marejadas ocurridas en julio de 2016 y agosto de 2015, en Valparaíso</p> <p>f. Catastro de obras de la DOP</p>	<p>a. Descripción de las variables mareográfica con viento, oleaje, presión atmosférica y marea astronómica y su impacto sobre la infraestructura portuaria y obras de protección de borde costero en la bahía de Valparaíso.</p> <p>b. Análisis de la dinámica morfológica de las playas de Viña del Mar comprendidas entre Punta Recreo hasta Punta Cochoa, y propuesta de control de erosión y manejo de sedimentos.</p> <p>c. Datos históricos de la altura significativa del oleaje (Hs) en m, periodo <i>peak</i> (Tp) de oleaje en s, y Dirección media de oleaje (DMO) en °, entre julio y agosto de 2015 frente al puerto de Valparaíso.</p> <p>d. Minutas de revisiones técnicas en terreno para la identificación de los impactos en distintas obras de infraestructura y propuesta de acciones correctivas.</p> <p>e. Informes que identifica daños sobre infraestructura y los costos asociados a la pérdida de activos, y costos de reparación de infraestructura afectada por el temporal de agosto de 2015.</p> <p>f. <i>Shape</i> de catastro de obras de infraestructura de la DOP actualizado.</p>
ONEMI	<p>a. Informes técnicos consolidados, de eventos como el desborde de río Las Minas, en Punta Arenas Región del Magallanes del 2012,</p> <p>b. Informe descriptivo de eventos hidroclimáticos específicos, como el sistema frontal ocurrido en las costas Centro-Sur del país, entre el</p>	<p>a. Informe que contiene una caracterización climática y eventos hidrometeorológicos desencadenantes de la catástrofe ocurrida en Punta Arenas, por desbordamiento del río Las Minas y la actuación sectorial para la atención de la emergencia.</p> <p>b. Contiene una descripción de las características del evento, una descripción de la secuencia de la emergencia y las gestiones realizadas, un análisis cuantitativo de daños a personas y afectación de viviendas por región</p>

	10 y 13 de julio de 2006.	afectada y un análisis de impacto geográfico del sistema frontal.
--	---------------------------	-------------------------------------------------------------------

Fuente: Elaboración propia.

6.3. Sistematización de información sobre eventos observados

Considerando la diversidad de fuentes de información identificadas para la recopilación de datos históricos sobre eventos hidrometeorológicos, sus efectos y el impacto socioeconómico y ambiental, se ha identificado la necesidad de desarrollar un proceso de sistematización de la información, con el objetivo de facilitar la comprensión sobre los efectos del Cambio Climático más recurrentes y los impactos de mayor envergadura.

En este sentido, se describe el proceso de sistematización, mediante los siguientes procesos: en primer lugar, la elaboración de una base de datos que contemple los criterios de organización definidos en la sección 6.3.1. Esta base de datos facilitó el desarrollo de tablas e infografías que reflejen recurrencia de eventos por región geográfica y la comprensión de aquellas regiones que han sufrido los impactos más significativos, de acuerdo con criterios sociales, económicos y medioambientales. Luego de haber identificado los eventos más desastrosos, se desarrollaron fichas de caracterización, en donde se resumió la información asociada a las causas o drivers climáticos y no climáticos que gatillaron el evento, delimitación espacial y temporal y una descripción más profunda de los impactos especialmente aquellos asociados a los servicios de infraestructura objeto de estudio.

6.3.1. Organización de información sobre eventos

En proceso, tiene por objetivo identificar la frecuencia de cada uno de los eventos de origen hidrometeorológico, así como la magnitud de los impactos generados por estos desde una enfoque económico, social y medioambiental (siempre que la información disponible lo permita). En tal sentido, se han desarrollado una serie de criterios para la organización de data histórica como se describe en la Tabla 5 .

Tabla 5. Criterios de organización de data histórica de eventos climáticos

Criterio	Descripción
Fuente	Se refiere a la fuente de información primaria de donde se obtuvieron detalles espaciales y temporales del evento. (Ej. SERNAGEMOIN).
Fecha	Corresponde a una descripción de la temporalidad del evento, mediante la descripción del periodo en día(s)/mes/año desde que se dieron las condiciones para el desarrollo del evento hasta su desenlace.
Macrozona	De acuerdo con la sección 0, de acuerdo con el Atlas del Agua de la DGA, se define como la porción geográfica que agrega varias regiones de acuerdo con sus características orográficas, hidrológicas y climáticas similares. (Ej. Macrozona Austral).
Región	Corresponde a una de las dieciséis (XVI) divisiones territoriales superiores de

	acuerdo con la organización territorial de Chile.
Provincia/Comuna o Sector	Corresponde a una porción más desagregada del territorio chileno, pudiendo ser una provincia cuando se trate de una de las 57 subdivisiones territoriales intermedias o una comuna cuando se trate de una de las 346 unidades básicas de administración local del país.
Clasificación del evento	De acuerdo con la sección 0, puede ser Aluvión, Marejada o Inundación, Para referirse a uno o varios de los efectos inmediatos producidos por los eventos hidroclimáticos extremos.
Descripción del evento	Corresponde a una descripción general del efecto producido por una condición climática extrema (Ej. Crecida del Río Copiapó).
Driver climático	Corresponde a la descripción de uno o varios de los drivers climáticos que gatillaron el efecto de condiciones hidrometeorológicas extremas. (Ej. Precipitación intensa).
Impacto Social	Corresponde a la descripción del impacto que tuvo cierto evento extremo sobre los habitantes de una o varias comunidades expuestas.
Impacto Económico	Corresponde a la descripción del impacto que tuvo cierto evento extremo sobre los bienes, capacidad productiva, servicios e infraestructura y su valor monetario representativo de una o varias comunidades expuestas.
Impacto Medio Ambiental	Corresponde a la descripción del impacto que tuvo cierto evento extremo sobre la calidad o cantidad de los recursos físicos y biológicos disponibles en la zona afectada antes del evento.

Fuente: Elaboración propia.

6.3.2. Análisis de impactos sobre eventos observados

En el anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se encuentra la base de datos n donde se ha compilado toda la información asociada a eventos hidroclimáticos extremos identificados para Chile según el periodo de tiempo establecido. Allí, se describen sus efectos e impactos sobre el medio social, económico y ambiental.

Considerando las dificultades para encontrar información fiable sobre impactos, se han establecido la siguientes premisas: la caracterización de los eventos hidroclimáticos extremos se realizará en función del tipo de efecto producido por una amenaza climática extrema; el análisis corresponde a una caracterización de impactos de carácter cualitativo de acuerdo con los tiempos y plazos establecidos para la consultoría; el resultado de la caracterización y valoración de impactos será verificado a través de la participación de diversos actores.

En base al planteamiento previo, se identifican los siguientes hallazgos; presencia en Chile de 89 eventos extremos de origen hidroclimático ver Ilustración 4, entre el periodo 2006-2018. Del total de eventos se estima que 67 corresponden a variaciones en el régimen de precipitaciones, destacándose aquellas de mayor intensidad, es decir grandes volúmenes de agua líquida en periodos de tiempo muy cortos, este evento se ha caracterizado como “precipitaciones intensas”. La definición de “precipitación intensa” es determinada por la magnitud de esta, que,

en principio considera la interacción de distintas variables como, datos históricos climáticos (precipitación y temperatura), periodo de tiempo de ocurrencia, región geográfica, estacionalidad, y fenomenología subyacente. La interacción multivariable para la definición de la magnitud de un evento de precipitación intensa dificulta la definición de un umbral de generalizado para Chile, por lo tanto, se establece de forma referencial una escala de clasificación de intensidad de una precipitación media en una hora, y que puede definirse como “Muy Fuerte” cuando varía entre 30,1 mm y 60 mm o puede ser “Torrencial” cuando supera los 60 mm en el mismo periodo de tiempo (AEMET, 2003).

Otro evento tipo de evento hidroclimático extremo que ha tenido impacto sobre las cuencas, ha sido las variaciones en el gradiente de temperatura o isotermas, con alteraciones particulares de la “isoterma 0” (Línea de Nieve), incrementándose su altitud (en m.s.n.m), y afectando el balance hídrico de la cuenca. A este fenómeno se ha caracterizado como “tormentas cálidas”, estas condiciones hidroclimáticas extremas ha tenido como principal efecto los aluviones e inundaciones. Y de igual forma que las precipitaciones intensas, la definición de un umbral corresponde netamente a la interacción multivariable entre meteorológica, climatología, geografía y otras. Por ejemplo, de acuerdo a (Garreaud, 2012) el nivel de congelación en el centro de Chile es típicamente entre 1.500 y 2.500 m cuando hay precipitación. Sin embargo, en aproximadamente un tercio de los casos, las precipitaciones se acompañan de temperaturas cálidas y niveles de congelación superiores a 3.000 m, lo que lleva a un incremento considerable en el área pluvial de las cuencas andinas y establece el escenario para los riesgos hidrometeorológicos.

Por otra parte, del total de eventos hidroclimáticos extremos identificados, son 22 que estiman ocurrencia por variaciones atípicas de los patrones climatológicos de viento y temperatura en el litoral, y en aguas marítimas de mayor profundidad, generando olas con una mayor altura significativa. A este fenómeno hidroclimático le ha seguido una reacción que se ha caracterizado como “marejadas”. De acuerdo con los datos DOP (2015), en Chile, el umbral medio de daño de marejadas o de oleaje extremo se establece para una altura significativa de ola (Hs) de 3 metros.

Las Ilustración 4 y 5 describen la distribución de ocurrencia de desastres, por presencia de eventos hidroclimáticos extremos, en donde se ha identificado que para el periodo de 12 años definido, la amenaza de mayor recurrencia ha sido las Remociones en Masa (Aluviones) con un 46% de ocurrencia en relación al total de eventos catastróficos, seguido por las inundaciones fluviales con un 29% y finalmente las marejadas con un 25%. Considerando que la temporalidad definida es corta en términos de clima, no es posible establecer conclusiones sobre recurrencia o proporcionalidad basada en análisis y normalización estadística, sin embargo, se puede identificar de forma no concluyente que el año 2015 fue particularmente intenso, en términos de ocurrencia de eventos catastróficos por aluviones, especialmente aquellos ocurridos en

diversas cuencas de las regiones de Antofagasta y Atacama y por marejadas particularmente en la zona central del país.

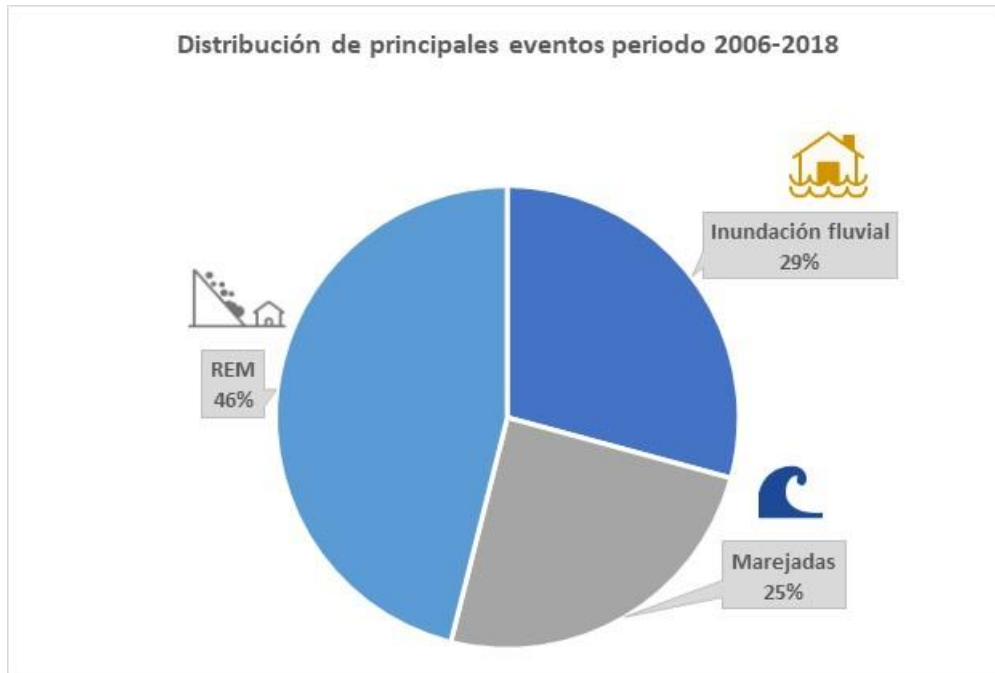


Ilustración 4. Caracterización de efectos asociados a eventos de origen hidroclimático periodo 2006-2018
Fuente: Elaboración propia

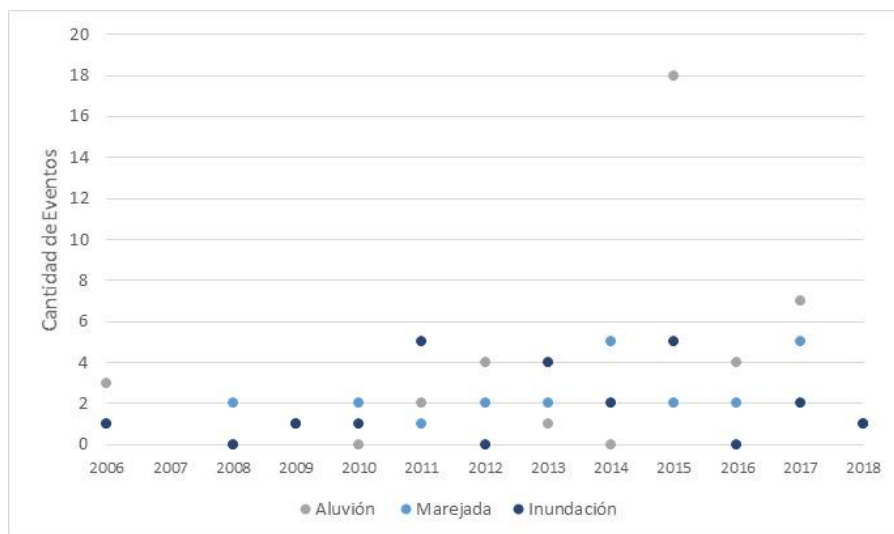


Ilustración 5. Recurrencia de eventos extremos de origen hidroclimático periodo 2006-2018
Fuente: Elaboración propia

Dentro de los hallazgos del periodo de estudio, también se identificó la recurrencia de eventos por región geográfica (Ver Tabla 6), en donde se destacan las regiones de Atacama y Antofagasta con una incidencia de 14 y 8 REM respectivamente, y las regiones de Araucanía y

Los Lagos con una incidencia de 5 y 4 inundaciones fluviales y finalmente Valparaíso como la región, que ha sido impactada por marejadas con mayor frecuencia.

Tabla 6. Recurrencia de eventos extremos por región geográfica en el periodo 2006-2018

Región	Remoción en Masa	Inundación fluvial	Marejada	Total
Arica y Parinacota	3	2	1	6
Tarapacá	3	0	0	3
Antofagasta	8	0	4	12
Atacama	14	3	1	18
Coquimbo	3	1	3	7
Valparaíso	0	0	6	6
Metropolitana	4	2	0	6
O'Higgins	1	0	0	1
Maule	0	3	1	4
Biobío	1	3	2	6
Araucanía	0	5	0	5
Los Lagos	3	4	0	7
Aysén	0	1	0	1
Magallanes y Antártica Chilena	1	1	0	2
De los ríos (Valdivia)	0	1	4	5
Total	41	26	22	89

Fuente: Elaboración propia.

Considerando estos hallazgos, a continuación, se presentan una serie de mapas en forma de infografía, que tienen por objetivo facilitar la comprensión de la recurrencia de efectos producto de eventos hidrolimáticos extremos a una escala territorial.

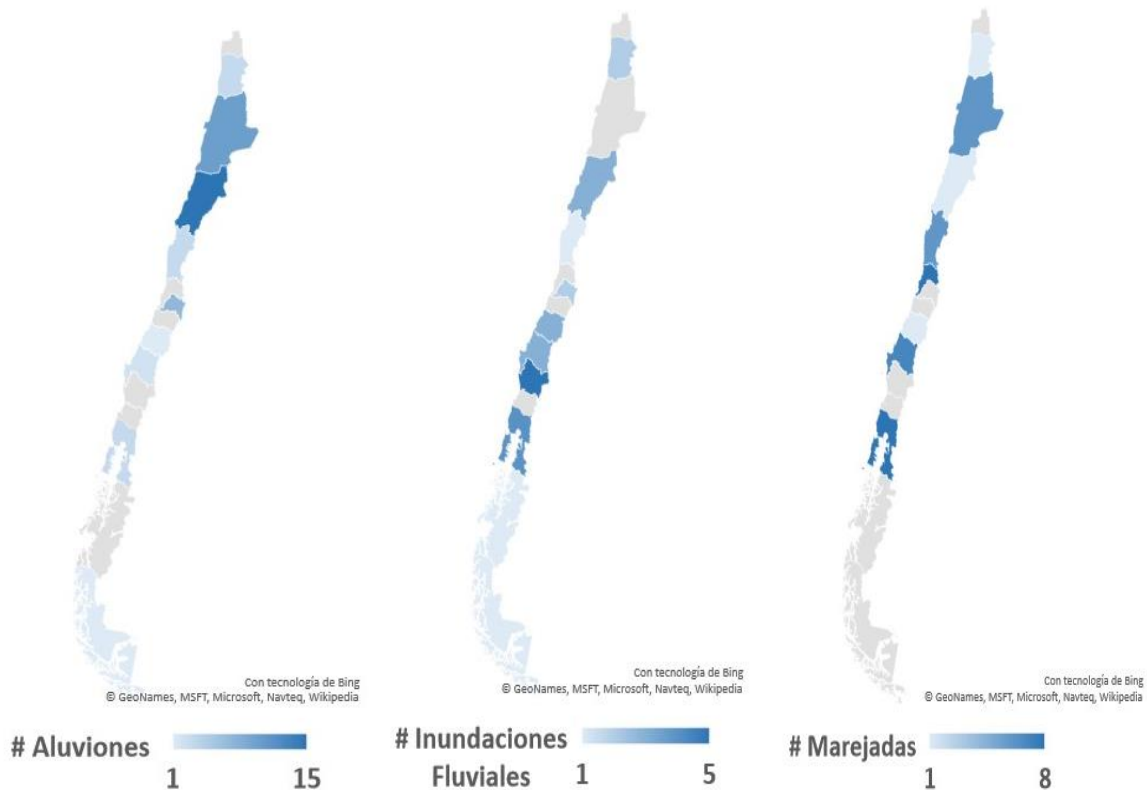


Ilustración 6. Distribución geográfica de amenazas con origen en eventos hidroclimáticos extremos
Fuente: Elaboración propia

Estos eventos catastróficos han impactado los sistemas humanos de diferentes formas, trayendo consigo diversas pérdidas (ver definiciones 5.4) que han variado en magnitud y extensión geográfica. En tal sentido, se desarrolló valoración cualitativa de los impactos sociales, económicos y medioambientales de acuerdo a los tres tipos de amenazas descritas.

Para desarrollar el análisis de impactos, se ha establecido mediante una revisión histórica de las catástrofes de origen hidroclimático ocurridas en Chile entre 1980 y 2018 y a través de juicio de expertos, se ha aplicado una serie de criterios de categorización cualitativos, que permitieron categorizar y comparar la magnitud del impacto, entre regiones geográficas y según tipo de amenaza, como se resume en la siguiente tabla:

Tabla 7. Criterios de organización de data histórica de eventos climáticos

Tipo de impacto	Bajo ²	Medio	Alto
-----------------	-------------------	-------	------

² Se establece el presunto de que si no ha habido información registrada sobre dicho fenómeno significa que su impacto ha sido bajo

Social	Describe eventos que debido a su magnitud han implicado evacuación de poblaciones y albergados temporales.	Describe eventos que debido a su magnitud han generado personas lesionadas y/o enfermos, así como damnificados y comunidades aisladas.	Describe eventos que debido a su magnitud han generado pérdidas de vidas humanas y/o desapariciones físicas.
Económico	Describe eventos sin información disponible, o que han implicado pérdidas económicas menores (viviendas anegadas y/o destruidas, caminos rurales cortados, anegamiento de pequeños predios agrícolas, daños menores de caletas y embarcaciones) 0 a 500 MM\$ CLP	Describe eventos que han implicado pérdidas económicas medias (Viviendas, destruidas, vías de comunicación regionales dañadas, anegamiento significativo de áreas de agricultura, paralización temporal y deterioro de caletas) 501 a 999 MM\$ CLP	Describe eventos que han implicado pérdidas económicas altas (Viviendas, hospitales, escuelas, edificios públicos destruidos, vías de comunicación principales dañadas, puentes, avenidas, anegamiento de importantes áreas de agricultura, paralización y destrucción de puertos) + de 1.000 MM\$ CLP
Ambiental	Describe eventos sin información disponible, alteración parcial de la calidad del agua, aire y suelo, pérdidas menores de cobertura vegetal, en zonas de inundación frecuentes, afectación mínima de biodiversidad	Alteración media de la calidad de agua, aire y suelo, pérdida medianamente significativa de cobertura vegetal y bosques, afectación temporal de biodiversidad	Alteración importante o irreversible de la calidad y disponibilidad de agua potable, suelo y aire, pérdida considerable de grandes áreas de cobertura vegetal y bosques, afectación irreversible de la biodiversidad

Fuente: Elaboración propia.

Estos criterios han sido aplicados para cada uno de los eventos recopilados en la base de datos, y posteriormente se ha asignado un valor numérico del 1 al 3 para su cuantificación, siendo 1 “Bajo”, 2 “Medio” y 3 “Alto”. Tomando en consideración el objetivo del estudio y la definición del servicio de infraestructura, que tiene por principio el fin social de protección de comunidades, se ha asignado una ponderación por tipo de impacto, validada por el cliente y planteada de la siguiente forma, Impacto social 50%, Impacto Económico 30% e Impacto Medioambiental 20%.

Finalmente, la suma de cada uno de los impactos de acuerdo con su peso ha permitido obtener una valoración de los eventos más impactantes ocurridos en los últimos 12 años en Chile, en donde se resumen los más destacados por tipo de amenaza:

Tabla 8. Eventos de origen hidrológico extremo de mayor impacto en Chile, periodo 2006-2018

Año	Región	Macrozona	Clasificación de Evento	Social (60%)	Económico (30%)	Ambiental (10%)	Suma
2015	Antofagasta	Norte	Remoción en Masa	3	3	2	2,9
2015	Atacama	Norte	Remoción en Masa	3	3	2	2,9
2006	Biobío	Sur	Inundación	3	3	2	2,9

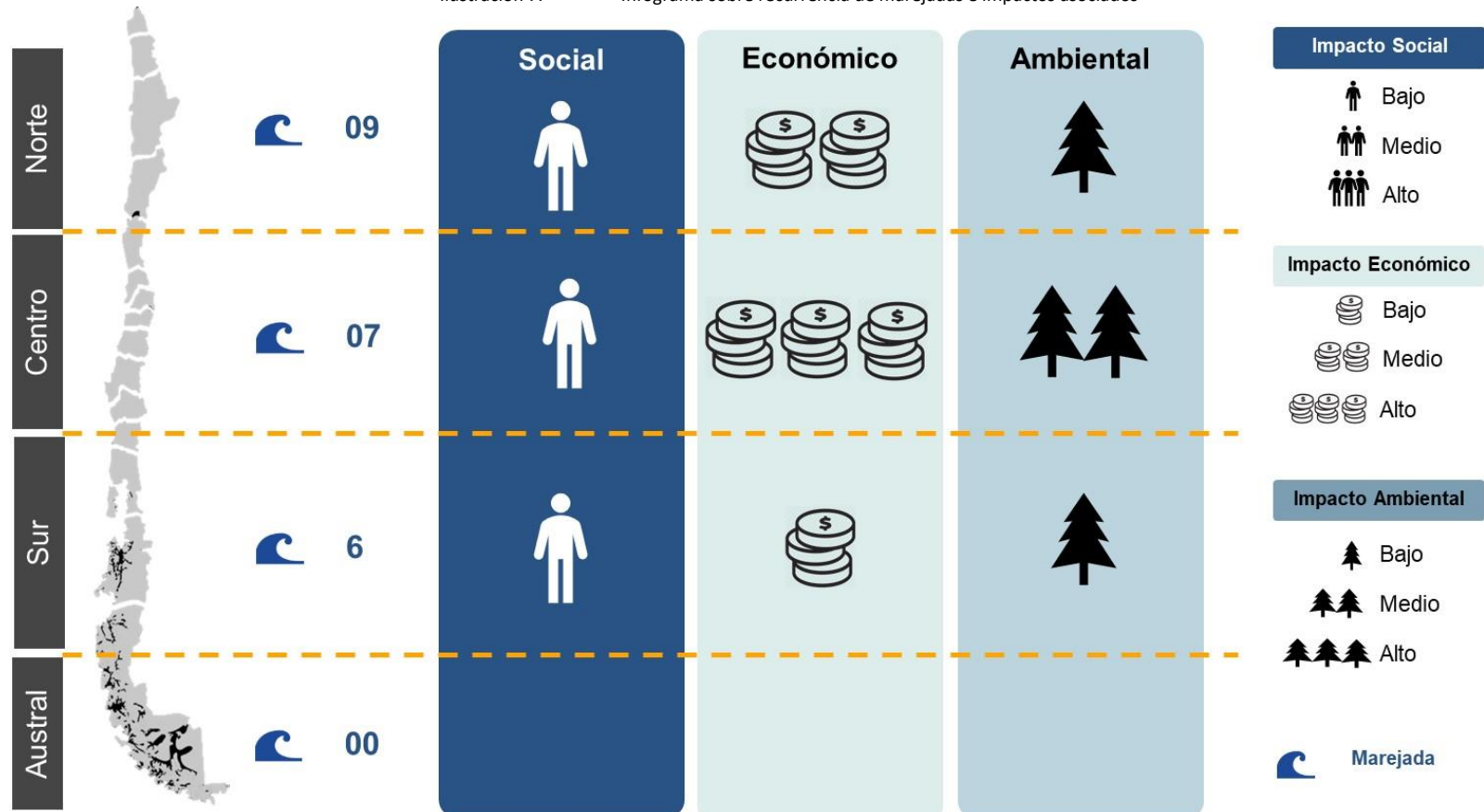
			fluvial				
2015	Valparaíso	Centro	Marejada	2	3	2	2,3

Fuente: Elaboración propia.

En base a este análisis, se ha desarrollado una serie de infografías, que agrupan la información sobre la frecuencia con la que han ocurrido los eventos catastróficos, considerando las 3 principales amenazas identificadas (marejadas, aluviones e inundaciones) en Chile y las Macrozonas geográficas asociadas considerando la clasificación hidrográfica en “Macrozonas” propuesta en el Atlas del Agua (DGA, 2016).

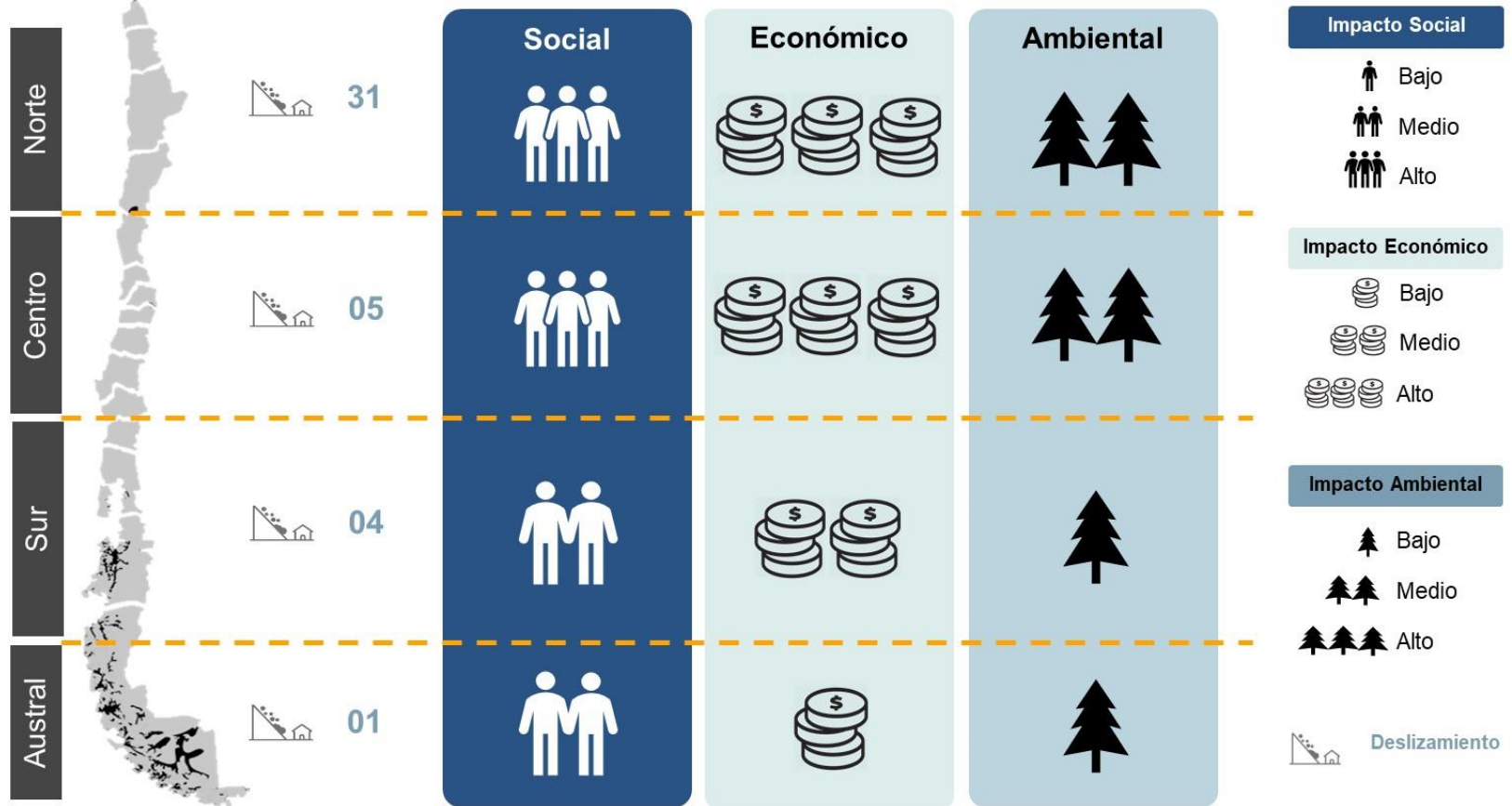
- En este sentido en el **infograma 1 “Impacto de Marejadas”** (Ilustración 7), se aprecia que la incidencia de marejadas ocurre en mayor medida en las macrozonas norte y sur del país, y su impacto social generalmente es bajo, considerando que este tipo de eventos da una mayor holgura en términos de tiempo de respuesta, y que se toman generalmente las medidas de prevención, basadas en sistemas de alerta temprana. Sin embargo, el impacto económico es otra realidad, ya que generalmente su impacto se ha valorado entre medio y alto, como sucede en las macrozonas norte y centro respectivamente, esto ocurre considerando variables demográficas, desarrollo económico y de infraestructuras característica de la región de Valparaíso y Antofagasta y su relevancia en la economía nacional.
- En este sentido en el **infograma 2 “Impacto de Aluviones”** (Ilustración 8), se aprecia que la incidencia de aluviones es muy alta en la zona norte de Chile específicamente en las regiones de Atacama y Antofagasta, con impactos sociales generalmente catastróficos considerando el número de víctimas fatales que estos traen consigo, esto ocurre principalmente por la existencia de oportunidades de mejoramiento de sistemas de alerta temprana y preparación social para enfrentar las emergencias (ONEMI, 2018). Por otra parte, el impacto económico asociado a los Aluviones es alto principalmente el centro de Chile, considerando que la región metropolitana agrupa el conglomerado demográfico e industrial más grande del país.
- En este sentido en el **infograma 3 “Impacto de inundaciones fluviales”** (Ilustración 9), se aprecia que la recurrencia de inundaciones fluviales es un evento que presenta su mayor incidencia en la macrozona sur, con un impacto social alto debido al número de víctimas fatales que ha traído consigo, producto del desbordamiento repentino de ríos o quebradas, y por ende la descarga de caudales máximos excepcionales. En términos de impactos económicos, a pesar de que su recurrencia es menor, se identifica la macrozona centro como una de las que ha tenido mayor significancia, principalmente por las variables demográficas y de desarrollo económico particulares de la Región Metropolitana. Como ejemplo de esto se encuentra el desenlace de la inundación por desbordamiento del río Mapocho ocurrida en la ciudad de Santiago en el año 2016. Por otra parte, el impacto de las inundaciones fluviales se ha hecho sentir en mayor medida en la macrozona austral, principalmente por el anegamiento de vastas áreas de cultivos y desarrollo agropecuario, así como reservorios de biodiversidad.

Ilustración 7. Infograma sobre recurrencia de marejadas e impactos asociados



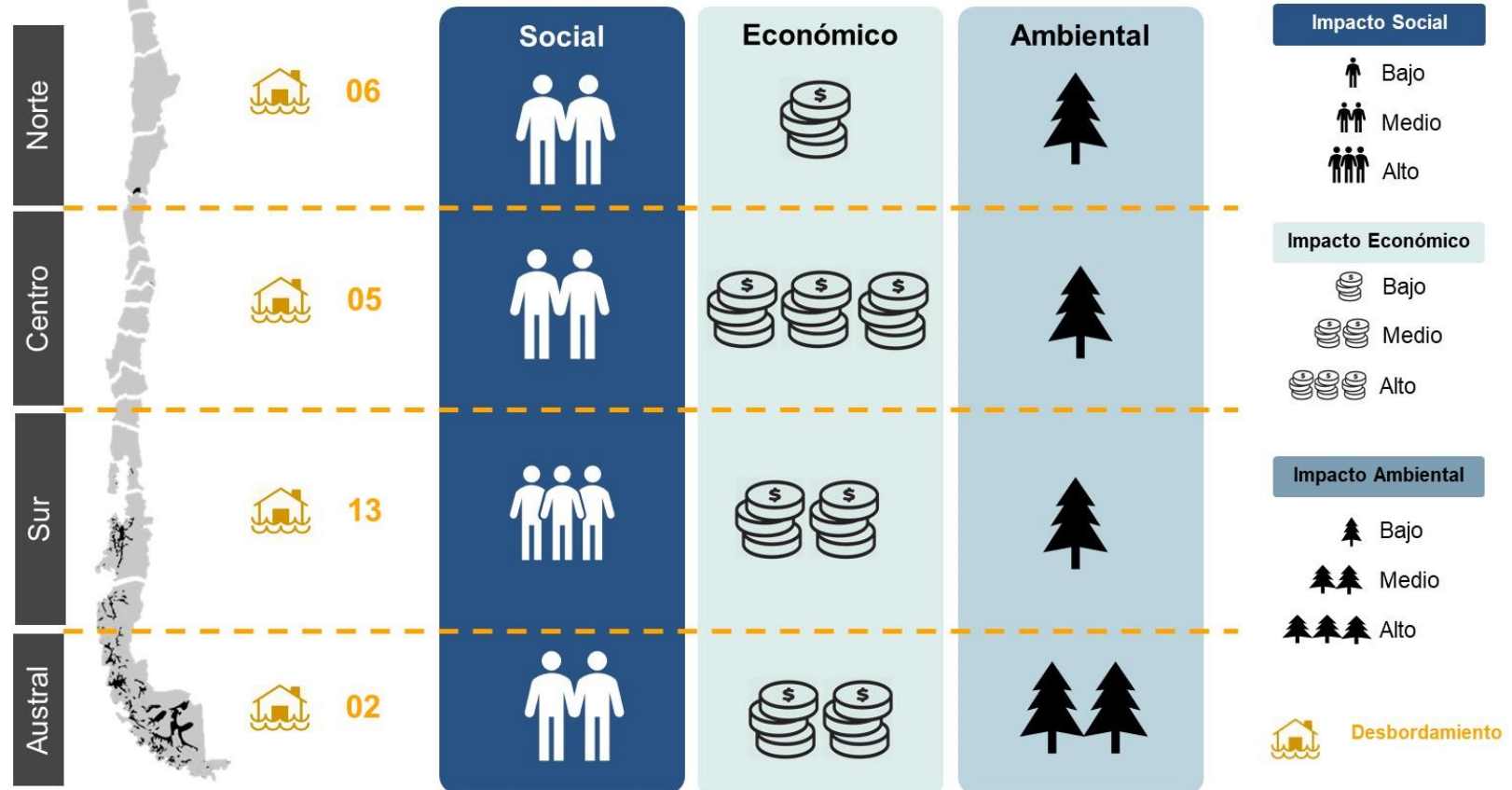
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 8. Infograma sobre recurrencia de aluviones e impactos asociados



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 9. Infograma sobre recurrencia de inundaciones fluviales e impactos asociados



Fuente: Elaboración propia

Tomando en consideración los eventos de mayor impacto y/o aquellos casos más representativos de acuerdo a las macrozonas hídricas como mandante geográfico, así como la disponibilidad de información sobre caracterización de dichos eventos, se han identificado aquellos, para los que se desarrollaron fichas de información técnica, con la finalidad de identificar las posibles causas o drivers tanto climáticos como no climáticos que desencadenaron el evento, además de identificar detalles sobre el impacto que tuvieron sobre en los servicios de infraestructura y sus repercusiones económicas y sociales. A continuación, se mencionan los principales eventos a desarrollar:

- Aluvión de Antofagasta y Taltal, marzo 2015,
- Aluvión del Río Copiapó, marzo 2015,
- Aluvión de la cuenca de Huasco, marzo 2015,
- Aluvión de la cuenca de Río Salado, marzo 2015,
- Aluvión del San José del Maipo, abril de 2016,
- Marejada de la V región, agosto del 2015,
- Marejada de Valdivia, junio de 2011,
- Marejada de Arica y Parinacota, julio 2013,
- Inundación por vaciamiento del lago Catchet II, febrero 2009.

6.3.3. Fichas por tipos de eventos de mayor impacto

El desarrollo de estas fichas tiene por objetivo, facilitar la construcción de una matriz de interacción entre los distintos drivers climáticos presentes en Chile y las amenazas que estos representan, así mismo permitiendo identificar potenciales factores de sensibilidad y de capacidad adaptativa, que pudiesen dar pista sobre las oportunidades de mejora existentes en las obras de infraestructura y que alentarían el desarrollo de la resiliencia climática en el futuro.

En tal sentido, las fichas se han estructurado bajo un formato, que en primer lugar permite establecer la temporalidad y la espacialidad del evento, posteriormente recoge datos que permiten la descripción de la magnitud y replicabilidad o recurrencia del evento climático principalmente. Contiene además información sobre los drivers climáticos y los no climáticos y finalmente una descripción de sus impactos incluyendo aquellos sobre los servicios de infraestructura objeto de análisis si existiesen según sea el caso.

Tabla 9. Evento Aluvional Antofagasta y Taltal, marzo del 2015

Fuente de información			
ONEMI, Comité Científico técnico informe anual 2015 ³ / DOH Caracterización y levantamiento de información debido a crecidas en las localidades de Antofagasta y Taltal			
Temporalidad			
Fecha Inicio:	24/03/2015	Fecha Fin:	26/03/2015
Ubicación			
Región:	Antofagasta	Macrozona:	Norte
Ciudad(es):	Taltal	Latitud (UTM):	
Comuna/provincia:	Taltal	Longitud (UTM):	
Cuencas asociadas:	Quebrada Las Rocas (Antofagasta), quebrada Taltal (Antofagasta)		
Tipo de evento climático¹			
Descripción:	Precipitaciones intensas en zonas cordilleranas y precordilleranas		
Magnitud:	Precipitación máxima acumulada 67 mm Taltal y 30 mm Antofagasta		
Duración:	36 horas aproximadamente		
Frecuencia o replicabilidad	Conjugación de diversas variables climatológicas que coincidieron con el inicio de la fase cálida del niño / Periodo de retorno del evento de 55 años		
Drivers Climáticos			
Temperatura:	La altura de la isoterma cero en promedio fue bajando de 4.600 a 4.000 metros de norte a sur durante la tormenta, la que usualmente es un 15 a 20% menor (cerca a 3.500 m).		
Precipitación:	En la alta cordillera de la Región de Antofagasta el registro fue de 8,2 mm en 15 minutos. En la estación de Alto del Carmen, en la zona precordillerana de la Región de Atacama, fue de 11 mm en 30 minutos		
Marea/Oleaje:	N/A		
Drivers No climáticos			
Ordenamiento del territorio	No identificados		
Impermeabilidad del suelo	No identificados		
Gestión de cuenca	Proyecto de control aluvional sin concluir		
Materialidad	No identificados		
Impactos o efectos del evento			
Caudales máximos (m ³ /s)	Líquidos 15 – 20, Detríticos 30 -50.		
Consecuencias:	Aluvión, inundaciones y sobrepase de infraestructura de control		
Clasificación del evento ² :	Estado de Excepción Constitucional de Catástrofe		
Personas	Infraestructura		
Muertos:	31	Portuarias	
Desaparecidos:	16	Borde costero	N/A
Heridos / Enfermos	No identificados	De Conectividad	N/A
Afectados	No identificados	De Ribera	N/A
Damnificados	35.086	De Turismo y deportes	N/A

Evacuados	No identificados	Pesca artesanal	N/A
Bienes		Hidráulicas	
Viviendas afectadas	6.253	Defensas fluviales	Insuficientes
Viviendas destruidas	2.071	Encauzamiento de riberas	No existen
Otros:	Carreteras interurbanas, Ruta 1, Ruta 5 y Ruta B- 902	Control aluvional	Colmatada y sobrepasada
Perdidas Económicas			
Servicio no prestado	No identificado		
Valor de la pérdida (M\$)	13.000 M\$ CLP		
Valor de la pérdida (US\$)	No identificado		

(1) Definición del evento considerando la definición de evento climático extremo según el IPCC

(2) Clasificación del evento de acuerdo con la ONEMI

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Evento Aluvional de río Copiapó Región de Atacama, marzo de 2015

Fecha y Fuente de información			
ONEMI, Comité Científico técnico informe anual 2015 ⁴ / DOH Caracterización y levantamiento de información debido a crecidas aluvionales la cuenca del Río Copiapó			
Temporalidad			
Fecha Inicio:	24/03/2015	Fecha Fin:	26/03/2015
Ubicación			
Región:	Atacama	Macrozona:	Norte
Ciudad(es):	Copiapó	Latitud (UTM):	
Comuna/provincia:	Nantoco, Tierra Amarilla, Paipote	Longitud (UTM):	
Cuencas asociadas:	El río Copiapó actuó hidráulicamente como un colector de las quebradas aguas abajo del embalse Lautaro, tales como Amolanas, Calqui, San Antonio, Los Loros (que recoge las aguas de las quebradas Lomas Bayas y El Peñón), Majadita, El Sauce, Cinchado y Cerrillos		
Tipo de evento climático¹			
Descripción:	Precipitaciones intensas en zonas cordilleranas y precordilleranas		
Magnitud:	Precipitación máxima acumulada de 64 mm en Cuenca Copiapó y 59 mm en cuenca de Huasco		
Duración:	36 horas aproximadamente		
Frecuencia o replicabilidad	Conjugación de diversas variables climatológicas que coincidieron con el inicio de la fase cálida del niño / Periodo de retorno del evento de 100 años		
Drivers Climáticos			
Temperatura:	La altura de la isoterma cero en promedio fue bajando de 4.600 a 4.000 metros de norte a sur durante la tormenta, la que usualmente es un 15 a 20% menor (cerca a 3.500 m).		
Precipitación:	El día 25 y 25 de marzo, se concentró la mayor precipitación en la cuenca del río Copiapó, con máximos cercanos a los 12 mm/h el 24 y 10 mm/h el 35		
Marea/Oleaje:	N/A		
Drivers No climáticos			

Ordenamiento del territorio	No identificados		
Impermeabilidad del suelo	No identificados		
Gestión de cuenca	Sistemas de monitoreo fluviométricos no operativos		
Materialidad	No identificados		
Impactos o efectos del evento			
Caudales máximos	Detrítico 220 m ³ /s		
Consecuencias:	Eventos aluvionales, inundaciones		
Clasificación del evento ² :	Estado de Excepción Constitucional de Catástrofe		
Personas		Infraestructura	
Muertos:	26	Portuarias	
Desaparecidos:	16	Borde costero	N/A
Heridos / Enfermos	No identificados	De Conectividad	N/A
Afectados	No identificados	De Ribera	N/A
Damnificados	35.086	De Turismo y deportes	N/A
Evacuados	No identificados	Pesca artesanal	N/A
Bienes		Hidráulicas	
Viviendas afectadas	3.520	Defensas fluviales	Ruptura de defensa de quebrada Cerrillos
Viviendas destruidas	338	Encauzamiento de riberas	Afectados por socavamiento
Otros:	80,1 km de rutas interurbanas y 284,8 km de rutas urbanas	Control aluvional	No especificado
Perdidas Económicas			
Servicio no prestado	No identificado		
Valor de la pérdida (M\$)	222.102 M\$ CLP		
Valor de la pérdida (US\$)	312 M\$ US		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Evento Aluvional de la cuenca de Huasco Región de Atacama, marzo de 2015

Fecha y Fuente de información			
ONEMI, Comité Científico técnico informe anual 2015 ⁵ / DOH Caracterización y levantamiento de información debido a crecidas aluvionales en la cuenca de Huasco, Región de Atacama			
Temporalidad			
Fecha Inicio:	24/03/2015	Fecha Fin:	26/03/2015
Ubicación			
Región:	Atacama	Macrozona:	Norte
Ciudad(es):	Huasco	Latitud (UTM):	
Comuna/provincia:	Huasco, Vallenar y Alto el Carmen	Longitud (UTM):	
Cuencas asociadas:	Río Huasco, desde la desembocadura de la quebrada Maitencillo, hasta la confluencia de los ríos El Carmen y El Tránsito y otras quebradas como, El		

	jilguero, Imperial Bajo, Chañar Blanco, Puente la Verbena, Embalse Santa Juana, El Solar, Maitén, El Sombrío y el Algodón		
Tipo de evento climático¹			
Descripción:	Precipitaciones intensas en zonas cordilleranas y precordilleranas		
Magnitud:	Precipitación máxima acumulada en 24hrs de 34 mm en Alto del Carmen, 19 mm en El Tránsito y 28 mm en Vallenar		
Duración:	36 horas aproximadamente		
Frecuencia o replicabilidad	Conjugación de diversas variables climatológicas que coincidieron con el inicio de la fase cálida del niño		
Drivers Climáticos			
Temperatura:	La altura de la isoterma cero en promedio fue bajando de 4.600 a 4.000 metros de norte a sur durante la tormenta, la que usualmente es un 15 a 20% menor (cerca a 3.500 m).		
Precipitación:	Precipitación máxima acumulada en 24hrs de 34 mm en Alto del Carmen, 19 mm en El Tránsito y 28 mm en Vallenar		
Marea/Oleaje:	N/A		
Drivers No climáticos			
Ordenamiento del territorio	Construcción de viviendas en zonas de descarga aluvional o inundación		
Topografía	Se identificó que la pendiente media de la cuenca de del valle del río Tránsito oscila entre el 40 y 80%, definiendo la pendiente de la cuenca como un factor de importancia a la hora de catalogar el riesgo aluvional		
Gestión de cuenca	No identificados		
Materialidad	No identificados		
Impactos o efectos del evento			
Caudales máximos	Detrítico 305 m ³ /s		
Consecuencias:	Eventos aluvionales, inundaciones		
Clasificación del evento ² :	Estado de Excepción Constitucional de Catástrofe		
Personas		Infraestructura	
Muertos:	5	Portuarias	
Desaparecidos:	No especificados	Borde costero	N/A
Heridos / Enfermos	No especificados	De Conectividad	N/A
Afectados	No especificados	De Ribera	N/A
Damnificados	6.305	De Turismo y deportes	N/A
Evacuados	No especificados	Pesca artesanal	N/A
Bienes		Hidráulicas	
Viviendas afectadas	190	Defensas fluviales	Defensas sobrepasadas
Viviendas destruidas	66	Encauzamiento de riberas	No especificado
Otros:	Rutas C-489, C-495	Control aluvional	No especificado
Perdidas Económicas			
Servicio no prestado	Pérdida total por producción agrícola 1.410 M\$ CLP		
Valor de la pérdida (M\$)	10.620 M\$ CLP		
Valor de la pérdida (US\$)	No especificado		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Evento Aluvional de la cuenca de del Río Salado región de Atacama, marzo de 2015

Fecha y Fuente de información			
ONEMI, Comité Científico técnico informe anual 2015 ⁶ / DOH Caracterización y levantamiento de información debido a crecidas aluvionales en la cuenca del Río Salado, Región de Atacama			
Temporalidad			
Fecha Inicio:	24/03/2015	Fecha Fin:	26/03/2015
Ubicación			
Región:	Atacama	Macrozona:	Norte
Ciudad(es):	Chañaral	Latitud (UTM):	
Comuna/provincia:	Chañaral, El Salado, Diego de Almagro y Llanta	Longitud (UTM):	
Cuencas asociadas:	Río Salado, Quebrada Chañaral Alto y Río Salado Alto		
Tipo de evento climático¹			
Descripción:	Precipitaciones intensas en zonas cordilleranas y precordilleranas		
Magnitud:	Precipitación máxima acumulada en 24hrs de 60 mm en estación pluviométrica Intelec		
Duración:	36 horas aproximadamente		
Frecuencia o replicabilidad	Conjugación de diversas variables climatológicas que coincidieron con el inicio de la fase cálida del niño / Periodo de retorno estimado Chañaral 10 años y El Salvador de 100 años		
Drivers Climáticos			
Temperatura:	La altura de la isoterma cero en promedio fue bajando de 4.600 a 4.000 metros de norte a sur durante la tormenta, la que usualmente es un 15 a 20% menor (cerca a 3.500 m).		
Precipitación:	Precipitación máxima acumulada en 24hrs de 60 mm en estación pluviométrica Intelec		
Marea/Oleaje:	N/A		
Drivers No climáticos			
Ordenamiento del territorio	No especificados		
Topografía	No especificados		
Gestión de cuenca	Insuficiencia hidráulica de puentes		
Materialidad	No especificados		
Impactos o efectos del evento			
Caudales máximos	Detrítico 752 m ³ /s		
Consecuencias:	Eventos aluvionales, inundaciones		
Clasificación del evento ² :	Estado de Excepción Constitucional de Catástrofe		
Personas		Infraestructura	
Muertos:	No especificados	Portuarias	
Desaparecidos:	No especificados	Borde costero	N/A
Heridos / Enfermos	No especificados	De Conectividad	N/A
Afectados	No especificados	De Ribera	N/A
Damnificados	No especificados	De Turismo y deportes	N/A

Evacuados	No especificados	Pesca artesanal	N/A
Bienes		Hidráulicas	
Viviendas afectadas	No especificados	Defensas fluviales	No especificado
Viviendas destruidas	No especificados	Encauzamiento de riberas	Altos niveles de destrucción de obras de canalización de Río Salado
Otros:	Rutas 5 y C-13	Control aluvional	No especificado
Perdidas Económicas			
Servicio no prestado	Pérdida total por producción agrícola 1.410 M\$ CLP		
Valor de la pérdida (M\$)	53.159 M\$ CLP		
Valor de la pérdida (US\$)	No especificado		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Evento Aluvional Villa Santa Lucía, diciembre de 2017

Fecha y Fuente de información			
SERNAGEOMIN, Díptico Aluvión en Villa Santa Lucía 2017			
Temporalidad			
Fecha Inicio:	15-12-2017	Fecha Fin:	16-12-2017
Ubicación			
Región:	Los Lagos	Macrozona:	Sur
Ciudad(es):	Villa Santa Lucía	Latitud (UTM):	
Comuna/provincia:	Chaitén	Longitud (UTM):	
Cuencas asociadas:	Cuenca hidrográfica del río Burrillos y cordón montañoso Yelcho		
Tipo de evento climático ¹			
Descripción:	Una remoción en masa del tipo deslizamiento ocurrió en las nacientes del río Burrillo debido a intensas precipitaciones registradas en la zona, área que corresponde al extremo sureste de la zona glaciar del Cordón Yelcho, la cual movilizó hielo, sedimentos y cobertura vegetal. El material se comportó como un flujo rápido que alcanzó el poblado de Villa Santa Lucía.		
Magnitud:	Precipitación máxima acumulada en 24hrs de 124 mm en cabecera de cuenca de río Burrillos		
Duración:	24 horas aproximadamente		
Frecuencia o replicabilidad	Conjugación de diversas variables climatológicas que coincidieron que una pared de roca se deslizase sobre un glaciar cubierto en retroceso, formando un aluvión que fluyó a una velocidad promedio estimada de 72 km/hora		
Drivers Climáticos			
Temperatura:	Este deslizamiento se originó como consecuencia de las intensas precipitaciones que afectaron el área (124,8 mm en 24 horas) junto a una elevada isoterma 0° (1.600 m.s.n.m).		
Precipitación:	Precipitación máxima acumulada en 24hrs de 124 mm en cabecera de cuenca de río Burrillos		
Marea/Oleaje:	N/A		
Drivers No climáticos			
Ordenamiento del territorio	Construcción de viviendas en zonas de descarga aluvional o inundación		
Topografía	Se identificó que la pendiente media de la cuenca del río Burrillos oscila entre el 15 y 45 %, definiendo la pendiente de la cuenca como un factor de importancia a la hora de catalogar el riesgo aluvional y de flujo de detritos		

Gestión de cuenca	No identificados		
Materialidad	No identificados		
Impactos o efectos del evento			
Caudales máximos	Detrítico 2.000.000m ³ a una velocidad media de 72 Km/h		
Consecuencias:	Eventos aluvionales, inundaciones, remoción de árboles y cobertura vegetal		
Clasificación del evento ² :	Estado de Excepción Constitucional de Catástrofe		
Personas		Infraestructura	
Muertos:	21	Portuarias	
Desaparecidos:	1	Borde costero	N/A
Heridos / Enfermos	12	De Conectividad	Caminos
Afectados	No especificados	De Ribera	Casas y establos
Damnificados	No especificados	De Turismo y deportes	N/A
Evacuados	No especificados	Pesca artesanal	N/A
Bienes		Hidráulicas	
Viviendas afectadas	50% de las viviendas de Villa Santa Lucía	Defensas fluviales	No especificado
Viviendas destruidas	50% de las viviendas de Villa Santa Lucía	Encauzamiento de riberas	No especificado
Otros:	rutas 7 y 235	Control aluvional	No especificado
Perdidas Económicas			
Servicio no prestado	No especificado		
Valor de la pérdida (M\$)	No especificado		
Valor de la pérdida (US\$)	No especificado		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Evento Aluvional San José del Maipo, abril de 2016

Fecha y Fuente de información			
SERNAGEOMIN, ficha de análisis de aluvión de San José del Maipo			
Temporalidad			
Fecha Inicio:	14-04-2016	Fecha Fin:	16-04-2016
Ubicación			
Región:	Metropolitana	Macrozona:	Centro
Ciudad(es):	Santiago	Latitud (UTM):	
Comuna/provincia:	San José de Maipo	Longitud (UTM):	
Cuencas asociadas:	Cuenca hidrográfica del río Maipo		
Tipo de evento climático¹			
Descripción:	Generación de flujos de detritos por fuertes e intensas precipitaciones en el sector del cajón del Maipo. Los efectos de estos flujos fueron diversos, desde interrumpir el suministro de agua potable en Santiago, hasta el corte de caminos, destrucción de vivienda y pérdida de vidas humanas, como ocurrió con el flujo de detritos en la localidad de El Melocotón, específicamente en el Estero Las Cucas.		
Magnitud:	Precipitación máxima acumulada en 24 h de 72 mm en cabecera de cuenca de estero Las Cucas		
Duración:	24 horas aproximadamente		
Frecuencia o replicabilidad	Conjugación de diversas variables climatológicas que coincidieron con el aumento de la densidad poblacional en las inmediaciones de las quebradas ha incrementado la probabilidad que las personas y sus viviendas sean afectadas por estos procesos geológicos.		

Drivers Climáticos			
Temperatura:	Para este evento, la isoterma cero se mantuvo sobre los 3. 500 m.s.n.m.		
Precipitación:	Precipitación máxima acumulada en 24 h de 72 mm en cabecera de cuenca de estero Las Cucas		
Marea/Oleaje:	N/A		
Drivers No climáticos			
Ordenamiento del territorio	Aumento de la densidad poblacional en las inmediaciones de las quebradas ha incrementado la probabilidad que las personas y sus viviendas sean afectadas por estos procesos geológicos.		
Topografía	Se identificó que la pendiente media de la cuenca del río Burritos oscila entre el 15 y 45 %, definiendo la pendiente de la cuenca como un factor de importancia a la hora de catalogar el riesgo aluvional y de flujo de detritos		
Gestión de cuenca	No identificados		
Materialidad	No identificados		
Impactos o efectos del evento			
Caudales máximos	Escurrimiento en el estero Las Cucas de 6 m de altura, caudal no informado		
Consecuencias:	Eventos aluvionales, inundaciones, remoción de árboles y arrastre de piedras		
Clasificación del evento ² :	Zona de catástrofe		
Personas		Infraestructura	
Muertos:	3	Portuarias	
Desaparecidos:	1	Borde costero	N/A
Heridos / Enfermos	No especificados	De Conectividad	Caminos y puentes
Afectados	No especificados	De Ribera	Casas
Damnificados	No especificados	De Turismo y deportes	N/A
Evacuados	No especificados	Pesca artesanal	N/A
Bienes		Hidráulicas	
Viviendas afectadas	3 viviendas aledañas al cauce de la quebrada del estero Las Cucas	Defensas fluviales	No especificado
Viviendas destruidas	1 vivienda	Encauzamiento de riberas	No especificado
Otros:	Ruta G25	Control aluvional	No especificado
Perdidas Económicas			
Servicio no prestado	No especificado		
Valor de la pérdida (M\$)	No especificado		
Valor de la pérdida (US\$)	No especificado		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Vaciamiento del Lago Catchet II, 2009

Fecha y Fuente de información			
Universidad de Concepción, Vaciamiento de Lago Catchet II desde Glaciar Colonia 2009			
Temporalidad			
Fecha Inicio:	14-04-2016	Fecha Fin:	16-04-2016
Ubicación			
Región:	Aysén	Macrozona:	Centro
Ciudad(es):	Cochrane	Latitud (UTM):	
Comuna/provincia:	Cochrane/Capitán Prat	Longitud (UTM):	
Cuencas asociadas:	Cuencas hidrográficas de los ríos Colonia, Baker		
Tipo de evento climático ¹			

Descripción:	La región de Aysén al igual que el resto del mundo ha registrado en los últimos años un importante aumento de la temperatura que ha acelerado el proceso de retroceso de glaciares. Este fenómeno provocado por el cambio climático hace que se formen lagos por el derretimiento. El fenómeno consiste en el desagüe repentino de lagos represados por paredes de hielo, también llamados jökulhlaups o “glacial lake outburst floods”, GLOF (por sus siglas en inglés). El evento, calificado como “evento hidrológico extremo” -por la Dirección General de Aguas (DGA) de Aysén- ocurre periódicamente en casi todas las cadenas montañosas del mundo, estimándose un aumento en su ocurrencia en el contexto de cambio climático.		
Magnitud:	Constantes vaciamientos del lago Catchet II junto al Glaciar Colonia en la cuenca del río Colonia.		
Duración:	Vaciamiento violento y repentino en 3 días aproximadamente.		
Frecuencia o replicabilidad	Vaciamiento violento y repentino en 3 días aproximadamente. Varios vaciamientos en meses anteriores y posteriores (total de 7 episodios de menor magnitud e intensidad). Desde 2008 el lago Cachet 2 se ha vaciado en seis ocasiones. La primera de ellas el 7 de abril del 2008, y luego el 8 de octubre y 21 de diciembre del mismo año. El 2009 se produjo un nuevo vaciamiento el 5 de marzo (la más importante y la que causó mayores impactos en la comunidad) y 16 de septiembre de 2009. En tanto, durante el 2010 se produjo nuevamente el 5 de enero.		
Drivers Climáticos			
Temperatura:	Para este evento, la temperatura se mantuvo en los valores medios normales.		
Precipitación:	N/A		
Marea/Oleaje:	N/A		
Drivers No climáticos			
Ordenamiento del territorio	Aumento de la densidad poblacional en las inmediaciones de los cauces de ríos ha incrementado la probabilidad que las personas y sus viviendas sean afectadas por estos procesos de desglaciación		
Topografía	El desagüe del lago formado por el derretimiento del glaciar se produce de manera subglacial a través de un túnel de 8 kilómetros de largo por 25 metros de ancho y 4 de alto. Se identificó que la pendiente media de la cuenca del río Colina y Baker oscila entre el 5 y 15 %, definiendo la pendiente de la cuenca como un factor de importancia a la hora de catalogar el riesgo inundaciones.		
Gestión de cuenca	No identificados		
Materialidad	No identificados		
Impactos o efectos del evento			
Caudales máximos	2500 m ³ /s		
Consecuencias:	Eventos de inundaciones, daño de viviendas y embarcaderos, afectación de animales bovinos y ovinos (arrastre con el agua)		
Clasificación del evento ² :	Estado de Excepción Constitucional de Catástrofe		
Personas		Infraestructura	
Muertos:	No especificados	Portuarias	
Desaparecidos:	No especificados	Borde costero	Embarcaderos
Heridos / Enfermos	No especificados	De Conectividad	Caminos y puentes
Afectados	No especificados	De Ribera	Casas
Damnificados	No especificados	De Turismo y deportes	Hoteles y hostales
Evacuados	No especificados	Pesca artesanal	Caletas

Bienes		Hidráulicas	
Viviendas afectadas	No especificados	Defensas fluviales	No especificado
Viviendas destruidas	No especificados	Encauzamiento de riberas	No especificado
Otros:	No especificados	Control aluvional	No especificado
Perdidas Económicas			
Servicio no prestado	No especificado		
Valor de la pérdida (M\$)	No especificado		
Valor de la pérdida (US\$)	No especificado		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Marejada en Arica, julio de 2013

Fuente de información			
Minuta sobre alerta de Marejadas en Arica – Armada de Chile – Capitanía de Puerto de Arica			
Temporalidad			
Fecha Inicio:	04/07/2013	Fecha Fin:	07/07/2013
Ubicación			
Región:	XV	Macrozona:	Norte
Ciudad(es):	Arica	Latitud (UTM):	N/A
Comuna/provincia:	Arica	Longitud (UTM):	N/A
Playas:	Chinchorro, El Laucho, La Lisera		
Puertos de Conectividad			
Defensas Costeras	El Caleuche, Paseo Wheelwright, Paseo San Juan de Saavedra.		
Tipo de evento climático ¹			
Descripción:	Marejadas.		
Magnitud:	Mareas hasta 1.4 metros de altura (predicción).		
Duración:	72 horas aproximadamente.		
Frecuencia	Sistema de fuerte viento en dirección sureste/este en zona oceánica. Marejadas más frecuentes en Chile para meses Mayo - Junio – Julio – Agosto.		
Drivers Climáticos			
Presión atmosférica:	S/I		
Vientos:	S/I		
Marea/Oleaje:	Mareas hasta 1,4 metros de altura (predicción).		
Drivers No climáticos			
Exposición	No identificados		
Población y N° Usuarios	No identificados		
Diseño y Construcción	No identificados		
Mantenimiento	No identificados		
Impactos o efectos del evento			
Altura significativa de ola:	Mareas hasta 1,4 metros de altura (predicción).		
Periodo de Ola:	S/I		
Dirección:	S/I		
Viento:	S/I		
Personas		Infraestructura	
Muertos:	No identificados	Portuarias	
Desaparecidos:	No identificados	De Ribera	S/I
Heridos / Enfermos	No identificados	De Conectividad	S/I
Afectados	No identificados	De Turismo y deportes	S/I
Damnificados	No identificados	Pesca artesanal	S/I

Evacuados	No identificados	Puertos	S/I
Bienes		Protección costera	
Viviendas afectadas	No identificadas	Muros de Borde	Sobrepaso. Destrucción de murete. Socavación de terraplenes costeros.
Viviendas destruidas	No identificados	Rompeolas	Sobrepaso. Sin daños.
Muelles y Caletas:	Sin daños registrados	Espigones / Molos	Sin daños registrados
Perdidas Económicas			
Servicio no prestado	No identificado		
Valor de la pérdida (M\$)	19.000 M\$ CLP		
Valor de la pérdida (US\$)	-		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Temporal Valparaíso, agosto de 2015

Artículo de Investigación: El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile Central (Winkler P., Contreras-López M., Campos-Caba R., Beyá José F. & Molina M.). Asesoría en Evaluación de Riesgos de Infraestructura Costera en un Contexto de Cambio Climático (Winkler P., Contreras-López M., Reyes Gallardo M., Cortes Molina F., Beyá Marshall J.)			
Temporalidad			
Fecha Inicio:	07/08/2015	Fecha Fin:	08/08/2015
Ubicación			
Región:	V	Macrozona:	Centro
Ciudad(es):	Valparaíso, Viña del Mar	Latitud (UTM):	N/A
Comuna/provincia:	Valparaíso, San Antonio	Longitud (UTM):	N/A
Playas:	El Convento, San Mateo, Caleta El Membrillo, Placeres, Portales, Yolanda, Caleta, Acapulco, La Boca, El Sol, Los Marineros.		
Puertos de Conectividad	Muelle Barón, Caleta Portales (muelle nuevo), Club de Yates de Recreo, Club House, Muelle Vergara, Club de Yates de Higuierillas, Caleta Peñuelas.		
Defensas Costeras	El Caleuche, Paseo Wheelwright, Paseo San Juan de Saavedra.		
Tipo de evento climático¹			
Descripción:	Temporal. Marejadas y Oleaje extremo. Viento extremo.		
Magnitud:	Olas con más de 3 metros de altura significativa.		
Duración:	24 horas aproximadamente.		
Frecuencia	Conjugación de baja presión atmosférica, sistema frontal de vientos con intensas precipitaciones y marea astronómica coincidiendo con el temporal. Marejadas más frecuentes en Chile para meses Mayo - Junio - Julio - Agosto.		
Drivers Climáticos			
Presión atmosférica:	Baja de presión atmosférica hasta 981 Hpa, iniciando el 7 de agosto y tomando su punto más bajo el 8 de agosto.		
Vientos:	Hasta 90 Km/H.		
Marea/Oleaje:	Altura por encima de los 3 m con daño efectivo registrado hasta 7.23 m.		
Drivers No climáticos			
Exposición	No identificados		
Población y N° Usuarios	No identificados		
Diseño y Construcción	No identificados		
Mantenimiento	No identificados		
Impactos o efectos del evento			
Altura significativa de ola:	7,23 m		
Periodo de Ola:	13,3 s		

Dirección:	310°		
Viento:	90 km/H (25 ms ⁻¹)		
Personas	Infraestructura		
Muertos:	6	Portuarias	
Desaparecidos:	No identificados	De Ribera	2
Heridos / Enfermos	No identificados	De Conectividad	2
Afectados	58.363	De Turismo y deportes	3
Damnificados	No identificados	Pesca artesanal	2
Evacuados	No identificados	Puertos	2
Bienes	Protección costera		
Viviendas afectadas	2.535	Muros de Borde	Sobrepaso. Socavación
Viviendas destruidas	No identificados	Rompeolas	Sobrepaso. Daños estructurales.
Muelles y Caletas:	Sobrepaso. Daños estructurales.	Espigones / Molos	Sobrepaso. Daños estructurales.
Perdidas Económicas			
Servicio no prestado	No identificado		
Valor de la pérdida (M\$)	56.000.000.000 M\$ CLP		
Valor de la pérdida (US\$)	6.830.000.000 US\$		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Marejada Chiloé, agosto de 2017

Fuente de información			
Minuta de Emergencia Chiloé 2017			
Temporalidad			
Fecha Inicio:	07/2013	Fecha Fin:	08/2013
Ubicación			
Región:	X	Macrozona:	Sur
Ciudad(es):	Queilen, Tenaún, Quenac	Latitud (UTM):	N/A
Comuna/provincia:	Chiloé	Longitud (UTM):	N/A
Playas:	Pudeto Medio		
Puertos de Conectividad	S/I		
Defensas Costeras	Queilen, Tenaún, Quenac		
Tipo de evento climático¹			
Descripción:	Marejadas.		
Magnitud:	S/I		
Duración:	Julio – Agosto		
Frecuencia	Marejadas más frecuentes en Chile para meses Mayo - Junio – Julio – Agosto.		
Drivers Climáticos			
Presión atmosférica:	S/I		
Vientos:	S/I		
Marea/Oleaje:	S/I		
Drivers No climáticos			
Exposición	No identificados		
Población y N° Usuarios	No identificados		
Diseño y Construcción	No identificados		
Mantenimiento	No identificados		

Impactos o efectos del evento			
Altura significativa de ola:	S/I		
Periodo de Ola:	S/I		
Dirección:	S/I		
Viento:	S/I		
Personas		Infraestructura	
Muertos:	No identificados	Portuarias	
Desaparecidos:	No identificados	De Ribera	S/I
Heridos / Enfermos	No identificados	De Conectividad	S/I
Afectados	No identificados	De Turismo y deportes	S/I
Damnificados	No identificados	Pesca artesanal	S/I
Evacuados	No identificados	Puertos	S/I
Bienes		Protección costera	
Viviendas afectadas	No identificadas	Muros de Borde	Sobrepaso y destrucción de muros de protección costera hecha a base pilotes y tablestacas para contención de relleno
Viviendas destruidas	No identificados	Rompeolas	Sin daños registrados
Muelles y Caletas:	Sin daños registrados	Espigones / Molos	Sin daños registrados
Perdidas Económicas			
Servicio no prestado	No identificado		
Valor de la pérdida (M\$)	3.605.000.000 M\$ CLP		
Valor de la pérdida (US\$)	-		

Fuente: Elaboración propia

6.4. Clasificación y Caracterización de amenazas

Es importante destacar, que de acuerdo al *Fifth Assessment Report* (AR5) del IPCC7, se referencia al concepto de peligro, como: el potencial desenlace de un suceso o impacto físico relacionado con el clima que pudiese causar pérdidas de vidas, lesiones, u otros efectos negativos sobre la salud, así como daños y pérdidas en infraestructuras, propiedades, medios de subsistencia, ecosistemas y recursos naturales (ver sección 5.4). Para efectos de concordancia con el vocabulario institucional del MOP, en este estudio se hará referencia al peligro como amenaza climática.

De acuerdo con el Centro de Cambio Global (CCG, 2012), y en base a las proyecciones climáticas allí descritas, se describen de manera resumida las principales amenazas climáticas que pudiesen impactar sobre obras y servicios de infraestructura en Chile en el futuro son:

- **Aumento de magnitud de sequías**, para este tipo de amenaza se ha identificado una correlación directa entre el incremento de la temperatura y los patrones de disponibilidad de agua en la región, considerando que en los Andes existe un vínculo



⁷ https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_glossary_ES.pdf





estrecho entre la acumulación de nieves y los volúmenes de descarga en los ríos, se ha determinado que el incremento en la temperatura está muy relacionado con los momentos en que se dan los máximos caudales de descarga.

- **Aumento de intensidad en inundaciones fluviales**, estas amenazas consideradas relevantes por su potencial alto de impacto se explican por un aumento significativo de la escorrentía aportante a un cauce o curso de agua, este aumento puede deberse a un evento de precipitación líquida, o al derretimiento del manto nival. Comúnmente la causa de las crecidas está asociada a eventos de precipitaciones, y pueden desarrollarse por tres motivos, (1) una tormenta de inusual intensidad; (2) una alta saturación y bajo almacenamiento de la cuenca frente a un evento, y (3) la ocurrencia de un evento de precipitación líquida sobre una porción significativa de la cuenca contribuyente, mayor a la típica.
- **Aumento de intensidad en inundaciones costeras**, El análisis de la información mareográfica disponible a nivel nacional, no permite concluir respecto de la existencia de tendencias de aumento del nivel del mar en las costas de Chile, sin embargo, desde el punto de vista del clima de oleaje, sí parecieran existir tendencias al aumento de alturas de oleaje significativo y mayor frecuencia de los eventos de tipo marejada.

De acuerdo con el IPCC 2016, las amenazas climáticas están claramente tipificadas al igual que su cadena de efectos, en tal sentido complementando lo descrito previamente, se desarrolla una caracterización general de todas las posibles amenazas climáticas que pudiesen presenciarse en Chile, con el objetivo de evaluar e identificar todos los posibles factores de sensibilidad climática presentes en un servicio de infraestructura, la siguiente tabla resume como se enlazan los principales drivers de cambio climático y sus efectos secundarios.

Tabla 19. Relación entre drivers climáticos y amenazas

Simbología	Driver Climático	Amenazas
	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura extrema del aire (Aumento excesivo de la temperatura ambiente) • Radiación solar extrema (Aumento excesivo de los niveles de radiación solar) 	<p>Disponibilidad de Agua o Sequía: La sequía es una anomalía climatológica transitoria en la que la disponibilidad de agua se sitúa por debajo de lo habitual en un área geográfica. Esta falta de lluvias durante un período prolongado de tiempo produce escasez de agua que afecta las actividades de la población en el territorio.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementos de las velocidades del viento (cambios extremos de magnitud, dirección y sentido de los vientos) • Cambios en el nivel medio del mar. 	<p>Marejadas Ciclónicas: Se podrían generar vendavales de gran magnitud que podrían ocasionar la erosión eólica tanto de borde costero como de lecho de ríos, a causa de tormentas ciclónicas caracterizadas por un centro de baja presión, bandas de lluvias en espiral y fuertes vientos que ocasionan variación</p>

	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura extrema del aire (Aumento excesivo de la temperatura ambiente) • Incremento de eventos de precipitaciones en épocas del año no usuales. 	<p>del nivel del mar.</p> <p>Tormentas Cálidas: Incremento de eventos de precipitaciones con temperaturas cálidas en meses de verano, en lugares donde habitualmente en esa época no llueve.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • Alteraciones en los valores de precipitación promedio anual/ estacional / mensual. • Precipitación extrema (incrementos de episodios con mayores: Intensidades, Frecuencias y Magnitudes) 	<p>Inundaciones Fluviales: Una inundación se produce cuando una cantidad determinada de agua de un cauce o río se desborda de su lecho o espacio habitual de flujo. Esto produce que el agua pase por zonas urbanas, las cuales se han localizado en zonas cercanas al lecho de cauces.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación extrema (incrementos de episodios con mayores: Intensidades, Frecuencias y Magnitudes) • Desprendimientos y/o deslizamientos de suelos, caídas de rocas. 	<p>Remociones en Masa (REM): Un deslizamiento es un tipo de corrimiento o movimiento de masa de tierra, provocado por la inestabilidad de un talud a causa de lluvias que saturan la estructura o matriz de un suelo, generando inestabilidad al disminuir su resistencia al esfuerzo de corte. También se pueden considerar fenómenos de aluviones, flujos de detritos y arrastre de materiales antrópicos como vehículos, casas, materiales de construcción, basura, entre otros.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementos de las velocidades del viento (cambios extremos de magnitud, dirección y sentido de los vientos) • Cambios en el nivel medio del mar. 	<p>Marejadas: Aumento significativo del oleaje (magnitud de altura de ola e intensidad), ocasionadas por episodios de fuertes vientos sin presencia de lluvias, que se pueden generar en cualquier época del año, donde recientemente hay tenido mayor frecuencia en el borde costero durante los meses de verano.</p>

	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación extrema (incrementos de episodios con mayores: Intensidades, Frecuencias y Magnitudes) • Incrementos de las velocidades del viento (cambios extremos de magnitud, dirección y sentido de los vientos) 	<p>Inundaciones Costeras: Aumento significativo del oleaje (magnitud de altura de ola e intensidad), ocasionadas por temporales de lluvias acompañados de vientos que se generan en el borde costero, principalmente en meses de invierno.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementos de las velocidades del viento (cambios extremos de magnitud, dirección y sentido de los vientos) • Cambios en el nivel medio del mar y patrones del oleaje. • Aumento de precipitaciones en borde costero. 	<p>Erosión del Borde Costero: Debido a los fenómenos de precipitaciones y viento se producen cambios o alteraciones en los patrones cotidianos del oleaje, lo cual produce erosión del borde costero, por ejemplo: de arena de playas, lecho de desembocadura de ríos, cambios de geomorfología de estuarios, movilidad de sedimentos, entre otros.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • Cambios en el nivel medio del mar por alteraciones del patrón de oleaje u oscilaciones extremas del régimen de mareas. 	<p>Incremento del Nivel del Mar: Se manifiestan alteraciones bruscas y extremas del nivel medio del mar en las zonas de borde costero, que afectan el funcionamiento de infraestructura como, por ejemplo: puertos, marinas, caletas de pescadores, entre otros.</p>

Fuente: Modificado de EC (2017), Non Paper Guidelines for project Managers

La Tabla 19, pretende desarrollar una lista extensiva más no exhaustiva de las principales amenazas climáticas a las que se encuentran expuestos los servicios de infraestructura de borde costero, control aluvional y defensas fluviales. De acuerdo con el análisis de eventos observados realizado en los últimos 12 años para Chile las principales amenazas presentes en el territorio son las marejadas, las remociones en masa, las inundaciones fluviales, las tormentas cálidas y eventualmente las marejadas ciclónicas.

6.4.1. Matriz de amenazas climáticas

En esta sección, se desarrolla una matriz, que busca establecer un marco lógico, para el posterior desarrollo del análisis de vulnerabilidad. Para esto es necesario realizar una caracterización de las principales amenazas climáticas según el tipo de servicio de infraestructura, así como sus potenciales impactos. Por otra parte, se busca analizar como estos

efectos, ocasionalmente pueden verse atenuados o ampliados, considerando factores de sensibilidad propios de la infraestructura.

Considerando la revisión de data histórica y la consulta de otras fuentes de información como CCG, (2012), a continuación, se establecen los criterios de clasificación de amenazas climáticas para Chile:

- Magnitud considerando los impactos analizados previamente,
- Replicabilidad, considerando el periodo de retorno promedio de acuerdo con el tipo de evento,
- Ubicación geográfica, corresponde a las referencias de macrozonas definidas en el Atlas del agua y las regiones que la componen,
- Potenciales impactos, esta asocia los potenciales impactos directos e indirectos sobre la infraestructura costera y de control crecidas y aluviones y los servicios que estas prestan.

De acuerdo con el planteamiento hecho se presentan las tablas con las matrices de análisis de amenazas climáticas para cada los dos grupos de servicios de infraestructura considerados en el estudio:

Tabla 20. Caracterización de amenazas asociadas a servicios de infraestructura fluvial

Tipo de amenaza	Presencia Geográfica	Magnitud	Potencial de Replicabilidad	Potenciales impactos infraestructura
Inundaciones fluviales	Mayor presencia en las macrozona norte y sur Entre las regiones de Valparaíso y Biobío	Media	Media	a. Sobrepase de defensas fluviales b. Incremento de escorrentía en zonas de alta cota de la cuenca c. Superación de caudales máximos de diseño d. Socavamiento
Remociones en Masa (REM)	Mayor presencia Macrozona norte del país, compuesta por las regiones de Arica y Parinacota, Antofagasta y Atacama	Alta	Media	a. Colapso de infraestructura de control aluvional b. Destrucción de infraestructura pública y privada c. Afectación de vialidad d. Inhabilitación de sistemas de retención de sedimentos e. Bloqueo natural o artificial del cauce de los ríos
Disponibili	Mayor presencia	Baja	Alta	a. No identificados

dad de agua	en las Macrozonas Norte y Centro del País			
Tormentas cálidas	Mayor presencia en las Macrozonas Norte y Centro del País	Alta	Alta	<ul style="list-style-type: none"> a. Sobrepase de defensas fluviales b. Incremento de escorrentía en zonas de alta cota de la cuenca c. Superación de caudales máximos de diseño d. Arrastre de grandes volúmenes de sedimento e. Socavamiento f. Fractura de glacieres

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Caracterización de amenazas asociadas a servicios de infraestructura de zona costera

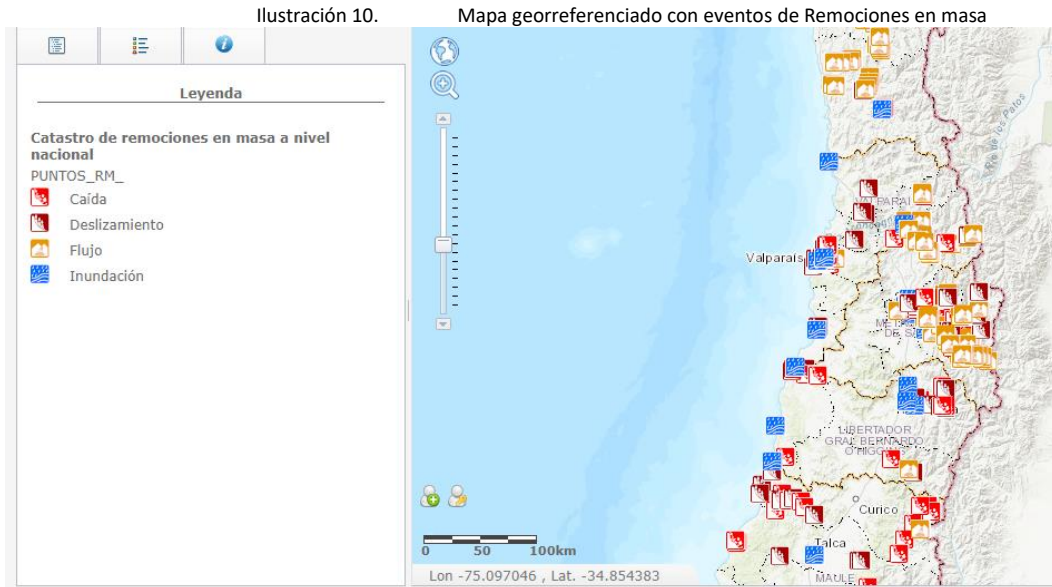
Tipo de amenaza	Presencia Geográfica	Magnitud	Potencial de Replicabilidad	Potenciales impactos infraestructura
Inundaciones costeras	Mayor presencia en las Macrozonas Centro y sur del País, destacándose las regiones de Valparaíso, Biobío y de Los Ríos	Media	Alta	<ul style="list-style-type: none"> a. Anegación de infraestructura de borde costero b. Interrupción de operaciones portuarias c. Arrastre de sedimento del litoral d. Afectación de vías de comunicación
Marejadas	Mayor presencia en las Macrozonas Centro y sur del País, destacándose las regiones de Valparaíso, Biobío y de Los Ríos	Media	Alta	<ul style="list-style-type: none"> a. Anegación de infraestructura de borde costero b. Interrupción de operaciones portuarias c. Arrastre de sedimento del litoral d. Afectación de vías de comunicación e. Daños Menores en Infraestructura Portuaria y costera. f. Daño infraestructura comercial particular.
Marejadas Ciclónicas	Macrozona Sur del país	Baja	Media	<ul style="list-style-type: none"> a. Anegación de infraestructura de borde

				<p>costero</p> <p>b. Interrupción de operaciones portuarias</p> <p>c. Arrastre de sedimento del litoral</p> <p>d. Afectación de vías de comunicación</p> <p>e. Daños mayores en infraestructura portuaria y costera.</p> <p>f. Daño infraestructura comercial particular.</p> <p>g. Pérdida de Playas (arenas).</p>
Erosión de borde costero	Mayor presencia en las Macrozonas Centro y sur del País.	Media	Alta	<p>a. Inestabilidad del suelo</p> <p>b. Socavamiento de infraestructura</p>
Incremento en el nivel del mar	Todo el territorio	Baja	Baja	<p>a. Anegación de infraestructura de borde costero</p>

Fuente: Elaboración propia

6.5. Análisis de Exposición de servicios de infraestructura al cambio climático

Considerando las amenazas climáticas analizadas, en esta sección se desarrolla un análisis de exposición, que consiste en la superposición de dos capas de información georreferenciadas como son la capa de amenazas climáticas (eventos observados) y el catastro de servicios de infraestructura de control aluvional, manejo de cauce y de zona costera; sin embargo, considerando la poca información relacionada con el catastro georreferenciado de eventos climáticos que afectan la zona costera, y la falta de un catastro actualizado de servicios de infraestructura hidráulica y/o fluvial ha dificultado el desarrollo del mapa de exposición por lo que según los datos de la UGIT se decidió vaciar en un mapa las emergencias georreferenciadas. Se destaca la importancia de mejorar la comunicación entre distintos actores para consolidar la información con un fin único, como es el de la construcción de mapas de riesgo climático para todo Chile, considerando que existen avances en la consolidación de la información como es el caso de los eventos de remociones en masa georreferenciados (*Shapes*) que ha desarrollado el Sernageomin o el catastro nacional de servicios de infraestructura de zona costera desarrollado por la Dirección de Obras Portuarias.



Fuente: Recuperado de PortalGeo Sernageomin, 2018 –
<http://portalgeo.sernageomin.cl/Visor/>

6.6. Análisis de sensibilidad (AS) de servicios de infraestructura

Es importante resaltar que la gestión integral de los riesgos asociados a las amenazas climáticas debe diversificar el enfoque y salir del paradigma único de pronosticar los eventos climáticos extremos, para esto es necesario incorporar análisis de vulnerabilidad, de aquellos servicios de infraestructura que brindan protección a las poblaciones (European Commission, 2016). En tal sentido resulta necesario identificar aquellos aspectos de sensibilidad, que gatillan las amenazas y terminan impactando de manera significativa a las comunidades.

En este estudio, los aspectos de sensibilidad serán denominados “Factores de sensibilidad”, y pueden agruparse en factores internos o externos al servicio de infraestructura, que pueden subclasificarse en estáticos, para referirse a características propias de la infraestructura y factores dinámicos para referirse a aquellas variables externas que actúan sobre el sistema. Antes de desarrollar un ejercicio de identificación de factores de sensibilidad de un servicio de infraestructura, resulta necesario conceptualizar al servicio de infraestructura como un sistema, es decir como un conjunto de componentes estructurales y no estructurales, que interactúan entre sí y responden funcional y operativamente a la demanda para la cual ha sido encomendado (Thorpe, 1998; Pellicer et al., 2012, Echaveguren, 2016).

De acuerdo con este planteamiento, es importante entender algunas premisas relevantes bajo las que interactúan los elementos de un servicio de infraestructura y una amenaza climática (Thorpe, 1998; Pellicer et al., 2012, Echaveguren, 2016):

- El grado de redundancia es un factor fundamental para que los servicios de infraestructura puedan hacer frente a la amenaza climática, y este se define como la

característica que hace que la resistencia del conjunto no dependa en gran parte o totalmente de un número reducido de elementos, puesto que la falla de estos puede traer como consecuencia el colapso total o parcial del sistema de infraestructura, debido a la debilidad de los restantes. Es por esto por lo que se debe buscar que la resistencia de la infraestructura se distribuya entre el mayor número de elementos posible, fomentando replicar u homologar elementos/sistemas que funcionen en paralelo.

- La robustez de un sistema de infraestructura ante eventos extremos se define como la característica que puede obtenerse mediante la conjunción de tres componentes, (i) hacer cada elemento del sistema más resistente a cualquier tipo de amenaza, (ii) dimensionar la infraestructura de mayor tamaño, (iii) proveer materiales en mayor cantidad y calidad, de manera tal de proveer mayor resistencia/ductilidad y durabilidad respectivamente
- La relación entre robustez y redundancia se plantea considerando que entre mayor sea la robustez de los elementos estructurales de una obra menor será la demanda de redundancia de dichos elementos y viceversa. Es por esta razón que se hace necesario en algunos casos para mantener la funcionalidad de un servicio de infraestructura, exista la opción de incrementar el grado de robustez de alguno de sus elementos o de lo contrario garantizar cierto grado de redundancia, que garantice la funcionalidad del sistema, aunque alguno de sus elementos no tenga un desempeño óptimo.

Comprendiendo la importancia de desarrollar el análisis de sensibilidad climática de un servicio infraestructura bajo un enfoque sistemático, se ha planteado una tabla que resume las particularidades y aspectos clave de los distintos tipos de servicio de infraestructura como sistema.

Tabla 22. Enfoque sistémico de los servicios de infraestructura

Servicio de infraestructura	Aspectos clave	Ejemplo
Infraestructura hidráulica o fluvial	<ul style="list-style-type: none"> • Activos (la infraestructura en cuestión) y los procesos necesarios para el buen funcionamiento de ésta, se toma en cuenta también la interconectividad de la infraestructura y el impacto potencial de los eventos sobre infraestructuras aguas arriba. • Entradas al sistema, • Salidas del sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> • Activos: Pozas de contención, muros entre otros. • Entradas: agua, sedimentos, otros • Salidas: agua y sedimentos en cantidades controladas
Infraestructura de zona costera	<ul style="list-style-type: none"> • Activos (la infraestructura en cuestión) y los procesos necesarios para el buen funcionamiento de ésta, se toma en cuenta también la interconectividad de la infraestructura y el impacto potencial de los eventos sobre infraestructuras aguas arriba. • Entradas al sistema, • Salidas del sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> • Activos: Muelles, muros de protección, molos y otros elementos. • Entradas: Usuarios de puertos,

		<p>embarcaciones entre otras.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Salidas: Servicios de conectividad, protección del litoral, recreación entre otras
--	--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Elaboración propia

Cada uno de estos aspectos clave está conformado por distintitos elementos estructurales o no, que representan potenciales factores de sensibilidad, para los que resulta necesario determinar el grado de sensibilidad o la medida en la que pudiesen contribuir a que el impacto de una amenaza climática se sienta con mayor fuerza sobre un servicio de infraestructura. Dichos factores permitirán desarrollar matrices de sensibilidad cualitativas en el que se aplicarán los criterios indicados en la siguiente tabla:

Tabla 23. Niveles de sensibilidad de un servicio infraestructura ante drivers climáticos y no climáticos

Sensibilidad Alta:	La amenaza climática puede tener un impacto alto sobre los activos y sus procesos, así como las entradas y salidas del sistema.
Sensibilidad media:	La amenaza climática puede tener un impacto medio sobre los activos y sus procesos, así como las entradas y salidas del sistema.
Sensibilidad Baja:	La amenaza climática puede tener un impacto leve o insignificante sobre sobre los activos y sus procesos, así como las entradas y salidas del sistema.

Fuente: Elaboración propia

Adicional a esto se establece que, los factores de sensibilidad pueden variar dependiendo a la etapa del ciclo de vida en la que se encuentre un determinado proyecto de infraestructura (Ver definiciones 5.4).

6.6.1. Sensibilidad dinámica para servicios de infraestructura

Considerando la existencia de factores de sensibilidad externos dinámicos, es decir actividades o características del entorno físico, ambiental o humano que actúan sobre el desempeño del servicio de infraestructura de control aluvional, manejo de cauce y zona costera, se ha identificado una serie de factores relevantes, que aplican transversalmente para casi todos estos servicios de infraestructura del MOP. Estos factores presentan la particularidad de que, a pesar de que tienen una importancia significativa, pueden o no encontrarse más allá de las competencias técnicas e institucionales del MOP y su abordaje debe desarrollarse bajo un enfoque de coordinación interministerial. De acuerdo con este planteamiento, se establece que su análisis no será prioritario dentro del estudio. A continuación, se describen estos factores:

- **Performance del sistema:** El desempeño o performance puede verse afectado o ser sensible por alguna variable climática o no climática. Si bien el sistema de

infraestructura puede desarrollar su funcionalidad y cumplir su servicio, puede realizarlo con un mejor o peor desempeño. Hay una componente objetiva de este factor y una componente subjetiva del usuario (Ej. La serviciabilidad de un determinado servicio de infraestructura, que puede ser eficiente en términos prácticos pero los usuarios la perciben como deficiente).

- **Características del entorno bio-físicas de la cuenca:** Presencia de sedimentos, pendiente de la cuenca, cobertura vegetal/suelos/uso de suelo/humedad del terreno (coeficiente de escorrentía, índice de infiltración, CN), redes de flujo o drenaje. Por ejemplo, el comportamiento de una cuenca del norte de Chile es diferente a una cuenca del sur de Chile de acuerdo con sus características bio-físicas.
- **Robos, hurtos y/o sabotajes:** Nivel de gestación de eventos de robo de materiales, hurtos de partes de la infraestructura, o sabotajes de los servicios públicos.
- **Ordenamiento Territorial Planificación y Gestión Territorial (Urbano/Rural):** Presencia o carencia de instrumentos de planificación territorial, regulación de uso de suelo, desvío o alteración de cauces.
- **Riesgos y Desastres (no climáticos):** Manifestación de amenazas y peligros naturales que detonan desastres en el territorio (terremotos, tsunamis, erupciones, entre otros).
- **Gobernabilidad y gobernanza en el territorio:** Capacidad de los gobiernos para planificar y gestionar obras públicas y Capacidad de organización y gestión de la comunidad en demandar obras públicas.
- **Pobreza y desigualdad en el territorio:** Nivel de escasez o abundancia de recursos económicos de comunidades y gobiernos para financiar diseño de nuevas infraestructuras o su mantenimiento continuo.
- **Manejo Integrado de cuenca (Ej. Zona costera):** Las acciones sobre un sector de la cuenca pueden tener repercusiones importantes sobre otros, pudiendo gatillar procesos de erosión, los cuales pueden afectar directamente a la infraestructura aludida.

Finalmente, considerando lo expuesto previamente, se presentan los principales factores de sensibilidad estáticos identificados y que se encuentran directamente vinculados con las competencias del MOP, así como su respectivo análisis de sensibilidad por tipo de servicio de infraestructura.

6.6.2. AS para servicios de infraestructura hidráulicas

De acuerdo con la “guía para gestores de proyectos haciendo resilientes al clima inversiones vulnerables” (EU, 2013), a continuación, se presentan las potenciales amenazas climáticas a las que deben hacer frente los servicios de infraestructura hidráulica:

- Aumento extremo de la temperatura
- Cambio progresivo de las precipitaciones
- Cambio extremo de las precipitaciones
- Velocidad del viento promedio
- Humedad del aire
- Radiación Solar
- Tormentas

- Inundaciones
- Tormentas de arena o polvo
- Erosión del suelo
- Calidad del aire
- Islas de calor urbanas

Por otra parte, se han identificado una serie de factores o temas de sensibilidad estáticos, con el potencial de definir el nivel de resiliencia climática frente a las amenazas de cambio climático descritas, como se describen a continuación:

- **Estructura del sistema:** Se define como el conjunto de medios técnicos, servicios y elementos estructurales o no, que buscan garantizar la funcionalidad del sistema o sus elementos, en los procesos de control aluvional, defensas fluviales y manejo de cauces, asimismo se establece que este factor resulta clave en la determinación de la sensibilidad del sistema frente a las amenazas climáticas, determinada principalmente por la forma en la que disposición y/o configuración de los elementos estructurales o no dentro del sistema den respuesta a una amenaza específica.
- **Grado de redundancia:** Se define como la repetitividad de los componentes o partes del sistema de infraestructura (Ej. Cantidad de diques o pozas de contención aluvional, mallas de retención de piedras, disipadores de energía, entre otros) en donde su implementación está asociada directamente a la magnitud de la amenaza climática y a las limitaciones geomorfológicas del área de emplazamiento (Ej. Condiciones geográficas limitadas para la construcción de elementos de protección), este factor es determinante de la sensibilidad del servicio de infraestructura en la medida que exista una baja redundancia de alguno de estos elementos, lo que implicaría una mayor probabilidad de ocurrencia de impactos de eventos climáticos que no puedan ser controlados.
- **Nivel de robustez:** Se define como el nivel del dimensionamiento de la infraestructura de acuerdo con estándares de diseño acordes a la solicitud que dicho sistema estará sometido. (Ej. Para contener un caudal de crecida de 9 m³/s se requiere como mínimo diseñar un muro de 5 m de alto y 1 m de ancho, finalmente se proyecta y construye un muro de 8 m de alto y 2 m de ancho). Esto entrega una obra más resiliente y robusta con un costo adicional asociado.
- **Funcionalidades del sistema:** Se establece como el funcionamiento deficiente o la disminución de la capacidad de un sistema de infraestructura y/o sus componentes, durante y después de la manifestación de alguno de los efectos asociados a las amenazas climáticas previstas, siendo este un factor de sensibilidad clave, considerando que, la capacidad del sistema se ha reducido, frente al control de los efectos del próximo evento hidrometeorológico.
- **Performance del sistema:** El desempeño o performance se define como un factor que está asociado a la calidad de servicio brindado durante la solicitud de la obra (componente objetiva), y la percepción de calidad de servicio del usuario (componente subjetiva), determinando de esta forma su comportamiento hacia el servicio que brinda la infraestructura (Ej. Exceso de confianza). Este factor potencia la sensibilidad de un servicio de infraestructura a los efectos cambio climático en la medida que exista un

desempeño bajo del servicio de infraestructura o una percepción errónea de este por parte de los usuarios.

- **Evolución temporal:** Se refiere al factor que establece la relación entre el estado de la infraestructura, sus elementos y la funcionalidad de estos respecto a su evolución en el tiempo, considerando que la infraestructura no es un sistema estático, sino dinámico y que se degrada con el tiempo, y que al mismo tiempo puede mejorarse a través de actividades de conservación o rehabilitación (*upgrades*).

Considerando los factores de sensibilidad descritos y las amenazas climáticas listadas previamente, a continuación, se presentan las matrices de sensibilidad, desarrolladas bajo un proceso participativo con la DOH, en donde se resume el análisis comparativo entre estos dos aspectos. Permitiendo de esta forma determinar el nivel de sensibilidad los servicios de infraestructura de control aluvional y manejo de cauces, asociados a la gestión de dicha dirección:

Tabla 24. Matriz de sensibilidad de obras de control aluvional ante amenazas climáticas

Sensibilidad de servicios de infraestructura de control aluvional		Sensibilidad estática					Sensibilidad dinámica							
		Infraestructura del sistema	Grado de redundancia	Nivel de robustez	Funcionalidad del sistema	Performance del sistema	Evolución temporal	Características bio-físicas de la cuenca	Robos hurtos sabotajes	Ordenamiento territorial	Riesgos y desastres	Gobernabilidad y gobernanza	Pobreza/desigualdad	Condición e intervención en la Cuenca (Ej. Cauce)
Drivers climáticos y efectos	Cambios extremos en las precipitaciones	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Baja	Alta	Alta	Alta	Baja
	Humedad del aire	Baja	Baja	Baja	Baja	Alta	Baja	Baja	Alta	Baja	Alta	Alta	Alta	Alta
	Tormentas	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Baja	Alta	Alta	Alta	Alta
	Variación de la línea de nieve (Tormentas Cálidas)	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Baja	Alta	Alta	Baja	Alta	Alta	Alta	Alta
	Erosión del suelo	Alta	Baja	Alta	Baja	Baja	Alta	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
	Inestabilidad y deslizamientos (REM)	Alta	Alta	Baja	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta

 Sensibilidad baja
  Sensibilidad media
  Sensibilidad alta

Fuente: Propuesta modificada según resultados talleres participativos de la DOH

Tabla 25. Matriz de sensibilidad de obras de manejo de cauce ante amenazas climáticas

Sensibilidad de servicios de infraestructura de manejo de cauce		Sensibilidad estática						Sensibilidad dinámica						
		Infraestructura del sistema	Grado de redundancia	Nivel de robustez	Funcionalidad del sistema	Performance del sistema	Evolución temporal	Características bio-físicas de la cuenca	Robos hurtos sabotajes	Ordenamiento territorial	Riesgos y desastres	Gobernabilidad y gobernanza	Pobreza/desigualdad	Condición e intervención en la Cuenca (Ej. Cauce)
Drivers climáticos y efectos	Cambios extremos en las precipitaciones	Alta	Media	Alta	Alta	Alta	Alta	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Baja
	Humedad del aire	Baja	Baja	Media	Media	Baja	Media	Baja	Alta	Baja	Media	Alta	Alta	Baja
	Tormentas	Media	Media	Alta	Alta	Alta	Alta	Baja	Baja	Baja	Baja	Media	Baja	Baja
	Variación de la línea de nieve (Tormentas Cálidas)	Alta	Media	Alta	Alta	Alta	Alta	Media	Alta	Baja	Media	Baja	Alta	Media
	Erosión del suelo	Alta	Media	Alta	Alta	Alta	Alta	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
	Inestabilidad y deslizamientos (REM)	Media	Media	Alta	Alta	Alta	Alta	Media	Media	Media	Alta	Alta	Alta	Alta

 Sensibilidad baja
  Sensibilidad media
  Sensibilidad alta

Fuente: Propuesta modificada según resultados talleres participativos de la DOH

6.6.3. AS de servicios de infraestructura portuaria y de zona costera

De acuerdo con la “guía para gestores de proyectos haciendo resilientes al clima inversiones vulnerables” (EU, 2013), a continuación, se presentan las potenciales amenazas climáticas a las que deben hacer frente los servicios de infraestructura de zona costera:

- Nivel medio del mar.
- Altura significativa de la ola.
- Potencia de la ola (opcional).
- Corrosión
- Erosión marina.
- Sedimentación.
- Intrusión Marina.

Por otra parte, se han identificado una serie de factores o temas de sensibilidad estáticos, con el potencial de definir el nivel de resiliencia climática frente a las amenazas de cambio climático descritas, como se describen a continuación:

- **Resistencia estructural:** La resistencia estructural es el factor que valora el estado físico y capacidad resistente de la infraestructura de zona costera frente al impacto de eventos extremos que puedan dañarla o a alguno de sus componentes. Se ha identificado que este factor es potencialmente sensible a la acción del oleaje, vinculado a un periodo de retorno de 40 años. Por otra parte, también se identifica su sensibilidad potencial frente a los cambios desequilibrados de la morfodinámica de las playas producto de aluviones o transporte en masa de sedimentos.
- **Estabilidad estructural:** La estabilidad estructural es el factor asociado a las fallas por asentamiento, desplazamiento o volcamiento de estructuras como rompeolas, defensas ribereñas, muros de protección, espigones y molos de abrigo, incluyendo el nivel de porosidad de estas para efectos de disipación de oleaje. Se ha identificado Se confirma la “Estabilidad estructural” como factor de sensibilidad y se reformula el concepto quedando de la siguiente forma: “La estabilidad estructural es el factor asociado a las fallas por asentamiento, desplazamiento o volcamiento de estructuras como rompeolas, defensas ribereñas, muros de protección, espigones y molos de abrigo, incluyendo el nivel de porosidad de estas para efectos de disipación de oleaje. Se ha identificado que este factor es potencialmente sensible a la acción del oleaje y a la erosión y sedimentación.
- **Calidad Material:** Se define como el factor asociado a la composición química y física materiales de construcción frente a la acción de a un ambiente marino posiblemente más corrosivo, que puede traer consigo la disminución de la vida útil de la obra. Este factor se ha establecido considerando acidificación de los océanos producto del Cambio Climático (absorción de CO₂ en los océanos).
- **Altura de la infraestructura:** Consiste en la elevación de la infraestructura en relación al nivel medio del mar (NMM), además se considera que esta elevación puede referirse una distancia bidimensional es la posición en relación a un eje “X” y/o a un eje “Y”, este factor hace potencialmente vulnerable la infraestructura tomando en consideración que esta altura puede verse significativamente reducida frente al aumento del nivel del mar

y los eventos que involucran oleaje. Es necesario por ello, que resulta importante evaluar la posibilidad de un mayor número de sobrepasos en el futuro sobre la infraestructura y sus elementos a causa del Cambio Climático.

- **Capacidad del servicio:** Este es un factor que se define como la capacidad que tiene un servicio de satisfacer la demanda para el cual fue diseñado, de forma individual o en conjunto, y que puede ser determinante de la sensibilidad frente a las amenazas climáticas, considerando que un servicio que cuenta con capacidad excedida es más susceptible a sufrir el impacto de las amenazas climática. Este factor puede variar dependiendo de su ubicación geográfica
- **Alcance del servicio:** Este es un factor que considera el alcance del servicio en función del número de usuarios, y establece que la vulnerabilidad puede verse potenciada cuando la amenaza climática tiene un impacto social significativo, considerando la cantidad de usuarios a los que se le ha dejado de prestar el servicio.
- **Conservación del sistema:** Se establece como el factor determinado por el estado físico o nivel de deterioro tanto de la obra de infraestructura como de su entorno natural inmediato (Ej. Playas), este factor puede potenciar la sensibilidad física de la Infraestructura de Borde Costero, sea por su ausencia, por la aplicación de procedimientos ineficientes o por baja gestión de ejecución.
- **Estado de los recursos naturales del sistema:** El estado de los recursos naturales como factor de sensibilidad está asociado a la presencia y/o estado de los mismo en el entorno inmediato del sistema que compone el servicio de infraestructura, considerando que estos elementos pueden ser playas, humedales, lagos, marismas, estuarios entre otros, y que pueden servir como catalizadores del impacto de las amenazas climáticas.

Considerando los factores de sensibilidad descritos y las amenazas climáticas listadas previamente, a continuación, se presentan las matrices de sensibilidad, desarrolladas bajo un proceso participativo con la DOP, en donde se resume el análisis comparativo entre estos dos aspectos. Permitiendo de esta forma determinar el nivel de sensibilidad los servicios de infraestructura de control aluvional y manejo de cauces, asociados a la gestión de dicha dirección:

Tabla 26. Matriz de sensibilidad de obras de infraestructura de protección de zona costera ante amenazas climáticas

Sensibilidad de servicios de infraestructura de borde costero		Sensibilidad estática								Sensibilidad dinámica							
		Resistencia Estructural	Estabilidad Estructural	Calidad Material	Altura de la infraestructura	Capacidad de servicio	Alcance del servicio	Conservación del sistema	Estado de los recursos naturales	Características bio-físicas de la cuenca	Robos hurtos sabotajes	Ordenamiento territorial	Riesgos y desastres	Gobernabilidad y gobernanza	Pobreza/desigualdad	Condición e intervención en la Cuenca (Ej. Cauce)	Manejo Integrado de cuenca (Ej. Zonas Costeras)
Drivers climáticos y efectos	Nivel Medio del Mar	Alta	Alta	Media	Alta	Media	Media	Media	Alta	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Baja	
	Precipitaciones intensas	Media	Media	Media	Baja	Alta	Baja	Alta	Alta	Baja	Alta	Baja	Media	Alta	Alta	Alta	
	Velocidad máxima del viento	Media	Media	Baja	Baja	Baja	Media	Baja	Media	Baja	Baja	Baja	Baja	Media	Baja	Baja	
	Altura y potencia de Ola	Alta	Alta	Media	Alta	Media	Media	Alta	Alta	Media	Alta	Baja	Media	Baja	Alta	Media	
	Acidificación del mar (corrosión)	Media	Media	Media	Baja	Baja	Baja	Media	Media	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	
	Cambios morfodinámicos de la costa (Erosión)	Media	Media	Media	Baja	Media	Media	Alta	Media	Media	Media	Alta	Alta	Baja	Alta	Alta	
	Tormentas	Media	Media	Baja	Media	Baja	Baja	Media	Media	Baja	Baja	Baja	Media	Media	Media	Media	

 Sensibilidad baja
  Sensibilidad media
  Sensibilidad alta

Fuente: Propuesta modificada según resultados talleres participativos de la DOP

Tabla 27. Matriz de sensibilidad de obras de infraestructura de puertos de conectividad ante amenazas climáticas

Sensibilidad de servicios de infraestructura de borde costero		Sensibilidad estática								Sensibilidad dinámica						
		Resistencia Estructural	Estabilidad Estructural	Calidad Material	Altura de la infraestructura	Capacidad de servicio	Alcance del servicio	Conservación del sistema	Estado de los recursos naturales	Características bio-físicas de la cuenca	Robos hurtos sabotajes	Ordenamiento territorial	Riesgos y desastres	Gobernabilidad y gobernanza	Pobreza/desigualdad	Condición e intervención en la Cuenca (Ej. Cauce)
Drivers climáticos y efectos	Nivel Medio del Mar	Yellow	Yellow	Green	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Green
	Precipitaciones intensas	Red	Red	Green	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Red	Green
	Velocidad máxima del viento	Red	Red	Green	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Green
	Altura y potencia de Ola	Red	Green	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Yellow
	Acidificación del mar (corrosión)	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green
	Cambios morfodinámicos de la costa (Erosión)	Green	Red	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Green	Green	Red	Red
	Tormentas	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow

 Sensibilidad baja
  Sensibilidad media
  Sensibilidad alta

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28. Matriz de sensibilidad de obras de infraestructura de playas artificiales ante amenazas climáticas

Sensibilidad de servicios de infraestructura de borde costero		Sensibilidad estática							Sensibilidad dinámica								
		Resistencia Estructural	Estabilidad Estructural	Calidad Material	Altura de la infraestructura	Capacidad de servicio	Alcance del servicio	Conservación del sistema	Estado de los recursos naturales	Características bio-físicas de la cuenca	Robos hurtos sabotajes	Ordenamiento territorial	Riesgos y desastres	Gobernabilidad y gobernanza	Pobreza/desigualdad	Condición e intervención en la Cuenca (Ej. Cauce)	Manejo Integrado de cuenca (Ej. Zonas Costeras)
Drivers climáticos y efectos	Nivel Medio del Mar	Verde	Verde	Verde	Rojo	Amarillo	Amarillo	Rojo	Rojo	Verde	Verde	Rojo	Rojo	Verde	Verde	Verde	
	Precipitaciones intensas	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarillo	Verde	Verde	Rojo	Verde	Rojo	Rojo	Rojo	Verde	Rojo	Verde	
	Velocidad máxima del viento	Amarillo	Verde	Verde	Verde	Rojo	Amarillo	Amarillo	Verde	Verde	Rojo	Rojo	Verde	Verde	Verde	Verde	
	Altura y potencia de Ola	Rojo	Rojo	Amarillo	Rojo	Rojo	Rojo	Amarillo	Rojo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Rojo	Amarillo	
	Acidificación del mar (corrosión)	Amarillo	Verde	Rojo	Verde	Verde	Amarillo	Rojo	Verde	Rojo	Amarillo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	
	Cambios morfodinámicos de la costa (Erosión)	Rojo	Amarillo	Verde	Rojo	Amarillo	Amarillo	Rojo	Verde	Verde	Rojo	Verde	Verde	Verde	Verde	Rojo	Rojo
	Tormentas	Rojo	Rojo	Amarillo	Verde	Verde	Amarillo	Amarillo	Amarillo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarillo	Amarillo



Sensibilidad baja



Sensibilidad media



Sensibilidad alta

Fuente: Elaboración propia

6.7. Vulnerabilidad de servicios de infraestructura basada en eventos observados

Para el desarrollo del análisis de vulnerabilidad, se considera la aplicación de definición de vulnerabilidad para servicios de infraestructura, que establece que esta es el resultado del producto de la sensibilidad por la exposición climática (EC, 2016). Además, es necesario plantear la premisa de que la capacidad adaptativa asociada a los servicios de infraestructura es constante e igual en todas las regiones geográficas y a lo largo del tiempo.

Para el desarrollo de esta sección serán considerados los datos de los infogramas de exposición y las matrices de sensibilidad desarrolladas. El análisis de vulnerabilidad tiene por objetivo dar a conocer el estado actual de los servicios de infraestructura en relación a los eventos pasados producto del cambio climático.

6.8. Vulnerabilidad de servicios de infraestructura de control aluvional y manejo de cauce

Tomando en consideración el análisis de sensibilidad para servicios de infraestructura de control aluvional y manejo de cauce, se ha determinado que estos son más sensibles a las amenazas climáticas del tipo cambios extremos en las precipitaciones, tormentas, inundaciones y remociones en masa/aluviones. A continuación, se hace una descripción de la relación entre el efecto de la amenaza climática y los servicios de infraestructura mencionados.

6.8.1. Remociones en Masa (REM)/Aluviones

La amenaza climática de REM/aluviones tiene una especial incidencia en la macrozona norte de Chile, esto se debe principalmente a alteraciones en la intensidad del régimen de precipitaciones, y al incremento en la frecuencia de tormentas cálidas o precipitaciones intensas en zonas cordilleranas (CCG-PUC, 2013). Por otra parte, este territorio se caracteriza por la escasa o nula cobertura vegetal de las cuencas y la presencia de gran cantidad de sedimentos, que pudiesen ser arrastrados durante las precipitaciones y erosionado el suelo por la acción del escurrimiento del agua. En este sentido se han identificado al servicio de infraestructura de control aluvional como el más vulnerable frente a la amenaza de REM, ya que estos por concepto están diseñados como medida de protección de terrenos y poblaciones, frente a crecidas de corrientes de agua.

Las consecuencias que tienen origen en las amenazas climáticas de aluviones o REM, pueden ser diversas, y se han clasificado en tres grupos de impactos, como son los sociales, económicos y medio ambientales. En relación con los impactos sociales se ha logrado determinar que estos particularmente suelen ser los que tienen una significancia alta, considerando que las consecuencias son ocasionalmente fatalidades o pérdidas humanas, desapariciones, lesionados

y damnificados entre otros. En cuanto a los impactos económicos, se han identificado consecuencias considerables, especialmente por tratarse destrucción de obras de infraestructura de vialidad, servicios públicos (Ej. hospitales y escuelas), y destrucción de hectáreas de cultivos o simplemente destrucción de viviendas y bienes de las comunidades. Finalmente se han identificado impactos medioambientales medianamente significativos, tratándose principalmente de disposición final de sedimentos producto de aluviones, contaminación de cuerpos de agua o deterioro de su calidad, que generalmente sirven para el suministro de agua potable a comunidades específicas, así mismo existen pocas referencias asociadas al impacto en biodiversidad.

El impacto sobre las obras existentes de control aluvional se ha caracterizado principalmente por la colmatación de pozas de retención, o su sobrepaso/rebose, la inhabilitación temporal de estas por saturación de capacidades hidráulicas, o la descarga o vertido no controlado de agua y/o sedimentos, pérdidas de activos o instrumentos (alcantarillados, instrumentos de fluviómetro o pluviometría). Para el caso de defensas fluviales se han evidenciado efectos de socavamiento, ruptura y afectación de forma irreversible de obras de encauzamiento y defensa y/o protección de riberas.

Los impactos de los eventos extremos también han sido gatillados por otros factores de sensibilidad dinámicos de origen antropogénico, como son, oportunidades en el marco regulatorio, robos, hurtos o sabotajes de los sistemas, la intervención no planificada de cauces y brechas en la administración del ordenamiento territorial. También se han identificado otros factores asociados a las características del entorno bio-físico de las cuencas y propensión a riesgos por amenazas naturales.

Las macrozonas de centro y sur de Chile, también se encuentran expuestas a la amenaza de REM con una menor recurrencia, como se ha reflejado en el análisis de data histórica, sin embargo, sus consecuencias asociados a impacto económico y social no han sido menores. Esto ocurre principalmente por características demográficas y de desarrollo de infraestructura características de la zona. En estas regiones se identifican una mayor capacidad de adaptación asociada a menores índices de pobreza o desigualdad y mayor cantidad de recursos económicos de gobiernos locales. (CCG, 2016).

Considerando que la exposición para servicios de infraestructura de control y aluvional en la macrozona norte es alta, a continuación, se listan los principales factores de sensibilidad transversales para Chile que deben ser considerados como prioritarios al momento de diseñar medidas de adaptación al cambio climático, asociadas a los servicios de infraestructura de control aluvional, dichas medidas pueden ser de tipo estructurales y no estructurales.

- Degradación de elementos o materiales de la obra, asociados a oportunas mantenciones o rehabilitación (*upgrade*).
- Deficiencia en la disponibilidad de todos o alguno de los componentes estructurales y/o elementos que componen un sistema o servicio de infraestructura de control aluvional,
- Deficiencia operacional o funcionalidad del sistema e interacción con el medio social,
- Redundancia de elementos y/o componentes deficientes,
- Oportunidades de gobernabilidad y coordinación intersectorial, asociados a planificación y gestión de obras públicas.

6.8.2. Inundaciones fluviales

La amenaza climática de inundaciones fluviales tiene alta incidencia en las macrozonas centro y sur de Chile, debido principalmente a alteraciones en el régimen de precipitaciones (mayor intensidad), y tormentas. En este sentido se han identificado como los servicios de infraestructura más vulnerables ante dicha amenaza, a aquellos que por concepto están directamente vinculados a la protección de terrenos y poblaciones frente a crecidas de corrientes de agua y regularización de las riberas y cauces de los ríos, específicamente hace referencia a obras fluviales de protección de riberas, encauzamiento y control aluvional.

Las consecuencias que tienen origen en las amenazas climáticas inundaciones o desbordamientos, pueden ser diversas, y se han clasificado en tres grupos de impactos, como son los sociales, económicos y medio ambientales. En relación con los impactos sociales se ha determinado que su magnitud es media, considerando que sus consecuencias generalmente obedecen a damnificados y lesionados. En cuanto a los impactos económicos, se han identificado consecuencias considerables, especialmente por tratarse de destrucción de obras de infraestructura de vialidad, anegamiento de obras de infraestructura pública, inhabilitación de servicios básicos de agua potable/alcantarillado/energía y destrucción de viviendas y áreas de cultivos. Finalmente se han identificado impactos medioambientales secundarios, asociados a: contaminación del suelo, emisiones de material particulado y alteración de la calidad del agua potable.

El impacto sobre las obras existentes de defensas y encauzamientos fluviales se ha caracterizado principalmente por socavamiento, destrucción temporal y total, y el colapso de infraestructuras y componentes. Para el caso de defensas fluviales se han evidenciado efectos de socavamiento, ruptura o destrucción de obras, colapso de defensas fluviales y desbordamiento de las obras de encauzamientos y/o protección de riberas.

Los impactos de la amenaza climática han sido potenciados por otros factores de sensibilidad dinámicos de origen antropogénico. Dentro del primer grupo encontramos, brechas y/u oportunidades asociados a robos, hurtos o sabotajes de los sistemas, gobernabilidad y ordenamiento territorial. Del segundo grupo se identifica la propensión de riesgos de amenazas naturales.

La macrozona centro de Chile, también se encuentran expuestas a la amenaza de inundaciones, y se ha logrado describir sus consecuencias, asociadas principalmente al impacto económico y social, considerando como efecto la presencia de damnificados y destrucción o anegamiento de viviendas e infraestructuras públicas.

Considerando que la exposición para servicios de infraestructura de manejo de cauces en la zonas sur y centro es alta, a continuación, se listan los principales factores de sensibilidad transversales para Chile que deben ser considerados como prioritarios al momento de diseñar medidas de adaptación al cambio climático, asociadas a los servicios de infraestructura de control aluvional, dichas medidas pueden ser de tipo estructurales y no estructurales.

- Degradación de Elementos o materiales de la obra, asociados oportunidades mantenciones o Rehabilitación (*upgrade*),
- Deficiencia operacional o de funcionalidad del sistema e interacción con el medio social,
- Bajo desempeño o Performance del Sistema (componente objetiva y subjetiva del usuario)
- Deficiencia en la disponibilidad de todos los componentes estructurales o elementos que componen un sistema o servicio de infraestructura de control aluvional, y defensas fluviales,
- Oportunidades asociadas a controlar el hurto, robo o sabotaje de los elementos del sistema de infraestructura.

En las siguientes matrices de vulnerabilidad, se cruzan los elementos accionantes de la vulnerabilidad en servicios de infraestructura de control aluvional como son: la sensibilidad y la exposición frente a las principales amenazas climáticas identificadas.

Tabla 29. Matriz de vulnerabilidad de servicio de infraestructura de control aluvional

		Exposición								
		Zona Norte			Zona Centro			Zona Sur		
		Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
Sensibilidad	Baja									
	Media		Erosión del Suelo			Tormentas			Tormentas	Inundaciones
	Alta	Tormentas	Inundaciones	Aluviones / Precipitaciones extremas		Inundaciones/ Erosión del Suelo	Aluviones / Precipitaciones extremas	Erosión del Suelo		Aluviones / Precipitaciones extremas

Baja
Medianamente vulnerable
Altamente vulnerable

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30. Matriz de vulnerabilidad de servicio de infraestructura de control aluvional

		Exposición								
		Zona Norte			Zona Centro			Zona Sur		
		Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
Sensibilidad	Baja									Tormentas
	Media		Erosión del Suelo	Aluviones		Erosión del Suelo / Tormentas	Aluviones/Precipitaciones extremas			Inundaciones
	Alta	Tormentas		Inundaciones / Precipitaciones extremas		Inundaciones		Erosión del Suelo	Aluviones	Precipitaciones extremas

	Baja
	Medianamente vulnerable
	Altamente vulnerable

Fuente: Elaboración propia.

6.9. Vulnerabilidad de servicios de infraestructura de zona costera

Tomando en consideración el análisis de sensibilidad para servicios de infraestructura de zona costera, se ha determinado que estos son más sensibles a las amenazas climáticas del tipo cambios extremos en el clima de oleaje y tormentas, impactando negativamente sobre componentes estructurales y afectando la operatividad de estos.

6.9.1. Inundaciones costeras

La amenaza climática de inundaciones costeras tiene alta incidencia en la macrozona sur y norte de Chile, debido principalmente a alteraciones en temperatura, presión atmosférica y velocidad del viento, que tienen como efecto un incremento de la altura significativa de la ola y por ende de su potencia, en este sentido se han identificado como los servicios de infraestructura más vulnerables ante dicha amenaza, principalmente a aquellos servicios portuarios de menor envergadura estructural como, puertos pesqueros artesanales (caletas) y puertos de conectividad principalmente, así mismo se evidencia que los servicios de infraestructura de protección del borde costero como paseos costeros y espigones principalmente son altamente vulnerables a los efectos de cambio climático.

Para los casos de puertos de conectividad estos se ven afectados por el aumento del nivel medio del mar y el impacto del oleaje, aumentando la probabilidad de sobrepaso y fallas estructurales como las observadas en el muelle nuevo del sector Caleta Portales de Valparaíso: destrucción de losas y pandeo de vigas, arriostramientos y columnas de dicho muelle. En la misma manera, el impacto de olas a más de 3 metros de altura, ocasionaron desplazamientos de tetrápodos de rompeolas (Ej. Club de Yates de Recreo, Valparaíso) y destrucción de su coraza por erosión durante el temporal del 8 de agosto de 2015. Este mismo problema se observó en las defensas ribereñas del Paseo San Juan de Saavedra (Valparaíso). También hubo un caso de

sedimentación o colmatación de arena sobre los tetrápodos de la defensa costera aledaña al Club de Yates de Recreo (Valparaíso).

Las consecuencias que tienen origen en las amenazas climáticas de inundaciones de zona costera son amplias, y se han clasificado en tres grupos de impactos, como son los sociales, económicos y medio ambientales. En relación con los impactos sociales se ha determinado que su magnitud es generalmente baja considerando los sistemas de alerta temprana existentes y las medidas preventivas protección de las comunidades. En cuanto a los impactos económicos, la realidad es otra ya que esta clase de eventos ha traído costos elevados, principalmente por la destrucción de infraestructura de vialidad, anegamiento de obras de infraestructura pública, y destrucción de viviendas, interrupción de operaciones de puertos marítimos, y pequeños puertos pesqueros (servicio no prestado). Finalmente se han identificado impactos medioambientales menores, asociados a contaminación de playas por presencia de escombros o residuos, y alteración de la calidad del agua potable. En relación con los impactos sobre la infraestructura se ha identificado que, considerando a los registros observados, se han generado casos donde el oleaje ha logrado desplazar elementos rocosos de diques de protección y espigones generando inestabilidad de este tipo de estructuras.

Los impactos de esta amenaza climática han sido potenciados por factores de sensibilidad dinámicos de origen antropogénico, como las brechas y oportunidades detectadas en relación al ordenamiento territorial y demanda de servicios de infraestructura, y factores de sensibilidad dinámicos de origen no antropogénico, como las características geomorfológicas propias del litoral en donde se emplazan las obras o el estado de conservación de los recursos naturales que se encuentran en el entorno de esta. (ver sección 6.6.1).

Considerando que la exposición para servicios de infraestructura de borde costero en la zona norte y sur de Chile es alta, a continuación, se listan los principales factores de sensibilidad transversales que deben ser considerados como prioritarios al momento de diseñar medidas de adaptación al cambio climático, asociadas a los servicios de infraestructura de este tipo, dichas medidas pueden ser de tipo estructurales y no estructurales y se describen a continuación.

- Inestabilidad estructural,
- Altura insuficiente,
- Deficiente estimación del punto mínimo de la acción climática y debilitamiento de resistencia estructural.

En la siguiente matriz de vulnerabilidad, se cruzan los elementos accionantes de la vulnerabilidad en servicios de infraestructura de borde costero como son: la sensibilidad y la exposición frente a las principales amenazas climáticas identificadas.

Tabla 31. Matriz de vulnerabilidad de servicio de infraestructura de zona costera

		Exposición								
		Zona Norte			Zona Centro			Zona Sur		
		Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
Sensibilidad	Baja									
	Media		Marea Meteorológica					Marea Meteorológica	Altura de ola	
	Alta		Altura de ola	Potencia de ola		Potencia de ola	Marea Meteorológica / Altura de ola			Potencia de ola

	Baja
	Medianamente vulnerable
	Altamente vulnerable

Fuente: Elaboración propia.

6.10. Vulnerabilidad futura de servicios de infraestructura

Esta sección comprende, en un primer segmento el análisis cualitativo de vulnerabilidad futura, que busca complementar el análisis de vulnerabilidad de eventos observados desarrollado previamente, con el objetivo de integrar la temporalidad prospectiva y dar solidez a los hallazgos de vulnerabilidad y sus respectivas soluciones de ingeniería asociadas a los servicios de infraestructura objeto de análisis.

Para contextualizar el análisis de vulnerabilidad futura de servicios de infraestructura, se describirán en primer lugar los modelos de circulación general (GCM's) que sirven de antecedente para el desarrollo de modelos de circulación regional, necesarios en la proyección de eventos hidroclimáticos futuros, y en la determinación de la exposición y vulnerabilidad prospectiva de los servicios de infraestructura potencialmente aludidos.

Para el desarrollo de esta sección serán considerados los datos existentes sobre el incremento en la probabilidad de ocurrencia de eventos climáticos extremos futuros, y las matrices de sensibilidad desarrolladas. Con el objetivo de comparar estos factores en matrices de vulnerabilidad futura para distintos tipos de servicios de infraestructura.

6.10.1. Modelos de Circulación General (GCM's)

Para comprender el pronóstico del clima en el futuro es necesario hablar de modelos de circulación global. De acuerdo con el IPCC 2005, un modelo climático es una representación numérica del sistema climático basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de retro-efecto, y que recoge todas o algunas de sus propiedades conocidas. Además, los sistemas climáticos, pueden representar modelos de diverso grado de complejidad; ya que pueden diferir en aspectos tales como el

número de dimensiones espaciales, el grado en que aparecen representados los procesos físicos, químicos o biológicos, o el grado de utilización de parametrizaciones empíricas.

En este contexto se han desarrollado los Modelos de Circulación General o Modelos de Clima Global (CGM's por sus siglas en inglés). En la actualidad existen aproximadamente veinte (20) modelos distintos (CCGUC, 2012), que varían de acuerdo con las aplicaciones, la forma en la que los procesos son representados o parametrizados, los métodos numéricos utilizados, la resolución entre otros.

Entendido esto, el proceso conceptual para la obtención de proyecciones climáticas parte primero de los escenarios de emisiones de GEI o *Representative Concentration Pathways* (RCP's), que son cargados en modelos climáticos globales y que facilitarán la obtención de proyecciones de representaciones características del clima como; la distribución en gran escala de la temperatura atmosférica, las precipitaciones, las radiaciones y los vientos; así como la distribución de las temperaturas oceánicas, las corrientes y las capas de hielo sobre el mar.

La aplicación de CGM's, es limitada cuando se trata de evaluar impactos locales, esta ocurre principalmente por la presencia de errores significativos que se incrementan a medida que disminuye la escala, considerando que muchos procesos importantes a pequeña escala no pueden representarse de manera explícita en modelos, y deben incluirse por tanto de forma aproximada cuando interactúan con accidentes o eventos de mayor escala.

Los GCM's utilizados para generar proyecciones climáticas en Chile, cuentan con una baja resolución espacial, típicamente del orden de los 50 km². Esta limitante es particularmente importante, ya que las condiciones climatológicas y medioambientales pueden cambiar de forma marcada a escalas menores, tomando en consideración la alta variabilidad topográfica de Chile y la corta distancia entre la cordillera y el océano (CCGUC, 2012).

Las proyecciones climáticas tienen siempre asociado un grado de incertidumbre y se desarrollan en una cascada de procesos denominada *downscaling*, que lleva consigo distintos niveles de incertidumbre, que deben ser consideradas oportunamente. En tal sentido, cualquier decisión correspondiente a un proceso de adaptación al cambio climático debe tomar en cuenta la incertidumbre asociada a las proyecciones de cambio climático dado que la probabilidad de que una estrategia de adaptación determinada sea o no efectiva se relaciona directamente con los niveles de incertidumbre (CCGUC, 2012). En este sentido, este estudio plantea propuestas de estrategias "win-win" bajo un enfoque de adaptación flexible que permita obtener resultados satisfactorios bajo un gran rango de modelos climáticos, en donde se vinculen necesidades actuales de desarrollo y que posibilite a la vez una adaptación eficaz y eficiente frente a los impactos previstos del cambio climático.

6.10.2. Amenazas futuras del cambio climático para Chile

De acuerdo con el Estudio Regional de la Economía del Cambio Climático para Chile (CEPAL, 2012); Las proyecciones para Chile indican dos cambios fundamentales: una baja en las precipitaciones y un alza en las temperaturas. Dependiendo del escenario de emisiones de gases de efecto invernadero considerado, se proyecta que los mayores aumentos sean del orden de 2 a 4° C, asociándose estos mayores aumentos a la zona central de Chile, y siendo más marcados en la zona del valle central y la zona cordillerana (CCGUC, 2012). La siguiente ilustración muestra la proyección de temperatura y precipitaciones en donde se observan proyecciones estimadas para tres periodos, uno temprano (2010-2040), un periodo de mitad de siglo (2040-2070), y uno tardío (2070-2100), para el escenario de emisiones A2⁸.

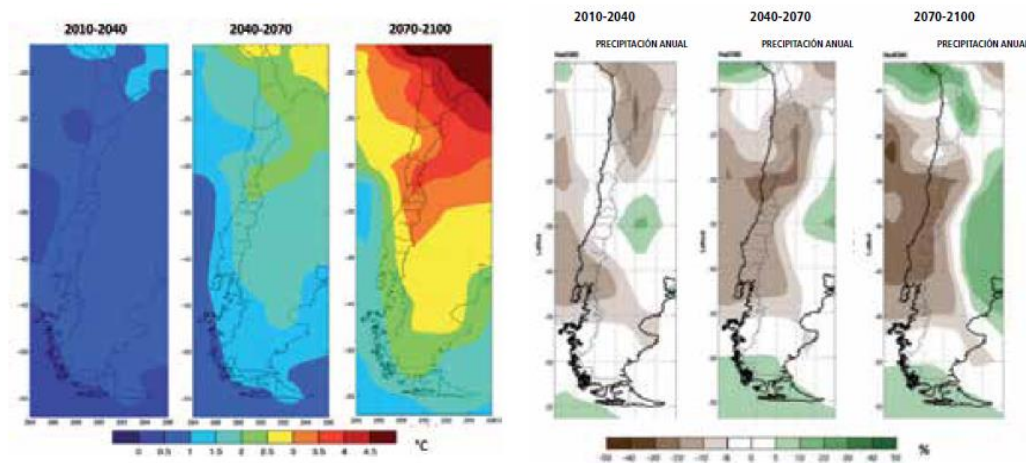


Ilustración 11. Proyecciones de cambios de temperatura y precipitaciones en tres periodos
Fuente: CEPAL, (2012).

Las proyecciones climáticas descritas se asocian a cambios que podrían potencialmente afectar las obras de infraestructura en Chile. Las principales amenazas que se desprenden de estos cambios son (CCGUC, 2012):

- Aumento en extensión y magnitud de sequías,
- Aumento en intensidad en inundaciones fluviales,
- Aumento en intensidad en inundaciones costeras.

Por otra parte, recientemente la Tercera Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre Cambio Climático (MMA, 2016), establece las proyecciones de temperatura y precipitación bajo los escenarios de concentraciones representativas o (RCP por sus siglas en inglés) extremos RCP2.6 y RCP8,5, para el modelo CMIP3-SRES y el escenario A1B⁹, y de la simulación regional PRECIS-ECHAM5 para el escenario de emisiones A1B.

⁸ Crecimiento económico más lento y fragmentado que en A1 temperaturas entre 2.0° – 5.4°C

⁹ Escenario que contempla una formula de aprovisionamiento de energía equilibrado entre uso intensivo de combustibles fósiles y energías de origen no fósil.

En este sentido, la principal tendencia observada en las temperaturas medias en Chile hasta 2010 es un patrón de calentamiento en los valles centrales y en los Andes y de enfriamiento en las costas. El enfriamiento en la costa coincide con el patrón de enfriamiento de las temperaturas superficiales del mar del Pacífico debido a la oscilación decadal del Pacífico. Además, se evidencia una tendencia al aumento de las temperaturas en el norte, lo que se relaciona con un ascenso altitudinal de la isoterma 0 °C en la zona cordillerana (MMA, 2016).

Temperaturas y precipitaciones

Considerando el modelo regional aplicado PRECIS-ECHAM5 para el escenario de emisiones A1B en el periodo 2031-2050, se proyecta un mayor calentamiento de la zona andina y menor en la región austral, y en el caso de las precipitaciones, las tendencias para el mismo periodo indican que sería un periodo más seco en comparación a la media histórica. Con una reducción entre el 5 y 15% para la zona comprendida entre las cuencas de los ríos Copiapó y Aysén.

La principal tendencia observada en las temperaturas medias anuales en Chile hasta 2010 es un patrón de calentamiento en los valles centrales y en los Andes y de enfriamiento en las costas. Además, se evidencia una tendencia al aumento de las temperaturas en el norte, lo que se relaciona con un ascenso altitudinal de la isoterma 0 °C en la zona cordillerana.

Eventos Extremos

El clima en Chile se encuentra fuertemente influenciado por tres forzantes o fenómenos climáticos como son; El Niño *Southern Oscillation* (ENSO), la Oscilación decadal del Pacífico (PDO), y la Oscilación Antártica (AAO), estos fenómenos pueden verse influenciados de forma negativa por las alteraciones producidas por el cambio climático, intensificando sus efectos y amplificando su potencial catastrófico (MMA, 2016).

Dentro de los eventos que pudiesen ocurrir se destacan las crecidas fluviales, producto de un aumento significativo de la escorrentía aportante a un cauce o curso de agua. Este aumento puede deberse a un evento de precipitación líquida, o al derretimiento del manto nival. También puede ocurrir que indirectamente este tipo de fenómenos signifiquen la falla de una obra, lo que a su vez significaría un aumento en los caudales, en relación con la primera causa denominada también tormentas cálidas, se proyectan casi 8 veces más eventos de esta magnitud ocurriendo con temperaturas mayores a los 12°C (*i.e.* un aumento desde 4 a 30 eventos). (CCGUC, 2016).

De acuerdo con el IPCC (2014a), el NMM mundial se elevó 0,19 (0,17 a 0,21) m en el período 1901- 2010, y se espera que aumente entre 0,26 y 0,82 m entre 2081 y 2100. En tal sentido se

estima que, en relación con los efectos del cambio climático sobre las costas de América del Sur, existen estudios realizados a nivel internacional que plantean diversos escenarios futuros para las variaciones del nivel del mar que se podría experimentar a lo largo del Siglo XXI (CEPAL, 2011). En general, la tendencia de los modelos es hacia el alza, aunque con diferencias significativas entre la costa Atlántica y del Pacífico. Apareciendo Chile con una tendencia media de aumento del nivel del mar entre 2 y 3 mm/año, mientras que para el horizonte 2040-2070 se presentan aumentos 2,8 y 4 mm/año.

Bajo la condición climática proyectada para 2070-2099 del escenario RCP8.5, se espera que en los próximos 10 años las alturas extremas de olas superen el promedio actual, una vez cada 4 años a lo largo de la costa chilena (U. de Valparaíso, 2016). En términos de los cambios relativos para el período 2070-2099, se proyecta que las alturas de olas extremas en los próximos 10 años a lo largo de las costas de Chile y Colombia aumenten en un 10-15% para el escenario RCP8.5, por 7-10% para el escenario RCP4.5. Bajo la condición climática proyectada de 2070-2099 de la vía de alta concentración creciente el escenario RCP8.5, la frecuencia de ocurrencia de la actualidad es probable que las alturas extremas de oleaje en los próximos 10 años se dupliquen o tripliquen en varias regiones costeras de todo el mundo, incluidas las costas de Chile y Colombia. (Wang, X. et al 2014).

A través del juicio de expertos y científicos en la materia se definieron los modelos matemáticos que mejor se asemejan a la realidad de las variables hidroclimáticas locales, y que además se ajustan a la temporalidad asociada a la vida útil de los servicios de infraestructura objeto de estudio. Para esto se ha hecho una revisión bibliográfica y entrevistas en donde se han analizado los resultados obtenidos de acuerdo con la corrida de los modelos para diferentes escenarios, establecidos en el estudio “Elaboración de una base digital del clima comunal de Chile: línea base (años 1980-2010) y proyección al año 2050” (MMA, 2016b) proporciona información sobre el cambio climático al 2050 según el escenario RCP8.5 para cada una de las 342 comunas chilenas. (TCN, CMNUCC 2016).

Considerando que existen obras de infraestructura cuya vida útil pudiese superar la barrera del año 2050, se ha considerado los modelos del CR2 que contiene Simulaciones Climáticas Regionales con el fin de evaluar las condiciones más probables del sistema climático regional en un escenario futuro hasta el año 2100, caracterizado por distintos efectos forzantes. El CR2 cuenta con dos modelos uno regional CORDEX y otro local RegCM4 Chile, que provee información de distintas variables hidroclimáticas como precipitación, temperatura, radiación entre otras, para tres periodos de tiempo, futuro cercano (2020-2035), futuro intermedio (2035-2050) y futuro lejano (2050-2065), bajo escenarios RCP 8,5 y RCP 2,6.

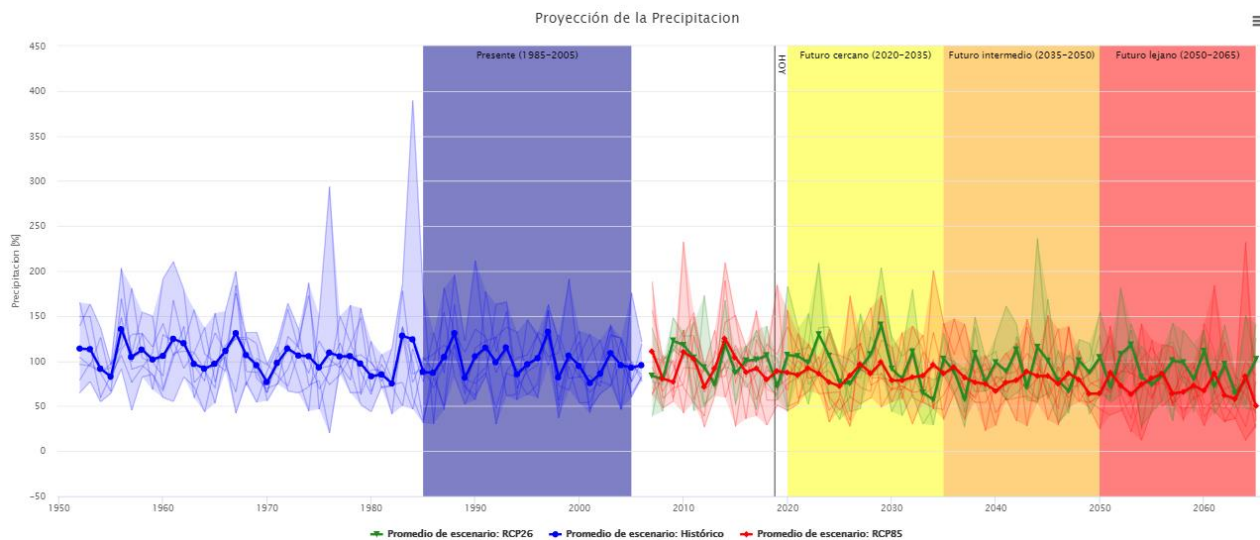


Ilustración 12. Proyecciones de cambios precipitaciones para el periodo 2050-2065 para un escenario RCP 8,5
Fuente: Elaboración propia basado en Simulaciones CR2, (2018).

En este estudio, la identificación de modelos regionales o locales para obtención de simulaciones predictivas sobre el comportamiento de variables climáticas como precipitación, radiación o temperatura, tiene por objetivo proporcionar una fuente de datos hidroclimáticos futuros, que servirán a los gestores de proyectos, para su aplicación en modelos hidrológicos o marítimos, que permitirán obtener proyecciones de magnitudes hidráulicas o marítimas necesarias para el diseño de obras de infraestructuras (Ej. Caudal máximo para una cuenca específica).

6.10.3. Análisis de vulnerabilidad de servicios de infraestructura basado en pronóstico de eventos futuros

En la sección previa, de acuerdo con la revisión bibliográfica, se han descrito los antecedentes y simulaciones existentes para el pronóstico del clima futuro en Chile, dentro de los principales hallazgos se destacan; el incremento de hasta 8 veces las tormentas cálidas en el territorio continental, y un incremento del nivel medio del mar entre 2 y 3 mm/año para el periodo 2020-2040, mientras que para el horizonte 2040-2070 se presentan aumentos 2,8 y 4 mm/año. y el incremento entre el 10 y 15% de la altura de las olas extremas del litoral.

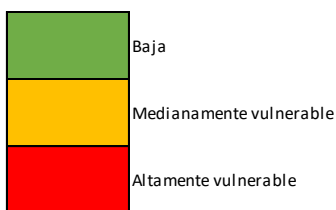
Sin embargo, estos datos se encuentran agregados a un nivel geográfico nacional y presentan un grado de incertidumbre alto al momento de hacer una aplicación por regiones, en tal sentido se identifica la oportunidad de desarrollar un análisis cuantitativo más exhaustivo en donde se puede determinar con precisión el incremento de la probabilidad de ocurrencia de eventos hidroclimáticos extremos y su potencial impacto a una resolución territorial mayor, en donde se obtengan valores porcentuales por región geográfica.

El análisis de la vulnerabilidad futura cuenta con un enfoque metodológico que permite establecer la línea de base o la vulnerabilidad actual del territorio, y compararla con la vulnerabilidad futura teniendo en cuenta las proyecciones climáticas en los próximos 100 años. Es necesario para su desarrollo considerar la premisa de que la única variable que cambia con el tiempo es la exposición a la amenaza climática, mientras que el resto de las variables se mantienen en condición *ceteris paribus*¹⁰, la aplicación de este principio es esencial para evitar situaciones de acumulación de incertidumbre en el análisis que harían inviable su interpretación. (Acclimatise, 2018).

Considerando los datos existentes, se ha hecho un ejercicio de análisis cualitativo de vulnerabilidad futura, en el que se ha considerado un incremento de la probabilidad de ocurrencia a eventos como tormentas cálidas, precipitaciones intensas, velocidad extrema del viento (marejadas ciclónicas), erosión del suelo e incremento de la temperatura en general, estas variaciones han sido representadas en matrices de vulnerabilidad futura como ejercicio práctico para comprender la conjunción de la exposición y la sensibilidad a las amenazas climáticas futuras.

Tabla 32. Matriz de vulnerabilidad futura de servicios de infraestructura de control aluvional

		Exposición								
		Macrozona Norte			Macrozona Centro			Macrozona Sur		
		Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
Sensibilidad	Baja									
	Media			Erosión del Suelo			Tormentas			Inundaciones / Tormentas
	Alta		Inundaciones / Tormentas	Aluviones / Precipitaciones extremas / Tormentas cálidas		Inundaciones/Erosión del Suelo	Aluviones / Precipitaciones extremas / Tormentas cálidas		Erosión del Suelo	Aluviones / Precipitaciones extremas



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Matriz de vulnerabilidad futura de servicios de infraestructura de manejo de cauce

¹⁰ Permaneciendo el resto constante

		Exposición								
		Macrozona Norte			Macrozona Centro			Macrozona Sur		
		Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
Sensibilidad	Baja									Tormentas
	Media		Erosión del Suelo	Aluviones / Tormentas cálidas		Erosión del Suelo / Tormentas	Aluviones/Precipitaciones extremas / Tormentas cálidas			Inundaciones / Tormentas cálidas / Derretimiento de glaciares
	Alta		Tormentas / Derretimiento de glaciares	Inundaciones / Precipitaciones extremas		Inundaciones / Derretimiento de glaciares		Erosión del Suelo	Aluviones	Precipitaciones extremas

Baja
Medianamente vulnerable
Altamente vulnerable

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34. Matriz de vulnerabilidad futura de servicios de infraestructura de zona costera

		Exposición								
		Macrozona Norte			Macrozona Centro			Macrozona Sur		
		Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
Sensibilidad	Baja		Incremento nivel medio del mar / Acidificación del mar			Acidificación del mar	Incremento nivel medio del mar		Acidificación del mar	Incremento nivel medio del mar
	Media	Marejadas ciclónicas				Marejadas ciclónicas	Erosión-abacamiento costero		Marejadas ciclónicas	Precipitaciones extremas
	Alta		Erosión-abacamiento costero	Incremento de altura y potencia de ola			Incremento de altura y potencia de ola		Erosión-abacamiento costero	Incremento de altura y potencia de ola

Baja
Medianamente vulnerable
Altamente vulnerable

Fuente: Elaboración propia.

En las matrices de vulnerabilidad, se puede evidenciar de forma representativa como se incrementa la exposición de los servicios de infraestructura de manejo de cauce y de control aluvional a fenómenos como tormentas cálidas y precipitaciones intensas, así como se representa la aparición con mayor intensidad de otros efectos del cambio climático como la erosión del suelo. La matriz de vulnerabilidad de zona costera representa el incremento de la exposición a fenómenos como aumento de la velocidad del viento (Marejadas ciclónicas) especialmente en la macrozona sur y el incremento de forma transversal en toda la costa chilena de la altura y potencia de la ola.

7. MEDIDAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA

Esta sección comprende el desarrollo metodológico y la aplicación de criterios para la identificación y priorización de medidas de adaptación que cumplan en mayor medida con las necesidades detectadas a través del diagnóstico de vulnerabilidad de servicios de infraestructura hidráulicos y de zona costera. En tal sentido se plantearán medidas al alcance de la mano (corto y mediano plazo) correspondientes con la realidad institucional del MOP y el contexto de Chile.

7.1. Metodología de evaluación comparativa “Benchmarking”

Para la identificación de las mejores prácticas en el mundo en materia de medidas de adaptación al cambio climático para infraestructura, se ha desarrollado un *Benchmarking* que consiste en el uso de criterios de comparación para identificar y evaluar aquellas medidas consideradas como casos exitosos en un contexto nacional e internacional. Las medidas identificadas a través de este proceso deben tener por objetivo incrementar la resiliencia de los servicios de infraestructura frente a las principales amenazas climáticas que les aluden.

Por otra parte, el desarrollo de este análisis comparativo permitirá, construir una base de conocimiento sobre medidas de adaptación en Chile y el mundo, permitiendo presentar a los responsables de proyectos una diversidad de alternativas de adaptación puestas en práctica, contribuyendo de esta forma al fortalecimiento de las competencias y gestión del conocimiento en la materia.

El *Benchmarking* internacional, contempló una revisión bibliográfica bajo dirección de *Acclimatise*, en la que se tuvo en consideración que las medidas identificadas sirvieran para hacer frente a las principales amenazas hidroclimáticas que aluden los servicios de infraestructura en Chile, en base a la data histórica de eventos observados en los últimos 10 años y la data de exposición futura a amenazas climáticas. En donde principalmente se destacan la presencia de; marejadas, marejadas ciclónicas, tormentas cálidas e inundaciones costeras para la zona costera, y por otras partes inundaciones fluviales y deslizamientos de tierra para infraestructura hidráulica.

Para la identificación de las mejores prácticas en Chile, se consideró la información suministrada por las direcciones de obras hidráulicas y portuarias DOH y DOP respectivamente, quienes durante el desarrollo de entrevistas o talleres manifestaron, ya haber incorporado acciones con un foco de gestión adaptativo, orientadas a mitigar los efectos del cambio climático.

7.2. Criterios del benchmarking

El principal criterio para la identificación de medidas u opciones de adaptación al cambio climático para servicios de infraestructura hidráulica y de zona costera, fue que estas respondieran total o parcialmente a los hallazgos del análisis de vulnerabilidad desarrollado, específicamente a aquellos factores identificados como clave para la disminución de la sensibilidad de los servicios de infraestructura y por ende incremento de su resiliencia.

Por otra parte, se ha considerado como criterio en la identificación de medidas su potencial de replicabilidad para Chile, que se traduce en el potencial para repetir una medida internacional, considerando las diferencias técnicas, sociales, económicas y del entorno bio físico natural con respecto a las de Chile, y en el caso de las medidas regionales, que estén puedan escalarse a otras regiones o de forma transversal para el país.

Considerando los criterios planteados, se han identificado catorce (14) experiencias internacionales y cinco (5) experiencias nacionales que se han resumido en la siguiente tabla (Ver anexos 14.5 y 14.6):

Tabla 35. Resumen de resultados del Benchmarking

Amenazas climáticas	Medida de adaptación	Lugar	Objetivo	Replicabilidad
<ul style="list-style-type: none"> Incremento en las precipitaciones Inundación fluvial 	Sistema de Gestión de Inundaciones en Yakarta basado en infraestructura gris, Indonesia	Yakarta, Indonesia	Mejorar la puesta en marcha y el mantenimiento del sistema de gestión de las inundaciones de Yakarta.	Alta
<ul style="list-style-type: none"> Incremento en las precipitaciones Inundación fluvial 	Protección contra las inundaciones en el río Drina	Bosnia Herzegovina	proporcionar una mejor protección frente a las inundaciones en las áreas del proyecto mediante medidas de adaptación basadas en obras de ingeniería y apoyo técnico	Alta
<ul style="list-style-type: none"> Incremento en las precipitaciones Inundación fluvial 	Medidas de recuperación de emergencia tras las inundaciones	Serbia	rehabilitación de la infraestructura de protección contra las inundaciones, y controlar el drenaje	Media
<ul style="list-style-type: none"> Incremento en las precipitaciones Inundación fluvial 	Introducción de infraestructura hidráulica no convencional: Creación de una	Rotterdam, Holanda	Construcción de una “plaza de agua” a gran escala, con el objetivo de actuar como espacio multifuncional, combinando la recogida del agua de lluvia con un	Baja

	“plaza de agua” en Benthemplein		espacio público recreacional al aire libre	
<ul style="list-style-type: none"> Incremento en las precipitaciones Control aluvional 	Sistema de Obras de Control Aluvional Quebradas La Cadena - Salar del Carmen - El Ancla- Entre otras	Antofagasta, Chile	construcción de más de 50 pozas de decantación con diques para aluviones en las quebradas afluentes a la ciudad de Antofagasta, limpieza de las quebradas afluentes, implementación de un sistema de vigilancia y mantenimiento de diques y pozas de decantación, Reforzamiento con obras de protección	Alta
<ul style="list-style-type: none"> Incremento en las precipitaciones Control aluvional 	Sistema de Obras de Control Aluvional Quebrada de Macul	Santiago, Chile	construcción de más de 50 pozas de decantación con diques para aluviones en las quebradas afluentes a la ciudad de Santiago	Alta
<ul style="list-style-type: none"> Incremento en las precipitaciones Control aluvional 	Sistema de Obras de Control Aluvional Quebrada Tres Puntas	Tocopilla, Chile	La construcción de más de 15 barreras de decantación para aluviones en las quebradas afluentes a la ciudad de Tocopilla	Alta
<ul style="list-style-type: none"> Incremento en las precipitaciones Control aluvional 	Sistema de Obras de Control Aluvional Quebrada Taltal	Taltal, región de Antofagasta, Chile	construcción de más de 7 pozas de decantación con diques para aluviones en las quebradas afluentes a la ciudad de Taltal, limpieza de las quebradas afluentes, Reforzamiento con obras de protección y reubicación de infraestructura	Alta
<ul style="list-style-type: none"> Incremento en las precipitaciones Control aluvional 	Sistema de Obras de Control Aluvional Quebrada Coyhaique	Región de Aysén, Chile	construcción de más de 244 barreras o diques para aluviones en las quebradas afluentes a la ciudad de Coyhaique, Mejoramiento de alcantarillas, para permitir el paso de los caudales líquidos en los cruces de las principales avenidas de la ciudad	Alta
<ul style="list-style-type: none"> Incremento de 	Sistema de Alerta Temprana	Georgia	Ampliación de la red de observación de riesgos naturales	Alta

<ul style="list-style-type: none"> las precipitaciones Todas 	<p>multiriesgo y uso de la información climática</p>		<p>inducidos por el clima y el desarrollo de las capacidades de los técnicos del Ministerio de Ambiente de Georgia para la elaboración de modelos climáticos, implementación del Sistema de Alerta Temprana Multirriesgo</p>	
<ul style="list-style-type: none"> Incremento en las precipitaciones Inundación fluvial 	<p>Sistema de Apoyo para la Toma de Decisiones en materia de inundaciones en la cuenca del río Chao</p>	<p>Phraya, Tailandia</p>	<p>crear información sobre las condiciones del río Chao Phraya, y suministrarla en tiempo real a cualquier usuario que la pudiera necesitar. El Sistema de Apoyo para la Toma de Decisiones (DSS) utiliza un sistema capaz de proporcionar información relativa a las inundaciones con siete días de antelación, lo que permite anticipar los posibles desastres a corto y mediano plazo</p>	<p>Media</p>
<ul style="list-style-type: none"> Oleaje extremo Incremento del nivel medio del mar Erosión costera Sedimentación Todas 	<p>Plan de Gestión del Cambio Climático de los puertos marítimos</p>	<p>Colombia</p>	<p>Proveer información básica sobre vulnerabilidad climática del sector portuario de Colombia y dotar de herramientas de adaptación para aumentar la resiliencia de los puertos colombianos ante los impactos previstos del cambio climático</p>	<p>Alta</p>
<ul style="list-style-type: none"> Aumento de intensidad de lluvias Incremento del nivel medio del mar Erosión costera Sedimentación 	<p>Adaptación al cambio climático del Puerto de Manzanillo</p>	<p>México</p>	<p>Modernizar el sistema de drenaje dentro del puerto, Modernizar y mejorar las trampas de sedimento, Considerar la planeación a nivel cuenca para la captación de lluvias y opciones de adaptación</p>	<p>Alta</p>
<ul style="list-style-type: none"> Erosión del suelo Inundaciones costeras Tormentas Mareas altas Otras 	<p>Gestión de inundaciones urbanas y de la erosión</p>	<p>Can Tho, Vietnam</p>	<p>Mejorar drenaje durante la temporada de inundaciones y mareas altas, protección de las zonas de ribera mediante la implantación de vegetación y la creación de espacios verdes abiertos al público</p>	<p>Alta</p>

<ul style="list-style-type: none"> • Inundaciones fluviales • Precipitaciones intensas • Otras 	Parque Yanweizhou en la ciudad de Jinhua	Jinhua, China	Introducción de humedales en un área urbana para reducir el riesgo de inundaciones	Media
<ul style="list-style-type: none"> • Inundaciones fluviales • Precipitaciones intensas • Otras 	Restauración del Corredor Verde del Bajo Danubio para la protección contra las inundaciones	Unión Europea (Varios países)	Proteger 1 millón de hectáreas de áreas protegidas nuevas y existentes; restaurar 224.000 hectáreas de llanura de inundación; y promover el uso sostenible, el desarrollo y la conservación del recurso hídrico a lo largo de unos 1.000 km.	Alta
<ul style="list-style-type: none"> • Inundaciones fluviales • Precipitaciones intensas • Otras 	12.000 Jardines de Lluvia	Seattle, Estados Unidos	Disponer de 12.000 jardines de lluvia en Seattle y en su área metropolitana	Baja
<ul style="list-style-type: none"> • Inundaciones fluviales • Precipitaciones intensas • Otras 	Reubicación de viviendas para la adaptación contra las inundaciones	Eferdinger Becken, Austria	Relocalización de gran parte de las casas situadas dentro de la zona inundable	Media
<ul style="list-style-type: none"> • Inundaciones fluviales • Precipitaciones intensas • Otras 	Seguimiento de la infraestructura hidráulica.	México	Las brigadas de Protección a la Infraestructura y Atención de Emergencias (PIAE) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), ejecutan Inspección de obras de protección	Alta

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, es importante destacar el hecho de que la adaptación es un proceso dinámico altamente influenciado por aspectos sociales, económicos, institucionales, de gobernanza, tecnológicos, de mercado, etc. e incluso las sociedades con una alta capacidad de adaptación siguen siendo vulnerables al cambio climático, a la variabilidad climática y a los eventos climáticos extremos.

7.3. Conceptualización de medidas de adaptación al cambio climático

Según el AR5 del IPCC, la adaptación es un medio de crear resiliencia y realizar ajustes en función de los impactos del cambio climático. Es específica del lugar y el contexto, y no existe ningún método único para reducir los riesgos que resulte adecuado para todas las situaciones.

Por otra parte, de acuerdo con *The European Climate Adaptation Platform (Climate-ADAPT)*¹¹, “...las opciones de adaptación son aquellas diseñadas con el objetivo gestionar el riesgo climático a un nivel aceptable, aprovechando cualquier oportunidad positiva que pueda surgir...” Entendiendo que las medidas de adaptación surgen como la respuesta a una amenaza particular, su clasificación ha sido desarrollada por el Climate-ADAPT, acorde al tipo de amenaza climática para la que buscan gestionar el riesgo.

En este sentido, existen distintas plataformas que proveen información útil sobre adaptación, dentro de las que destaca el portal web de *Climate-ADAPT*, que cuenta con un motor de búsquedas de casos de estudio¹², en donde organiza y divulga la información disponible para Europa, de acuerdo al tipo riesgo climático dentro de los que destacan, inundación, sequía, temperatura extrema, estrés hídrico, incremento del nivel del mar, hielo y nevadas y tormentas, además han clasificado las medidas por sector de adaptación, en donde se destacan, reducción de riesgo de desastre, transporte, biodiversidad, financiera, forestal, urbana, gestión de agua, borde costero, infraestructura, salud, y agricultura.

Como parte del proceso de mejorar la comprensión e incrementar la colaboración en materia de adaptación al cambio climático resulta vital la publicación y el intercambio de información sobre las mejoras experiencias, como proceso fundamental para el desarrollo de una sistematización de medidas de adaptación para servicios de infraestructura, que al mismo tiempo permita al gestor de proyectos, contar con una visión ampliada e integral sobre las diferentes opciones que pudiese aplicar para mejorar la resiliencia de los servicios de infraestructura.

De acuerdo con los encuentros, discusiones e informes emitidos por el Panel Intergubernamental de expertos y líderes mundiales para hacer frente al cambio climático, se ha llegado a consensos en temas sobre que las vulnerabilidades de las comunidades o servicios de infraestructura frente a este fenómeno global pueden disminuirse a través del incremento en las condiciones de resiliencia mediante medidas de adaptación. Destacándose que dentro de la tipología planteada de medidas adaptación e interacciones con la mitigación que permiten el incremento de la resiliencia a las amenazas climáticas, se encuentran:

- Específicas del contexto y enfocadas a la reducción de la sensibilidad y la exposición;
- Graduales y transformativas;
- Generadoras de co-beneficios, sinergias y contrapartidas;

¹¹ <https://climate-adapt.eea.europa.eu/knowledge/adaptation-information/adaptation-measures>

¹² <https://climate-adapt.eea.europa.eu/sat>

- Complementarias – ciertas medidas de adaptación suaves, en general menos costosas, deberán implementarse en primer lugar para favorecer la implementación de otras medidas más complejas y costosas;
- Medidas que tomen en cuenta los límites de la adaptación convencional.

Se deben evitar igualmente opciones de mal-adaptación, es decir, medidas tomadas para evitar o reducir la vulnerabilidad al cambio climático de un sistema pero que afectan negativamente o aumentan la vulnerabilidad de otros sistemas, sectores o poblaciones.

Asimismo, el IPCC plantea que debe ser impulsada una gestión climáticamente inteligente de la infraestructura, de manera tal que el enfoque principal sea el de la integración de la Reducción del Riesgo de Desastres/Adaptación al Cambio Climático (RRD/ACC) como un medio impulsor de resiliencia, a través de la generación de capacidades de reflexión, nuevas herramientas y habilidades que permitan operativizar la adaptación y de esta manera hacer vinculante el empoderamiento institucional para reducir vulnerabilidades.

La adaptación a menudo implicará una combinación de acciones que incluyan medidas suaves y duras para la gestión del riesgo climático y el aprovechamiento de las oportunidades asociadas con él. La siguiente Tabla muestra la tipología y ejemplos de medidas de adaptación al cambio climático para el sector de infraestructura:

Tabla 36. Tipología de medidas de adaptación para la gestión del riesgo climático

Tipo de medida	Descripción	Ejemplo
Suave (<i>soft</i>)	Creación, análisis e intercambio y difusión de la información	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo del clima o de factores relacionados con el clima vs. umbrales críticos • Evaluaciones cuantitativas de riesgo climático. (Ej: Elaboración de esquemas y vigilancia de los peligros y vulnerabilidades, sistemas de alerta temprana, monitoreo y seguimiento, desarrollo y difusión tecnológica de prevención).
	Institucional / política / Cambios de paradigmas / idiosincrasias	<ul style="list-style-type: none"> • Modificación de procesos, normas, lineamientos, códigos. • Participación de las partes interesadas. • Desarrollo de planes de gestión de riesgos climáticos que incorporen un componente de prevención. • Medidas de preparación y respuesta, incluidos los planes de emergencia pertinentes. (Ej: Normas y reglamentos: Normas y prácticas de diseño y construcción de infraestructura, legislación de apoyo en la reducción del riesgo de desastres, legislación a favor de la

		<p>contratación de seguros).</p> <p>(Ej: Políticas, planes y programas: Políticas públicas de adaptación al cambio climático, planes regionales de adaptación al cambio climático, programas de adaptación al cambio climático en ciudades y macrozonas del territorio, vinculación integrada con la ordenación del territorio).</p>
	Financieras y de transferencia de riesgos a terceros	<p>Protección frente a riesgos climáticos a través de sistemas de seguros u otros instrumentos financieros</p> <p>(Ej: Incentivos financieros, seguros, bonos de catástrofe, bonos verdes, fondos para imprevistos en caso de desastres, asociaciones público-privadas).</p>
	Operacional (OPEX)	<p>Cambios en las operaciones, incluyendo el uso de márgenes de seguridad para hacer frente a las incertidumbres del cambio climático.</p>
Duras (“hard”)	Modificaciones físicas (CAPEX)	<p>Soluciones de ingeniería gris, verde o híbridas. Incluyen la adaptación de la infraestructura existente a condiciones futuras de cambio climático.</p> <p>(Ej: Ingeniería gris: Diques de contención, escolleras, estructuras de protección de borde costero, elaboración de normas, códigos y estándares).</p> <p>(Ej: Medidas basadas en los ecosistemas: Restauración ecológica, conservación de suelos, forestación, reforestación, preservación de humedales y ecosistemas resilientes).</p>

Fuente: Acclimatise, 2018.

Dado el grado de incertidumbre inherente al sistema en el que se consideran el cambio y la variabilidad climática, es esencial identificar medidas de adaptación que funcionen bien bajo condiciones de incertidumbre; se trata de las llamadas “soluciones adaptativas de resultados garantizados”, que proporcionan beneficios socioeconómicos netos y continúan valiendo la pena independientemente de la naturaleza del clima futuro. Son medidas flexibles basadas en una adaptación incremental y sistemática en lugar de emprender una opción de adaptación a gran escala y con un alto costo de una sola vez.

7.4. Sistematización de medidas de adaptación para servicios de infraestructura

Considerando los resultados del análisis Benchmarking y las recomendaciones de expertos de la DOH y DOP, en esta sección se describirán de forma sistematizada las principales medidas de adaptación de corto y mediano plazo para el refuerzo de la capacidad de adaptación, y que contribuyan a una mejor comprensión y respuesta a los desafíos futuros del cambio climático.

En general las medidas de adaptación abordadas en este estudio se han agrupado en dos grandes conjuntos, las “Medidas suaves” y las “Medidas duras”, este último grupo implicará un análisis más extenso considerando que se encuentra en línea con el objetivo del estudio y considerando que corresponde con las competencias naturales de las direcciones técnicas del MOP. A continuación, se describen los grupos de medidas mencionados:

- Medidas suaves “*Soft*”, incluyen la creación, análisis e intercambio y difusión de la información, medidas institucionales y de política, financieras y de transferencia de riesgos a terceros y operacionales
- Medidas duras “*Hard*”: Medidas de ingeniería,
 - Medidas “grises”: Obras civiles de infraestructura costera e hidráulicas la y conservación de estas.
 - Medidas “verdes”: Obras o actividades orientadas a la gestión sustentable, conservación y restauración de ecosistemas para reducir el riesgo de desastres, similar al concepto de reducción del riesgo de desastres basado en ecosistemas uso e implementación de obras ecosistémicas como humedales, estuarios, lagunas y marismas, en sintonía con el medio ambiente natural.
 - Medidas “híbridas”: Consiste en la combinación en una proporción adecuada de las medidas grises, verdes o Brown considerando las particularidades del proyecto o la obra
 - Medidas “Brown”: Actividades asociadas al movimiento de tierra por rellenos y dragados en playas y cauces de ríos y elementos de protección ribereña erosionados o colmatados

El siguiente diagrama sintetiza las diferentes tipologías de medidas de adaptación que serán abordadas en este estudio.

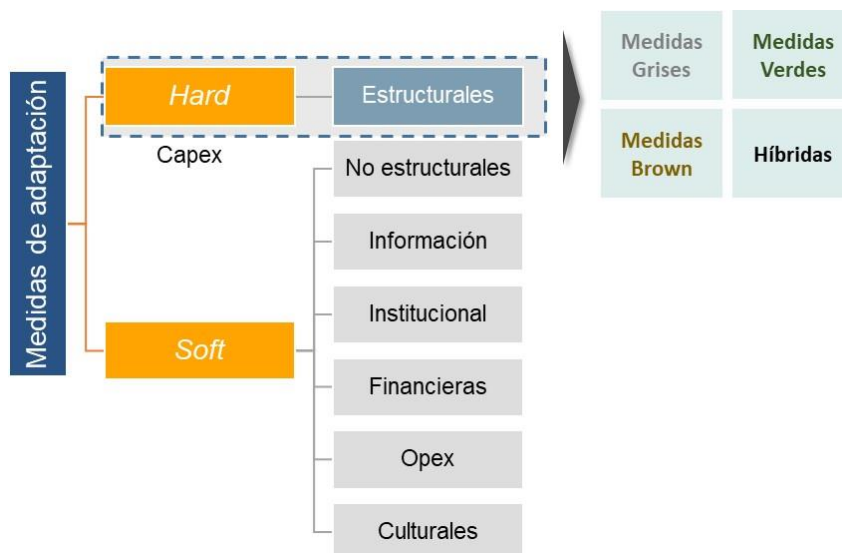


Ilustración 13. Diagrama de tipología de medidas de adaptación
Fuente: Elaboración propia.

Medidas de adaptación *soft* o suaves

Son todas aquellas medidas asociadas a la creación, análisis e intercambio y difusión de la información, medidas institucionales y de política, financieras y de transferencia de riesgos a terceros y operacionales, se consideran como medidas de adaptación que buscan reforzar la capacidad de adaptación, y establecer las directrices en la gestión de recursos y competencias necesarias para la implementación efectiva de las medidas “*hard*”, contemplan generalmente cambios de fondo concretos que contribuyen a reducir los riesgos del cambio climático y a aprovechar las oportunidades asociadas con él. Dichas medidas pueden a su vez agruparse en cuatro grandes subcategorías, como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 37. Ejemplos de tipología de medidas de adaptación al cambio climático en infraestructura

Tipo	Descripción
Institucionales y gobernanza	Normas y reglamentos: Normas y prácticas de diseño y construcción de infraestructura, legislación de apoyo en la reducción del riesgo de desastres, legislación a favor de la contratación de seguros. Políticas, planes y programas nacionales: Políticas públicas de adaptación al cambio climático, planes regionales de adaptación al cambio climático, programas de adaptación al cambio climático en ciudades y macrozonas del territorio. Vinculación integrada con la ordenación del territorio.
Sociales culturales	Opciones educativas: Sensibilización e integración en la educación, intercambio de conocimientos, investigación, plataformas de intercambio de conocimientos y aprendizaje. Opciones de comportamiento: Preparación de viviendas y planificación de la evaluación, conservación del suelo, ecosistemas, y agua, gestión de residuos, aprendizaje de convivencia con el riesgo.
Cambios de paradigmas / idiosincrasias	Práctica: Innovaciones sociales, cambios de comportamientos o cambios institucionales, cambios de gestión que produzcan modificaciones sustanciales en los modos de vida. Política: Decisiones y medidas de carácter político, social, cultural y ecológico en sintonía con la disminución de la vulnerabilidad y el riesgo, apoyando la adaptación, mitigación y el desarrollo sustentable. Personal: Presunciones, creencias, valores y visiones del mundo individuales y colectivos que influyan en las respuestas al cambio climático.
Financieras	Modelos de negocio, instrumentos financieros locales, nacionales e internacionales.

Fuente: Elaboración propia.

Para describir las medidas suaves de adaptación al cambio climático en el contexto Chileno, es necesario hacer referencia al Plan de Adaptación y Mitigación de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático 2017-2022, en donde se destacan el planteamiento de un eje de adaptación que comprende las líneas de acción 1 y 2 y un eje de gestión del conocimiento que contempla las líneas de acción 7,8 y 9:

- **Línea de acción 1:** Cambios metodológicos para incorporar la gestión del riesgo hidroclimático futuro en la evaluación, diseño y planificación de servicios de infraestructura.
- **Línea de acción 2:** Incorporación en los procesos de planificación ministerial de las implicancias del Cambio Climático para los servicios de infraestructura del Ministerio de Obras Públicas.
- **Línea de acción 7:** Coordinación Intra e Interministerial del Cambio Climático.
- **Línea de acción 8:** Gestión del Conocimiento en Cambio Climático.
- **Línea de acción 9:** Promoción de la innovación tecnológica para la adaptación al Cambio Climático.

Medidas de adaptación *Hard* o duras

Las medidas de adaptación al cambio climático “duras”, están asociadas principalmente a aquellas que implican un desarrollo ingenieril acompañado de inversiones significativas, ocasionalmente vinculado con grandes obras de infraestructura, las mismas se han agrupado de acuerdo a su tipo como se describe a continuación.

Medidas de infraestructura gris

En el contexto de adaptación de la infraestructura al cambio climático, resulta fundamental el hecho de reconocer que la ingeniería convencional no aborda de forma concluyente la variabilidad climática futura producto de dicho fenómeno, en tal sentido y para efectos de este informe una medida gris se establece como aquella que comparte los principios de la ingeniería convencional, pero con la particularidad de que incorpora un enfoque constructivo que contempla factores de resiliencia, o variables de diseño que responderán de forma efectiva a los impactos producto de los eventos climáticos extremos que pudiesen ocurrir en el futuro.

Se identifican medidas de infraestructura gris como, por ejemplo: obras paseos de protección de zona costera, diques de contención de cauces de ríos, usualmente se diseñan con el objetivo de garantizar el 100 % de protección contra un desastre, sin embargo, cuando la magnitud del desastre alcanza un límite superior “excepcional” la capacidad de protección de la obra se reduce substancialmente. Por ejemplo, los flujos de agua o caudal rebosan la infraestructura de control (inundación fluvial) e ingresa en zonas residenciales, predios agrícolas e incluso registrando rompimiento de diques o fallas estructurales de los elementos de contención.

Medidas de infraestructura verde

Es importante resaltar el hecho de que la infraestructura verde es un componente esencial de la adaptación basada en los ecosistemas y aporta numerosos co-beneficios ya que utiliza los bienes y servicios producidos por los ecosistemas en cuestión para aumentar la resiliencia de un sistema al cambio climático. Hoy en día se utiliza el término de infraestructura verde haciendo referencia a la gestión sustentable, conservación y restauración de ecosistemas para reducir el riesgo de desastres, similar al concepto de reducción del riesgo de desastres basado en ecosistemas (Renaud, 2013).

La infraestructura verde es diseñada, por ejemplo, para reducir efectos del tránsito de crecidas o inundaciones por el cauce de ríos manteniendo el flujo en el cauce, y reduciendo los daños de la inundación, también como buffer frente al incremento del nivel medio del mar. Este tipo de medidas de manejo de inundaciones sustentable a menudo incluye métodos de desarrollo de bajo impacto para reducir escurrimientos en superficies impermeables.

En comparación a las infraestructuras grises, las infraestructuras verdes toman ventaja de los ecosistemas naturales, diseñando soluciones que consideran una armonía entre las características hidrológicas del lugar y la reducción del daño generado por eventos climáticos como precipitaciones intensas o el escurrimiento desde su fuente (humedales, parques, pantanos, bosques, entre otros). Además, las infraestructuras verdes son habitualmente diseñadas y planificadas con un enfoque integral de cuencas que incorporan la escala de la unidad hidrográfica, la conservación de ecosistemas y uso de suelo existentes. En general se consideran tres tipos de infraestructura verde:

- Costa: arrecifes de coral, humedales, dunas, marismas, lechos de ostras y pastos marinos
- Terrestre: silvicultura (forestación, reforestación, deforestación evitada), humedales
- Urbano: techos verdes / fachadas, espacios verdes y corredores, jardines de lluvia, *bioswales* o drenajes sostenibles y colectores de agua de lluvia para su aprovechamiento.

La siguiente tabla muestra un amplio rango de beneficios que podrían ser aprovechados por la implementación de técnicas de infraestructuras verdes:

Tabla 38. Ejemplos de tipología de medidas de adaptación al cambio climático en infraestructura

Ejemplo de infraestructura verde	Descripción de beneficios
<ul style="list-style-type: none"> • Parques urbanos inundables, • Pavimentos permeables, • Humedales, • Zanjas de Bio-infiltración, • Bofedales (cabeceras de cuencas), • Revegetación de laderas de 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce la probabilidad de inundación, • Incrementa la recarga de los acuíferos, • Disminuye los efectos de las islas de calor urbanas, • Disminuye los costos de inversión y mantención, • Mejora la belleza escénica o paisajística, • Permite la integración social de actividades recreativas,

cerros.	<ul style="list-style-type: none"> • Permite la integración social y de desarrollo de actividades productivas, • Genera espacios de convivencia con ecosistemas y permite prácticas de agricultura urbana, • Control / prevención de la erosión del suelo. • Protección de playas y costas contra marejadas ciclónicas y energía de las olas, • purificación del aire, • Secuestro de carbono, • Regulación del clima, • Regulación de descargas acuíferas, • Recarga de agua subterránea, • Hábitat para especies, • Polinización, • Filtración y captura de sedimentos, • Estabilización de la tierra mediante la captura de sedimentos, • Purificación de agua, • Mantenimiento de la calidad del agua.
---------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Elaboración propia (2018)

Medidas de infraestructura híbrida

Las tendencias actuales se orientan a implementar medidas de infraestructura mixta o híbrida, siendo una de las interrogantes a discutir en qué proporción de infraestructura gris o verde debería ser expandida o reducida las medidas. Para determinar la combinación óptima en una determinada zona del territorio, deben ser evaluadas la efectividad de la infraestructura híbrida en la reducción de desastre, el aumento de la resiliencia, así como también los costos/beneficios sociales y económicos. Por ejemplo, la expansión del área de la infraestructura gris en el territorio puede elevar los niveles de control de desastres, pero podría también resultar en la pérdida de biodiversidad, alteración de los paisajes e incremento de las zonas de islas de calor, incrementando los costos de mantenimiento.

La siguiente figura muestra la curva entre seguridad y magnitud del desastre para infraestructura gris mostrando un gráfico con una forma rectangular. Por el contrario, la respuesta de infraestructura verde es esperada que muestre una tendencia decreciente más gradual. Además, la curva entre seguridad y magnitud de desastre podría extenderse durante un periodo de tiempo más largo respecto a la curva de la infraestructura gris. Sin embargo, la relación entre la respuesta de la infraestructura verde y la magnitud de desastre no está bien entendida, y puede variar dependiendo del tipo de infraestructura verde implementada (ver figura). Por lo tanto, la incertidumbre del desempeño de la infraestructura verde es alta.

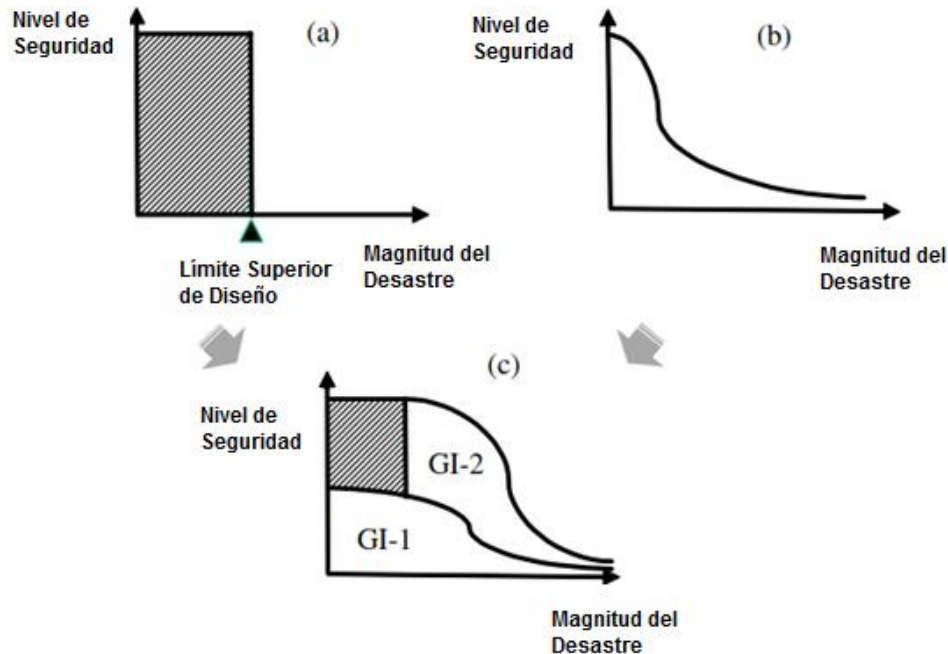


Ilustración 14. Curva de relación entre nivel de seguridad y magnitud de desastres para infraestructuras grises, verdes e híbridas

Fuente: Adaptado de Nakamura e Ishiyama, (2018).

En el pasado, ventajas y desventajas del desempeño de infraestructuras verdes y grises han sido discutidas y comparadas para así poder seleccionar la mejor aproximación para reducir el riesgo de desastres y mejorar la adaptación al cambio climático. La figura muestra un diagrama conceptual de un sistema híbrido combinando estos 2 tipos de infraestructura. En este diagrama conceptual GI-1 representa infraestructura verde básica o fundamental, la cual incluye parques, bosques, humedales o pantanos en el cauce de un río, mientras que GI-2 representa infraestructura verde adicional.

Finalmente, se destaca que todas las opciones de adaptación presentadas tienen como principal objetivo obtener beneficios en el marco de un futuro incierto sometido al cambio climático. Se trata pues de:

- Medidas “no-regret” (medidas robustas o de resultados garantizados): Medidas cuyos beneficios socioeconómicos y ambientales son superiores a sus costos de implementación y que vale la pena aplicar con independencia de la naturaleza del clima futuro. Son las medidas llamadas "blandas" que contribuyen a aumentar la capacidad de adaptación mediante el apoyo a una mejor comprensión y gestión de los riesgos en un contexto de incertidumbre asociado al cambio climático.
- Medidas “low-regret” (de poco riesgo): Los costes asociados a dichas medidas son relativamente bajos, pero los beneficios obtenidos pueden ser potencialmente

importantes. Se trata, por ejemplo, de medidas operacionales que implican cambios en los procesos y procedimientos de gestión y de toma de decisión.

- Medidas de adaptación “win-win”: Acciones que tienen co-beneficios ambientales, sociales o económicos, así como de mitigación (reducción de emisiones de gases de efecto invernadero).
- Opciones flexibles o reversibles: Medidas que se pueden implementar de forma gradual, o con capacidad de integrar nuevos conocimientos, tecnologías, etc.

7.5. Medidas de adaptación para servicios de infraestructura de zona costera e hidráulicos.

Para la identificación de distintas opciones de adaptación para los servicios de infraestructura de zona costera e hidráulicos, ha sido necesario, en primer lugar, considerar el resultado del análisis de sensibilidad exploratorio desarrollado previamente y su validación en el taller 1. Asimismo, se han valorado todas aquellas iniciativas de adaptación al cambio climático tanto locales como internacionales identificadas en el *benchmarking* y que poseen un potencial de replicabilidad alta de acuerdo a los servicios de infraestructura objeto de estudio, como son:

- Control aluvional,
- Manejo de cauces,
- Puertos de pesquera artesanales,
- Puertos de Conectividad,
- Protección de Borde Costero.

A continuación, se presenta una serie de potenciales medidas de adaptación específicas para dichos servicios de infraestructura, que buscan incrementar la resiliencia de estos frente a las amenazas climáticas presentes en Chile. La siguiente compilación de medidas de adaptación no pretende ser una fórmula única para incrementar la resiliencia al Cambio Climático de los servicios de infraestructura aludidos, sino más bien buscan presentar una serie de opciones de adaptación, que sirvan de referencia para el proyectista cuando se enfrente al dilema de la identificación de opciones de adaptación atingentes al caso de estudio.

7.5.1. Descripción general de medidas de adaptación para infraestructura hidráulica

La matriz de factores de sensibilidad climática para servicios de infraestructura hidráulica se ha usado como referencia para analizar aquellos factores que determinan la vulnerabilidad de estos, dicho análisis permitió al mismo tiempo identificar las potenciales oportunidades de mejora planteadas como medidas de adaptación. Para entender qué se quiere mejorar, es necesario previamente describir los servicios de infraestructura y sus elementos, como se detalla a continuación:

Control aluvional: Consiste en obras de tipo estructural compuesta por, muros o diques que permiten atenuar, contener, frenar y/o detener el flujo de detritos o aluviones que se pudiesen producir en una cuenca de una quebrada o cauce fluvial. Estas obras estas compuestas generalmente por uno o varios de los elementos que se describen abajo.

- Piscinas de retención de aluviones; almacenamiento de sedimentos, escombros y piedras; diseñadas para disipar energía e incrementar el tiempo de reacción a la población que se encuentra en dirección aguas abajo para evitar pérdidas/daños humanos.
- Barreras dinámicas; muros confeccionados con mallas de anillos metálicos que permiten retener flujo de detritos (piedras, troncos, escombros) y dejan el paso al agua o sedimentos más finos, esto permite evitar daños a personas e infraestructuras en zonas aguas abajo, disipando la energía y atenuando el flujo.

Manejo de cauces: Son obras de tipo estructural compuesta generalmente por elementos como enrocados, muros de contención, diques y/o canales revestidos, y son diseñadas para mantener el trazado del cauce de un curso de agua evitando su desbordamiento e inundaciones en zonas rurales y/o urbanas.

- Sistemas de disipación de energía y aforo de caudales (gradas, vertederos); son obras que permiten el paso de flujo aluvional o de detritos y al mismo tiempo, disminuyen la energía destructiva que estos traen consigo, esto se logra a través de una serie de gradas o vertederos diseñados para disipar la energía cinética y potencial del flujo, mediante el roce y la fricción que tienen el fluido con dichas infraestructuras. Por otra parte, los vertederos también permiten tener control de aforo de caudales y así medir de manera más precisa el flujo de las crecidas o avenidas que se registren en el lugar.
- Parques inundables (espacios públicos de uso recreativo); consiste en obras proyectadas sobre el lecho de un cauce que tiene habitualmente escaso o nulo escurrimiento de aguas, con el objetivo de canalizar las aguas que escurren mediante el uso de obras de drenaje y plazas, zonas recreativas, juegos infantiles, arbolado, canchas deportivas, *skatepark*, etc; proyectados sobre el lecho del cauce.
- Revestimiento de cauces (fondo y lechos laterales); consiste en la proyección y construcción de muros de enrocado, gaviones, y geosintéticos en lechos laterales de ríos y protección del fondo para evitar la socavación de pilares y estribos de puentes.
- Badenes o vados para tránsito vehicular; elemento estructural tipo badenes, diseñados para permitir el libre paso del escurrimiento de escorrentía y a la vez el tránsito

vehicular y así evitar las dificultades de taponamiento que se registraron en puentes y alcantarillas, debido a la obstrucción de la sección hidráulica entre pilares bajo pilares o tuberías respectivamente.

Considerando la descripción de los servicios de infraestructura hidráulica sujetos a mejoramiento en el incremento de la resiliencia climática, se plantean una serie de medidas de adaptación al cambio climático, agrupadas como medidas estructurales, para referirse a aquellas que implican el diseño y ejecución de obras grises, híbridas y verdes; y medidas no estructurales, para referirse a las medidas asociadas a la gestión de información, y sistemas preventivos o de alerta temprana.

Medidas de adaptación estructurales:

Estas medidas se han enfocado en una redefinición del diseño, considerando un aumento de las dimensiones de la infraestructura hidráulica, con el objetivo de incrementar su resistencia en conjunto o de alguno de sus elementos, frente al aumento del área de escurrimiento y la energía del flujo en el cauce, y tienen por objetivo incrementar la robustez a través del aumento de la capacidad de disipación de energía de crecidas, aumento de flujo de detritos e inundaciones.

Este tipo de medidas, aplican tanto para infraestructura proyectada como existente. Si el caso es el primero, el diseño deberá estar basado en un estudio bajo enfoque determinista o de predicción probabilística que considere la variación del periodo de retorno en función de los pronósticos de variabilidad climática en el contexto del cambio climático. O en su defecto y de forma no definitiva, considerando la variación de los parámetros de cálculo de área de escurrimiento en función del incremento de la línea de nieve y distribución espaciotemporal de las precipitaciones extremas en el futuro.

De acuerdo con lo planteado, a continuación, se describen las principales medidas de adaptación al cambio climático identificadas para servicios de infraestructura hidráulica.

- Aumento de la altura de infraestructura: aumento de la altura original para evitar sobrepaso por escurrimiento (crecidas, tránsito de avenidas) o aumento de cauce por lluvias debido a la elevación de la línea de nieve a causa del cambio climático. Corresponde al tipo de obra gris.
- Aumento de las dimensiones físicas o reforzamiento estructural en infraestructura: incrementar resistencia y estabilidad estructural frente al impacto de la carga de escurrimiento, impacto por energía y problemas erosivos, así como reforzamiento de la protección abrasiva de aluviones o flujos de detritos. Ejemplo: aumentar espesor de coraza protectora en defensa ribereña, disminución de pendiente, adición de nuevos elementos estructurales de disipación de energía, aumento de espesor de diques de

contención, uso de materiales anti-abrasivos, etc., considerando el aumento de los niveles de escurrimiento por cambio climático. Corresponde al tipo de obra gris.

- Aumento de capacidad de almacenamiento de piscinas aluvionales: incrementar la capacidad de retención de los sedimentos y detritos en los escurrimientos, amortiguar el tránsito de la avenida o crecida en el cauce de la cuenca. Esta medida incluye estudios de localización estratégica para este tipo de obras y así contener de manera efectiva los flujos de detritos y barro. Corresponde al tipo de obra gris.
- Disipación de energía del flujo aluvional: Barreras dinámicas, diques, o muros localizados en quebradas, cuyo objetivo es disipar la energía de los flujos o escurrimientos y provocar su atenuación antes de llegar a zonas urbanas. Esta puede ser una medida complementaria a las de adaptación estructural o para aquellas obras existente, en caso futuro se pronostique sea rebasada la altura de escurrimiento de diseño a causa del cambio climático. Corresponde al tipo de obra gris.
- Rehabilitación o construcción de parques en lecho de cauces y zonas naturales: Recuperación de riberas de cauces y generación de parques artificiales reforestados con árboles, donde parte del lecho de los cauces es intervenido mediante la inserción de especies endémicas o introducidas y espacios públicos de recreación. Corresponde al tipo de obra híbrida.
- Dragado o descolmatación de lecho de cauces. Retiro de sedimentos o cantos rodados en infraestructura hidráulica colmatada o zonas saturadas del lecho. Corresponde al tipo de obra híbrida.
- Conservación e implementación de espacios naturales (ecosistemas). Uso de humedales, pantanos, bofedales y lagunas como protección, atenuación del escurrimiento, flujos y erosión. Corresponde al tipo de obra verde.

Medidas de adaptación no estructurales: Dentro de las medidas de adaptación no estructurales propuestas, se destaca la necesidad de establecer un rol de ejecución o articulador de acciones afines con las competencias de las distintas direcciones del MOP.

- Mejoramiento de la red de monitoreo de variables hidroclimáticas: Mejoramiento en cobertura geográfica, cantidad de estaciones y calidad de información suministrada, para variables como como precipitaciones, temperatura y caudales medios, con el objetivo de levantar una serie de datos que ayude a en la aplicación de modelos numéricos de predicción.
- Construir y divulgar una serie de datos hidroclimáticos prospectivos de alta resolución geográfica, con el objetivo de: (i) Integrar a la metodología convencional de diseño hidráulica/hidrológica de infraestructura, variables que representen y simulen la complejidad de la manifestación de fenómenos climáticos que presentan alta variabilidad espacial y temporal, (ii) Desarrollar un análisis de exposición más detallado en donde se analice la ubicación espacial estratégica de obras de control aluvional y control de inundaciones para aquellas zonas altamente expuestas, (iii) Análisis y definición de localización espacial de línea de nieve o isoterma 0 °C, (iv) Creación de un

mapa de la distribución espacial de precipitaciones proyectando tanto su distribución en altura msnm y distribución norte- este.

- Reevaluación del comportamiento del régimen de los cauces, si se están comportando mayoritariamente con régimen fluvial, nival o mixto, o si los periodos de estiaje y crecidas se han ido desfasando con respecto a las estaciones del año, tomando en consideración tanto aquellas regiones recientemente afectadas por eventos hidrometeorológicos extremos como en el resto del territorio del país
- Creación de un comité de coordinación intersectorial: Comité asesorado por expertos en climatología, hidrología, sedimentología, etc. que permita vincular y articular acuerdos entre las distintas direcciones (DOH, DOP, SEMAT, DGA, etc.) respecto a cambio climático y toma de decisiones estratégicas en el territorio.
- Ejecutar un servicio de consultoría externo con el fin de: i) Compilar toda la información sobre el inventario y zonificación de las secciones transversales de los principales cauces de Chile, y aforo de crecidas; ii) Identificar aquellos cauces con déficit de información, desactualizada o inexistente; iii) Clasificación del territorio en zonas de baja, media y alta probabilidad de desborde o inundaciones, según simulaciones de alturas de escurrimiento o ejes hidráulicos; iv) Compilación de datos sobre mediciones de variables y parámetros climáticos horarios y diarios de los eventos de crecidas; v) Propuesta de medición con aforadores y vertederos de caudales de crecidas, avenidas o eventos extraordinarios mediante límnímetros o tecnología de sonar.
- Desarrollo de estudios de modelación numérica probabilística para predicción de altura de escurrimiento de cauces y capacitación de usuarios finales: Al ser las inundaciones, crecidas, avenidas o aluviones más bien fenómenos locales detonados por una condición particular de temperaturas de carácter más regional (frías o cálidas según estación o época del año) se debiese implementar herramientas para estimar estos caudales y tiempos de ocurrencia de crecidas. Es bastante complejo contar con registros de caudales en todas las quebradas y cuencas del territorio, siendo algunos escurrimientos muy efímeros o escasos, pero si es posible tener información y pronósticos de precipitaciones y temperaturas. Tres etapas que pueden ser abordada con los enfoques descritos: i) Generación de series de tiempo y distribuciones espaciales con temperaturas y precipitaciones; ii) Transformación de esta precipitación en escorrentía caracterizada por hidrogramas; iii) Propagación hidráulica de hidrogramas a los puntos de interés
- Revisión de los códigos de diseño por un panel de expertos: Estudio de la necesidad de aumento en los periodos de retorno de diseño (incremento de la magnitud de diseño de precipitaciones y caudales) y disminución del riesgo de falla admisible del diseño (aumento de la seguridad de la obra). Discusión de la asignación de la vida útil de obra (ciclo de vida del servicio de infraestructura), recurrencia del evento extremo y definición del umbral de riesgo o nivel de seguridad a proveer en los diseños futuros adaptados al cambio climático.
- Creación de un comité integrado por expertos en comportamiento de cuencas: nacionales, internacionales y también comunidad del lugar (población local de cuencas)

asignado por macrozona hidrológica de Chile encargado de aprobar todos los diseños hidrológicos/hidráulicos propuestos por ingenieros consultores, empresas consultoras y otras entidades, verificando el cumplimiento de las normativas vigentes y revisando la aplicación de criterios de diseño que consideren el cambio climático.

- Programas de rehabilitación y limpieza de cauces: Robustecer los programas existentes y definir roles y responsabilidades claras, con el objetivo de ejecutar de forma efectiva las actividades de limpieza periódica de residuos y escombros en los lechos de cauces donde habitualmente las personas o industrias tiran sus desmontes o desechos, lo cual disminuye la sección hidráulica del cauce y transforma a dichos elementos en potenciales objetos que pueden ocasionar daños materiales y a personas al ser parte de un aluvión o inundación.
- Establecer Sistemas de Alerta temprana y Emergencia, en prevención de eventos extremos de inundaciones y aluviones.
- Planes destinados a evitar los procesos de desertificación de las cuencas, así como también daños antrópicos a estas (incendios forestales, por ejemplo).
- Desarrollar programas de protección del territorio para diversas amenazas climáticas (Ej. aluviones, tormentas cálidas, sequías), bajo un enfoque de vulnerabilidad climática prospectiva con el objetivo de definir los requerimientos técnicos y/o servicios de infraestructura necesarios para garantizar la resiliencia climática en infraestructura dentro de las próximas décadas, y que por defecto deberían ser incluidos dentro del proceso de planificación del MOP (Ej. Construcción de mapas de riesgo, medición de vulnerabilidad climática a una alta resolución del territorio, identificación de nuevas oportunidades de financiamiento).

7.5.2. Descripción general de medidas de adaptación para infraestructura de zona costera

La matriz de factores de sensibilidad climática para servicios de infraestructura de zona costera se ha usado como referencia para analizar aquellos factores que determinan la vulnerabilidad de estos, dicho análisis permitió al mismo tiempo identificar las potenciales oportunidades de mejora planteadas como medidas de adaptación. Para entender que se quiere mejorar, es necesario previamente describir los servicios de infraestructura y sus elementos, como se detalla a continuación:

Infraestructura de pesca artesanal: Obras de infraestructura paralelas a la costa (muro macizo) o con ángulo respecto a la costa (sistema de pórticos).

Puertos de Conectividad: Estructuras de tipo embarcadero, paralelos a la costa (muro macizo) o con ángulo respecto a la costa (sistema de pórticos).

Protección de Zona Costera: corresponde a muros de protección costera y defensas ribereñas para mitigación del impacto de oleaje o mitigación de la erosión, construidos usualmente como protección de paseos costeros. También se considera en este grupo los rompeolas o molos de abrigo.

Considerando la descripción de los servicios de infraestructura hidráulica sujetos a mejoramiento en el incremento de la resiliencia climática, se plantean una serie de medidas de adaptación al cambio climático, agrupadas como medidas estructurales, para referirse a aquellas que implican el diseño y ejecución de obras grises, híbridas y verdes; y medidas no estructurales, para referirse a las medidas asociadas a la gestión de información, y sistemas preventivos o de alerta temprana.

Medidas de adaptación estructurales:

Estas medidas consisten en el diseño y aumento de las dimensiones propias de la infraestructura de la zona costera para elevar su resistencia frente al incremento de la altura de oleaje, generando mayor robustez en la misma o elevando su capacidad de disipación de energía de oleaje. Aplica a infraestructura futura o existente. El diseño deberá estar basado en estudios de predicción probabilística o semi probabilística considerando la variación del periodo de retorno futuro bajo contexto de cambio climático o considerando variaciones en los parámetros de cálculo de altura de oleaje, el incremento del nivel medio del mar y marea meteorológica. Las medidas estructurales se han organizado de la siguiente forma:

- Aumento de la altura de infraestructura: aumento de la altura original para evitar sobrepaso por oleaje (marea meteorológica) o aumento del nivel del mar a causa del cambio climático. Corresponde al tipo de obra gris.
- Aumento de las dimensiones físicas o reforzamiento estructural en infraestructura: incrementar resistencia y estabilidad estructural frente al impacto de la carga de oleaje y problemas erosivos, así como reforzamiento de la protección anticorrosiva. Ejemplo: aumentar espesor de coraza protectora en defensa ribereña, incremento de pendiente, adición de nuevos elementos estructurales en una caleta pesquera, aumento de espesor de muros costeros, uso de pintura anticorrosiva, curado del concreto, etc., considerando el aumento de oleaje por cambio climático. Corresponde al tipo de obra gris.
- Aumento de porosidad de molos de abrigo: disipar la energía del impacto de oleaje. Esta medida incluye estudios de modelación física para medir la efectividad del molo existente o sus alternativas de solución. Corresponde al tipo de obra gris.
- Disposición de drenajes en defensa costera en áreas urbanas vulnerables: en caso extremo de sobrepaso, el sistema de drenaje deberá ser capaz de retirar la mayor cantidad de agua de mar para evitar inundación en zonas urbanas costeras de jerarquía territorial estratégica (servicios de transporte masivo, vialidad, comercios, instituciones del estado, etc). Corresponde al tipo de obra gris.
- Mitigación de Oleaje: Molos de abrigos o rompeolas frente a la costa, cuyo objetivo es abatir la altura de la ola y provocar su rompimiento antes de llegar a la costa. Esta puede ser una medida complementaria a las de adaptación estructural o para aquellas obras existente, en caso futuro se pronostique sea rebasada la altura de diseño a causa del cambio climático. Corresponde al tipo de obra gris.

- Recarga de Playas: Recuperación de playas o generación de nuevas playas artificiales para ganar espacio al mar mediante colocación de grandes volúmenes de arena en la costa intervenir. Corresponde al tipo de obra marrón.
- Dragado: Retiro de sedimentos en infraestructura de zona costera colmatada. Corresponde al tipo de obra marrón.
- Conservación e implementación de ecosistemas: Uso de humedales, dunas, estuarios y lagunas como protección al oleaje y erosión. Corresponde al tipo de obra verde.

De las medidas no estructurales se describe:

- Monitoreo de Variables Hidrometeorológicas y Sedimentológicas: para el levantamiento de información estadística por instrumentación que ayude a establecer modelos de predicción más confiables en el futuro para altura de oleaje y procesos morfodinámicos de la costa.
- Desarrollo de estudios de modelación numérica – probabilista para predicción de altura de oleaje y capacitación de usuarios finales: partiendo de la data disponible se puede considerar simulaciones (MonteCarlo, Latinohipercúbico, etc), para su posterior recalibración con la data a ser recolectada a futuro.
- Revisión de los periodos de retorno en códigos de diseño: Cepal (2011), pronostica una variación de los periodos de retorno en Chile para altura de oleaje y considerando escenarios de aumento del nivel del mar e intensificación de tormentas es necesario revisar los actuales periodos de diseño para su validación o recalibración.
- Uso de Redes Neuronales Artificiales como modelo de predicción: es una opción para predecir el aumento del oleaje y vulnerabilidad. Su desventaja es que requiere muchos datos para entrenamiento de la red. La ventaja es que no discrimina las correlaciones entre las variables a analizar: CO2, temperatura, oleaje, capacidad estructural, que ayude a determinar la vulnerabilidad, pues la red neuronal busca esa correlación entre variables tan disímiles. Actualmente comienza a usarse en modelos de predicción de vulnerabilidad de infraestructura terrestre como puentes (AASHTO), sistema de alerta sísmica, generación de espectros sísmicos de diseño, etc. No se tienen referencias para vulnerabilidad en Infraestructura de Zona Costera por cambio climático
- Desarrollar un estudio de determinación de impactos sobre los servicios de infraestructura y la materialidad de estos, producto de la acidificación del océano en el litoral de Chile considerando distintos escenarios de calentamiento global de acuerdo con el IPCC.
- Desarrollar programas de protección del territorio para diversas amenazas climáticas (Ej. marejadas, incremento del nivel medio del mar, erosión de la zona costera, marejadas ciclónicas), bajo un enfoque de vulnerabilidad climática prospectiva con el objetivo de definir los requerimientos técnicos y/o servicios de infraestructura necesarios para garantizar la resiliencia climática en infraestructura dentro de las próximas décadas, y que por defecto deberían ser incluidos dentro del proceso de planificación del MOP (Ej. Construcción de mapas de riesgo, medición de vulnerabilidad

climática a una alta resolución del territorio, identificación de nuevas oportunidades de financiamiento).

- Generar programas de protección del territorio para diversas amenazas (aluviones, marejadas, tormentas cálidas eventos extremos), bajo un enfoque de exposición a las amenazas climáticas prospectivo con el objetivo de definir las obras y servicios necesarios, a ser incluidos dentro del proceso de planificación del MOP (Ej. Construcción de mapas de riesgo, medición de vulnerabilidad climática a una alta resolución del territorio, identificación de nuevas oportunidades de financiamiento).

7.5.3. Resumen Medidas de adaptación de servicios de infraestructura al CC

A continuación, se presenta una tabla que resumen, las distintas opciones de adaptación al cambio climático de acuerdo con el tipo de amenaza climática y la sensibilidad propia del servicio de infraestructura contenido desarrollado en secciones previas.

Tabla 39. Opciones de adaptación al cambio climático de servicios de infraestructura hidráulica

Amenaza climática	Sensibilidad climática media-alta	Opciones de adaptación propuestas	Tipología
Tormentas / Cambios extremos en las precipitaciones	Infraestructura del sistema	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de altura de elementos estructurales • Aumento de dimensiones físicas o reforzamiento estructural • Aumento de capacidad de retención de los elementos estructurales • Revisión de códigos de diseño 	Estructural Gris
	Redundancia	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de altura de los elementos de infraestructura • Aumento de dimensiones físicas o reforzamiento estructural • Aumento de capacidad de retención de los elementos estructurales 	Estructural Gris
	Robustez	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de altura de elementos estructurales • Aumento de dimensiones físicas o reforzamiento estructural • Aumento de capacidad de retención de los elementos estructurales 	Estructural Gris
	Funcionalidad	<ul style="list-style-type: none"> • Disipación de energía del flujo (detrítico o no) • Rehabilitación de parques inundables • Conservación y desarrollo de ecosistemas • Sistemas de monitoreo de amenazas y de infraestructura 	Estructural Gris-verde/No Estructural
	Performance	<ul style="list-style-type: none"> • Disipación de energía del flujo (detrítico o no) • Conservación y desarrollo de ecosistemas • Sistemas de monitoreo de amenazas y de infraestructura 	Estructural Gris verde / No Estructural
	Evolución Temporal	<ul style="list-style-type: none"> • Programas de rehabilitación y limpieza de cauces 	No estructural
Humedad del aire	Performance	<ul style="list-style-type: none"> • Disipación de energía del flujo (detrítico o no) • Conservación y desarrollo de ecosistemas 	Estructural – Gris / Verde
Tormentas cálidas	Infraestructura del sistema	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de altura de elementos estructurales • Aumento de dimensiones físicas o reforzamiento estructural • Aumento de capacidad de retención de los elementos estructurales • Revisión de códigos de diseño 	Estructural Gris

	Redundancia	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de altura de elementos estructurales • Aumento de dimensiones físicas o reforzamiento estructural • Aumento de capacidad de retención de los elementos estructurales 	Estructural Gris
	Robustez	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de altura de elementos estructurales • Aumento de dimensiones físicas o reforzamiento estructural • Aumento de capacidad de retención de los elementos estructurales 	Estructural Gris
	Funcionalidad	<ul style="list-style-type: none"> • Disipación de energía del flujo (detrítico o no) • Rehabilitación de parques inundables • Conservación y desarrollo de ecosistemas 	Estructural Gris / Estructural Verde
	Performance	<ul style="list-style-type: none"> • Disipación de energía del flujo (detrítico o no) • Rehabilitación de parques inundables 	Estructural Gris / Estructural Verde
Erosión del suelo	Infraestructura del sistema	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de altura de elementos estructurales • Aumento de dimensiones físicas o reforzamiento estructural • Aumento de capacidad de retención de los elementos estructurales • Revisión de códigos de diseño 	Estructural Gris
	Robustez	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de altura de elementos estructurales • Aumento de dimensiones físicas o reforzamiento estructural • Aumento de capacidad de retención de los elementos estructurales 	Estructural Gris
	Evolución Temporal	<ul style="list-style-type: none"> • Programas de rehabilitación y limpieza de cauces • Conservación y desarrollo de ecosistemas 	No estructural / Estructural Verde
Transversales	Territorio	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de programas de conservación del territorio 	No estructurales
	Información	<ul style="list-style-type: none"> • Fortalecimiento de red de monitoreo e integración de SAT 	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40. Opciones ingenieriles de adaptación al cambio climático de servicios de infraestructura de zona costera

Amenaza climática	Sensibilidad climática media-alta	Opciones de adaptación propuestas	Tipología
-------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------

Subida del nivel medio del mar	Resistencia	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la altura de la infraestructura • Aumento de las dimensiones o reforzamiento estructural • Aumento de porosidad de obras de protección • Mitigación de oleaje a través de obras de protección estructurales 	Estructural gris
	Estabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de las dimensiones o reforzamiento estructural • Aumento de porosidad de obras de protección • Mitigación de oleaje a través de obras de protección estructurales Recarga o dragado de playas • Disposición de drenajes en defensas costera 	Estructural gris-brown
	Altura de infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> • Recarga o dragado de playas • Uso de redes neuronales de monitoreo de amenazas 	Estructural Brwon / No estructural
	Estado de conservación	<ul style="list-style-type: none"> • Programas de rehabilitación y limpieza riberas y playas • Programa de conservación de infraestructura • Disposición de drenajes en defensas costeras 	Estructural brown/ No estructural
	Estado de Recursos naturales	<ul style="list-style-type: none"> • Recarga o dragado de playas • Conservación y/o desarrollo de ecosistemas 	Estructural Brown-verde
Precipitaciones intensas	Resistencia	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la altura de la infraestructura • Aumento de las dimensiones o reforzamiento estructural • Mitigación de oleaje a través de obras de protección estructurales 	Estructural gris
	Estabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de las dimensiones o reforzamiento estructural • Mitigación de oleaje a través de obras de protección estructurales • Recarga o dragado de playas • Disposición de drenajes en defensas costera 	Estructural gris-brown
	Altura de infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> • Recarga o dragado de playas • Uso de redes neuronales de monitoreo de amenazas 	Estructural Brwon / No estructural
	Estado de Recursos naturales	<ul style="list-style-type: none"> • Recarga o dragado de playas • Conservación y/o desarrollo de ecosistemas 	Estructural Brown-verde
Velocidad máxima del viento	Resistencia	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de las dimensiones o reforzamiento estructural • Mitigación de oleaje a través de obras de protección estructurales 	Estructural gris
	Estabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de las dimensiones o reforzamiento estructural 	Estructural gris-brown

		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de porosidad de obras de protección • Mitigación de oleaje a través de obras de protección estructurales 	
	Estado de Recursos naturales	<ul style="list-style-type: none"> • Conservación y/o desarrollo de ecosistemas 	Estructural Brown-verde
Incremento de altura y potencia de ola	Resistencia	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la altura de la infraestructura • Aumento de las dimensiones o reforzamiento estructural • Aumento de porosidad de obras de protección • Mitigación de oleaje a través de obras de protección estructurales 	Estructural gris
	Estabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de las dimensiones o reforzamiento estructural • Aumento de porosidad de obras de protección • Mitigación de oleaje a través de obras de protección estructurales • Recarga o dragado de playas • Disposición de drenajes en defensas costera 	Estructural gris-brown
	Altura de infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> • Recarga o dragado de playas • Uso de redes neuronales de monitoreo de amenazas 	Estructural Brown / No estructural
	Estado de conservación	<ul style="list-style-type: none"> • Programas de rehabilitación y limpieza riberas y playas • Programa de conservación de infraestructura • Disposición de drenajes en defensas costeras 	Estructural brown/ No estructural
	Estado de Recursos naturales	<ul style="list-style-type: none"> • Recarga o dragado de playas • Conservación y/o desarrollo de ecosistemas 	Estructural Brown-verde
	Acidificación del mar	Calidad material	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión de códigos de diseño
Cambios morfodinámicos de la costa	Resistencia	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de porosidad de obras de protección • Mitigación de oleaje a través de obras de protección estructurales 	Estructural gris
	Estabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de las dimensiones o reforzamiento estructural • Mitigación de oleaje a través de obras de protección estructurales • Recarga o dragado de playas 	Estructural gris-brown
	Calidad material	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión de códigos de diseño 	No estructural
	Estado de Recursos naturales	<ul style="list-style-type: none"> • Recarga o dragado de playas • Conservación y/o desarrollo de ecosistemas 	Estructural Brown-verde
Transversales	Territorio	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de programas de conservación del territorio 	No estructural



Ministerio de Obras Públicas

Diagnóstico de la Vulnerabilidad de infraestructura y Medidas de Adaptación al Cambio Climático

	Información	<ul style="list-style-type: none">• Fortalecimiento de red de monitoreo e integración de SAT	
--	-------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Fuente: Elaboración propia.

8. METODOLOGÍA DE INTEGRACIÓN DE LA RESILIENCIA CLIMÁTICA EN CICLO DE VIDA DE PROYECTOS

Considerando que el ciclo de vida de un proyecto de servicios de infraestructura de zona costero o de obras hidráulicas en el MOP, comprende las etapas de; planificación, prefactibilidad, factibilidad, diseño, ejecución, operación mantenimiento, como se describen a continuación:

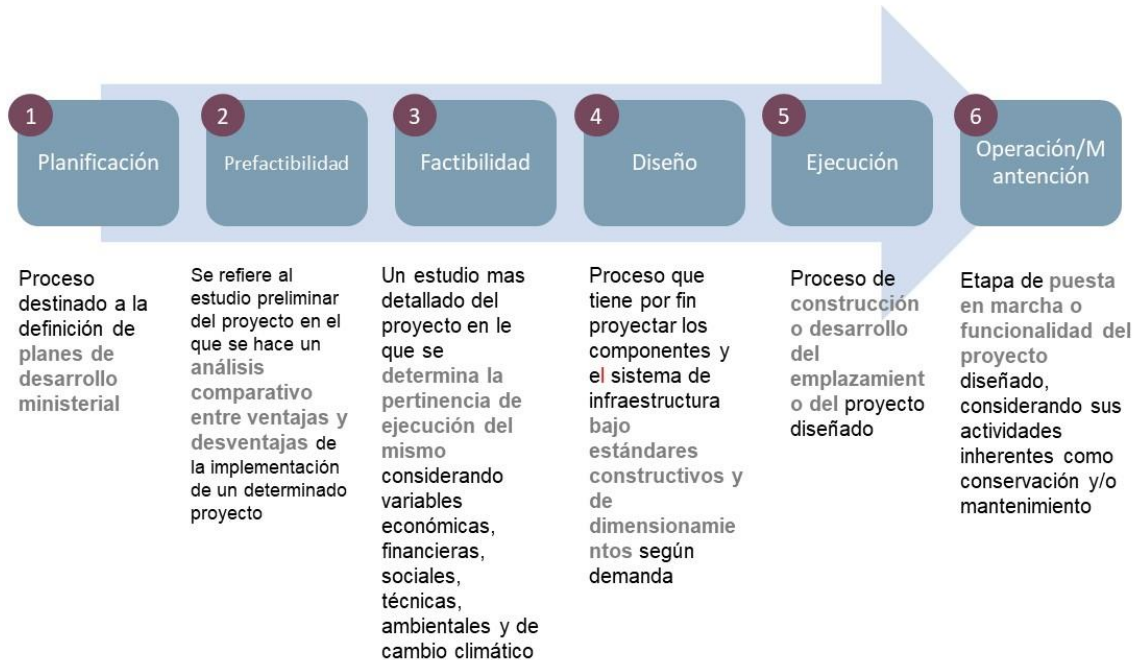


Ilustración 15. Descripción de etapas del ciclo de vida de un proyecto.
Fuente: Elaboración propia

Se plantea, el desarrollo de una metodología que facilite el proceso de integración del análisis de cambio climático en la toma de decisión asociada a la identificación, selección y priorización de medidas de adaptación al cambio climático de un proyecto de servicio de infraestructura de borde costero, control aluvional o manejo de cauces. Para esto sea tomado en consideración, la propuesta de enfoque metodológico de decisión respecto a la incorreción de análisis de cambio climático por tipología de infraestructura, desarrollado por Centro de Cambio Global, (2012) y usado como referente en el plan de adaptación y mitigación de los servicios de infraestructura al cambio climático, 2017-2022 del MOP.

Este acercamiento inicial a la metodología de integración del cambio climático en proyectos propone en primer lugar, la incorporación del cambio climático en la evaluación de aquellos proyectos que tienen prevista una vida útil superior a los 10 años (MOP, 2016), también plantea la necesidad de “incluir CC a escala gruesa en evaluación”, siempre que la necesidad sea sensible a las condiciones climáticas y se encuentre en una fase de planificación/estrategia.

Para el desarrollo de la inclusión del CC a escala gruesa en evaluación como se plantea en la metodología descrita, se propone el uso las directrices publicada por la *European Commission* (2016) en su guía de directrices para gerentes de proyectos, en donde se han identificado siete (7) herramientas de análisis que contemplan distintas actividades y niveles de evaluación de la resiliencia climática de un proyecto, en donde su aplicabilidad está sujeta a la etapa del ciclo de vida en que se encuentre el proyecto, como se listan a continuación:

- Identificación y análisis de las sensibilidades climáticas del proyecto (AS),
- Evaluación de la exposición a peligros climáticos (EE),
- Evaluación de la vulnerabilidad (EV),
- Evaluación de riesgos climáticos (ERC),
- Identificación de opciones de adaptación (EOA),
- Priorización de opciones de adaptación (POA),
- Integración de plan de acción de adaptación al proyecto (IPAAP).

Etapa del ciclo de vida	Objetivo institucional	Procesos/Análisis	Análisis de resiliencia climática						
			1 AS	2 EE	3 AV	4 ERC	5 IOA	6 POA	7 IPAAP
Planificación	Definición de enfoque MOP / planes de desarrollo	Planes de desarrollo de servicios de infraestructura	■	■	■	■			
Pre-factibilidad	Establecimiento de opciones de desarrollo y ejecución de estrategia	Estudio de prefactibilidad	■	■	■	■		■	
		Diseño conceptual				■			
		Selección de alternativas de emplazamiento	■	■	■				
		Planificación de contratos					■		■
		Selección de tecnologías	■			■	■		
Factibilidad	Finalizar alcance y ejecución del plan	Estimación de costos y modelación económica/financiera						■	
		Estudio de factibilidad	■	■	■	■			
		Análisis preliminar de impacto socio ambiental					■	■	
Diseño	Determina los recursos para le ejecución del plan	Diseño de ingeniería	■			■	■		
		Estimación de costos y modelación económica/financiera						■	
		Evaluación de impacto socio ambiental del proyecto (Si procede)				■	■		
Ejecución	Construcción detallada de infraestructura	Ingeniería de detalle	■			■	■		■
		Ingeniería y gestión de adquisición y construcción							■
Operación y mantenimiento	Operación, mantenimiento y mejoramiento de infraestructura	Gestión de infraestructura							■
		Operación y Mantenimiento							■

Ilustración 16. Integración de análisis de resiliencia climática dentro del ciclo de vida de proyectos convencional. Fuente: Adaptado de EC, (2016).

El objetivo principal de estas directrices es ayudar a los inspectores del MOP a incorporar la resiliencia de la infraestructura a la variabilidad climática actual y futura producto del cambio climático dentro de los proyectos bajo su responsabilidad. En tal sentido estas recomendaciones

técnicas proporcionan información sobre los pasos que se pueden emprender para integrar la resiliencia climática en una evaluación del ciclo de vida del proyecto practicada en el MOP. Al finalizar el inspector estará en capacidad de determinar lo siguiente:

- Determinar si un proyecto es vulnerable a la variabilidad y cambio del clima,
- Evaluar los riesgos climáticos actuales y futuros para el éxito del proyecto,
- Identificar y evaluar opciones de adaptación relevantes y rentables para crear resiliencia al clima,
- Integrar las medidas de adaptación (medidas de resiliencia) en el ciclo de vida del proyecto.

Considerando la complementariedad entre la propuesta metodológica hecha por CCG (2012), y las directrices metodológicas de la Unión Europea (2016) para integrar un análisis pertinente del cambio climático en proyectos de infraestructura, se ha desarrollado una propuesta de diagrama que considera la integración del análisis de variabilidad climática fundamentado en la vulnerabilidad de un proyecto frente a una amenaza específica del territorio Chileno. En dicho diagrama las etapas del ciclo de vida se han agrupado en dos fases generales como son, Planificación, Prefactibilidad y factibilidad y en Diseño, ejecución, operación y mantenimiento, y la frase “necesidad” hace referencia a la necesidad de un servicio de infraestructura de control aluvional, manejo de cauce o zona costera.

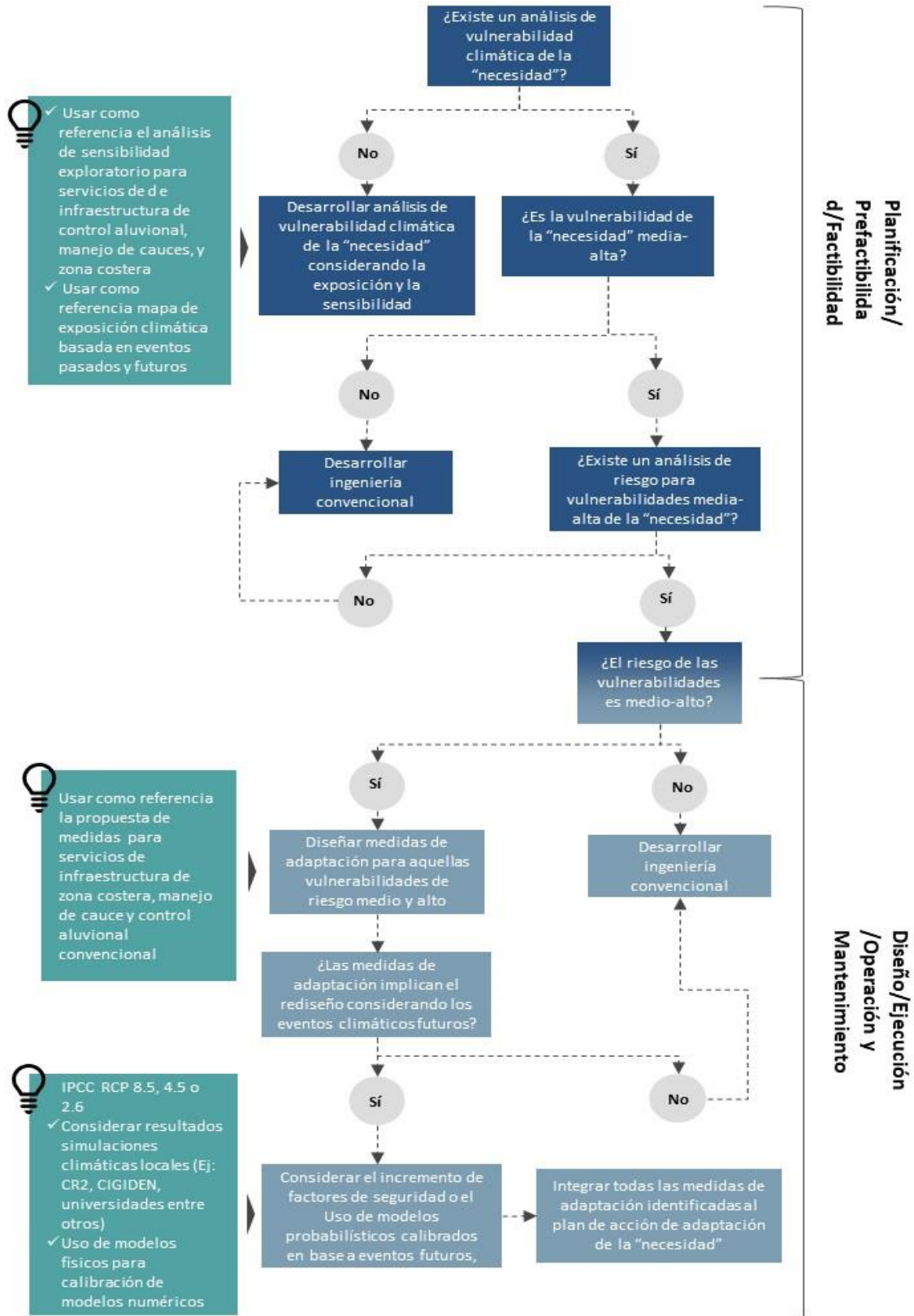


Ilustración 17. Incorporación del análisis del Cambio Climático a lo largo del ciclo de vida de proyectos
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al planteamiento metodológico hecho, y tomando en consideración que los casos de estudio como son; Obras fluviales y control aluvional en la quebrada Paipote, Región de Atacama (Caso 1), Sistema de defensas fluviales Río Mataquito, Región del Maule (Caso 2) y Paseo Costero Juan de Saavedra, Región de Valparaíso (Caso 3), y que todos se encuentran en la primera fase, resulta necesario incorporar los análisis, análisis de sensibilidad (AS), evaluación de exposición (EE), análisis de vulnerabilidad (AV), evaluación del riesgo climático e identificación de opciones de adaptación (IOA).

8.1. Evaluación de exposición a las amenazas climáticas

Una vez que se hayan identificado las sensibilidades de un tipo de proyecto, el siguiente paso es evaluar la exposición del proyecto y sus activos expuestos a las amenazas climáticas en la ubicación en donde se emplazará el proyecto. La evaluación de la exposición se debe desarrollar considerando dos enfoques uno retrospectivo (eventos pasados observados) y otro prospectivo (eventos potenciales futuros).

Para el desarrollo de la evaluación de exposición retrospectivo, es necesario utilizar la información disponible en la sección 6.3, por otra parte, cuando un proyecto se clasifica como sensible y/o expuesto a una amenaza climática particular, se debe hacer una evaluación de cómo esto puede evolucionar en el futuro. Por ejemplo, si un proyecto es sensible a altas temperaturas, se debe hacer una evaluación de cómo su exposición puede cambiar en escalas de tiempo futuras relevantes para la vida útil del proyecto, la siguiente tabla resume de forma general los principales drivers climáticos y efectos secundarios para el desarrollo de proyectos servicios de infraestructura.

Tabla 41. Identificación de amenazas climáticas según tipología de proyecto

Tipología de proyecto	Drivers Climáticos	Efectos Secundarios
Control aluvional	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento progresivo de la temperatura del aire • Aumento extremo de la temperatura del aire • Cambio progresivo en las precipitaciones • Cambio extremo en las precipitaciones • Velocidad promedio del viento • Velocidad máxima del viento • Humedad del aire • Radiación solar 	<ul style="list-style-type: none"> • Tormentas • Variaciones de la isoterma 0 • Disponibilidad de agua • Inundaciones • Erosión del suelo • Inestabilidad y deslizamiento de laderas (REM) • Cambio de régimen de flujo en cauces: Nival, fluvial o mixto. • Desfase en épocas de estiaje y crecidas (retraso o adelanto de acuerdo a las estaciones del año).

<p>Manejo de cauces</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento progresivo de la temperatura del aire • Aumento extremo de la temperatura del aire • Cambio progresivo en las precipitaciones • Cambio extremo en las precipitaciones • Velocidad promedio del viento • Velocidad máxima del viento • Humedad del aire • Radiación solar 	<ul style="list-style-type: none"> • Tormentas • Variaciones de la isoterma 0 • Disponibilidad de agua • Inundaciones • Erosión del suelo • Inestabilidad y deslizamiento de laderas (REM) • Cambio de régimen de flujo en cauces: Nival, fluvial o mixto. • Desfase en épocas de estiaje y crecidas (retraso o adelanto de acuerdo a las estaciones del año).
<p>Zona costera (*)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento progresivo de la temperatura del aire • Aumento extremo de la temperatura del aire • Cambio progresivo en las precipitaciones • Cambio extremo en las precipitaciones • Velocidad promedio del viento • Velocidad máxima del viento • Humedad del aire • Radiación solar 	<ul style="list-style-type: none"> • Nivel Medio del Mar • Altura y potencia de Ola • Acidificación del mar (corrosión) • Cambios morfodinámicos de la costa • Inestabilidad y deslizamiento de laderas (REM)

Fuente: Elaboración propia.

(*) Paseos de zona costera, puertos de pesca artesanal y de conectividad.

8.2. Identificación de las sensibilidades climáticas del proyecto

Como se ha definido previamente, la sensibilidad se establece como el grado en que un sistema se ve afectado, de manera adversa o beneficiosa, por la variabilidad o el cambio climático. La sensibilidad del proyecto debe determinarse en relación con una gama de variables climáticas y efectos secundarios o amenazas relacionadas con el clima (En la sección 6, se proporciona una lista extensa pero no exhaustiva de drivers climáticos y efectos secundarios considerados para desarrollar análisis de sensibilidad). Por otra parte, dada la amplia gama de tipología de proyectos, resulta necesario definir las variables y/o factores considerados como relevantes por determinar la sensibilidad de un sistema o proyecto específico frente a una amenaza particular, la definición de estos factores es una responsabilidad que recae en los desarrolladores del proyecto y que deben ser validados a través del juicio de expertos.

El desarrollo del análisis de sensibilidad de proyectos de servicios e infraestructura de borde costero, control aluvional y manejo de cauces consiste en la comparación de aquellas variables o factores de sensibilidad versus las amenazas climáticas y sus efectos, para de esta forma

determinar aquellos factores que definen la sensibilidad propia de un proyecto de infraestructura.

Tabla 42. Resumen de sensibilidad climática de servicios de infraestructura de tipo control aluvional

Factor de sensibilidad	Efectos secundarios de la variabilidad climática				
	Inundaciones	Tormentas	Variación de la isoterma 0	Erosión del suelo	Inestabilidad y deslizamientos (REM)
Infraestructura del sistema		Alta			Alta
Grado de redundancia		Alta			
Nivel de robustez			Alta	Alta	
Funcionalidad del sistema	Alta	Alta	Alta		Alta
Performance del sistema	Alta	Alta			
Evolución temporal	Alta	Alta			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 43. Resumen de sensibilidad climática de servicios de infraestructura de tipo manejo de cauce

Factor de sensibilidad	Efectos secundarios de la variabilidad climática				
	Inundaciones	Tormentas	Variación de la isoterma 0	Erosión del suelo	Inestabilidad y deslizamientos (REM)
Infraestructura del sistema			Alta	Alta	
Grado de redundancia			Alta		
Nivel de robustez	Alta	Alta		Alta	Alta
Funcionalidad del sistema	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Performance del sistema	Alta	Alta		Alta	Alta
Evolución temporal	Alta	Alta		Alta	Alta

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 44. Resumen de sensibilidad climática de servicios de infraestructura de zona costera

Factor de sensibilidad	Efectos secundarios de la variabilidad climática			
	Variación del nivel medio del mar	Altura y potencia de la ola	Cambios morfodinámicos de la costa	Acidificación del Mar (Corrosión)
Resistencia estructural	Alta	Alta		
Estabilidad estructural	Alta	Alta		
Calidad material				Alta
Altura de la infraestructura	Alta	Alta		
Capacidad de servicio	Alta			
Alcance del servicio	Alta	Alta	Alta	Alta
Estado de los recursos naturales	Alta	Alta	Alta	

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a las tablas presentadas, se han identificado aquellos factores que determinan una sensibilidad alta de los proyectos de infraestructura de borde costero, control aluvional y manejo de cauces. Con el objetivo de concentrar los esfuerzos en la inclusión de medidas de adaptación pertinentes, y que den respuesta a la variabilidad climática futura, se plantea la necesidad de establecer medidas de adaptación enfocadas en robustecer y localizar estratégicamente las obras de infraestructura de control aluvional y manejo de cauce, así como adecuar la funcionalidad del sistema y sus componentes a la variabilidad fluvial producto de eventos climáticos extremos.

Por otra parte, para el caso de servicios de infraestructura de borde costero se plantea la importancia de priorizar las medidas de adaptación para aquellos servicios de infraestructura portuaria con un mayor alcance de servicio (mayor número de usuarios), y para esto se considera de gran relevancia establecer medidas que garanticen la protección la infraestructura mediante la conservación de los recursos naturales disponibles en el entorno del sistema, y por otra parte medidas orientadas a reforzar la resistencia y estabilidad estructural de las obras así como la altura de las obras de protección de borde costero

8.3. Evaluación de vulnerabilidad de servicios de infraestructura

Cuando se considera que un proyecto tiene una sensibilidad alta o media a una variable o amenaza climática particular, la ubicación del proyecto y los datos de exposición se integrarán

en el SIG para evaluar la vulnerabilidad. Aquí, para cada sitio del proyecto, la vulnerabilidad (V) se calcula de la siguiente manera:

$$V = S \times E$$

donde, [S es el grado de sensibilidad que tiene el servicio de infraestructura] y [E es la exposición a las condiciones climáticas de referencia / efectos secundarios]. En este proceso de evaluación, se asume que la capacidad de adaptación de cada proyecto es constante e igual en todas las regiones geográficas.

8.4. Evaluación del riesgo hidroclimático en servicios de infraestructura

El módulo de evaluación de riesgos hidroclimático proporciona un método estructurado para analizar las amenazas climáticas y sus impactos, y de esta forma suministrar información que facilite la toma de decisiones. Este proceso funciona mediante la evaluación de las probabilidades y la magnitud de los impactos asociados con los peligros identificados en la sección 6 y la evaluación de la importancia del riesgo para el éxito del proyecto.

La evaluación de riesgos se basará en el análisis de vulnerabilidad descrito en las etapas del 1 a 3, centrado en la identificación de riesgos y oportunidades asociadas con las “altas” vulnerabilidades, y potencialmente también las vulnerabilidades “medias”, a discreción del especialista técnico de la resiliencia climática o desarrollador del proyecto y el inspector fiscal. La evaluación de riesgo para los servicios de infraestructura de borde costero, control aluvional y manejo de cauces será abordada bajo un enfoque práctico desarrollado para los casos de estudio (Ver sección 9- 136 -).

8.5. Identificación de opciones de adaptación de servicios de infraestructura

Este módulo ayuda a identificar las medidas de adaptación para responder a las vulnerabilidades y riesgos climáticos que se han identificado mediante la aplicación de las primeras cuatro (4) herramientas de análisis como son, el análisis de sensibilidad (AS), evaluación de Exposición (EE), análisis de vulnerabilidad (AV) y Evaluación del riesgo hidroclimático (ER). La metodología primero implica la identificación de opciones para responder a las vulnerabilidades y riesgos, seguida de una evaluación cualitativa y cuantitativa detallada de las opciones. En esta etapa resulta sumamente importante contar con un árbol de decisión y una serie de criterios que ayuden a desarrollar el proceso de identificación de opciones de adaptación acordes al proyecto que se estudia. En tal sentido a continuación se establece un diagrama que facilitará el desarrollo del proceso de identificación de opciones de adaptación.

El proceso de identificación de opciones de adaptación requiere de la aplicación de uno o varios de los criterios que se describen a continuación:

- Amenaza múltiple: daño y amenaza a identificar. Verificar si existe amenaza y daño múltiple, por ejemplo: socavación y sobrepaso, erosión y oleaje intenso, incremento del nivel del mar entre otras.
- Sensibilidad: ¿Es sensible al cambio climático o sus variables de impacto? Con esto se define soluciones tradicionales o de adaptación.
- Vulnerabilidad: dependiendo del grado de vulnerabilidad pueden considerarse acciones preventivas, correctivas o superiores (inversiones).
- Efectividad: la intervención de una obra de adaptación incrementará la resiliencia y disminuirá la vulnerabilidad de la población beneficiada de manera notable, esta puede ser aplicada a través de un análisis costo-eficiencia.
- Ambiente: ¿Es la solución o medida amigable con el medio ambiente? Cual tiene menor impacto ambiental, Tanto en la construcción como en el origen de sus materiales.
- Mantenimiento y Monitoreo: capacidad y gastos por mantenimiento y monitoreo de la infraestructura intervenida o de la nueva obra de adaptación.
- Factibilidad: evaluar la sostenibilidad de mantenimiento en base a la capacidad gubernamental, capacidad técnica, recursos económicos y organización social de los ciudadanos.
- Recursos Materiales: disponibilidad de los materiales de construcción en la zona; esto forma parte de la evaluación del proyecto y debe contemplar que materiales se disponen en la zona para definir la medida de adaptación.

8.6. Priorización de opciones de adaptación

El proceso de priorización de opciones de adaptación puede desarrollarse bajo distintos enfoques cualitativos y cuantitativos, en donde su aplicación depende directamente de la disponibilidad de información asociada al proyecto. En este sentido a continuación se plantea la existencia principalmente, de tres metodologías para la priorización de las medidas de adaptación al cambio climático.

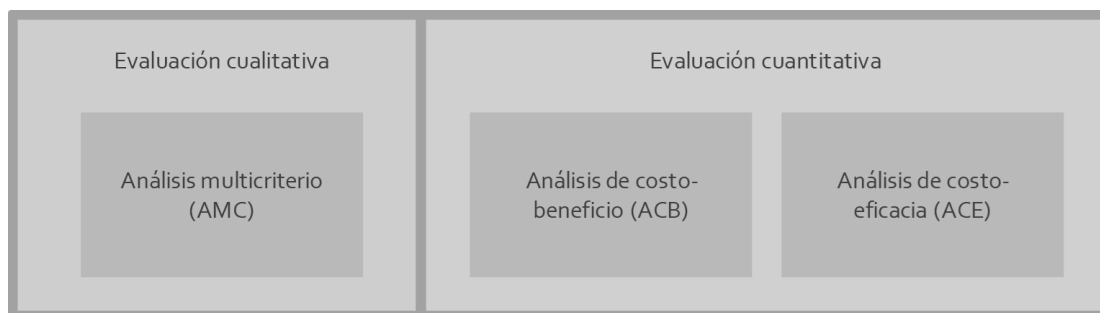


Ilustración 18. Metodologías de priorización de medidas de adaptación existentes.
Fuente: Acclimatise, (2018).

Análisis costo beneficio (ACB), consiste en una comparación de los costos y beneficios de una medida expresados en valores monetarios con un objetivo principal, p. ej. eficiencia económica.

La metodología de ACB en el contexto del cambio climático presentada en esta sección, por lo tanto, se basa en una metodología de ACB estándar. Se supone que los usuarios de estas directrices están familiarizados con esta metodología y se hará hincapié en los ajustes sugeridos del ACB en el contexto de las decisiones de inversión que involucran, en parte o en su totalidad, las decisiones de adaptación al cambio climático. La metodología asumirá que se llevará a cabo una evaluación económica, es decir, desde la perspectiva del país en lugar de la evaluación financiera que cubre solo los impactos relevantes del promotor del proyecto.

- **Ventajas:** Informa sobre la viabilidad económica de una opción de adaptación, permite priorizar entre opciones de adaptación alternativas en términos monetarios, y permite la comparación de opciones con carácter intersectorial.
- **Limitaciones:** Los costos y beneficios deben poder medirse en términos monetarios, y el ACB requiere mucho tiempo, y expertos en la materia.

El Análisis Costo Eficacia (ACE), es una medida de la eficiencia. Consiste en comparar el costo de alcanzar una unidad de objetivo determinada, p. ej. Pesos/ha de bosque protegido, mediante diferentes opciones de adaptación.

- **Ventajas:** Brinda información sobre cómo se puede alcanzar un objetivo de la manera más eficiente.
- **Limitaciones:** Se requiere un objetivo mensurable común, y se deben poder definir los costos en términos monetarios.

Cabe destacar que la aplicación de los análisis ACB y ACE, se encuentra estandarizada a través de las metodologías definidas por el Ministerio de Desarrollo Social para la aprobación de financiamiento de proyectos del MOP y su precio social asociado¹³.

El Análisis Multicriterio (AMC), es una herramienta que permite clasificar y priorizar múltiples opciones de adaptación; las clasificaciones resultantes de un AMC no se basan meramente en cálculos económicos, sino en un abanico más amplio de criterios a fin de plasmar objetivos más generales.

- **Ventajas:** El AMC permite priorizar y ayuda a identificar soluciones de compromiso y situaciones beneficiosas para todos (“win-win situation”), es necesario encontrar un indicador común (p. ej. puntuaciones), y las puntuaciones se pueden calcular (si se dispone de criterio cuantitativo) u obtener mediante consulta a expertos. Se trata de un método de evaluación numérico, con la posibilidad de ponderar ciertos criterios, si así se desea.
- **Limitaciones:** El AMC es más subjetivo que otros métodos, el AMC no aporta ninguna información sobre la eficiencia económica, salvo que este sea uno de los criterios utilizados en el análisis, y se trata de un método de evaluación numérico, con la posibilidad de ponderar ciertos criterios, si así se desea.

¹³ <http://sni.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/download/metodologia-general/?wpdmdl=855>

A continuación, se presentan ejemplos de criterios que se podrían utilizar para priorización de las medidas de adaptación identificadas:

Tabla 45. Criterios de priorización de medidas de adaptación para un AMC

Nombre	Descripción	Criterios DOH	Criterios DOP
Urgencia	Grado de urgencia de la medida, en relación con la vulnerabilidad y principales riesgos existentes en la zona de emplazamiento del proyecto.	Se priorizan aquellas medidas orientadas a disminuir la sensibilidad de servicios de infraestructura hidráulicos/fluviales, frente a las amenazas como incremento de caudal de escurrimiento, erosión del suelo y aluviones.	Se priorizan aquellas medidas orientadas a disminuir la sensibilidad de servicios de infraestructura de zona costera, frente a las amenazas como incremento de altura del oleaje, erosión del litoral e incremento de la velocidad máxima del viento.
Participación ciudadana	Considera que entre mayor sea el involucramiento de los actores de las comunidades mayor será su factibilidad, económica, social, ambiental y financiera.	Las medidas planteadas contemplan un uso integral del territorio e incorpora los asentamientos humanos urbanos, rurales, en zonas andinas, y aquellos en localizaciones estratégica (conos de deyección, quebradas altoandinas, zonas de alta densidad poblacional).	Las medidas planteadas contemplan un uso integral del territorio e incorpora los asentamientos humanos urbanos, rurales, así como su interacción con servicios ecosistémicos, actividades económicas, servicios y conectividad (ejemplo caletas de pescadores artesanales, puertos de conectividad, rutas de trenes entre otras).
Financiable	Probabilidad de conseguir financiamiento para la implementación de la medida en los próximos 2 - 5 años.	Que la medida cumpla con los principales criterios socioambientales establecidos por los fondos internacionales destinados para tal fin.	
Viabilidad	Criterio asociado a la posibilidad de ejecutar la medida de forma efectiva en los próximos 2 – o 5 años, en	<ul style="list-style-type: none"> • Existe la estructura y/o competencias institucionales para su implementación • Existe un marco jurídico que respalde la implementación de la medida • Recursos Materiales: disponibilidad de los materiales de construcción en la zona; esto forma parte de la evaluación del proyecto y debe contemplar que 	

	función de los recursos técnicos, humanos, de la capacidad institucional, y del marco jurídico, existentes.	materiales se disponen en la zona para definir la medida de adaptación más adecuada. • Relación Costo/Beneficio: estudiar la factibilidad cuando son aplicables dos o más medidas de adaptación.
Cambio de paradigma"	Contribución de la medida a un "cambio transformacional", es decir que la medida tenga un impacto más allá de una inversión puntual en un proyecto o programa, sino que contribuya a un cambio de paradigma para conseguir una sociedad más resiliente.	
Compatibilidad	Coherencia con los objetivos de desarrollo sostenible y con demás estrategias y planes ya aprobados en Chile.	

Fuente: Elaboración propia.

8.7. Integración del plan de acción de adaptación al proyecto

La etapa final del proceso de integración de la resiliencia climática en el ciclo de vida de un proyecto implica la integración del plan de acción en adaptación para el proyecto, y se desarrolla bajo las siguientes actividades:

- Después de la evaluación de las opciones (Etapa 9.6), y se decidan desarrollar las modificaciones al diseño técnico del proyecto y las opciones de gestión, según corresponda. Integrar las medidas de resiliencia climática en el diseño del proyecto y en los contratos en la etapa de "Construcción" del ciclo de evaluación del proyecto,
- Empezar las siguientes acciones al diseñar un plan de implementación para el clima confirmado conjunto de medidas de resiliencia,
- Preparar el plan de financiamiento de medidas de adaptación,
- Preparar el plan para monitoreo y respuesta (Ej. Sistemas de alerta temprana).

9. DESARROLLO DE CASOS DE ESTUDIO

En esta sección se desarrollarán la aplicación de la metodología de la integración de la resiliencia climática en tres (3) casos de estudio, como se listan a continuación:

- Caso 1: Obras fluviales y control aluvional quebrada Paipote, Región Atacama
- Caso 2: Sistema de defensas fluviales río Mataquito, región del Maule
- Caso 3: Paseo Costero San Juan de Saavedra, Valparaíso, Región de Valparaíso.

Para la identificación de los casos de estudio, en primer lugar, se han establecido una serie de argumentos como se describen a continuación.

- Vulnerabilidad: El caso debe considerarse altamente vulnerable, considerando que la vulnerabilidad se determina por la presencia de dos factores como son exposición y sensibilidad se debe tomar en cuenta lo siguiente:
- Exposición: El caso debe localizarse en alguna de las regiones geográficas frecuentemente amenazadas por eventos climáticos extremos, y sus efectos como marejadas, aluviones e inundaciones (alta exposición), considerando el tipo de servicio que se desea estudiar y el tipo de protección, para esto ha sido necesario evaluar los impactos sociales, ambientales y económicos en base a los eventos observados.
- Sensibilidad: El caso seleccionado debe ser un servicio de infraestructura que de acuerdo con sus características propias o del entorno en donde se emplazará, se identifica como altamente sensible a un tipo de amenaza climática determinada.
- Disponibilidad de información: Los casos propuesto deben contar con datos de ingeniería que permitan desarrollar un análisis de vulnerabilidad real, esto implica contar con al menos una prefactibilidad del caso a estudiar.
- Antecedentes: Deben existir antecedentes históricos en donde se evidencia una reiteración en la afectación o daños sobre los sistemas de infraestructura diseñados para el control o protección de diversas amenazas climáticas.

Posterior al desarrollo de la propuesta de casos de estudio esta fue sometida a aprobación por parte de las respectivas direcciones de obras portuarias e hidráulicas (DOP y DOH respectivamente).

Para la aplicación de la metodología de integración de la resiliencia climática en los casos de estudio seleccionados, resulta necesario identificar cual es la Fase del ciclo de vida del Estudio se encuentran, para ello es necesario recurrir a la Ilustración Ilustración 15, identificándose que los casos correspondientes a Paipote (DOH) y Paseo Juan de Saavedra(DOH) están en la fase de diseño y que el proyecto de Río Mataquito (DOH) consiste en una proposición para incorporar las variables de cambio climático para el cálculo de los caudales de diseño, por lo que se considera que está en la Fase conceptual.

Las consideraciones metodológicas mencionadas se desarrollarán para cada caso de estudio, de acuerdo al siguiente resumen; en primer lugar, el análisis de la vulnerabilidad habrá permitido

identificar las “zonas de vulnerabilidad prioritarias” de las infraestructuras costeras e hidráulicas de Chile, sobre la base de la superposición del análisis de la exposición de dichas infraestructuras a las amenazas climáticas futuras y de los principales factores de sensibilidad identificados de manera participativa por los expertos de la DOP y de la DOH en el taller celebrado el día 18 de octubre de 2018.

Una vez analizado el problema, el siguiente paso consiste en identificar una serie de opciones de adaptación que permitan evitar, reducir al mínimo y afrontar los impactos del cambio climático sobre las infraestructuras costeras e hidráulicas de Chile y sobre los servicios prestados por dichas infraestructuras.

La identificación de las medidas de adaptación se hará considerando, por un lado, un análisis comparativo de opciones de adaptación, actualmente en ejecución en Chile y fuera de él (que se podrían escalar o aplicar a otras regiones del país), estas opciones tienen como fin incrementar la resiliencia climática frente a eventos extremos similares a los que se han enfrentado y se irán incrementando los servicios de infraestructura en Chile, bajo un contexto de cambio climático. Por otro lado, se utilizará como referencia el “*checklist*” de posibles medidas de adaptación proporcionada por la guía europea para la evaluación de la vulnerabilidad climática de las infraestructuras. Al finalizar esta etapa se habrán identificado un paquete de medidas de adaptación al cambio climático, y se habrán priorizado aquellas atingentes a la realidad de los casos de estudio planteados.

En tal sentido, a través de un taller que ha contado con la participación de expertos de la DOP y de la DOH, a través de una “lluvia de ideas”, se han validado tanto las medidas de adaptación estructurales como no estructurales sistematizadas en este estudio. Posteriormente en la segunda parte del taller se han priorizado las medidas de adaptación al cambio climático acuerdo a los casos de estudio, usando la técnica del análisis multicriterio, permitiendo reconocer las mejores prácticas y las posibles barreras existentes para su implementación.

Los criterios propuestos se han desarrollado de forma conjunta con el MOP, y para cada medida se han atribuido valores de 0 a 3 a cada criterio, en función de la capacidad de la medida de responder a dicho criterio. Se suman las puntuaciones obtenidas para cada criterio, haciéndose la misma operación para cada una de las medidas propuestas. Después, se comparan los valores totales obtenidos para cada medida y se procede a establecer un ranking de las medidas para la adaptación de la infraestructura al cambio climático.

Se considera, además, que las acciones llamadas “suaves”, que contribuyen al refuerzo de la capacidad adaptativa, que son acciones “no-regret” (medidas sin pérdidas a través de las cuales se obtendrán beneficios en un amplio rango de escenarios climáticos posibles), deberían ser

implementadas lo antes posible, ya que dichas acciones facilitan generalmente la implementación de acciones de adaptación concretas sobre el terreno (medidas “verdes”, “grises” o híbridas), así como los procesos de planificación, de gestión y de toma de decisiones.

Tal y como recomiendan las buenas prácticas para la adaptación, se enfoca se pondrá en la puesta en marcha de medidas llamadas “low hanging fruits” es decir, aquellas acciones “al alcance de la mano” y que permitan obtener beneficios concretos en el corto o mediano plazos.

9.1. Caso 1: Obras fluviales y control aluvional quebrada Paipote, Región Atacama

Caso propuesto: Caso práctico 1, Obras fluviales y control aluvional quebrada Paipote, Región de Atacama

Unidad: Dirección de obras hidráulicas (DOF/DOH)

Tipo de servicio de infraestructura: Obras fluviales, control aluviona.

Análisis de propuesta: Este caso propuesto se encuentra ubicado en la región de Atacama, comuna de Tierra Amarilla que, de acuerdo con los datos eventos observados y analizados, esta es una región frecuentemente expuesta a amenazas climáticas de tipo Remociones en Masa (REM), aluviones e inundaciones fluviales, con recurrente afectación de zonas urbanas en la quebrada de Paipote como en la Ciudad de Copiapó, y ha traído consigo pérdidas sociales muy significativas. De acuerdo con el caso propuesto este tipo de servicio de infraestructura se caracteriza por presentar una sensibilidad alta frente a aluviones e inundaciones, principalmente por la presencia de factores críticos como; deficiencia en el grado de redundancia de componentes del sistema de infraestructura y nivel de robustez de los componentes del sistema. Considerando la existencia de datos de ingeniería resulta una oportunidad valiosa para la cuantificación de la reducción de la vulnerabilidad del servicio a través de la implementación de medidas de adaptación.

9.1.1. Diagnóstico del Caso 1:

- a) Identificación del equipamiento de infraestructura fluvial, manejo de cauce y control aluvional:

Nombre: Obras Fluviales y control aluvional en la Quebrada de Paipote, Región de Atacama

Tipo de servicio de infraestructura: Manejo de Cauce y control aluvional.

- b) Tipología Estructural:

El diseño de este proyecto DOH consistió en estudiar el cauce de toda la Quebrada de Copiapó teniendo esta obra ya ejecutada en la actualidad y calcular los nuevos caudales de crecida teniendo como comparativa el evento del 15 marzo de 2015.

La Quebrada de Paipote se considera flujo Aluvional, siendo una quebrada no controlada y que

desemboca en el Río Copiapó, las obras proyectadas consisten en canalización en hormigón armado con ancho del canal en el sector de los puentes de vialidad Paipote nuevo y Paipote viejo es de aproximadamente 12 m por 2 m de altura. Este canal se inicia 200 m arriba de este punto, y es suficientemente ancho como para permitir que el escurrimiento del agua se expanda y se introduzca en esta estructura.

Para disminuir el flujo aluvional de las Quebradas que componen el sistema de Paipote, y que se ubican aguas arriba del sector urbano fue necesario proyectar obras de retención de sedimentos tipo muros vertederos y piscinas de retención, además se contempla mejorar las alcantarillas de los cruces de vialidad existentes.

c) Ubicación geográfica:

MACROZONA: Norte

REGIÓN: Atacama

COMUNA/PROVINCIA: Copiapó

CIUDAD: Copiapó

d) Descripción de las amenazas climáticas e impactos:

ANTECEDENTES: Existen antecedentes históricos de inundaciones de del río Copiapó como los indican los registros de lo sucedido durante los años 1997, 2015 y 2017, en donde se produjeron importantes inundaciones en sus afluentes, río Salado y la quebrada Paipote, generando desbordamientos en la parte baja de la ciudad de Copiapó dado el rebalse del flujo. Se considera que esto se originó por modificaciones en el cauce producto de la alta incidencia de la urbanización de la zona, ejemplo de esto es la edificación del mall Plaza Copiapó, y en Chañaral donde la quebrada Conchuelas bajó con gran fuerza, provocando inundaciones durante el año 2015.

En términos meteorológicos, los eventos son catalogados como extraordinarios, generando acumulaciones sobre los 150 mm en vastos sectores de la región de Coquimbo, alcanzando 1.5 a 2 veces el promedio climatológico, con intensidades por momentos que alcanzaron los 10 mm/hora. La Dirección Meteorológica de Chile (DMC) analizó y estudio el fenómeno y lo denominó un sistema de baja presión activo, resultante de una mutación entre una baja segregada y un sistema frontal (ONEMI, 2017).

IMPACTOS: Los años mencionados entre otros eventos generaron crecidas de ríos, esteros y se activaron quebradas que contenían mucho material detrítico acumulado, afectando sectores de valle, interrumpiendo la conectividad y principalmente provocando inundaciones en sectores de las localidades de Tierra Amarilla, Chañaral y Copiapó, en la región de Atacama, y dejando a varias localidades urbanas y rurales anegadas y aisladas en la región de Coquimbo, particularmente en las comunas de Vicuña, Monte Patria y Río Hurtado, entre otras. Provocando depósitos de material

fino de algunos metros de altura las que tuvieron que ser removidas posteriormente por Municipalidades, Vialidad y DOH.

Las figuras siguientes muestran una vista de la canalización, puede notarse el ancho de base (12 m), los muros (2 m de altura) con talud vertical y al fondo se aprecian los taludes naturales ya mencionados (~ 1:1 H:V). La figura siguiente muestra la misma canalización en el sector donde ésta termina, a unos 120 m aguas abajo de Av. Copayapu.

Los daños apreciados en la infraestructura señalada anteriormente fueron: Inestabilidad de taludes, deterioro de muros de canal, desgaste de revestimiento de fondo y riberas del canal.



Ilustración 19. **Revestimiento de cauce post 25M zona urbana se puede apreciar el puente mecano que conecta la calle 21 de Mayo en la ciudad de Copiapó**
Fuente: SEIA, 2018



Ilustración 20. **Inicio de la obra de encauzamiento canal de protección, se aprecia obra post evento 25M**
Fuente: SEIA, 2018

e) Identificación de amenazas y daños

Incremento Nivel del Cauce - CC: S/I

Caudal: S/I.

Precipitaciones recurrentes/intensas/gran magnitud: Si.

Flujo aluvional: Escorrimiento de sedimentos y barro desde quebradas en cabeceras de cuencas.

Flujo de detritos: S/I

Daños estructurales: inundaciones, desgaste de revestimiento de enrocado en fondo de canales, deterioro de enrocados de ribera, sobrepaso de badenes, entre otros.

Fotos: Si.

f) Soluciones aplicadas

Inmediatamente después de la crecidas, y dada la cercanía de las obras existentes con el área urbana, especialmente como se muestra en la Figura siguiente, la autoridad solicitó que se ejecutaran obras de emergencia, esta vez hacia aguas arriba del puente Mecano, con el fin de generar una canalización natural que, con geometría similar a lo definido por la consultora EIC en el proyecto de obras, permitiera contener crecidas que se repiten al menos una vez cada 100 años, respetando las obras existentes pero alejando el trazado del canalón natural (cauce de la quebrada) del sector poblado dirigiéndolo hacia la ribera derecha. Así es como nace el trazado del canalón natural de 25 m de ancho, taludes similares hacia ambas riberas 4:1 (H:V) tal como se muestra en parte de la figura siguiente. Obra que se denomina “perfilamiento urbano” (SEIA, 2018).



Ilustración 21. Canalón natural de quebrada Paipote y obras de “perfilamiento urbano”
Fuente: SEIA, 2018

✓ Análisis de resultados

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: Para el caso de estudio señalado se aplica la matriz de sensibilidad siguiente:

Factores de sensibilidad	Inestabilidad y deslizamientos (REM)	Tormentas	Cambios extremos en las precipitaciones	Erosión del suelo	Humedad del aire
Infraestructura del sistema	Red	Red	Yellow	Yellow	Green
Grado de Redundancia	Yellow	Red	Yellow	Green	Green
Nivel de robustez	Green	Yellow	Yellow	Red	Green
Funcionalidad del sistema	Red	Red	Red	Green	Green
Performance del sistema	Yellow	Red	Red	Green	Yellow
Evolución temporal	Yellow	Red	Red	Yellow	Green

De acuerdo con el análisis de sensibilidad por medio de la matriz desarrollada en la Metodología de diagnóstico de vulnerabilidad, una infraestructura como la señalada en el presente caso de estudio es propensa a problemas de resistencia y estabilidad estructural por escurrimiento de crecidas extremos, aumento del caudal de flujo y erosión, así como impacto por sólidos y energía de tránsitos de avenidas. Esto repercute, por tanto, en la capacidad y alcance del servicio de la infraestructura.

Además, considerando, según la información recolectada, que la infraestructura fluvial y manejo de cauce es sensible a flujos detríticos desde las quebradas superiores. Se tiene por tanto un caso de amenaza múltiple con caudal, impacto de altura de escurrimiento y erosión. No se tiene referencia de la altura de escurrimiento respecto al fondo del lecho, ni su pendiente. Se desconoce antecedentes de erosión previa al temporal. La erosión del lecho y las riberas del río han creado inestabilidades generales y locales.

El caudal sólido para 100 años de período de retorno es de 210,10 m³/s para 100 años de período de retorno, en este sector las velocidades son de 5 m/s, dando como resultado una altura de eje hidráulico 2.13 m de altura, el número de damnificados según la prensa es de 31 personas 6 desaparecidos 800 a 35.000 damnificados, daños en la infraestructura por 1.500 Millones de US\$ según la estimación por la asociación de Aseguradoras de Chile (AACH). La erosión del lecho y las riberas del río han creado inestabilidades generales y locales de riberas.

VULNERABILIDAD: Finalmente se establece que el servicio de infraestructura de obras fluviales y manejo de cauce que se emplazará en la región de Atacama ciudad de Copiapó, y en consideración a su nivel de exposición a eventos hidrológicos extremos de tipo precipitaciones intensas, incremento del área fluvial de escurrimiento, y los factores de sensibilidad identificados, se ha determinado que el proyecto tiene una vulnerabilidad media principalmente producto de la incidencia de las amenazas climáticas de incremento de la altura de la isoterma "0" y potencia de

escorrentía y la erosión del lecho y ribera de cauce presentando un nivel de vulnerabilidad medio. En tal sentido se concluyen los siguientes aspectos.

- ✓ De acuerdo a la metodología para integrar la resiliencia climática en proyectos de infraestructura, se identifica que no se aplicaron las herramientas de análisis como el análisis de exposición, el análisis de sensibilidad y análisis de vulnerabilidad.
- ✓ Las alternativas de solución planteadas en el caso de estudio corresponden a un solo tipo de medida de adaptación principalmente estructural de tipo gris y verde
- ✓ El análisis costo efectividad se ha desarrollado para evaluar de distintas configuraciones de una misma medida de adaptación sin identificación de medidas complementarias no estructurales (Evaluación del proyecto convencional)
- ✓ Condiciones de borde (criterios de diseño) a juicio de los diseñadores o consultores mediante la aplicación de un periodo de retorno de 100 años para incremento del dimensionamiento de las obras (dimensiones geométricas de canalón)
- ✓ Carencia de desarrollo de modelos físicos para calibración de modelos matemáticos
- ✓ Ausencia de planificación territorial trayendo consigo afectación a la comunidad y daño industrias

Conclusiones

- La experiencia práctica de los eventos del año 1997, 2015 y 2017 y los pronósticos climáticos analizados, muestran que para la cuenca de Paipote las magnitudes de los caudales máximos anuales aumentarán y, por lo tanto, los caudales de diseño usados en la proyección y verificación de obras hidráulicas en la cuenca se verán afectados, por lo que se concluye una VULNERABILIDAD MEDIA frente a las amenazas de inundaciones fluviales y Remociones en Masa y la necesidad de complementar el análisis retrospectivo de escorrentía incorporando variables climáticas futuras.
- La otra variable de diseño de gran relevancia que debe ser incorporada dentro de la prefactibilidad del caso de estudio, es a tasa de erosión, mediante un estudio para obras existentes. Esto con la finalidad de evaluar la probabilidad de falla de badenes, enrocados de fondo y ribera del río y otras obras, y así programar las medidas de protección necesarias. En este sentido se determina una VULNERABILIDAD MEDIA frente a las amenazas de inundaciones.
- Como consecuencia precipitaciones más frecuentes e intensas, se hace asimismo necesario adecuar los umbrales de alerta por inundación y diseñar sistemas de alerta efectivos. Si bien los resultados presentados en esta sección son válidos para la cuenca de Paipote, bosquejan los procedimientos necesarios que deben ser implementados para evaluar los efectos de lluvias en épocas cálidas, por lo que se concluye una VULNERABILIDAD ALTA a las amenazas de tormentas cálidas.

9.1.2. Medidas de adaptación al cambio climático propuestas

Para este caso práctico, considerando los antecedentes indicados, se recomiendan las siguientes opciones:

- Medida de adaptación estructural 1: Realizar un complemento al diseño de protección de cauce o riberas de la quebrada Paipote considerando infraestructura verde como por ejemplo parques inundables (como parque Kaukary en Copiapó) o ecosistemas resilientes a inundaciones.
- Medida de adaptación estructural 2: Mitigar la socavación con mayor dimensionamiento de espesor de enrocados o reforzarlos con concreto de alta resistencia a la abrasión.
- Medidas de Adaptación No Estructurales 1: Establecer monitoreo de variables hidrometeorológicas (precipitaciones y caudal) con el fin de tener una base del comportamiento de las tormentas en minutos, horas y día, como también para estimar los valores de eventos extremos o de crecidas.
- Medidas de Adaptación No Estructurales 2: Establecer inspecciones periódicas al revestimiento del cauce del río.
- Medidas de Adaptación No Estructurales 3: Programa de educación a las comunidades sobre efectos de Cambio Climático sobre Infraestructura de protección de cauce.
- Medidas de Adaptación No Estructurales 4: Crear sistema de alerta temprana. El sistema de alerta se debe vincular al monitoreo de la autoridad competente, dada la rapidez de las activaciones de las quebradas deben ser a partir de pronósticos y modelos precipitación escorrentía más modelo hidráulico. Luego de aquello es como se da la alerta (protocolo).

9.2. Caso 2: Sistema de defensas fluviales río Mataquito, región del Maule

Caso propuesto: Caso práctico 2, Sistema de defensas fluviales río Mataquito, región del Maule

Unidad: Dirección de obras hidráulicas (DOF/DOH)

Tipo de servicio de infraestructura: Defensas fluviales

Análisis de propuesta: Este caso propuesto se encuentra ubicado en la región del Maule que, de acuerdo con los datos de eventos observados analizados, esta es una región frecuentemente expuesta a amenazas climáticas de tipo inundaciones fluviales, con características hidrológicas marcadas por caudales importantes en comparación con la zona norte de Chile, con recurrente afectación de servicios de infraestructura vial, defensas fluviales y obras de encauzamiento, que han traído consigo pérdidas económicas y sociales relevantes. De acuerdo con el caso propuesto este tipo de servicio de infraestructura se caracteriza por presentar una sensibilidad alta frente a crecidas o avenidas por aumento de caudal del río, principalmente por la presencia de factores críticos como, intervención no planificada de cauces, y deficiencia en el grado de redundancia de componentes del sistema de infraestructura de defensa fluvial. Considerando la existencia de datos de ingeniería resulta una oportunidad valiosa para la cuantificación de la reducción de la vulnerabilidad del servicio de infraestructura a través de la implementación de medidas de adaptación.

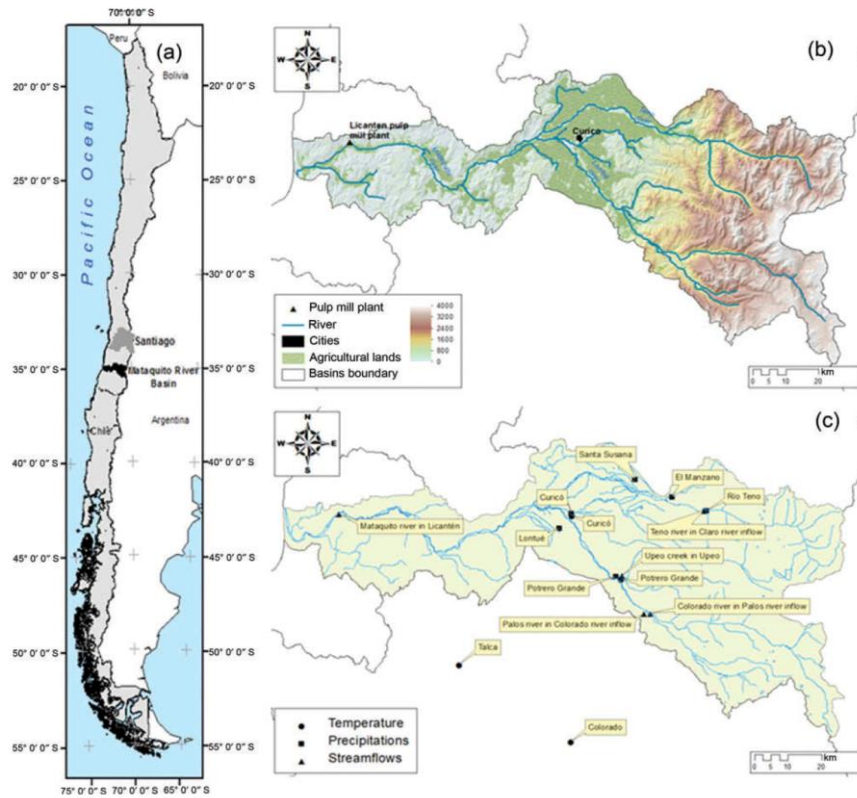


Ilustración 22. Mapa de cuenca de río Mataquito: (a) Localización, (b) Topografía y principales cursos de agua relacionados, (c) Localización de estaciones hidroclimáticas usadas en el estudio.
 Fuente: Vicuña et al., 2013.

De acuerdo con el caso propuesto este tipo de servicio de infraestructura se caracteriza por presentar una sensibilidad alta frente a crecidas o avenidas por aumento de caudal del río, principalmente por la presencia de factores críticos como, intervención no planificada de cauces para el desarrollo agrícola y zonas habitacionales rurales, y deficiencia en el grado de redundancia de componentes del sistema de infraestructura de defensa fluvial (Riffo et al., 2009). Considerando la existencia de datos de ingeniería resulta una oportunidad valiosa para la cuantificación de la reducción de la vulnerabilidad del servicio de infraestructura a través de la implementación de medidas de adaptación.

9.2.1. Diagnóstico del Caso 2:

a) Identificación del equipamiento de infraestructura de protección de cauce:

Nombre: Protección de cauce río Mataquito para evitar desborde, inundaciones y socavación de estructuras

Tipo IPC: Protección con enrocados, gaviones, revestimiento del lecho y riberas

b) Tipología Estructural:

El sistema estructural corresponde a obras de protección de ribera, enrocado y encauzamiento del río Mataquito.

c) Ubicación geográfica:

MACROZONA: Centro

REGIÓN: Del Maule

COMUNA/PROVINCIA: Curicó

CIUDAD: Licantén, Curepto, Rauco, Majadillas

Las siguientes imágenes muestran la situación en condiciones normales del escurrimiento y lecho del río Mataquito, sin tener eventos de crecidas extremas por régimen fluvial o nival.



Ilustración 23. Imágenes condiciones de cauce normal río Mataquito en Licantén
Fuente: Vídeo Inundaciones Licantén, 2018.

d) Descripción de las amenazas climáticas e impactos:

ANTECEDENTES: La siguiente grafica muestra el hidrograma de crecida de los ríos afluentes al río Mataquito, los ríos Teno y Los Palos y el cauce receptor río Mataquito aforado en Licantén.

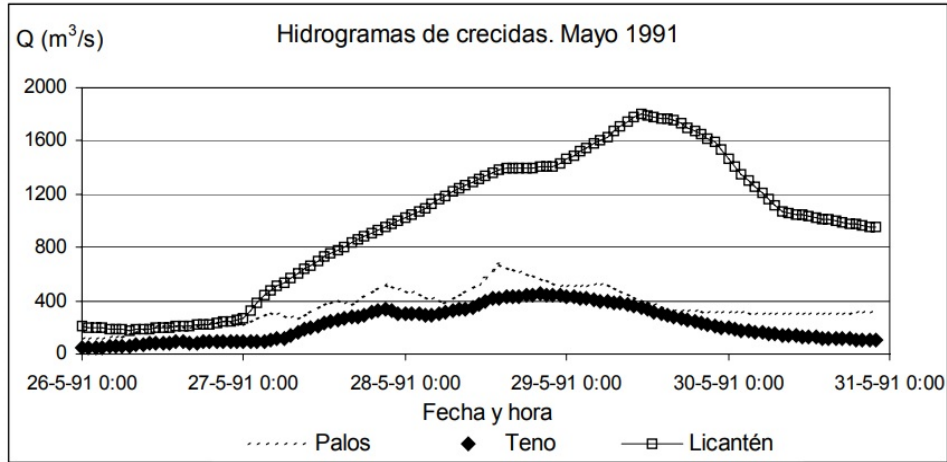


Ilustración 24. Inundación de evento de mayo de 1991, Cuenca río Mataquito
Fuente: Santander y Vargas, 2006

Otro caso es por ejemplo la crecida que habría ocurrido el 23 de mayo del año 2008, la que generó una inundación bastante inusual en el río Mataquito, región del Maule, a la altura de Licantén, cerca de la desembocadura en el Océano Pacífico. Esta crecida inutilizó la estación fluviométrica, por lo que sólo se tiene una estimación de la magnitud del caudal máximo instantáneo. La DGA (2008) estima un caudal instantáneo de 4.154,6 m³/s en esta ubicación en el momento en que la estación fue destruida. Por otra parte, el mismo estudio estima un valor del caudal máximo instantáneo del evento del orden de 7.000 – 8.000 m³/s. Esto significaría un caudal cuyo periodo de retorno con toda seguridad superó los 200 años (PUC, 2012; Vicuña et al., 2013). Las siguientes imágenes muestran la situación acontecida en el territorio del lecho del río Mataquito en mayo del 2008 durante y después de las inundaciones y desbordes del río en zonas agrícolas y residenciales rurales:

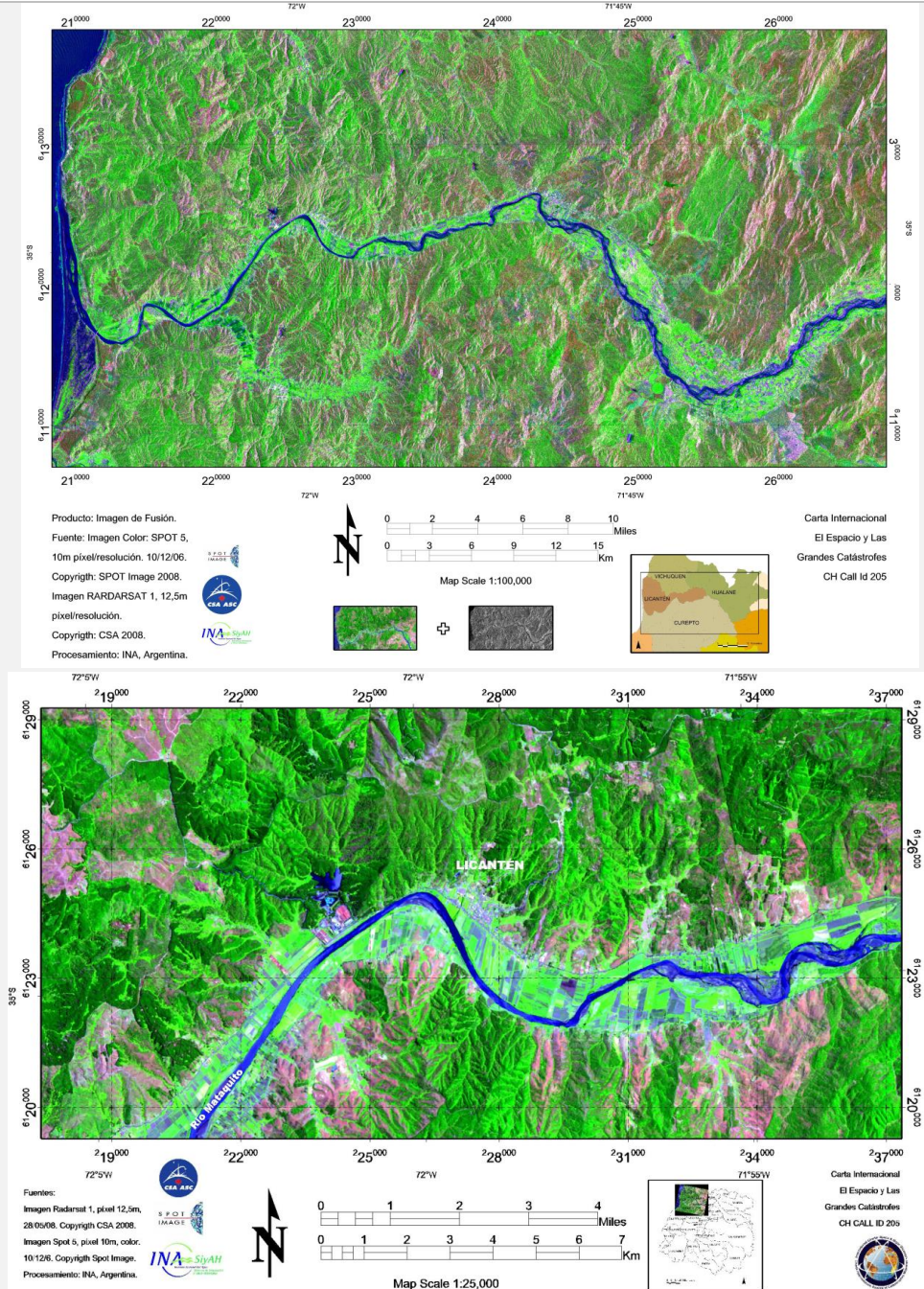


Ilustración 25. Simulación de inundación de Mayo 2008, Río Mataquito
 Fuente: Reliefweb, 2008

La Tabla siguiente compara las condiciones meteorológicas promedio estimadas para la cuenca durante la ocurrencia de este evento con lo observado durante una crecida importante, pero de menor magnitud, ocurrida el 27 de mayo del 2002. Se puede observar que para este último evento la precipitación fue de 20 mm más, pero las temperaturas fueron menores, lo que

significó una elevación menor de la isoterma cero (i.e. 1700 m vs. 2200). Esto muestra que efectivamente estas diferencias en temperaturas y elevación de la línea de nieve pueden explicar, al menos en parte, el mayor caudal observado el 2008 (PUC, 2012).

Comparación de dos eventos de crecidas ocurridas en los años 2002 y 2008, Río Mataquito a la altura de Licantén (PUC, 2012).

	27 mayo 2002	23 mayo 2008
Precipitación últimas 48 horas (mm)	103,6	83,9
Caudal máximo diario (m ³ /s)	931	2690
T_{max} media (°C)	13,0	17,4
Elevación estimada de la línea de nieve (m)	1700	2200

La siguiente imagen muestra como la variación de la línea de nieves o isoterma cero grados puede afectar el régimen de escurrimiento de los cauces, modificando su condición de nival a fluvial, al aumentar o disminuir el área o superficie de escurrimiento de aguas lluvias:

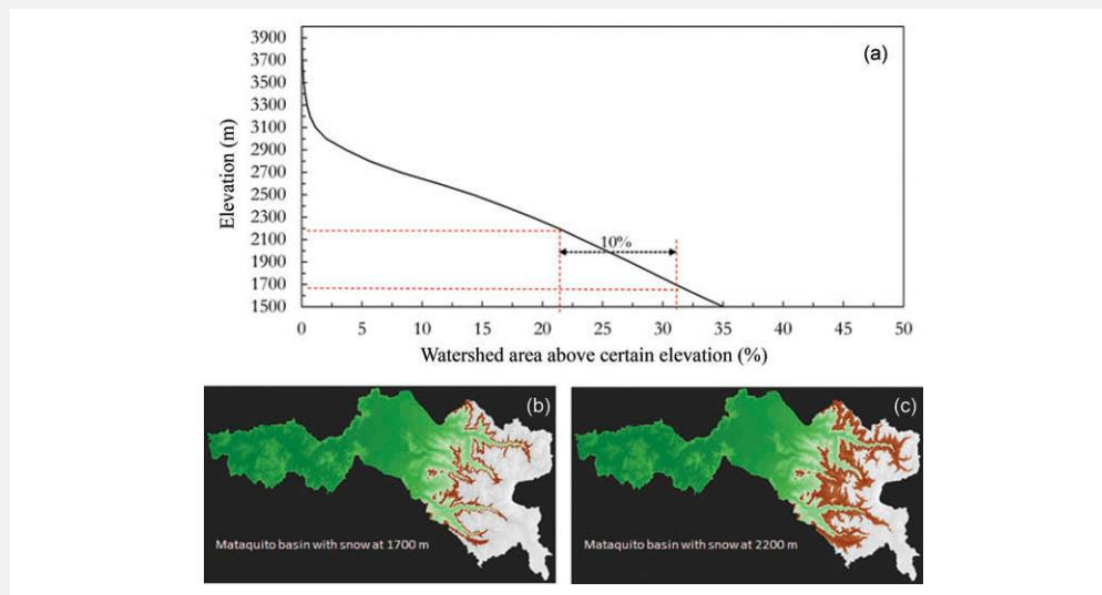


Ilustración 26. Mapa de comparación de área de escorrentía evento mayo 202 y mayo 2008, cuenca rio Mataquito
Fuente: Vicuña et al., 2013

IMPACTOS: Las crecidas del río Mataquito han producido un aumento de las erosiones en los terrenos agrícolas del sector, incrementando con ello el riesgo de inundación a las viviendas aledañas al cauce, poniendo en riesgo además infraestructura pública, como el pozo de captación del Sistema de Agua Potable Rural (APR) Majadilla de Rauco, quedando este asentamiento humano en riesgo y altamente vulnerable ante cualquier nueva crecida del río, más aun con la temporada de deshielos que se registra todos los veranos, lo que hace aumentar

el caudal del río con los riesgos ya descritos anteriormente.

e) Identificación de amenazas y daños

Incremento nivel del cauce por CC: Sin información

Caudal: Caudales estimados por la DGA como crecida del orden de 7.000 – 8.000 m³/s correspondientes a T = 200 años.

Precipitaciones recurrentes/intensas/gran magnitud: Si.

Flujo aluvional: S/I

Flujo de detritos: S/I

Daños estructurales: inundaciones, destrucción de sistemas de APR, deterioro de enrocados, socavación de pilares de puentes, entre otros.

Socavación: Erosión del fondo y laderas de los ríos, pone en riesgo a las estructuras.

Fotos: Si.

f) Soluciones aplicadas:

De acuerdo con los antecedentes presentados anteriormente y al observar el comportamiento del río Mataquito ante eventos extremos de la naturaleza debido a precipitación generadas en la parte alta de la cuenca hidrográfica, considerando además las características geomorfológicas de su lecho, el cual tiene una sección transversal relativamente plana sin mucho desnivel las posibilidades de inundación son altas ante crecidas o aumentos del caudal del río. Las zonas de lecho del río han sido invadidas para ser utilizadas con fines de predios agrícolas y zonas residenciales rurales. El río al observar las imágenes fotográficas y de satélite sigue el curso de la topografía y la dirección de muchos meandros que tiene a lo largo de su cauce.

De acuerdo a lo indicado por Marcelo Lagos geógrafo PUC y otros autores (Arenas et al., 2008) nos indican que: “La importancia de las recientes inundaciones (en mayo, 2008) provocadas por el desborde del Río Mataquito en Licantén, debieran llevar a una mayor rigurosidad en la definición de los límites del espacio urbanizable”. Por lo tanto, existen muchas zonas expuestas a riesgo de inundaciones al estar asentadas en el lecho del río, esto puede ser comprobado al observar los materiales aluviales y coluviales que existen en el terreno.

Junto a esto se debe pronosticar escenarios futuros de posibles eventos extremos y así disponer de adecuados y eficaces sistemas de alerta temprana, que puedan avisar a la población con un tiempo razonable para que puedan escapar a una zona segura y no poner en riesgo sus vidas. Para el caso de pronósticos de escenarios futuros de precipitaciones, temperaturas y caudales, investigadores de PUC han propuestos los siguientes análisis prospectivos para el comportamiento futuro del río Mataquito:

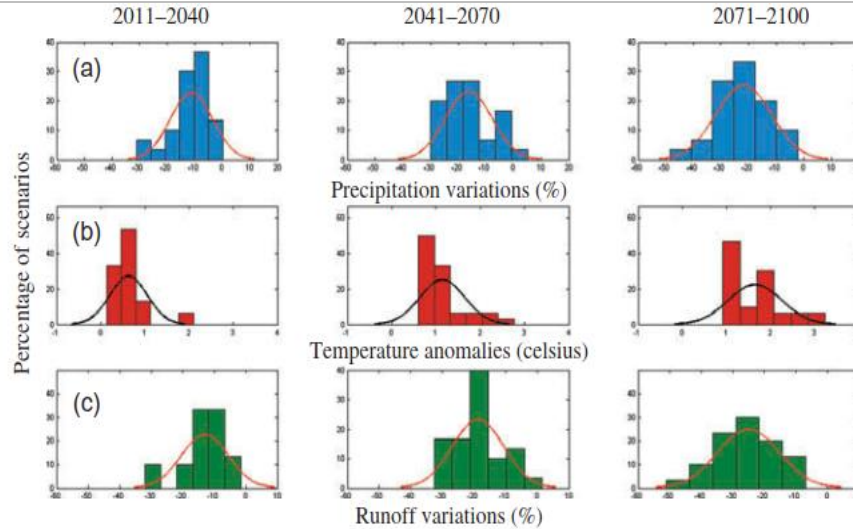


Ilustración 27. Escenarios futuros de precipitaciones, temperaturas y caudales en cuenca del río Mataquito
Fuente: Vicuña et al., 2013

Al observar las imágenes fotográficas a lo largo del cauce del río Mataquito claramente queda de manifiesto que se carece de obras de encauzamiento a lo largo de la mayoría del lecho, lo cual incrementa las posibilidades de desbordamiento ante aumento de flujo. Es necesario proyectar obras de contención de inundaciones en ambos márgenes del lecho del río para contener las crecidas en casos extremos. Junto a esto es necesario estudiar los diferentes meandros y curvas que tiene el río a lo largo de curso, para proyectar obras apropiadas que soporten las fuerzas hidrodinámicas del río en situación de crecidas y así estas obras no colapsen o cedan. Las soluciones estructurales aplicadas y conocidas hasta la fecha consistieron en el peraltamiento de las obras fluviales aledañas al sector de Licantén.

g) Análisis de resultados

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: Para el caso de estudio señalado se aplica la matriz de sensibilidad siguiente:

Factores de sensibilidad	Inestabilidad y deslizamientos (REM)	Tormentas	Cambios extremos en las precipitaciones	Erosión del suelo	Humedad del aire
Infraestructura del sistema	Red	Red	Yellow	Yellow	Green
Grado de Redundancia	Yellow	Red	Yellow	Green	Green
Nivel de robustez	Green	Yellow	Yellow	Red	Green
Funcionalidad del sistema	Red	Red	Red	Green	Green

Performance del sistema	Yellow	Red	Red	Green	Yellow
Evolución temporal	Yellow	Red	Red	Yellow	Green

De acuerdo con el análisis de sensibilidad por medio de la matriz desarrollada en la Metodología de Diagnóstico de Vulnerabilidad, una infraestructura como la señalada en el presente caso de estudio es propensa a problemas de desborde o inundaciones por escurrimiento de crecidas extremas, aumento del caudal de flujo y erosión. Esto repercute, por tanto, en la capacidad y alcance del servicio de la infraestructura propuesta para protección de cauce.

De acuerdo con la información recolectada, en la cuenca del río Mataquito, las temperaturas han aumentado especialmente durante los meses de primavera. Estas tendencias han sido estadísticamente robustas durante los últimos 30 años (1976-2008). La magnitud de precipitación ha disminuido; sin embargo, se registra un incremento en la frecuencia de caudales extremos en la cuenca. Proyecciones climáticas de 12 GCM indican que estas tendencias van a continuar durante el siglo XXI, incrementando así la vulnerabilidad de las obras hidráulicas existentes y la probabilidad de ocurrencia de desbordes del río. La frecuencia y magnitud de los caudales máximos anuales posiblemente aumentarán como consecuencia de eventos de precipitación más intensos y de cambio en la proporción de días con precipitación líquida con respecto a precipitación sólida durante los meses de invierno (PUC, 2012).

VULNERABILIDAD: Finalmente se establece que el servicio de infraestructura de obras fluviales y manejo de cauce que se emplazará en la VII región del Maule, y en consideración a su nivel de exposición a eventos hidroclimáticos extremos de tipo precipitaciones intensas, recurrentes y de gran magnitud, socavación de cauces, y los factores de sensibilidad identificados, se ha determinado que el proyecto tiene una vulnerabilidad alta principalmente producto de la incidencia de las amenazas climáticas de incremento de la altura y potencia de crecida del río y la socavación del lecho. En tal sentido se destacan los siguientes aspectos.

- ✓ De acuerdo a la metodología para integrar la resiliencia climática en proyectos de infraestructura, se identifica que no se aplicaron las herramientas de análisis como el análisis de exposición, el análisis de sensibilidad y análisis de vulnerabilidad,
- ✓ Las alternativas de solución planteadas en el caso de estudio corresponden a un solo tipo de medida de adaptación estructural,
- ✓ El análisis costo efectividad se ha desarrollado para evaluar de distintas configuraciones de una misma medida de adaptación sin identificación de medidas complementarias no estructurales (Evaluación del proyecto convencional),
- ✓ Condiciones de borde (criterios de diseño) a juicio del diseñador mediante la aplicación de criterios conservadores para incremento del nivel del eje hidráulico en cauce,

- ✓ Carencia de desarrollo de modelos físicos para calibración de modelos matemáticos,
- ✓ El periodo de retorno considerado podría no tener en cuenta el efecto del cambio climático,
- ✓ Se recomienda la implementación de muros de enrocados, gaviones, tierra armada, muro de hormigón rodillado, tablestacados, entre otros,
- ✓ Se deben proyectar y construir obras de prevención de futuras inundaciones, principalmente a la fecha el enfoque en la cuenca del río Mataquito ha sido el desarrollo agrícola de la zona, sin tener en cuenta que el río recobra o recupera el espacio tomado por el ser humano en predios agrícolas o zonas residenciales rurales cuando hay crecida. Para evitar pérdidas en estas actividades económicas y daños a las personas se tiene que invertir en planes de zonas y obras de mitigación del riesgo de desastres.

Conclusiones

- Resultados para la cuenca del río Mataquito indican que las magnitudes de los caudales máximos anuales aumentarán y que por lo tanto los caudales de diseño usados en el diseño y verificación de obras hidráulicas en la cuenca se verán afectados (PUC, 2012), por lo que se concluye una VULNERABILIDAD ALTA para esta infraestructura de protección de cauce bajo la variable de Caudal.
- Como consecuencia precipitaciones más frecuentes e intensas, se hace asimismo necesario adecuar los umbrales de alerta por inundación y diseñar planes de evacuación acordes. Si bien los resultados presentados en esta sección son válidos para la cuenca del río Mataquito, bosquejan los procedimientos necesarios que deben ser implementados para evaluar los efectos de climas más cálidos en otras cuencas en Chile) (PUC, 2012), por lo que se concluye una VULNERABILIDAD ALTA en el futuro para esta infraestructura de protección de cauce bajo la variable de Precipitaciones intensas, recurrentes y gran magnitud.

9.2.2. Medidas de adaptación al cambio climático propuestas

Para este caso práctico, considerando los antecedentes indicados, se recomiendan las siguientes opciones:

- Medidas de adaptación estructurales 1: Realizar el nuevo diseño de protección de cauce o riberas del río Mataquito considerando el tirante o eje hidráulico en base a los registros históricos de altura de escurrimiento de aguas del río y/o considerando modelos de predicción de altura de escurrimiento extremo bajo efectos de cambio climático.
- Medidas de adaptación estructurales 2: Mitigar la socavación con mayor dimensionamiento de las defensas fluviales.
- Medidas de adaptación estructurales 3: Revestimiento del cauce del río con gaviones, enrocados, entre otros.
- Medidas de Adaptación No Estructural 1: Establecer monitoreo de variables hidrometeorológicas (precipitaciones y temperatura).

- Medidas de Adaptación No Estructural 2: Establecer inspecciones periódicas al revestimiento del cauce del río.
- Medidas de Adaptación No Estructural 3: Desarrollo de un sistema de alerta temprana.

Recomendaciones de rediseño para medidas basadas en obras grises DOH

A continuación, se detallan algunas recomendaciones técnicas orientadas al rediseño de obras grises del caso de estudio. En tal sentido, se plantea:

Reacondicionar la geometría a soluciones mixtas como separar el material fluvial grueso del lecho del mismo río y reacomodar en los sectores más socavados, con el objetivo de densificar el suelo subyacente, haciéndolo más resistente al arrastre de sólidos por la corriente de agua. considerar espigones sumergidos coligadas con defensas fluviales típicas.

En el contexto de cambio climático se hace necesario proveer de infraestructura adecuada y eficaz para medir y tener información de terreno sobre las crecidas o avenidas que pueda tener el río, en este caso Mataquito. Para ello se requiere en primer lugar adecuar las estaciones de aforo para eventos extremos o crecidas, si bien la DGA tiene una base de datos relevante e importante de aforo de caudales medios, no cuenta con un sistema de medición de crecidas del río, ya que los instrumentos o sistemas que miden los caudales medio colapsan, se dañan o son destruidos por el evento extremo de escurrimiento. Por esto, se debe proyectar obras simples, clásicas y efectivas del punto de vista de costo y de la medición como cablecarros, limnímetros, y sistemas de aforo con secciones del cauce, como se observa en la siguiente figura.

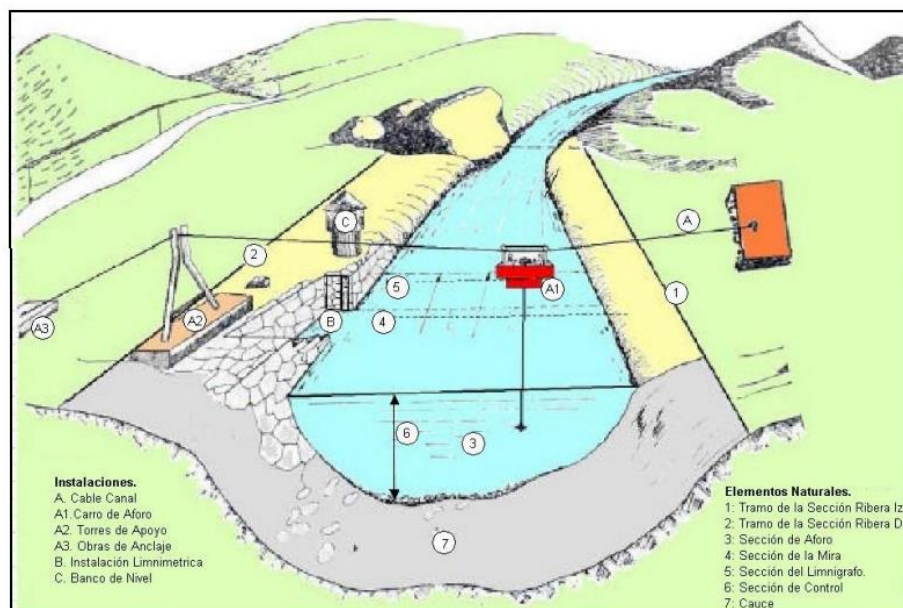


Ilustración 28. Ejemplo de sistema de monitoreo de eventos de crecidas extremas alternativos para el río Mataquito

Fuente: Vicuña et al., 2013

El trazado del río Mataquito es muy heterogéneo y cuenca con una geomorfología muy diversa desde la cordillera al mar, se observan una gran cantidad de meandros y curvas a lo largo de su trayecto, lo cual implica comprender y modelar el comportamiento del escurrimiento de sedimentos, detritos, y agua, lo cual va conformando el paisaje y territorio de la cuenca de Mataquito que actualmente se conoce, un proceso altamente dinámico y complejo. Es por esta razón que se hace necesario utilizar los sedimentos o materiales sólidos del lecho del río con cuidado para la construcción de obras de protección de inundaciones en zonas sensibles como zonas residenciales o de obras civiles de relevancia.

Si bien es posible proyectar y construir obras tipo muros de contención de concreto armado, enrocados, y/o gaviones, es importante destacar que, como procesos propios de la geología, hidrología, sedimentología, geomorfología el río volverá a ocupar las zonas que en el pasado ha ocupado mediante crecidas o avenidas extremas, como lo ha venido haciendo desde hace cientos de años. Por esta razón se hace necesario zonificar el área del ancho del cauce de río Mataquito e identificar las alturas o cotas msnm de inundación para determinados periodos de retorno (10, 25, 50 y 100 años). De esta forma, se tendría conocimiento de las zonas expuestas a las amenazas de inundaciones futuras y daría la posibilidad y oportunidad de aplicar un ordenamiento territorial para reorganizar los usos del suelo y reubicar asentamientos humanos si fuese necesario.

Al tener una zonificación de secciones transversales características a lo largo del trazado del cauce del río es posible planificar obras de mitigación de inundaciones según el uso del suelo en el sector, por ejemplo, zonas agrícolas, zonas residenciales, zonas ganaderas, zonas de industrias, etc. Donde de acuerdo a la importancia u grado de seguridad a brindar, se diseñan las obras de protección asociado a cierto periodo de retorno por ejemplo 100 años.

9.3. Caso 3: Paseo Costero Juan de Saavedra, Valparaíso, Región de Valparaíso

Caso propuesto: Caso práctico 3, Paseo costero Juan de Saavedra, Región de Valparaíso

Unidad: Dirección de obras hidráulicas (DOF/DOH)

Tipo de servicio de infraestructura: Protección de borde costero / Puerto de pesca artesanal

Análisis de propuesta: Este caso propuesto se encuentra ubicado en la región de Valparaíso que, de acuerdo con los datos de eventos observados y analizados, esta es una región frecuentemente expuesta a amenazas climáticas de tipo marejadas, con recurrentes impactos en servicios de infraestructura de borde costero, trayendo consigo pérdidas económicas significativas. Este tipo de servicio de infraestructura se caracteriza por presentar una sensibilidad alta frente a marejadas, principalmente por la presencia de factores críticos como

estado de intervención de la cuenca, uso del borde costero, exposición al fuerte oleaje y baja resistencia estructural. Además, que en las entrevistas con la DOP indicaron la intención de iniciar estudios específicos. Considerando la existencia de datos de ingeniería resulta una oportunidad valiosa para la cuantificación de la reducción de la vulnerabilidad del servicio a través de la implementación de medidas de adaptación.

9.3.1. Diagnóstico del Caso 3:

a) Identificación del equipamiento de infraestructura de protección de zona costera:

Nombre: Paseo costero Juan de Saavedra

Tipo de infraestructura: Protección de zona costero

b) Tipología Estructural:

DESCRIPCIÓN SISTEMA ESTRUCTURAL: El paseo costero Juan de Saavedra corresponde una obra de protección de infraestructura costera, que se componen un espacio con fines recreativos y turísticos. El territorio colindante además lo conforma la franja del Metro de Valparaíso (MERVAL) y la correspondiente a Avenida España de tuición SERVIU. El proyecto anterior Antiguamente poseía una defensa ribereña de rompeolas con tetrápodos de concreto los que colapsaron y se disgregaron.

c) Ubicación geográfica:

MACROZONA: Centro

REGIÓN: Valparaíso

COMUNA/PROVINCIA: Valparaíso

CIUDAD: Valparaíso

DIRECCIÓN: Avenida España

d) Descripción de las amenazas climáticas e impactos:

ANTECEDENTES: El temporal del 8 de agosto de 2015 afectó negativamente esta infraestructura, específicamente en la defensa costera, causado por la conjugación de baja de presión atmosférica y sistema frontal de vientos con intensas precipitaciones que provocó marejadas intensas en la zona de Valparaíso (marea meteorológica) coincidiendo con una marea astronómica, incrementado la altura de oleaje notablemente. Se tienen los siguientes datos asociados:

- Altura significativa de Ola: 6.5 m.
- Periodo de Ola: 12.8 s.
- Velocidad del Viento: hasta 90 Km/H.
- Presión Atmosférica: baja de presión hasta los 981 HPa.

IMPACTOS: De acuerdo con el artículo sobre el temporal del 15 de agosto de 2015 que impactó las regiones de Valparaíso y Coquimbo (Winkler, P. et al, 2016) con cita textual: "El oleaje causó el desplazamiento de los tetrápodos y la pérdida de material de relleno que da soporte al Paseo

San Juan de Saavedra (Fig. 8c). Luego del temporal se observó la socavación generalizada de la defensa, causada por el desplazamiento de tetrápodos y pérdida del material de relleno". También se reporta en el mismo artículo daños a las edificaciones aledañas al paseo costero, con sobrepaso de oleaje que generó el arrastre de más de 2000 m³ de escombros en la vía férrea del Metro de Valparaíso y la Av. España. Se estima que las pérdidas económicas fueron de 5.000.000.000 pesos chilenos aproximadamente.

- Identificación de amenazas y daños

Incremento Nivel del Mar - CC: 0,33 m (escenario RCP 8,5 proyección a 50 años, 2.066)

Oleaje: máximo oleaje registrado a 6.5 m.

Sobrepaso: Sí.

pH marino: Sin información

Salinidad del Mar: Sin información

Erosión: Si. Se registraron erosiones y socavación del borde costero. Pérdida de material de relleno.

Sedimentación: No.

Daños estructurales: desplazamiento de tetrápodos. Destrucción de la defensa ribereña.

Fotos: Si.



Ilustración 29. Desplazamiento de tetrápodos zona costera de la región de Valparaíso post evento Ago-2015
Fuente: Winckler; P., 2016

- Soluciones propuestas:

Para Junio de 2018 se realizó un informe de solución al caso de Paseo Juan de Saavedra, con nombre: Modelación Física Paseo Juan de Saavedra, dentro del estudio: Diseño Conservación Defensas Costeras Sectores Avenida Perú y Juan de Saavedra", de la ciudad de Valparaíso, Chile.

El estudio contempló la recopilación de datos de la Infraestructura de Borde Costera Paseo Juan de Saavedra, estudio del Oleaje y Modelación Física para el mismo, mediante simulaciones del laboratorio y diagnóstico real del evento de impacto climático (oleaje).

Datos Técnicos considerados en el estudio y diseño del nuevo Paseo Juan de Saavedra:

- Vida útil: 50 años.
- Nivel de Seguridad: moderado para pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de falla (ROM 0.2-90, tabla 2.1).
- Periodo de Retorno Oleaje de Diseño: 100 años (estabilidad de estructura) para Hs = 5.6 m.
- Periodo de Retorno de Sobrepaso Admisible en berma de base: 8 años para Hs = 4 m.
- Riesgo de sobrepaso (berma de base): 50 %.
- Riesgo de falla de estabilidad de la estructura: 39.5 % (ec. 2.1 ROM 0.2-90).
- Incremento NMM por CC: 0.33 m (escenario RCP8.5, al 2066).
- Defensa de diagnóstico (real antes del evento 8-8-15): Enrocado con berma de coronamiento de 4.50 m y berma con 10.50 m y pendiente 1.75:1.00.

Comparación de alternativas de solución:

Identificación	Descripción	Reducción de sobrepaso (%)	Reducción de daño (%)	Costos (\$CLP)	Análisis Costo Beneficio (ACB)
Alternativa 01	Construcción de una capa de enrocado y berma a pie compuesta por tetrápodos reutilizables de la playa movidos por el temporal del 8-8-15, a ser reacomodados en la base de la escollera o defensa ribereña.	Reducción de 53%.	Diagnóstico (real por evento del 8-8-15): daño en 81.7%. Alternativa 01 (tetrápodos): daño 32%.	737.537.799 pesos chilenos.	738 / 53 = 13.93
Alternativa 02	Construcción de una coraza de piezas Cubípodos 3T (no utilizados hasta la fecha del estudio en Chile con una berma de rocas a pie de la defensa.	Reducción de 48%.	Diagnóstico (real por evento del 8-8-15): daño en 81.7%. Alternativa 02 (Cubípodos): daño de 33.9%.	4.057.706.817 pesos chilenos.	4.058 / 48 = 84.54
Alternativa 03	Construcción de una berma de Dolos con muro de coronamiento y enrocado como berma a pie de defensa.	Reducción de 74%.	Diagnóstico (real por evento del 8-8-15): daño en 81.7%. Alternativa 03 (dolos): daño del 10.5%.	2.095.861.071 pesos chilenos.	No identificado

Resumen de soluciones del proyecto:

- Tramo 1 de 280 metros cercano a Caleta Portales se aplicará la alternativa 03 por ser está el área más sensible y afectada durante el temporal 8-8-15.
- Tramo 2 de 220 metros entre las edificaciones de la Armada de Chile hacia Club de Yates de Recreo, se propuso aplicar alternativa 01 o alternativa 02 por tener efectividades similares, destacando sin embargo que la alternativa 01 es menos costosa.
- La alternativa 01 posee una menor relación por ser menos costosa y más efectiva que la alternativa 02, siendo recomendable su aplicación.

e) Resultados:

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: Para el caso de protección de borde costero aplica la matriz de sensibilidad siguiente:

Factores de Sensibilidad	Nivel Medio del Mar	Precipitaciones Intensas	Altura y Potencia de Ola	Acidificación del Mar (corrosión)	Cambios Morfodinámicos de la Costa por CC
Resistencia Estructural	Red	Yellow	Red	Yellow	Yellow
Estabilidad Estructural	Red	Yellow	Red	Yellow	Red
Calidad Material	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Yellow
Altura la Infraestructura	Red	Green	Red	Green	Green
Capacidad del Servicio	Red	Red	Yellow	Green	Yellow
Alcance de del Servicio	Red	Green	Red	Green	Red
Conservación del Sistema	Yellow	Green	Yellow	Green	Yellow
Estado de los Recursos Naturales	Red	Red	Red	Yellow	Red

De acuerdo al análisis de sensibilidad por medio de la matriz desarrollada en la Metodología de Diagnóstico de Vulnerabilidad, una infraestructura como la del presente caso de estudio es propensa a problemas de resistencia y estabilidad estructural por oleaje extremo, aumento del nivel medio del mar y socavación, así como sobrepaso por oleaje. Esto impacta, por tanto, en la capacidad y alcance del servicio de la infraestructura.

VULNERABILIDAD: De acuerdo a la información recolectada por medio de los antecedentes y el análisis de sensibilidad, el Paseo Juan de Saavedra es propenso a oleaje intenso y erosión causada por el mismo, como quedó registrado en el temporal del 8 de agosto de 2015. Se tiene por tanto un caso de amenaza múltiple con sobrepaso, impacto de oleaje y erosión. Se desconoce antecedentes de erosión previa al temporal. La erosión en la defensa ribereña provocó pérdida de soporte de esta en su relleno, facilitando además el desplazamiento de tetrápodos por el oleaje y las masas de aguas agitadas (pérdida de trabazón), provocando la

destrucción de la defensa y la pérdida de la obra.

Considerando el análisis de exposición desarrollado más el uso referencial de la matriz de sensibilidad se ha determinado que el proyecto tiene una vulnerabilidad alta principalmente producto de la incidencia de las amenazas climáticas de incremento de la altura y potencia de ola y de erosión del borde costero

- ✓ De acuerdo a la metodología para integrar la resiliencia climática en proyectos de infraestructura, se identifica que no se aplicaron las herramientas de análisis como el análisis de exposición, el análisis de sensibilidad y análisis de vulnerabilidad.
- ✓ Las alternativas de solución planteadas en el caso de estudio corresponden a un solo tipo de medida de adaptación estructural
- ✓ El análisis costo efectividad se ha desarrollado para evaluar distintas configuraciones de una misma medida de adaptación sin identificación de medidas complementarias no estructurales (Evaluación del proyecto convencional)
- ✓ Condiciones de borde (criterios de diseño) correctos mediante la aplicación del escenario RCP 8.5 para incremento del nivel medio del mar
- ✓ Desarrollo de modelos físicos para calibración de modelos matemáticos
- ✓ El periodo de retorno utilizado puede cambiar en el futuro trayendo consigo incremento en el riesgo de falla

Conclusiones

- La metodología de diagnóstico de vulnerabilidad bajo contexto de cambio climático puede aportar un diagnóstico más detallado de la situación del Paseo Juan de Saavedra, considerando que su rediseño se enfoca en la altura de oleaje, aún se omiten otros factores de impacto como la erosión y la misma variación de los periodos de retorno a futuro debido a la influencia por cambio climático. La metodología desarrollada apunta a una evaluación basada en criterio de multi amenaza.
- Sobre lo expuesto anteriormente, es importante considerar medidas adicionales a la solución dada en el proyecto del Paseo Juan de Saavedra, que aumente la resiliencia y blinden o aseguren la mitigación de la vulnerabilidad a futuro, dentro del periodo de vida útil de la estructura.
- Se demuestra que el uso de la Matriz de Sensibilidad ayuda al Ingeniero evaluador a identificar y diferenciar las amenazas y problemas frente a los cuales puede estar sometida la Infraestructura de Zona Costera en Chile.
- Es rescatable el uso del escenario RCP8.5 para considerar aumento del nivel medio del mar. Esta aplicación puede ser utilizada como una medida de “primeros auxilios” para involucrar el problema del cambio climático sobre la Infraestructura de Zona Costera.
- Del punto anterior, también se destaca la necesidad de desarrollar otros modelos más locales para la predicción de altura de oleaje y generación de mapas de riesgo – amenaza – vulnerabilidad aplicable a la Infraestructura de Zona Costera.

- La metodología, incluye un procedimiento ordenado y de fácil aplicación debido a su carácter descriptivo y complemento con la Matriz de Sensibilidad, abriendo el camino para la propuesta de aquellas medidas de solución más adaptables al problema de cambio climático.

9.3.2. Medidas de adaptación al cambio climático propuestas

Para este caso práctico, de acuerdo a la metodología de diagnóstico de cambio climático y la matriz de sensibilidad desarrollada en este proyecto, se recomiendan las siguientes medidas:

- Medidas de adaptación estructurales:
 - Considerar medidas complementarias de mitigación del oleaje como por ejemplo, el uso de molos de abrigo o rompeolas sumergidos que ayuden a reducir la altura de oleaje o abatir su energía, basándose en resultados de modelos de predicción; por ejemplo, si se pronosticase umbrales de diseño o periodos de retorno superiores al seleccionado en el estudio de rediseño del paseo, se incrementaría nuevamente la vulnerabilidad de daño en el paseo, destacándose la necesidad de un análisis de vulnerabilidad multi amenaza que contemple todos los factores de impacto.
- Medidas de Adaptación No Estructurales:
 - Establecer monitoreo de variables hidrometeorológicas: instrumentos de medición en tiempo real que ayuden a determinar la evolución de la altura de oleaje extremo a futuro.
 - Desarrollar un modelo de predicción del oleaje extremo a futuro bajo contexto de cambio climático considerando tanto el nivel medio del mar como la marea meteorológica y capacitación de usuarios. Esto con el objetivo de revisar el periodo de diseño y su evolución futura bajo influencia del cambio climático, así como la efectividad del proyecto de diseño del nuevo Paseo Juan de Saavedra.
 - De la experiencia con la selección de los periodos de retorno, es conveniente recomendar su revisión para validación o recalibración en los códigos de diseño, considerando su posible variación a futuro bajo influencia del cambio climático, de manera que normalice su uso en casos futuros.
 - Establecer inspecciones periódicas al avance erosivo.

Debido a la incertidumbre futura de los actuales modelos predictivos, es importante establecer un control evaluativo del comportamiento de las variables hidrometeorológicas y su impacto en la Infraestructura de Zona Costera en Chile, para generar datos suficientes que permitan desarrollar un modelo de predicción más preciso y que pueda ser recalibrado periódicamente, por ejemplo, cada 5 años, para validar o ajustar los valores de demanda de diseño; en caso de ajuste, se tienen dos (02) opciones: continuar robusteciendo la estructura (aumentar altura y dimensiones) o construir obras de mitigación como por ejemplo, molos de abrigo o rompeolas sumergidos, que produzcan el rompimiento del oleaje antes de tocar costa.

Considerando las conclusiones del caso práctico N° 3 Paseo Juan de Saavedra, se recomienda tener en cuenta, obras de mitigación dentro del estudio de soluciones estructurales y asegurar la vida útil de las obras futuras y/o existentes con control de monitoreo de las variables de

impacto respaldando estudios probabilistas de predicción de estas variables y su comportamiento futuro, así como mantenimiento periódico más frecuente.

Recomendaciones de rediseño para medidas basadas en obras grises DOP

A continuación, se detallan algunas recomendaciones técnicas orientadas al rediseño de obras grises del caso de estudio. En tal sentido, se plantea:

Recomposición del borde costero a contar de la recuperación del sedimento a través de espigones sumergidos, que constituyen una barrera natural e integrada al paisaje costero. Estudio de los cauces aledaños al sector que recargan de sedimentos los bordes costeros y que pueden influenciar sedimentológicamente la conformación de dunas y otras barreras naturales. Cultivo de Macroalgas con el fin de reducir oleaje y acidificación.

El Paseo Juan de Saavedra original fue destruido por el impacto del temporal del 8 de agosto de 2015, ocasionando erosión en la defensa costera, desplazamiento de los tetrápodos y sobrepaso del oleaje afectando otros equipamientos urbanos aledaños al paseo.

Este paseo, fue rediseñado considerando una altura del nivel medio del mar de 33 cm proyectado para el año 2066 dentro del rango de vida útil del mismo, en un estudio soportado con ensayos de laboratorio para evaluación de efectividad de disipación del oleaje (porosidad de las piezas de defensa de ribera del paseo), generando hasta 03 alternativas de defensa costera.

Sin embargo, no contempló un análisis de sensibilidad que abarcará la condición de múltiples amenazas, por lo que no se consideraron los potenciales impactos de amenazas como erosión de borde costero, acidificación de mares, incremento del nivel máximo del viento, que entre otras medidas permitiera proponer soluciones de mitigación del oleaje a través de obras de abrigo y limitando la solución solo a la reconstrucción y acondicionamiento del paseo.

Otro aspecto destacable en el diseño de la nueva obra, es que si bien se considera un periodo de retorno T_r : 100 años para estabilidad de la estructura correspondiendo a una altura de 5.6 m, la misma aún quedaría por debajo de los 6.5 metros del temporal del 8-8-15, respaldando esto en los ensayos físicos para el escenario del temporal, pero sin considerar que el problema de cambio climático genera muchas incertidumbre en los modelos de predicción actuales, razón por la cual se requiere de una evaluación periódica que recopile data estadística de las variables de impacto que ayude a recalibrar estos modelos matemáticos, considerando además un estudio de la CEPAL (2011) que pronostica la variación de los periodos de retorno hacia el futuro producto del cambio climático.

Lo anterior significa que, si esos periodos de retorno varían, diferenciándose de los proyectados hasta ahora, en algún momento del futuro cercano la vulnerabilidad del paseo aumentará, porque su diseño no se ajustaría a lo que se ha pronosticado hasta ahora (diseño obsoleto).

Esa es la razón de la importancia de medidas complementarias, como el monitoreo necesario de las variables hidrometeorológicas como la altura de oleaje por medio de las mareas meteorológicas, que ayuden a establecer y recalibrar cada cierto tiempo los valores de demanda para efectos de diseño y evaluación del desempeño estructural del Paseo Juan de Saavedra dentro de su rango de vida útil.

De ocurrir una recalibración de los periodos de retorno o bien obtener alturas de oleaje pronosticadas superiores a las consideradas en el último diseño, deberá considerarse un rediseño del mismo, significando nuevos costos para efectos de robustecer la estructura o bien considerar medidas de mitigación del oleaje, reduciendo su altura o abatiendo su energía de impacto con molos de abrigo o rompeolas, sumergidos o no, que compensen el remanente superior de la posible nueva altura de oleaje respecto a la que se ha proyectado en el estudio de diseño del nuevo Paseo Juan de Saavedra.

Esto justifica sin duda, y frente a la incertidumbre del comportamiento de las variables de impacto a futuro por cambio climático, establecer esta metodología de diagnóstico de vulnerabilidad para efectos del diseño de las nuevas infraestructuras costeras en Chile o bien para el rediseño de las actuales, considerando parámetros estructurales como aumento la altura y modificación de las dimensiones actuales de las obras existentes, complementándose con soluciones de carácter no estructural como el monitoreo de las variables de impacto y desarrollo de modelos probabilistas de predicción.

Para los casos de playas e infraestructura que pueda estar ubicada en espacios abiertos o rurales, es necesario considerar medidas de obras “Brown” o marrones, así como las obras verdes, involucrando las primeras el movimiento de tierra para la recarga de playas, generación de playas artificiales que protejan comunidades costeras o bien el dragado de obras ya colmatadas con sedimento arrastrado por el oleaje marino. Las obras verdes en tantos, es una a solución amigable con el medio ambiente, ya sea por la necesidad de proteger o recuperar ecosistemas como humedales, estuarios o lagunas que protejan no solo a las comunidades costeras, sino por ejemplo a caletas pesqueras, ya que estos ecosistemas ofrecen refugio durante temporales y tormentas, y son efectivos contra el oleaje y la erosión costera, y son amigables con el ambiente porque forman parte de este.

Importante también es considerar la combinación de estos tipos de obras, mejor conocidas como obras híbridas, teniendo por ejemplo uso de lagunas bordeadas con muro de gaviones

que admiten vegetación pequeña, fusionándose con el medio ambiente, o bien un muelle de concreto protegido por un estuario o una laguna natural cercana a la costa que pudiera aprovecharse.

9.4. Análisis de propuestas técnicas de mejoramiento de metodologías de diseño

Al finalizar la evaluación de los casos de estudio, y en base a la experiencia en la aplicación de la metodología de integración de la resiliencia climática para proyectos de servicios de infraestructura hidráulicos y de zona costera, se han identificado una serie de recomendaciones técnicas, asociadas a la incorporación de la variabilidad climática futura distintas etapas del ciclo de vida de proyectos.

9.4.1. Recomendación(es) de metodología de diseño de servicios de infraestructura hidráulico

El objetivo de esta sección es el de identificar aquellas acciones y/o medidas que faciliten el proceso de integración de un enfoque prospectivo de los datos hidrometeorológicos que inciden directamente sobre las condiciones de borde o criterios de diseño (Ej. Caudal máximo Q_{max}) de servicios de infraestructura de control aluvional y manejo de cauces.

Antes es importante destacar que, existe un amplio rango de alternativas para la incorporación formal de la teoría de probabilidades, lo que implica distintos niveles de complejidad. La elección final de la alternativa dependerá principalmente de la variedad, calidad y resolución de los datos existentes, de la precisión requerida en el diseño, de la magnitud del riesgo involucrado y de la capacidad disponible, tanto técnica como humana. Considerando la disponibilidad de datos existentes al momento del desarrollo de este estudio, se desarrollarán las alternativas bajo un enfoque Screening. Esta metodología busca describir con mayor detalle los riesgos potenciales además se destaca que no contempla desarrollar una valoración de la incertidumbre ya que para esto se requiere el desarrollo de un estudio y simulaciones prácticas

9.4.2. Reformulación de metodologías y criterios de estimación de caudales de diseño

Como medidas de adaptación al cambio climático se sugiere invertir más recursos materiales, humanos y financieros en el desarrollo de estudios hidrológico de cuencas con el fin de ampliar la cobertura territorial y poder generar la actualización de hidrogramas de eventos de tormentas, para así comprender de manera más apropiada el patrón de lluvias según su duración, intensidad y composición desde un punto de vista global. A continuación, se explica en qué consisten los principales hallazgos y medidas de adaptación:

Variables de diseño

Tomando en consideración la relevancia en la modelación de variables de diseño en función de las simulaciones prospectivas del clima en una resolución regional o local, se establecen una serie de recomendaciones técnicas asociadas a la incorporación en el diseño el enfoque hidrológico frente a eventos extremos producto del cambio climático, a través de un método *screening*, definido como un método simple o de acercamiento inicial para determinar la posibilidad de existencia de riesgo (orden de magnitud). Ejemplos: factores de amplificación y el uso de modelos hidrológicos como *Variable Infiltration Capacity* (VIC).

Principios Generales del Paradigma de Diseño Hidráulico/Hidrológico Tradicional

Se requiere que, en los análisis de diseño de crecidas empleados comúnmente para servicios de infraestructura se considere los eventos de avenidas o crecidas extremas. Se ha desarrollado dos procedimientos para proporcionar estimados de estos eventos de crecidas extremas, el enfoque probabilístico y el enfoque determinista. El enfoque probabilístico estima los periodos de retorno o las probabilidades de excedencia de eventos hipotéticos de crecidas extremas mediante el estudio estadístico de los eventos históricos pasados. El enfoque determinista por su parte estima la magnitud de un evento de avenida extrema considerando las condiciones más severas tanto meteorológicas como hidrológicas que son razonablemente posibles en el área de diseño del servicio de infraestructura, sin tener en cuenta la probabilidad de ocurrencia del evento. La selección de una crecida de diseño debe tomar en consideración el nivel de riesgo asociado con ese evento. El criterio conservador empleado al seleccionar una crecida de diseño debería basarse en un análisis de los riesgos de las áreas aguas arriba desde la falla del servicio de infraestructura y el costo de prevenir tales fallas.

Enfoque Probabilístico

Durante la etapa operativa de un servicio de infraestructura, se asume generalmente que el mantenimiento de rutina asegurará que la instalación se encuentre en buenas condiciones antes de que comience la estación anual de inundaciones y/o crecidas. Por consiguiente, el periodo de estabilidad que interesa comprende solamente un año. En tal caso, generalmente es aceptable un diseño que resista la mayor crecida que pueda ocurrir en un periodo de 100 años si la única preocupación es la pérdida del servicio de infraestructura. La mayor crecida que pueda ocurrir en un periodo de 100 años tiene una probabilidad de excedencia de 0.01, lo que significa que la crecida tiene una posibilidad de ocurrencia (o de ser excedida) de 1% en cualquier año dado. En los casos en que existan motivos de preocupación por la salud y seguridad pública o en los casos en que no se efectúe el mantenimiento de rutina, como, por ejemplo: después de que la instalación haya cesado sus operaciones, es aconsejable un nivel de riesgo correspondiente a una probabilidad de excedencia mucho menor de 0.01.

Los estudios de probabilidad se basan en los registros de eventos aleatorios. En base a dichos registros, se puede determinar una curva de frecuencia. Sin embargo, debido a que la mayoría de los registros de precipitación son generalmente muy cortos (generalmente 100 años o en la mayoría de los casos menos), las determinaciones de frecuencias son a menudo poco confiables para los eventos de crecida extrema. Una regla general práctica es que la extrapolación de una curva de frecuencia probablemente no es confiable para cantidades de precipitación que tienen intervalos de repetición de más del doble de longitud del registro, es decir, es necesario un registro confiable de por lo menos 50 años para predecir la precipitación mayor producida en un periodo de 100 años. En los casos en que el registro se considere muy corto para proporcionar los estimados confiables de frecuencia de precipitación, los registros de áreas cercanas pueden ser empleados para extender el registro en el sitio e incrementar la confiabilidad de los datos. Esto se puede efectuar siempre que haya un alto grado de correlación entre los registros. Si no están disponibles los registros confiables de precipitación o si el nivel de riesgo es tal que es aconsejable una crecida de diseño que tenga una probabilidad de excedencia menor a 0.01, se debería tomar en consideración el estimar un caudal de crecida de diseño que emplee el enfoque determinista.

Enfoque Determinista

El enfoque determinista estima una crecida de diseño sin tener en cuenta la probabilidad de su ocurrencia. Dicho evento se denomina generalmente como Precipitación Máxima Probable (PMP) y es la mayor intensidad de lluvia que es físicamente posible en un área geográfica. Debería reconocerse, sin embargo, que, ya que muchos servicios de infraestructura son de menor dimensión, no sería posible justificar el diseño para un evento de precipitación extrema como tal. En estos casos, debería ser responsabilidad del ingeniero o profesional a cargo del diseño el determinar el criterio que se puede dar a un servicio de infraestructura para el caso de la tempestad más fuerte sin imponer costos que no sean razonables o un riesgo indebido al ambiente o a las personas que podrían ser afectadas desfavorablemente. A la tempestad de diseño para un servicio de infraestructura se le puede designar como la fracción de la PMP, dependiendo del nivel de riesgo. Por ejemplo, un sitio de alto riesgo donde una falla pondría en peligro directamente la vida humana de un asentamiento humano tendría que ser diseñado para la PMP total, mientras un sitio de riesgo moderado podría ser diseñado para 0.75 PMP, y un sitio de bajo riesgo donde no hay vidas humanas o estructuras que estén amenazadas directamente podría diseñarse para 0.5 PMP.

Los datos de PMP deberían ser obtenidos de fuentes publicadas, lamentablemente con referencia a países del extranjero y no necesariamente reflejan la realidad del clima y la geomorfología de Chile. Sin embargo, ya que los registros de precipitación en Chile aún siguen siendo en algunos lugares del país limitados, puede ser que los datos de PMP no estén disponibles. Si este es el caso, se tendrá que desarrollar los datos de PMP. Un factor básico para

desarrollar límites superiores de precipitación dentro de una región es una revisión de las principales tempestades de lluvia que han ocurrido en la cuenca. Siempre constituye un problema la falta de suficientes datos de precipitaciones, particularmente en las áreas montañosas o más alejadas del territorio donde no hay estaciones pluviométricas. Por ejemplo, un método empleado en los EEUU para resolver esta deficiencia es el procedimiento mediante el cual las tempestades históricas son transpuestas de otros lugares. Este procedimiento asume que las cantidades de precipitación que han ocurrido en otros lugares podrían producirse en la cuenca de la que se tienen datos limitados, es decir que las áreas son meteorológicamente homogéneas.

El paso inicial para preparar un estimado de PMP es efectuar un análisis de los patrones de precipitación de las tempestades de registro en el área, así como en otras áreas que son consideradas meteorológicamente homogéneas. El siguiente paso es determinar las condiciones meteorológicas que ocasionaron las grandes cantidades de precipitación. Esto se efectúa examinando patrones climáticos sinópticos y procesos dinámicos de todas las tempestades para aislar las tempestades que han ocurrido meteorológicamente en el punto de interés y que podrían haber producido una precipitación extrema. En este paso, los factores atmosféricos básicos (agua precipitable efectiva, temperaturas, vientos, etc.) son examinados junto con los factores físicos como diferencias en el terreno, es decir, altura, orientación e inclinación de taludes. Luego, se evalúa el suministro de humedad que estaba disponible durante el periodo de precipitación intensa. Entonces se incrementa las precipitaciones apropiadas para la transposición y las precipitaciones que han ocurrido en la cuenca mediante la relación entre la humedad más extrema que puede ocurrir y la humedad observada de la tempestad real. Para las precipitaciones que ocurrieron fuera de la cuenca, se hizo un ajuste adicional para la diferencia en disponibilidad de humedad entre la ubicación de la precipitación y de la cuenca.

La topografía también afecta significativamente a las precipitaciones. Tal como se mencionó en los párrafos anteriores, la topografía puede incrementar las tasas y cantidades de precipitación por el alza como resultado de forzar el aire por encima de las barreras orográficas. Por lo tanto, también se debe considerar los efectos orográficos al estimar las cantidades de PMP en regiones montañosas.

Riesgo de Falla

Tanto el enfoque probabilístico como el determinista comprenden riesgos de falla. No existen pautas definidas para determinar niveles aceptables de riesgo de falla para la mayoría de los tipos de servicios de infraestructura. Sin embargo, las probabilidades de falla no deberían exceder unos cuantos puntos de porcentaje dependiendo de las consecuencias de falla para los habitantes en dirección aguas abajo del escurrimiento de un cauce, el uso del suelo también en dirección aguas abajo del sentido de escurrimiento del cauce, y la instalación de servicio de

infraestructura en su mismo. Podrían ser también significativas las consecuencias ambientales de falla, como daño o degradación de ecosistemas.

Con el fin de estimar la frecuencia (intervalo de recurrencia) de la crecida a considerar en el diseño de un servicio de infraestructura, se debe determinar un riesgo aceptable de falla. Cuando se determina la aceptabilidad del riesgo de falla, se debe considerar las consecuencias de falla para los habitantes de cuencas o lugares en dirección aguas abajo del sentido del cauce, uso de tierras o suelos en sentido aguas abajo del cauce o el daño ambiental potencial. Por ejemplo, si se determina que una probabilidad de falla de 5% es un nivel aceptable de riesgo durante la operación, para una instalación con una vida operativa de 20 años, entonces la crecida a considerar en el diseño de dicho servicio de infraestructura debería tener un intervalo de recurrencia de (r) de 390 años.

$r = 20 [1/0.05 - 1/2] = 390$ años Para una posibilidad de falla de 10%, el intervalo de recurrencia sería 190 años.

En la Tabla siguiente se proporciona ejemplos de intervalos de recurrencia de crecidas de diseño para riesgos asumidos de fallas. Se debería observar que en ningún caso la crecida máxima que puede ocurrir en un periodo de 100 años presenta un nivel aceptable de riesgo de falla.

Vida del Diseño (años)	Riesgo Aceptable de Falla (%)	Intervalo de Recurrencia de Diseño (años)
20	5	390
	10	190
	18.2	100
30	5	585
	10	285
	26	100
50	5	975
	10	475
	40	100
100	1	9,950
	5	1,950
	10	950
500	1	49,750
	5	9,750
	10	4,750
1000	1	99,500
	5	19,500
	10	9,500

Ilustración 30. Tabla de intervalos de recurrencia de crecidas de diseño para servicios de infraestructura
Fuente: Elaboración Propia.

Propuesta de medidas y cambios con un nuevo enfoque o paradigma de definición de crecidas de diseño

De acuerdo con lo indicado anteriormente, en la práctica de la hidráulica/hidrología como especialidad de la ingeniería civil, se ha considerado el enfoque probabilístico/estadístico para llevar a cabo las estimaciones de caudales o flujos de crecidas, los cuales son considerados para el diseño o dimensionamiento de las obras asociadas a servicios de infraestructura hidráulica. Este enfoque ha inducido a los diseñadores o proyectistas de obras civiles considerar los datos históricos de eventos registrados y medidos del pasado de precipitaciones o caudales de cauces, para periodos de tiempo no muy extensos y quizás poco representativos de los fenómenos naturales del planeta, que se han venido dando desde hace millones de años.

Una crítica a esta metodología podría argumentar que parece poco sensato y poco conservador asumir que una serie de datos de 30 años de un determinado lugar o cuenca podría representar el comportamiento futuro de las precipitaciones en diferentes escalas temporales, épocas o temporadas del año (verano, otoño, primavera, verano) y diferentes escalas espaciales (parte baja, media y alta de la cuenca).

Es por esto por lo que en este documento a continuación se proponen una serie de medidas de índole indicativas, para analizar y discutir la incorporación o amplificación de algunos factores en la determinación de los flujos o caudales de crecidas para implementar en diseño, y así incorporar la incertidumbre del futuro, cambio climático y brindar un dimensionamiento menos sensible desde el punto de vista de robustez, redundancia, funcionalidad e imagen del servicio de infraestructura hidráulica.

Se reitera que estas medidas son indicativas, es decir son propuestas que, en un futuro cercano y parte de otra instancia, deberán convocar a expertos y especialistas en el tema para que puedan debatir y analizar la modificación de normas de diseño, guías de diseño y manuales de diseño de infraestructura hidráulica actualmente vigentes en el país, definidos principalmente bajo el enfoque probabilístico/estadístico.

Junto con esto se estima que para formular medidas de adaptación al cambio climático y así disminuir la vulnerabilidad de los servicios de infraestructura hidráulica es necesario definir en un contexto de cambio climático un nivel o umbral de riesgo a asumir respecto a la falla o seguridad que tendrá las obras respectivas de acuerdo con el servicio que ellas brinden. Se entiende que la autoridad competente y experta en el tema, en este caso el MOP, debe abrir el debate para definir estos umbrales de riesgo o seguridad vinculado a los costos asociados respectivos.

Cuencas aforadas (simulación lluvia – escorrentía medida con datos reales de terreno)

A continuación, se presentan una de las modalidades de estimación de caudales de crecidas en la denominada condición de cuencas hidrográficas que se encuentran aforadas, o sea, dichas cuencas han sido medidas con respecto a las precipitaciones caídas y los flujos/caudales/gastos generados en los principales cauces. Este método permite contar con datos reales manifestados en las cuencas, cauces y diversos territorios. Para determinación de la tormenta de diseño sería recomendable contar con información obtenida a través de un pluviógrafo, ya que este equipo provee información instantánea, sin embargo, la mayoría de las estaciones de medición de precipitaciones solo cuentan con pluviómetros que solo proveen de valores medios.

Estadística de series de tiempo de datos pluviométricos

Dado que el país tiene limitaciones en la disponibilidad de datos ya sea hidrométricos como pluviométricos y la mayor parte de las cuencas hidrográficas no se encuentran instrumentadas, generalmente se utilizan métodos indirectos para la estimación del caudal de diseño (métodos de cuencas aforadas).

La representatividad, calidad, extensión y consistencia de los datos es primordial para el inicio del estudio hidrológico, por ello, se recomienda contar con un mínimo de 25 años de registro que permita a partir de esta información histórica la predicción de eventos futuros con el objetivo que los resultados sean confiables, asimismo dicha información deberá incluir los años en que se han registrado los eventos del fenómeno “El Niño”, sin embargo, dado que durante el evento del fenómeno del niño la información no es medida ya que normalmente se estiman valores extraordinarios, esta información debe ser evaluada de tal manera que no se originen sobredimensionamientos en las obras.

Indiscutiblemente, la información hidrológica y/o hidrometeorológica básica para la realización de un estudio para diseño de un servicio de infraestructura correspondiente, deberá ser representativa del área en donde se emplaza el servicio de infraestructura hidráulica.

En este contexto una de las medidas de adaptación propuestas es considerar modelamientos de escenarios futuros bajo un enfoque determinístico, que incluyan los factores del cambio climático global, y de esta forma tener una envolvente de escenarios favorables y desfavorables de eventos de precipitaciones y/o sequías. Junto con los escenarios es relevante incorporar la variabilidad de la temperatura isoterma cero o línea de nieves en dichos escenarios, lo cual ratifica una variabilidad de la escala espacial tanto en latitud y/o longitud como en el sentido de altitud.

Curvas de Intensidad – Duración - Frecuencia

Las curvas intensidad – duración – frecuencia (IDF) son un elemento de diseño que relacionan la intensidad de la lluvia, la duración de esta y la frecuencia o recurrencia con la que se puede presentar, es decir su probabilidad de ocurrencia o el periodo de retorno.

Para determinar estas curvas IDF se necesita contar con registros pluviográficos de lluvia en el lugar de interés y seleccionar la lluvia más intensa de diferentes duraciones en cada año, con el fin de realizar un estudio de frecuencia con cada una de las series así formadas. Es decir, se deben examinar los hietogramas de cada una de las tormentas ocurridas en un año y de estos hietogramas elegir la lluvia correspondiente a la hora más lluviosa, a las dos horas más lluviosas, a las tres horas y así sucesivamente. Con los valores seleccionados se forman series anuales para cada una de las duraciones elegidas. Estas series anuales están formadas eligiendo, en cada año del registro, el mayor valor observado correspondiente a cada duración, obteniéndose un valor para cada año y cada duración.

Como medidas de adaptación al cambio climático se propone zonificar el territorio con curvas de IDF, y caracterizarlo de manera sitio-específica y así comprender el comportamiento de lugares como por ejemplo cuencas donde se lleven a cabo actividades humanas en asentamientos urbanos que podrían verse afectados por inundaciones, crecidas o aluviones. El objetivo de esta medida es poder caracterizar de mejor manera la dinámica de las precipitaciones en diferentes lugares del territorio y considerando el cambio climático previsto, sin necesidad de tener que llegar a aproximación de valores o interpolaciones.

Hidrogramas de escorrentía

Como ya sabemos, las características de una tormenta son: La duración de la lluvia, el patrón intensidad – tiempo, la distribución espacial de la lluvia y la cantidad de escorrentía o flujo de escurrimiento de aguas en la superficie de la cuenca. Por lo tanto, el hidrograma es el gráfico que permite visualizar el flujo o caudal generada por cada centímetro (o una pulgada) de agua caída por una tormenta con una duración especificada.

Los hidrogramas nos permiten modelar la escala temporal de la tormenta o aguacero, permitiendo así representar los *peaks* o caudales máximos instantáneos que se puedan dar en algún cauce de la cuenca.

Como medida de adaptación al cambio climático se sugiere invertir recursos materiales, humanos y financieros en el estudio y generación modelos hidrológicos más complejos en el que intervengan más variables que las actuales y que considere el cambio climático previsto estas son: precipitación o caudal máximo instantáneo. Este modelo será calibrado sobre la base histórica podrá ser posible determinar un caudal de diseño para cualquier período de retorno en el futuro teniendo en cuenta las tendencias mundiales de temperatura por efecto del cambio

climático para 50 años en el futuro. El modelo aconsejable es *Variable Infiltration Capacity* (VIC por sus siglas en inglés), (Liang et al., 1994) ya empleado por la Universidad Católica de Chile y de Chile, entre otras, pero no incorporada a los manuales de diseño del MOP.

Cuencas no aforadas (simulación lluvia – escorrentía artificial con datos sintéticos)

A continuación, se presentan una de las modalidades de estimación de caudales de crecidas en la denominada condición de cuencas hidrográficas que no se encuentran aforadas. Como es conocido en el territorio, no todas cuencas hidrográficas cuentan con instrumentos para el registro de precipitaciones y aforo de caudales de cauces. En estos casos, se recurre a fórmulas y procedimientos obtenidos a través del estudio de cuencas de otros lugares del mundo que han sido caracterizadas y parametrizadas, de forma tal que con estos modelos fisco-matemáticos es posible obtener de una manera artificial, construida o sintética estimaciones de caudales de crecidas.

Hidrogramas sintéticos

Además de los hidrogramas naturales, existen hidrogramas sintéticos que son simulados, artificiales y se obtienen usando las características fisiográficas y parámetros de la cuenca de interés. Su finalidad es representar o simular un hidrograma representativo del fenómeno hidrológico de la cuenca, para determinar el caudal punta o máximo para diseñar. Algunos de los métodos más conocidos son:

- Hidrograma sintético triangular del SCS,
- Hidrograma sintético adimensional del SCS,
- Método Hidrograma Unitario Sintético de Snyder,
- Método de tránsito de avenidas de Clark.

Una de las desventajas y limitaciones de estos métodos es su representatividad en lugares del mundo diferentes a las características de las cuencas donde fueron calibrados. Por ejemplo, muchos métodos son de EEUU y muchas cuencas por ejemplo andinas en países de Sudamérica no son similares a cuencas de la región de Tulsa en EEUU. El clima también es distinto en estos lugares, lo cual genera aún más diferencias y falta de representatividad.

Una medida de adaptación al cambio climático que se propone es generar bajo el estudio de cuencas en macrozonas del territorio hidrogramas unitarios sintéticos que representen la simulación de precipitaciones – escorrentía acorde a la geomorfología, clima, uso del suelo, ecosistemas propios del país, con coeficientes calibrados y ajustados para cuencas hidrográficas del territorio nacional.

Fórmula racional

Estima el caudal máximo a partir de la precipitación, abarcando todas las abstracciones en un solo coeficiente C (coeficiente. escorrentía) estimado sobre la base de las características de la

cuenca. Considera que la duración de la precipitación es igual al tiempo de concentración de la cuenca. Supone que una precipitación constante de intensidad I (mm/hr) cae homogéneamente sobre una cuenca de superficie A (Km²). Este método es muy usado para cuencas, $A < 10$ Km².

En este método considera el tiempo, no proporciona la forma del hidrograma: es un cálculo en régimen permanente y sólo calculamos el caudal constante que se obtendría como resultado de una precipitación constante. Una de las desventajas de aplicar este método, es que por su simplicidad solamente puede ser usado para cuencas pequeñas Área < 10 Km² y con precipitaciones de corta duración y homogéneas.

Como medida de adaptación al cambio climático se propone aplicar algunos factores o coeficientes de calibración a la fórmula racional que apliquen a cada una de las cuencas pertenecientes a las grandes macrozonas hídricas del territorio nacional y que tome en cuenta el cambio climático previsto.

9.4.3. Reformulación de metodologías y criterios de dimensionamiento de obras hidráulicas

Fórmula de Manning

El cálculo hidráulico considerado para establecer las dimensiones mínimas de la sección transversal para ductos, canales, badenes, vertederos, entre otros tipos de obras asociados a servicios de infraestructura a proyectarse, es lo establecido por la fórmula de Robert Manning, popularmente conocida como la “fórmula de Manning” para canales abiertos y tuberías, por ser el procedimiento más utilizado y de fácil aplicación, la cual permite obtener la velocidad del flujo y caudal para una condición de régimen uniforme mediante la siguiente relación.

$$V = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{n}$$

$$R = A / P$$

$$Q = VA$$

Donde:

Q : Caudal (m³/s)

V : Velocidad media de flujo (m/s)

A : Área de la sección hidráulica (m²)

P : Perímetro mojado (m)

R : Radio hidráulico (m)

S : Pendiente de fondo (m/m)

n : Coeficiente de Manning

Como medida de adaptación se recomienda estudiar la posibilidad de recalibrar los coeficientes de la fórmula de Manning de modo tal que incorporen factores de sensibilidad de las obras como son la robustez del diseño, la redundancia y la funcionalidad de los diseños, de manera tal que no se vean afectados por los efectos del cambio climático. Se hace necesario evaluar a través de un estudio para una etapa posterior de tipo costo-beneficio sobre el sobredimensionamiento de las obras de servicios de infraestructura y pérdidas o daños materiales/humanos/ambientales.

Obras de protección de cauces

Existen una serie de metodologías empíricas fruto de la investigación a nivel de laboratorio o pruebas piloto que ha permitido obtener ecuaciones o fórmulas que permiten dimensionar las obras de protección en lechos de cauces y así evitar erosión, socavación y sobrepaso de los lechos de ríos.

Enrocados

Para el diseño del enrocado existen varios métodos, en esta sección se presentarán algunos métodos para el cálculo del tamaño de la piedra de protección. El método de *Maynard* propone las siguientes relaciones para determinar el diámetro medio de las rocas a usarse en la protección.

$$d_{50} = C_1 (yF^3)$$

$$F = C_2 \left(\frac{V}{\sqrt{gy}} \right)$$

Donde:

d_{50} : Diámetro medio de las rocas

y : Profundidad de flujo

V : Velocidad media del flujo.

F : Número de Froude

C_1 y C_2 : Coeficientes de corrección.

Los valores recomendados de C_1 y C_2 se muestran a continuación:

$$C_1 \begin{cases} 0.28 & \text{Fondo plano} \\ 0.28 & \text{Talud } 1V : 3H \\ 0.32 & \text{Talud } 1V : 2H \end{cases}$$

$$C_2 \begin{cases} 1.5 & \text{Tramos en curva} \\ 1.25 & \text{Tramos rectos} \\ 2.0 & \text{Extremos de espigones} \end{cases}$$

Como medida de adaptación se recomienda estudiar la posibilidad de recalibrar los coeficientes de corrección de la fórmula de *Maynard* de modo tal que incorporen factores de sensibilidad de las obras como son la robustez del diseño, la redundancia y la funcionalidad de los diseños, de manera tal que no se vean afectados por los efectos del cambio climático. Se hace necesario evaluar a través de un estudio para una etapa posterior de tipo costo-beneficio acerca del sobredimensionamiento de las obras de servicios de infraestructura y pérdidas o daños materiales/humanos/ambientales.

Por otra parte, el Método del *U. S. Department of Transportation* propone las siguientes relaciones para el cálculo del diámetro medio de las rocas.

$$d_{50}^I = \frac{0.001V^3}{y^{0.5}K_1^{1.5}}, \text{ en sistema inglés}$$

$$K_1 = \left[1 - \left(\frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi} \right) \right]^{0.5}$$

$$C = C_{sg} C_{sf}$$

$$C_{sg} = \frac{2.12}{(\gamma_s - 1)^{1.5}}$$

$$C_{sf} = \left(\frac{FS}{1.2} \right)^{1.5}$$

$$d_{50} = C d_{50}^I$$

Donde:

d_{50} : Diámetro medio de las rocas

V : Velocidad media del flujo.

y : Profundidad de flujo

K_1 : Factor de corrección

θ : Ángulo de inclinación del talud

ϕ : Ángulo de reposo del material del enrocado.

C : Factor de corrección

γ_s : Peso específico del material del enrocado

FS : Factor de seguridad

Este método considera un factor de seguridad en el diseño o dimensionamiento de los elementos tipo enrocados, los cuales se enuncian en la siguiente tabla:

CONDICIÓN	RANGO DEL FS
Flujo uniforme, tramos rectos o medianamente curvos (radio de la curva/ancho del cauce > 30). Mínima influencia de impacto de sedimentos y material flotante.	1.0 – 1.2
Flujo gradualmente variado, curvatura moderada (10 < radio de la curva/ancho del cauce < 30). Moderada de impacto de sedimentos y material flotante.	1.3 – 1.6
Flujo rápidamente variado, curvas cerradas (radio de la curva/ancho del cauce < 10), flujos de alta turbulencia, flujo de turbulencia mixta en estribos de puentes. Efecto significativo de impacto de sedimentos y material flotante.	1.6 – 2.0

Ilustración 31. Factores de seguridad para dimensionamiento de enrocados
Fuente: U.S. Department of transportation

Como medida de adaptación al cambio climático se sugiere la revisión y modificación de los factores de seguridad de la fórmula antes presentada, de manera tal que se contextualice en las macrozonas hídricas de Chile y de acuerdo a los resultados de un análisis costo-beneficio permitan un nivel de sobredimensionamiento de las obras de servicios de infraestructura.

Gaviones

Como recomendaciones generales para el dimensionamiento de gaviones, desde el punto de vista hidráulico, se tienen las siguientes consideraciones:

- El tamaño de las piedras debe ser suficientemente grandes y homogéneas para que no produzcan pérdidas de material a través de las mallas de los gaviones, recomendándose en lo posible, piedras de tamaño nominal 1.5 veces el tamaño mínimo de la abertura de la malla.
- Las piedras deben seleccionarse, tamizarse y limpiarse antes de rellenar las cajas de gaviones.
- La altura del muro de gaviones debe ser mayor que el nivel esperado de la crecida.
- La sección transversal del muro de gaviones debe ser estable.
- El muro de gaviones debe contar con un colchón anti-socavante que se extienda horizontalmente sobre la orilla una distancia mínima de 1.5 veces la profundidad de socavación esperada.

La siguiente expresión es habitualmente considerada para ser usada para encontrar el tamaño de la roca, es denominado el Método de Maza Álvarez:

$$D_m = \frac{135V}{\gamma_s^{1.03} (y^{1/(2+y)} - 0.15V)}$$

Donde:

D_m : Diámetro medio de la roca (m)

V : Velocidad media del flujo ($V < 4.5\text{m/s}$)

y : Tirante de flujo (m)

γ_s : Peso específico del material de protección (Kg/m^3)

Como medida de adaptación al cambio climático se sugiere la revisión y modificación de la velocidad máxima de flujo indicada en la fórmula antes presentada, de manera tal que sea una velocidad representativa de inundaciones / aluviones de distintas macrozonas del país en un contexto de cambio climático.

9.5. Resumen de propuestas de reformulación de metodología de diseño de servicios de infraestructura hidráulica

A continuación, se presentan 2 tablas con el resumen de propuestas de reformulación de metodologías de diseño de servicios de infraestructura:

Tabla 46. Resumen de comparación de alternativas de reformulación de caudales de diseño

Método convencional	Descripción/principio	Antecedentes	Herramientas
Modelamiento de escenarios futuros bajo un enfoque determinístico	Desarrollar varias simulaciones de distintos escenarios, favorables y desfavorables para eventos de precipitaciones y/o sequías. espacial tanto en latitud y/o longitud como en el sentido de altitud.	<ul style="list-style-type: none"> Incorporar la variabilidad isoterma cero o línea de nieves en dichos escenarios. Data hidrometeorológica prospectiva de alta resolución (5 km) 	CR2, INH, Universidades, tesis de pre y posgrado, publicaciones
Zonificar el territorio con curvas de IDF calibradas	Caracterización detallada de la dinámica de las precipitaciones en diferentes lugares del territorio (Macrozonas, cuencas), sin necesidad de tener que llegar a aproximación de valores o interpolaciones	<ul style="list-style-type: none"> Data hidrometeorológica prospectiva de alta resolución (5 km) 	CR2 INH, Universidades, tesis de pre y posgrado, publicaciones
Generación de hidrogramas de eventos de tormentas	Desarrollo de hidrogramas de eventos y tormentas que permitan comprender de manera más apropiada el patrón de lluvias según su	<ul style="list-style-type: none"> Data hidrometeorológica prospectiva de alta resolución (5 km) 	CR2 INH, Universidades, tesis de pre y posgrado, publicaciones

	duración, intensidad y composición.		
Generación de hidrogramas unitarios sintéticos de precipitación	Desarrollo de hidrogramas unitarios sintéticos que representen la simulación de precipitaciones escorrentía acorde a la geomorfología, clima, uso del suelo, ecosistemas propios del país	<ul style="list-style-type: none"> Data hidrometeorológica prospectiva de alta resolución (5 km) 	CR2 INH, Universidades, tesis de pre y posgrado, publicaciones
Generación de hidrogramas unitarios sintéticos de escorrentía	Desarrollo de hidrogramas unitarios sintéticos que representen la simulación escorrentía acorde a la geomorfología, clima, uso del suelo, ecosistemas propios del país, con coeficientes calibrados y ajustados para cuencas hidrográficas del territorio nacional.	<ul style="list-style-type: none"> Data hidrometeorológica prospectiva de alta resolución (5 km) 	CR2 INH, Universidades, tesis de pre y posgrado, publicaciones
Aplicación de factores o coeficientes de calibración a la fórmula racional de cálculo de caudales	Desarrollo de factores de calibración de fórmulas racionales de caudales de acuerdo a las grandes macrozonas hídricas y/o cuencas del territorio nacional	<ul style="list-style-type: none"> Data hidrometeorológica prospectiva de alta resolución (5 km) 	CR2 INH, Universidades, tesis de pre y posgrado, publicaciones

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 47. Resumen de comparación de alternativas de reformulación de metodologías de dimensionamiento

Método convencional	Descripción/principio	Antecedentes	Herramientas
Recalibrar los coeficientes de la fórmula de Manning	Incorporar factores de sensibilidad de las obras como; la robustez del diseño, la redundancia y la funcionalidad de los diseños, de manera tal que no se vean afectados por los efectos del cambio climático	Universidades	INH y pruebas de terreno en cauces reales de Chile
Recalibrar los coeficientes de corrección de la fórmula de <i>Maynard</i>	de modo tal que incorporen factores de sensibilidad de las obras como son la robustez del diseño, la redundancia y la funcionalidad de los diseños, de manera tal que no se vean afectados por los efectos del	Universidades	INH y pruebas de terreno en cauces reales de Chile

	cambio climático.		
Modificar los factores de seguridad de la fórmula de dimensionamiento de enrocados	se sugiere la revisión y, de manera tal que se contextualice en las macrozonas hídricas de Chile y de acuerdo a los resultados de un análisis costo-beneficio permitan un nivel de sobredimensionamiento de las obras de servicios de infraestructura	Universidades	INH y pruebas de terreno en cauces reales de Chile Completar
Modificar la velocidad máxima de flujo en la fórmula de dimensionamiento de gaviones	de manera tal que sea una velocidad representativa de inundaciones / aluviones de distintas macrozonas del país.	Universidades	INH y pruebas de terreno en cauces reales de Chile Completar

Fuente: Elaboración propia.

9.5.1. Recomendación(es) de metodología de diseño de servicios de infraestructura de zona costera

El objetivo de esta sección es el de identificar aquellas acciones y/o medidas que faciliten el proceso de integración de un enfoque prospectivo de los datos hidrometeorológicos que inciden directamente sobre las conclusiones de borde o criterios de diseño (Ej. Altura de la Ola Hw) de servicios de infraestructura de zona costera.

9.5.2. Reformulación de metodologías y criterios de estimación de altura máxima de oleaje

A continuación, se describen las recomendaciones técnicas para revisión de los métodos de diseño en Infraestructura de Zona Costera:

Periodo de retorno (Tr)

De acuerdo con, (CEPAL año 2011) se establece una evolución del Tr de 50 años para altura significativa de la Ola, con predicción de una disminución en el transcurso de siglo actual en 4 localidades de Chile. Asimismo, este es el estudio establece un precedente de la necesidad de justificar la revisión de los Tr en las normas de diseño de servicios de infraestructura de zona costera vigentes.

Polígono de estudio	Lon (°)	Lat (°)	2010	2040	2070
Concepción (CHL)	-73,09	-36,83	50	41,94	35,25
Valparaíso (CHL)	-71,63	-32,96	50	41,70	34,73
Arica (CHL)	-70,45	-18,38	50	34,29	23,86
I. Taggart (CHL)	-75,58	-49,45	50	52,49	55,02

Ilustración 32. Evolución del periodo de retorno de 50 años de altura de ola significativa en varios puntos de estudio

Fuente: CEPAL, 2011

En base a este pronóstico de la CEPAL, es necesario iniciar un levantamiento de información estadística que ayude a confirmar o recalibrar los actuales periodos de retorno de diseño asociados a la altura de oleaje en Chile. Para ello son necesarios los instrumentos de monitoreo hidrometeorológico y su aplicación en modelos de predicción probabilísticos.

Modelos Probabilísticos en el Diseño

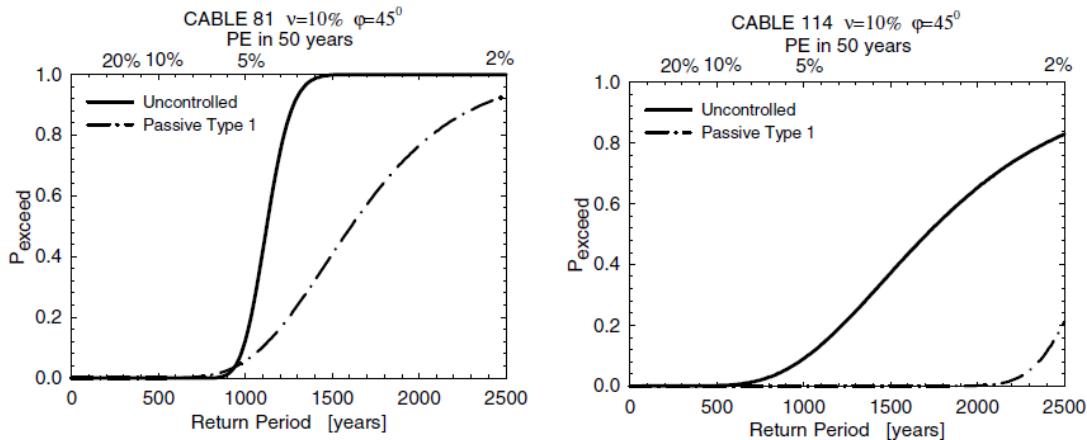
En el documento de Evaluación de Riesgo de Infraestructura Costera bajo contexto de Cambio Climático, se describen estudios probabilísticos para altura de oleaje y direccionalidad sobre el temporal del 2015, con data disponible a la fecha, Winkler, P. (2015), de allí se destaca la de ERA-I y DOP. Esta data sirve de base estadística para proyecciones futuras y realización de simulaciones aleatorias (Montecarlo) que establezcan los primeros modelos de predicción.

Base de datos	Inicio	Término	Distribución	Coficiente	R ²	Umbral
FUGRO	1989-09-09	1991-05-31'	Weibull	k = 1.0	0,99	5,75 [m]
ERA-I	1979-01-01'	2014-12-31'	Weibull	k = 1.4	0,99	4,99 [m]
IFREMER	1990-01-01'	2014-12-31'	Weibull	k = 1.4	0,98	4,81 [m]
NOAA CFSR	1979-01-01'	2010-12-31'	Weibull	k = 1.4	0,94	5,48 [m]
NOAA WWII	1997-01-01'	2010-12-31'	Weibull	k = 1.0	0,93	4,83 [m]
EEM	1979-01-01'	2010-12-31'	Weibull	k = 1.4	0,94	7,24 [m]
DOP	1980	2013	-	-	-	Máx. anual

Ilustración 33. Información sobre bases de datos y método de análisis de valores extremos
Fuente: CEPAL, 2011

Se recomienda para efectos de diseño el desarrollo de modelos de predicción probabilísticos con la data existente, complementada mediante simulaciones aleatorias como el método de Montecarlo o Latino Hipercúbico, que generen:

- Modelos de Predicción de Altura de Oleaje: estimación de la magnitud y comportamiento de las amenazas climáticas a futuro que impactan la Infraestructura de zona costera. Deben ejecutarse en base a data disponible o simulaciones aleatorias.
- Curvas de Fragilidad: una función de probabilidad acumulada que indica la vulnerabilidad respecto al aumento de una variable de impacto, por ejemplo, la altura de oleaje o el periodo de retorno. Parten de los modelos de predicción y son muy populares en la actualidad para evaluación del desempeño sismo resistente de estructuras. Estas curvas pueden ayudar a determinar la vulnerabilidad bajo un enfoque probabilista integrado al diseño. Un rediseño correcto, moverá la curva de fragilidad de izquierda a derecha, reduciendo la vulnerabilidad.



Fuente: Reliability of a Cable Stayed Bridge, G.P. Cimellaro y M. Domaneschi.

A modo de referencia, en la ilustración anterior, se encuentran las curvas de fragilidad del Puente Memorial Bill Emerson, río Missisipi, USA, para el análisis del comportamiento a tensión de los cables 81 y 114 con control pasivo (uso de aisladores en el modelo estructural) y sin control pasivo (sin aisladores), bajo acelerogramas sintéticos (sismos artificiales). En ambos casos, la curva de fragilidad del modelo sin control pasivo se movió hacia la derecha cuando el modelo estructural del puente incluyó los aisladores sísmicos (incluyó control pasivo), lo que se traduce en una disminución de la vulnerabilidad y un mejor desempeño estructural bajo la acción sísmica.

En tal sentido, si, por ejemplo, para una defensa costera, ajustado al contexto de cambio climático, se busca tener el mismo efecto observado en la gráfica de las curvas de fragilidad, implica realizar un rediseño o reforzamiento futuro de dicha defensa considerando efectos de cambio climático que provocan la variación de los periodos de retorno, el aumento del nivel mar o la intensificación del oleaje extremo, que afectarán esa defensa. Es decir, los diseños actuales deben calibrarse considerando estas variaciones futuras, y una curva de fragilidad que corresponda a un diseño actual, se recalibrará en la misma medida que se ajuste el diseño a esas variaciones de impacto climático (medidas de adaptación), a razón de disminución de la vulnerabilidad.

- Índice de Confiabilidad: el índice de confiabilidad es un valor de seguridad que relaciona la demanda y capacidad de una estructura (ej. Nivel de porosidad vs energía de oleaje). Una ventaja de este método es que puede asociarse a costos iniciales de una obra y costos de reparación, teniendo un costo total en su periodo de vida útil. Puede fijarse un índice de referencia (βT), por ejemplo, que admita hasta un 20 % del costo inicial para reparaciones (nivel de falla por un evento catastrófico) y posteriormente ajustar el diseño de la estructura a construir para un índice de confiabilidad lo más cercano posible al βT .

$$\beta = (\mu_R - \mu_Q) / \sqrt{(\sigma_R^2 + \sigma_Q^2)}$$

- μ_R : media de la capacidad o resistencia.
- μ_Q : media de la demanda.
- σ_R : desviación estándar de la resistencia.
- σ_Q : desviación estándar de la demanda.

Códigos de diseño basado en confiabilidad

La mayoría de los códigos actuales a nivel mundial aceptan la naturaleza aleatoria de los parámetros de diseño, sobre todo bajo contexto de cambio climático; por ello se recomienda integrar a los códigos de diseño DOP para infraestructura costera, el uso de índices de confiabilidad y establecer valores deseados de este índice, predefiniendo:

- Criterio de aceptabilidad.
- Definición de niveles de seguridad o estados límites, siendo por ejemplo los utilizados en el Paseo Juan de Saavedra: sobrepaso y estabilidad.
- Desarrollar las provisiones necesarias para el cumplimiento del objetivo del código de establecer un nivel de confiabilidad mínimo o diseñar una estructura cuya probabilidad de falla sea menor al valor aceptable máximo esperado.

Un objetivo primordial de un código de diseño con enfoque probabilístico es diseñar una estructura que tenga un índice de confiabilidad cercano a un valor deseado o especificado (β_T), por lo que se establece una medida de cercanía o tolerancia entre el código y su objetivo. Esto puede hacer mediante el criterio de cercanía ó penalizaciones, para la diferencia entre β y β_T , la cual puede ser positiva o negativa, el criterio de cercanía puede minimizar el valor esperado:

$$(\beta_T - \beta)^P$$

Si se desea penalizar grandes desviaciones con respecto al objetivo, entonces puede aplicarse este criterio para $P \geq 2$. De forma general, la función específica que se use es conocida como β -metric y su expresión general es:

$$M(\beta_T - \beta)$$

β -metric puede aplicarse también en términos de costos.

Altura de Ola

El documento de Evaluación de Riesgo de Infraestructura Costera en un contexto de Cambio Climático (Winckler; P., 2016), se indica un cálculo aproximado de la altura de oleaje para efectos de diseño:

$$C = NRS + NMM + ZMA + ZMMP + ZMMV + W + Oig$$

Chile | Perú | Ecuador | España | www.deuman.com
Av. Vitacura N° 2909 Of. 714, Las Condes – Santiago
Teléfono: (+56 2) 2232 6136
E-mail: info@deuman.com

- C: nivel de diseño.
- NRS: nivel de reducción de sondas.
- NMM: nivel medio del mar.
- ZMA: marea astronómica.
- ZMMP: marea meteorológica por variación de la presión atmosférica.
- ZMMV: marea meteorológica por viento.
- W: set-up de oleaje.
- OIG: ondas infra gravitatorias.

Las variables que están bajo efecto de cambio climático son: el nivel medio del mar y las mareas meteorológicas por presión atmosférica y viento. Estas son variables de carácter aleatorio, es decir, pueden ser abordadas probabilísticamente, en tanto el resto de las variables pueden tomarse como variables determinísticas.

Para el nivel medio del mar, existe un estudio que es el escenario RCP8.5 que puede ser aplicado en el cálculo de la altura de oleaje (ver caso práctico Paseo Juan de Saavedra), en tanto se desarrolle un modelo de predicción que involucre variables locales de las zonas geográficas de Chile o de sus regiones.

De las mareas meteorológicas bajo efecto de la presión atmosférica y viento, establecer modelos de predicción requerirá levantamiento de información estadística más amplia que minimice la incertidumbre en su cálculo; sin embargo, existen estudios, Suh et al. (2012) con un modelo probabilístico de Weibull cuyos factores han sido ajustados localmente para relacionar la curva de probabilidades de alturas extremas de olas con el aumento de cantidad e intensidad de tormentas. Tagaki et al. (2011), ha realizado una investigación donde aumenta las intensidades del viento en tormentas en un 10 % para capturar su efecto en el oleaje sobre rompeolas. Los resultados indican un aumento entre el 17 % y 25 % de la altura significativa de la ola.

En todo caso, el ajuste de la altura total de ola pasa por la revisión de los periodos de retorno, ya explicado anteriormente, por lo que se recomienda respaldar cada diseño proyectando el periodo de retorno futuro asociado a una altura de oleaje en base a estadísticas disponibles o, producir data sintética mediante simulaciones de Montecarlo, partiendo de la poca información disponible.

Dimensión de la Estructura Costera

Robustecer las dimensiones de la estructura costera, sea para el reforzamiento de una obra existente o el diseño de una nueva, es aumentar la resistencia y estabilidad estructural para soportar el impacto de oleaje y el aumento del nivel del mar. De aquí se plantea soluciones:

- **Altura de Ola:** el incremento de la altura está en función de la altura de diseño de la ola que debe contemplar la influencia de cambio climático.
- **Muelles cerrados:** si un estudio determina una alta vulnerabilidad bajo efectos de oleaje o erosión, las estructuras macizas o rígidas requieren mayor peso para estabilizarse y resistir el deslizamiento y volcamiento. Aquí es importante reconsiderar si deben incrementarse los factores de sensibilidad utilizados para cálculo de estabilidad estructural (1.5 sin empuje pasivo y 2.0 con empuje pasivo) para diseños futuros o bien incrementar el peso de una obra existente.
- **Muelles abiertos:** de tipo caleta pesquera, cuya estructura es aporticada, deben considerarse un reforzamiento estructural con nuevos elementos o sustitución de los existentes con otros elementos más grandes. Esta acción puede ser más costosa, teniendo la opción de abatir el oleaje para disminuir su fuerza de impacto en la estructura.

Porosidad

Las defensas ribereñas, rompeolas o molos de abrigo enrocados, pueden evaluarse en base a su porosidad y verificar frente a una intensificación del oleaje futuro, si deben ser reforzados. Esto implica no solo uso de modelos de predicción de la altura de oleaje sino aplicación de ensayos físicos o en laboratorio.

Mitigación

Con el uso de defensas costeras se puede mitigar o reducir el impacto de oleaje en la infraestructura costera; de usar una protección directa como molos de abrigo debe tenerse en cuenta el punto anterior; en tanto, es recomendable disponer en las soluciones de diseño, una alternativa opcional de uso de rompeolas sumergidos o a distancia de la costa que disminuyan el impacto de oleaje sobre la Infraestructura de Zona Costera, lo que puede reducir los costos de un diseño por reforzamiento estructural.

9.6. Resumen de alternativas de reformulación de metodología de diseño de servicios de infraestructura de zona costera

Tabla 48. Resumen de comparación de alternativas de reformulación de caudales de diseño

Método convencional	Descripción/principio	Antecedentes	Herramientas
Calibración de periodos de retorno considerando la variabilidad climática futura	Validar o ajustar los periodos de retorno asociados a caudal de precipitación y altura de oleaje para efectos de diseño basándose en estudios probabilísticos.	CEPAL, 2011.	Data estadística (simulación o levantamiento). Análisis probabilístico.

Monitoreo de variables hidrometeorológicas	Control de las variables climáticas de impacto sobre la infraestructura fluvial y costera con levantamiento de información estadística.	Base de datos oleaje: FUGRO, ERA-I, IFREMER, NOAA CFSR, NOAA WWIII, EEM, DOP.	Instrumentación con pluviómetros para conteo de precipitaciones y boyas de medición de altura de oleaje.
Monitoreo de Variables Sedimentológicas	Control del arrastre de sedimentos: erosión o socavación, sedimentación, aluviones, etc., sobre la infraestructura fluvial y costera con levantamiento de información estadística.	S/I	Data estadística (simulación o levantamiento). Análisis probabilístico.
Modelos de predicción	Proyecciones de incremento de la magnitud de las variables de impacto para diseño de obras futuras y rediseño de las existentes bajo vulnerabilidad y exposición considerable.	RCP2.6 – 4.5 – 8.5	Determinístico: en base a data existente por regresión lineal. Probabilístico o semiprobabilístico: simulaciones aleatorias para establecer modelos predictivos y curvas de fragilidad. Índices de confiabilidad β , β -metric (costos/beneficio asociado a confiabilidad).
Mejoramiento de códigos de diseño basado en confiabilidad	Establecer medidas de cercanía o tolerancia entre los códigos de diseño su objetivo y su confiabilidad	Actuales manuales de evaluación social, probabilidad de sobrepaso de infraestructura	S/I

Fuente: Elaboración propia.

Acciones para desarrollar la implementación de las alternativas de reformulación de las metodologías de diseño de servicios de infraestructura de zona costera e hidráulicas:

- Paso 1: Desarrollar simulaciones condiciones hidrometeorológicas a una resolución alta en un contexto de cambio climático bajo escenarios RCP 2,6; 4.5 y 8.5
- Paso 2: Contar con una base de datos prospectivo de aquí a 100 años, la tenemos, la existente que oportunidades tiene.

- Paso 3: Hacer un análisis estadístico de datos, Periodo de retorno vs altura de ola
- Paso 4: Incorporar esta base de datos en modelos probabilísticos existentes
- Paso 5: Modificar rangos de riesgos de falla para que los proyectos sean factibles
- Paso 6: Definir un nivel o umbral de riesgo a asumir respecto a la falla o seguridad

9.7. Recomendaciones de mejora de evaluación social de proyectos de servicios de infraestructura hidráulico y de zona costera

La preparación y evaluación de proyectos, comprende en forma general dos etapas la primera que es cualitativa y permite identificar el problema, desarrollar un diagnóstico de la situación actual, y configuración de alternativas de solución y la segunda etapa es cuantitativa y corresponde al cálculo de ciertos indicadores que permitirán emitir un pronunciamiento sobre la conveniencia de ejecución de un proyecto.

En la etapa de preparación del proyecto dentro de la metodología general de preparación y evaluación de proyectos del MDS, que se fundamenta principalmente en eventos observados:

“...a) Observación de la realidad: apreciación de situaciones o hechos que no son deseados y provocan efectos negativos en la sociedad; b) Detectar disfuncionalidades en las intervenciones sociales existentes: cuando algún programa o proyecto realizado previamente no ha logrado los objetivos buscados; c) Contrastar la situación a analizar respecto a niveles habituales, normales o estándares. Esto implica utilizar referencias de variables económicas, sociales, productivas u otras. Estas referencias pueden estar dadas por: niveles promedio a nivel nacional o regional, estándares definidos por políticas sectoriales o regionales, acuerdos tomados con organismos internacionales, entre otros...”

No existe como fuente para la identificación de problemas un análisis que tome en consideración tanto los eventos hidroclimáticos extremos observados como el comportamiento climático futuro, o la amenaza climática futuras producto del cambio climático. En tal sentido resulta importante; en primer lugar, desarrollar un mapa de riesgo climático nacional en donde se refleje la vulnerabilidad de los distintos servicios de infraestructura aludidos frente a las amenazas climáticas futuras del cambio climático.

Complementando el planteamiento anterior, se confirma la importancia de definir el nivel de riesgo climático al que se encuentran vulnerables los servicios de infraestructura existentes, ya que la etapa de evaluación de los proyectos bajo los enfoques costo beneficio o costo eficacia. Se establece la necesidad de identificar los distintos beneficios, en donde se destaca el literal d) que identifica a la reducción del riesgo como un beneficio potencial generado por el proyecto:

“...d) Reducción de Riesgos: cuando el proyecto aumenta los niveles de seguridad de un determinado servicio...”

Por otra parte, de acuerdo a la metodología de preparación y evaluación de proyectos de defensas fluviales¹⁴, se establece que la definición de costos y beneficios para un proyecto de esta naturaleza se aplica el cálculo del indicador Valor Actual Neto (VAN) para diferentes alternativas de diseño de obra, que tienen por fin evitar los daños producidos por una crecida cuya magnitud está asociada a un período de retorno (T), el cálculo se hace para una serie de beneficios producidos en un tiempo probabilístico. Surge así el problema de como estimar los beneficios futuros, si no se sabe a priori la magnitud de los caudales que se pueden presentar. En tal sentido se propone la actualización de las curvas de daños vs factores determinantes considerando los resultados de simulaciones climáticas bajo de alta resolución geográfica y en base a escenarios como el RCP 4,5 y 8,5.

¹⁴ <http://sni.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/download/defensas-fluviales/?wpdmdl=899>

10. SISTEMAS DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA PARA SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA

De acuerdo con el plan de adaptación y mitigación de los servicios de infraestructura al cambio climático (MOP, 2017), en Chile existen oportunidades de mejora de los sistemas de monitoreo de diferentes variables de origen hidrometeorológico y oceánico que definen las características de las amenazas. Principalmente estas oportunidades se encuentran en la recopilación y disponibilidad de información relacionada con provisión de agua, impactos por exceso de agua y amenazas costeras.

Consciente de esa oportunidad, dicho plan contempla el desarrollo de dos líneas de acción orientadas a abordar el monitoreo tanto de la amenaza como de los servicios de infraestructura aludidos, estas líneas están definidas como:

Línea de acción plan de adaptación al CC MOP	Medidas
Línea de acción 2: Monitoreo de Amenaza	<ul style="list-style-type: none">• Medias 6: Conocimiento actual y futuro de glaciares,• Medida 7: Mejoras en monitoreo de caudales extremos,• Medida 8: Mejoras en monitoreo de amenazas costeras.
Línea de acción 3: Monitoreo de vulnerabilidad de la infraestructura	<ul style="list-style-type: none">• Medida 9: Revisión periódica de obras fluviales, de drenajes y viales• Medida 10: Incorporación de un monitoreo semicontinuo del impacto de obras de infraestructura costera

En el marco de estas líneas de acción se plantea desarrollar el análisis de sistemas de monitoreo y alerta temprana de este estudio un enfoque integral, es decir analizar e identificar las medias de monitoreo ya sean de la amenaza o de la vulnerabilidad de la infraestructura, y su potencial integración a sistemas de alerta temprana (SAT). Para el desarrollo de dicho análisis en primer lugar es necesario, desarrollar la descripción del estado del arte de los sistemas de monitoreo y alerta temprana existentes en Chile.

Es importante destacar que la selección entre un sistema de monitoreo de amenazas u otra de vulnerabilidad de infraestructura al cambio climático, depende de la interacción de distintas variables, dentro de las que se destacan, el tipo de amenaza climática (intensidad) y la exposición a dicha amenaza (características geográficas del área de emplazamiento) y el objetivo para el cual se ocupará el sistema. Es decir, cuando se trate de sistemas de monitoreo que tienen como fin preservar la integridad física de poblaciones en tiempo real, resultan más efectivas las medidas de monitoreo de las amenazas, ejemplo de esto son los mecanismos monitoreos de las remociones en masa (REM), que se caracterizan por ser evento de desarrollo rápido e impacto particularmente alto, en donde ocasionalmente el monitoreo de un servicio de

infraestructura de control aluvional debe ir acompañado de un sistema más preventivo aguas arribas que monitoree las variables sedimentológicas, e hidrológicas asociadas a dicha amenaza, de esta forma se amplía el tiempo de previsión o de respuesta de una población al impacto de un aluvión.

De acuerdo con esto, el estudio se desarrollará considerando el análisis de aquella medida de monitoreo, capaz de integrarse a un SAT y que represente el mayor periodo tiempo de respuesta frente a los potenciales impactos de una determinada amenaza del cambio climático.

Otro de las funcionalidades relevantes en la implementación de sistemas de monitoreo de variables hidrometeorológicas, es que su inexistencia o su ejecución incorrecta, implica correr el riesgo de diseñar o dimensionar servicios de infraestructura en donde no se reconozca la variabilidad de la demanda futura asociada a los distintos forzantes climáticos. Por lo tanto, se destaca la importancia de las medias de monitoreo, en el desarrollo de una serie con las características de temporalidad y espacialidad lo suficientemente representativas como para incorporar las proyecciones climáticos futuros, y por ende diseñar servicios de infraestructura bajo un enfoque no convencional, en el que se consideren datos estadísticos proyectados sino que además considere la evolución de los factores de sensibilidad que determinan la vulnerabilidad de un determinado proyecto.

Finalmente, en esta sección se identifican aquellos casos exitosos y buenas prácticas (*Benchmarking*), en un contexto nacional e internacional, de medidas de monitoreo y sistemas de alerta temprana, que tienen correspondencia con la vulnerabilidad local frente a amenazas climáticas, de servicios de infraestructura de zona costera, control aluvional y manejo de cauces.

10.1. Sistemas de monitoreo y alerta temprana para servicios de infraestructura hidráulica

De acuerdo al análisis de vulnerabilidad desarrollado en la sección 6, los servicios de infraestructura de control aluvional son altamente vulnerables a las amenazas climáticas como cambios extremos en las precipitaciones, y remociones en masa (REM), particularmente en la macrozona norte de Chile, esto se ha evidenciado a través de la alta presencia de eventos extremos hidroclimáticos con consecuencias catastróficas como el aluvión de Copiapó 2015.

En la actualidad existen distintas iniciativas orientadas al monitoreo principalmente de forzantes climáticas extremas, con el fin de construir una serie de datos por un periodo de tiempo de más de 50 años y que proyecte las mismas en el futuro. Dentro de estas iniciativas se destacan el desarrollo de iniciativas como el Sistema de Alerta Temprana (SAT) de quebrada de Ramón en la Región Metropolitana, que consiste en el incremento de la densidad espacial de instrumentos de medición e incremento el número de variables registradas, con el objetivo de analizar dichos

datos mediante el uso de modelos numéricos hidráulicos e hidrológicos, que permitirán mejorar la precisión de las alertas y abrirá una ventana de tiempo para previsiones de entre 24 y 72 h.

Considerando que los sistemas de control aluvional y de manejo de cauce hace frente a la demanda producida por la presencia de amenazas climáticas como precipitaciones intensas, incremento de caudales de escurrimiento, y remociones en masa, y que eventualmente estas amenazas se desarrollan en periodos de tiempo corto, se destaca la relevancia de analizar aquellas medidas de monitoreo de la amenaza en sí, a continuación se describen las principales medidas de monitoreo y alerta temprana consideradas como buenas prácticas y que además con atingentes a la realidad de las amenazas locales.

10.1.1. Sistemas de monitoreo y alerta temprana de servicios de infraestructura hidráulica

En relación a los sistemas de monitoreo y alerta temprana de servicios de infraestructura de control aluvional se destaca que estos deben entenderse solo como una parte de estos sistemas ya que los tiempos de respuesta y de viaje en las cuencas chilenas es bastante corto. De este modo, los sistemas de alerta temprana deben basarse principalmente en pronósticos meteorológicos y las simulaciones asociadas, como también en el monitoreo en tiempo real de las variables detonantes de eventos de crecidas (PUC, 2016).

En tal sentido, a continuación, se presentan los resultados de la investigación documental relativa a las medidas de monitoreo y control de eventos climáticos que afectan y afectarán a los servicios de infraestructura de control aluvional y manejo de cauce en Chile. La investigación bibliográfica permitió la sistematización de tres tipos de mecanismos de monitoreo y alerta temprana:

- Sistemas de monitoreo y alerta temprana para inundaciones;
- Sistemas de monitoreo y alerta temprana para deslizamiento de tierras;
- Sistemas de monitoreo de la evolución del permafrost.
- Sistemas de monitoreo ciudadano.

10.1.2. Sistemas de monitoreo de servicios de infraestructura de control aluvional

La siguiente tabla resume los principales sistemas de monitoreo de amenazas climáticas vinculados con servicios de infraestructura de control aluvional; que han sido identificados a través del *benchmarking* y que plantean una potencial solución a las demandas locales de monitoreo y SAT descritas, estas medidas se han desarrollado con mayores detalles en forma de fichas descriptivas la sección 11.

Tabla 49. Resumen de medias de monitoreo y sistemas de alerta temprana para amenazas vinculadas con servicios de infraestructura de control aluvional

Nombre de la medida	Localidad	Objetivo	Descripción	Costo aproximado
Sistema de alerta temprana para deslizamientos de tierras en Centroamérica	Varios países de Centroamérica	- Desarrollar representaciones espaciales y temporales calibradas y validadas del riesgo de deslizamiento en tiempo real, - Capacitar a los servicios meteorológicos e hidrológicos nacionales sobre la manera de entender e interpretar los resultados de la evaluación del riesgo de deslizamiento.	Proyecto consistió en un sistema que permite desarrollar representaciones espaciales del riesgo de deslizamiento en tiempo real.	No disponible
Sistemas de alerta temprana para deslizamientos de tierra	Alemania	El objetivo principal del proyecto LEWIS fue el desarrollo de un prototipo de servicio de alerta al ciudadano sobre deslizamientos basado en el uso de datos de Observación Terrestre (OT) mediante el uso de datos satelitales.	Se desarrollaron modelos utilizando datos de OT con el fin de detectar cambios significativos en la superficie terrestre que podrían anunciar posibles deslizamientos de tierra.	2.690.004 €
Sistema de Monitoreo del permafrost en Alaska	EE. UU.	Establecer una red de monitoreo del permafrost en la región oeste de Alaska.	se establecieron un total de 26 estaciones de monitoreo automatizado para recopilar datos de temperatura de la capa activa y del permafrost, La coleta de datos de temperatura de la capa activa y del permafrost se utilizaron para la elaboración un modelo de alta resolución que permite obtener información sobre el estado actual del permafrost y proyectar cambios futuros.	No disponible

<p>sistemas de monitoreo y análisis del permafrost en Europa</p>	<p>Noruega y Suiza</p>	<p>Monitorear la evolución del permafrost en zona subártica y en zonas alpinas de Europa.</p>	<p>Sistema de monitoreo incluye la observación de tres tipos de variables (1) temperaturas del suelo (en pozos) y de la superficie medidas cerca del sitio de perforación, (2) cambios en el hielo del subsuelo y en el contenido de agua no congelada mediante levantamientos geoelectricos y (3) velocidades de fluencia del permafrost determinadas por levantamientos geodésicos y fotogrametría</p>	<p>No disponible</p>
<p>Sistema de alerta temprana quebrada de Ramón región metropolitana de Santiago</p>	<p>Chile</p>	<p>Diseñar e implementar un sistema de alerta temprana (SAT) para la Quebrada de Ramón, basado en la integración de pronósticos meteorológicos, modelos hidrológicos e hidráulicos, un sistema de monitoreo en línea y una plataforma computacional para el seguimiento de estos eventos.</p>	<p>El proyecto comprende 5 etapas; 1. Recopilación de antecedentes; 2. Instalación de equipos de monitoreo; 3. Modelación meteorológica e hidrológica; 4. Diseño e implementación del SATy plataforma</p>	<p>No disponible</p>

Fuente: Elaboración propia.

10.1.3. Sistemas de monitoreo de servicios de infraestructura de manejo de cauces

La siguiente tabla resume los principales sistemas de monitoreo de amenazas climáticas vinculados con servicios de infraestructura de manejo de cauces; que han sido identificados a través del benchmarking y que plantean una potencial solución a las demandas locales de monitoreo y SAT descritas, estas medidas se han desarrollado con mayores detalles en forma de fichas descriptivas en el anexo 14.7.

Tabla 50. Resumen de medias de monitoreo y sistemas de alerta temprana para amenazas vinculadas con servicios de infraestructura de manejo de cauces

Nombre de la medida	Localidad	Objetivo	Descripción	Costo aproximado
Sistema de Alerta temprana para inundaciones	Reino Unido	Alertar sobre posibles riesgos de inundaciones a los habitantes de Inglaterra y Gales que vivan en una zona de alto riesgo de inundación y que tengan un teléfono fijo o un celular mediante llamadas telefónicas o mensajes de texto.	La agencia ambiental del reino Unido utiliza información georreferenciada para identificar con precisión las personas y propiedades en zonas a riesgo de inundación y les envía mensajes de alerta. La agencia analiza continuamente las previsiones meteorológicas, monitorea los niveles de saturación del suelo y los resultados a tiempo real de la telemetría sensorial fluvial, los superpone a los mapas de riesgo de inundación, y decide cuándo emitir alertas.	962.000 US \$.
Sistema de alerta temprana para reducir los riesgos de inundaciones en el Valle de Aburrá	Colombia	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo en tiempo real de información meteorológica, variables hidrológicas e información sobre la calidad del aire - Desarrollo e implementación de modelos de predicción hidrológica y meteorológica, ajustados a la localidad 	El SIATA, es un sistema capaz de informar en tiempo real sobre la evolución de los caudales y de variables hidro-climáticas que informan sobre el riesgo de inundación en una determinada zona, este dispone de redes de monitoreo para precipitaciones y otras variables meteorológicas, nivel de agua y cauces, humedad del suelo (86 estaciones). Además, cuenta con una red de cámaras de transmisión en vivo (7 cámaras).	No disponible

<p>Seguimiento de la infraestructura hidráulica a través de las brigadas de Protección a la Infraestructura y Atención de Emergencias</p>	<p>México</p>	<p>Llevar a cabo diversas medidas preparatorias para estar en mejores condiciones de atender las posibles emergencias en materia hídrica.</p>	<p>Inspección a través de brigadas de distintos elementos estructurales, con el propósito de verificar su estado físico y de operación, así como la gestión con las autoridades correspondientes de la corrección de deficiencias identificadas</p>	<p>No disponible</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------

Fuente: Elaboración propia.

10.2. Sistemas de alerta temprana para servicios de infraestructura de zona costera

Considerando los análisis de vulnerabilidad para servicios de infraestructura costera, se ha determinado que la amenaza de marejadas impacta en mayor medida en las regiones central y sur de Chile, en tal sentido se destaca la necesidad de implementar sistemas de monitoreo de amenazas climáticas y de vulnerabilidad de servicios de infraestructura que permitan contar con tiempos de respuesta efectivos, que ayuden a prevenir los efectos de las marejadas como son; daños a la infraestructura, inhabilitación total o temporal de servicios de infraestructura portuaria de conectividad, pesca artesanal y protección o la disminución de sus capacidades.

Chile en la actualidad cuenta con la red de observación de climas de oleaje en aguas profundas, como sistema de monitoreo de variables oceanográficas, además se identifica que existen importantes necesidades de mejorar y desarrollar el conocimiento del clima de oleaje, parámetro fundamental para el diseño de infraestructura marítima. Ya que se ha determinado que las observaciones directas del oleaje son escasas, no existiendo en la actualidad una red de boyas estables de operación continua en el tiempo (CCG, 2016).

Actualmente, en Chile, desde el año 1968, SHOA administra el Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos (CENDHOC) donde se recopila y almacena los registros de las estaciones mareográfica instaladas en los principales puertos del País, contándose con 40 estaciones para el 2015, y para el año en curso (2018), la Armada de Chile adquirió 24 boyas convencionales Sentinel SB-285P del fabricante Tideland Signal. Esto es un avance importante en la construcción de una red de monitoreo, sin embargo, es necesario en el ámbito civil tener disposición de estos dispositivos para efectos de validar las investigaciones en curso y los modelos de predicción de clima de oleaje.

La siguiente sección presenta el resultado de la investigación documentaria relativa a las

medidas de monitoreo y control de eventos climáticos que afectan y afectarán a las infraestructuras costeras de Chile. La investigación bibliográfica permitió la identificación del mecanismo de monitoreo y alerta temprana de uso común como:

- Sistemas de monitoreo y alerta temprana para marejadas y aumento del nivel del mar;

A continuación, se presentan ejemplos de proyectos correspondientes al tipo de sistema de monitoreo y de alerta temprana identificados.

10.2.1. Sistemas de monitoreo de servicios de infraestructura de protección de zona costera

La siguiente tabla resume los principales sistemas de monitoreo de amenazas climáticas vinculados con servicios de infraestructura de zona costera; que han sido identificados a través del *benchmarking* y que plantean una potencial solución a las demandas locales de monitoreo y SAT descritas, estas medidas se han desarrollado con mayores detalles en forma de fichas descriptivas en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 51. Resumen de medidas de monitoreo y sistemas de alerta temprana para amenazas vinculadas con servicios de infraestructura de zona costera

Nombre de la medida	Localidad	Objetivo	Descripción	Costo aproximado
Sistema de detección de tormentas en Chile y Ecuador	Chile y Ecuador	Mejorar el monitoreo de tormentas y extender el margen de tiempo para alertar a la población de posibles lluvias intensas y otros peligros asociados con el clima.	El sistema permite el monitoreo temporal de alta resolución que mejora sustancialmente la previsión inmediata del impacto de una tormenta, al emitir advertencias meteorológicas, con unas horas de anticipación. Los datos son transmitidos en tiempo real	1.812.195 US \$.
Red de observación costera australiana	Australia	Establecer un sistema piloto de monitoreo costero que está siendo aplicado en 10 playas de la costa australiana, con el fin de predecir los impactos en los cambios	El proyecto combina sistemas de monitoreo del nivel del agua y las olas del océano ya existentes con un enfoque novador de monitoreo automático y	340.000 AUS \$.

		en el oleaje y en el nivel del mar.	continuo del litoral a través de un sistema de cámaras, para apoyar la gestión y la investigación sobre la evolución de la costa en un contexto de cambio climático.	
Implementación de un Sistema de Alerta Temprana para marejadas en la República de Mauricio	Mauricio	Sistema de predicción hecho a medida y de alta calidad para una mejor preparación y una emisión de alertas más eficaz, con el fin de reducir los impactos de las inundaciones por marejadas en un contexto de cambio climático.	Es un conjunto de tablas fáciles de utilizar y muy intuitivas en formato HTML para cada isla, que contienen información sobre la variación espacial y temporal de los niveles del mar pronosticadas con respecto a umbrales previamente establecidos. En varias ubicaciones de las tres islas, se dispone además de un sistema de alerta mediante el cual se informa a la población sobre el nivel de preparación recomendada en base a las previsiones sobre el nivel del mar.	133.705 US \$.
Sistema de monitoreo de infraestructura mediante captura de imágenes en Tótems	Chile	Monitoreo de vulnerabilidad de la infraestructura	Instalación de tótems de captura de imágenes para que las personas usen sus propios celulares para la toma de fotos en una dirección única respecto del punto de observación, enfocado en las zonas de interés.	No disponible

Fuente: Elaboración propia.

11. PRIORIZACIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA PARA CHILE

Considerando las experiencias locales e internacionales de sistemas de monitoreo y alerta temprana que se han identificado en el contexto de servicios de infraestructura del MOP y que han surgido como parte de la repuesta adaptativa para incrementar la resiliencia climática. Se ha considerado que la selección de un tipo u otro sistema de monitoreo o alerta temprana va a depender directamente del grado de vulnerabilidad de estos servicios.

En tal sentido, se identifica la importancia de hacer un bajada de los sistemas de monitoreo, mediante la priorización de aquellos servicios de infraestructura que tengan una vulnerabilidad alta, y para los que se el monitoreo de la amenaza y de la infraestructura sea un factor determinante de su sensibilidad climática, además aquellos servicios que se encuentren alta o medianamente expuestos a una amenaza climática particular considerando las condiciones geográficas o el lugar de emplazamiento del servicio de infraestructura.

En esta sección se describirán los criterios de priorización de sistemas de monitoreo o alerta temprana y los resultados de su aplicación con el objetivo de determinar la prioridad de servicios de infraestructura que requieren de éstos, considerando la sensibilidad y exposición climática.

11.1. Criterios de priorización de sistemas de monitoreo y alerta temprana

En esta sección se describe el proceso de priorización de las medidas de monitoreo para servicios de infraestructura de control de aluviones, manejo de cauces y de zona costera, para esto, en primer lugar, se considerará como prioridad aquel que demande de un sistema de monitoreo continuo o semicontinuo será basándose en su alta sensibilidad y exposición a los eventos climáticos extremos, con el objetivo de reducir la probabilidad de ocurrencia de desastres o impactos significativos de tipo social, económico y ambiental.

En segundo lugar, para priorizar las medidas se desarrollará un análisis de distintos criterios con el objetivo de incorporar directamente los múltiples intereses de los actores involucrados, así como la visión de los desarrolladores de políticas, en el análisis de las alternativas de monitoreo sin necesariamente asignar valores monetarios a todos esos intereses.

Dentro de los principales criterios a considerar para la selección de medidas de monitoreo de obras de infraestructura frente a eventos climáticos extremos, a continuación, se detallan los más importantes en el ámbito social, ambiental, financiero y de gobernanza:

Tabla 52. Propuesta de criterios a para el análisis multicriterio (MCA) de priorización de medidas de monitoreo

Aspecto	Criterios
Vulnerabilidad	La medida en la que el sistema de monitoreo responda a la demanda de un servicio de infraestructura con vulnerabilidad climática alta (C1)
Financiero	Costo inicial de inversión de la medida <i>Capex</i> (C2) Costo de operación y mantenimiento de la medida <i>Opex</i> (C3) Eficiencia de la medida (C4)
Social	Competencias técnicas especializada para implementación de medidas (C5) Mano de obra local para la implementación de la medida (C6) Riesgo de impacto del cambio climático sobre la comunidad (C7)
Gobernanza	Administración municipal de la medida (C8) Administración regional de la medida (C9) Administración nacional de la medida (C10)
Ambiental	Compatibilidad con el entorno físico natural (C11) Gestión sustentable de residuos y/o desechos (C12) Compatibilidad con el entorno biológico natural (C13)

Fuente: Elaboración propia

El análisis de los criterios de priorización de servicios de infraestructura permitirá compilar la opinión de expertos, con el objetivo de asignar ponderación y una descripción cualitativa de aquellas variables que intervienen en el proceso de toma de decisión de una institución o responsable de ciclo de vida de la obra, en la selección de la medida de monitoreo más apropiada para una obra de infraestructura.

Finalmente, considerando los criterios planteados, se ha determinado que los sistemas prioritarios para la implementación de sistemas de monitoreo y alerta temprana son los servicios de infraestructura de control aluvional y los de zona costera, a continuación, se desarrolla la justificación de priorización de estos servicios.

11.2. Justificación de sistemas de monitoreo y alerta temprana para servicios de infraestructura de control aluvional

Debido a su gran velocidad de flujo, fuerzas de impacto y largas distancias de salida, los flujos de detritos, aluviones e inclusive inundaciones son uno de los tipos de escurrimientos más peligrosos en muchas regiones del mundo. Por ejemplo, en los Alpes suizos en los últimos 30 años se han documentado un promedio de 17 flujos de detritos que causan daños por año. Tienden a ocurrir durante grandes tormentas regionales en periodos cortos de años. El costo de las medidas de mitigación construidas es bastante grande, especialmente considerando que las comunidades del lugar y de otros lugares del mundo también están amenazadas por otros procesos como inundaciones, desprendimientos de tierras, desprendimientos de rocas y avalanchas de nieve, lo que indica la necesidad de medidas de costo-efectivas como los sistemas de alarma.

Debido a su repentina iniciación, los flujos de detritos y aluviones son difíciles de predecir e incluso los eventos pequeños pueden poner en peligro a los humanos y la infraestructura. Se prevé que los sistemas de advertencia proporcionen cierto grado de protección, principalmente para prevenir muertes.

Se han desarrollado muchos sistemas de monitoreo para áreas de cuencas densamente pobladas en todo el mundo. Ejemplos recientes están disponibles en Canadá (Jakob et al. 2006), Italia (Bacchini y Zannoni 2003), Taiwan (Chang 2003; Chen et al. 2005; Kung et al. 2008), China (Brand et al. 1984; Zhang 1993) y Japón (Hirano 1997; Itakura et al. 1997; Tanabashi 1998)

Los sistemas de detección y de alerta de flujo de detritos y aluviones están en uso generalizado en todo el mundo ya desde algunos años. Los sistemas relativamente simples que detectan flujos (por ejemplo, Bacchini y Zannoni 2003; Chang 2003; Liu y Chen 2003) incluyen una amplia gama de sensores de detección tales como geófonos (vibración del suelo), dispositivos de medición de distancia por ultrasonidos y radar (altura de flujo) o sensores microondas (variación del nivel freático), los cuales pueden estar vinculados a luces de tránsito o señales de alarma para notificar a las autoridades responsables de la gestión de riesgos naturales.

En general dependiendo de las características geomorfológicas de las cuencas, el tiempo de viaje entre la zona de inicio y la llegada del frente del flujo a un punto de interés suele ser mucho menor que una hora. Si bien a los servicios de infraestructuras por donde habitualmente circulan, vehículos, peatones o habitan personas, a menudo se les puede advertir que salgan o al menos no ingresen a un área en peligro de amenaza por flujo de detritos o aluviones, lamentablemente hoy en día, un sistema de monitoreo en tiempo real no proporciona suficiente tiempo para la evacuación de residentes de tal área. Por lo tanto, existe la necesidad de una predicción confiable para proporcionar una alerta temprana para todos los flujos de detritos, aluviones e inclusive inundaciones con un mínimo de falsas alarmas.

La seguridad total nunca estará garantizada por tales sistemas de alerta o detección, por lo cual en general, deben considerarse como un complemento de la resiliencia de la comunidad desde una perspectiva de gestión de riesgos. Debido a que no hay definiciones de advertencia y alerta reconocidas internacionalmente, seguimos las regulaciones suizas en las que la advertencia o la advertencia temprana se definen como información oportuna sobre un posible evento peligroso, y la alerta se considera una señal acústica (y visual) en caso de peligro inmediato, con el objetivo de iniciar una reacción predefinida de la población afectada.

Los sistemas de alerta temprana para el flujo de detritos o aluviones a menudo combinan los pronósticos de lluvia y las mediciones en tiempo real de la precipitación, y suelen utilizar umbrales empíricos de lluvia para la actividad de movimiento masivo, que están idealmente

disponibles para la región en cuestión (por ejemplo, Wieczorek 1987; Deganutti et al. 2000; Fan et al. 2003).

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), en cooperación con el Servicio Nacional de Meteorología (NWS), operó uno de los primeros sistemas experimentales de predicción y alerta de flujo de detritos y aluviones en el área de la Bahía de San Francisco de 1986 a 1995 (Keefer et al. 1987; Wilson et al. 1993) en función de los umbrales de lluvia establecidos para esta región (por ejemplo, Cannon y Ellen 1985; Wilson y Wieczorek 1995). Este sistema se basó en una combinación de pronósticos de precipitación, mediciones de lluvia y comparación con los umbrales empíricos de lluvia, que proporcionó tiempos de alerta temprana de al menos varias horas antes de que se excedieran los umbrales de lluvia. California también está sujeta a la actividad de aluviones en áreas que han sido recientemente quemadas por incendios forestales: un concepto bien elaborado para dicho sistema de alerta, incluidas las necesidades de investigación, se ha descrito en un informe de la Fuerza de Tareas de Flujo de Detritos de NOAA-USGS (2005). Los eventos de lluvia desencadenante en este caso son eventos intensos de larga duración para los cuales la disponibilidad de pronósticos precisos puede aumentar la confiabilidad de las advertencias en comparación con las intensas tormentas de corta duración que a menudo provocan flujos de detritos en cuencas (por ejemplo, Berti y Simoni 2005; Gregoret y Dalla Fontana 2007).

La Oficina de Ingeniería Geotécnica en Hong Kong instaló un sistema de advertencia para deslizamientos de tierra poco profundos en 1977. La mejora constante llevó a un sistema completamente automatizado para pronóstico de deslizamientos de tierra basado en pronósticos de precipitación a corto plazo para el área (Chan y Pun 2004; Aleotti 2004). En su sistema, los datos de más de 100 pluviómetros, radares de lluvia e imágenes satelitales se utilizan para controlar la situación meteorológica. Cuando se superan los umbrales de lluvia de 1 o 24 h, los servicios de transmisión locales comienzan a transmitir avisos regulares de mensajes al público.

Por otra parte, Jakob et al. (2006) investigaron la posibilidad de predecir el momento de los flujos de detritos a lo largo de la costa norte de la Columbia Británica en Canadá para proteger a los trabajadores forestales y sus equipos. Sin embargo, la gran variabilidad espacial y el número limitado de mediciones a largo plazo hicieron imposible la aplicación de métodos tradicionales. Por lo tanto, se estableció un árbol de decisiones para avisos de deslizamientos de tierra que incluye el pronóstico de precipitación regional, la lluvia de antecedentes de 4 semanas y los datos locales de precipitación de 24 h combinados con una clasificación de tormenta. El nivel de advertencia resultante indica el grado de susceptibilidad al deslizamiento de tierra, proporcionando así una herramienta de apoyo para las partes responsables.

Estos enfoques de alerta temprana dependen en gran medida de la calidad del pronóstico y la capacidad predictiva de los umbrales de lluvia que a menudo son imprecisos, especialmente en ambientes de cuencas andinas donde es probable que las tormentas cortas y locales provoquen flujos de detritos y aluviones súbitos y violentos. Bajo este contexto es necesario y se hace urgente implementar sistemas de monitoreo para los servicios de infraestructura de control aluvional, dado el alto grado de exposición y vulnerabilidad de la población en algunos lugares del territorio a este tipo de amenazas.

11.3. Justificación de sistemas de monitoreo y alerta temprana para servicios de infraestructura de zona costera

Entre las medidas de adaptación propuestas dentro del estudio, se considera aplicación del monitoreo de las variables hidrometeorológicas y sedimentológicas para asegurar modelos de predicción más precisos. Para la Infraestructura de la zona costera, las variables de impacto son la altura significativa de ola y el aumento del nivel medio del mar bajo efectos de cambio climático, considerado también los cambios morfodinámicos de la costa asociados a erosión y sedimentación (flujo de sedimentos por oleaje). Conocer la magnitud futura de estos eventos dependerá de datos estadísticos obtenidos del monitoreo constante de dichas variables.

Actualmente, en Chile, desde el año 1968, SHOA administra el Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos (CENDHOC) donde se recopila y almacena los registros de las estaciones mareográficas instaladas en los principales puertos del País, contándose con 40 estaciones para el 2015, y para el año en curso (2018), la Armada de Chile adquirió 24 boyas convencionales Sentinel SB-285P del fabricante Tideland Signal. Esto es un avance importante en la construcción de una red de monitoreo, sin embargo, es necesario en el ámbito civil tener disposición de estos dispositivos para efectos de validar las investigaciones en curso y los modelos de predicción.

El monitoreo de las variables hidrometeorológicas es una de las acciones más relevantes para efectos de control de esas variables. A continuación, se establecen las razones por la cual es necesario este monitoreo:

Actualmente una de las carencias para implementar una metodología adecuada de diagnóstico de vulnerabilidad bajo cambio climático, pasa por la poca información de data existente para efectos de altura de oleaje y nivel medio del mar, lo cual significa que los modelos de predicción no sean tan precisos, recordando el término computacional “Garbage In, Garbage Out” que significa “basura entra, basura sale” y que aplica a aquellos datos inconsistentes o erróneos que al ser introducidos aún el software más sofisticado, los resultados obtenidos serán tan incorrectos como lo son sus datos de entrada. Por lo tanto, es necesario por tanto levantar la

información estadística existente que capture implícitamente la influencia por cambio climático mediante la calibración de los Modelos de Predicción:

Con la red de monitoreo se podrá comprender mejor el comportamiento de las variables hidrometeorológicas para efectos de establecer sistemas de alerta temprana (SAT) más precisos en tiempo real. Esto significa que se minimizarán los errores de predicción en la duración y ocurrencia de los eventos extremos, para efectos de anticipación del evento extremo, así como el cierre y/o prohibición de uso de la Infraestructura de zona costera como caletas pesqueras, puertos de conectividad y paseos costeros en base a los umbrales operacionales (altura de ola), lo que implica resguardo de vidas, disminución de los daños y menor impacto económico, teniendo en cuenta respecto a este último, que un cierre innecesario o que continúe más allá del punto de culminación del evento, significará pérdidas económicas innecesarias. Un ejemplo, es un estudio de Puerto Patache en Iquique, donde se determinó que el 49 % de 138 cierres del puerto fue injustificado porque la altura real de la ola local estuvo por debajo de la pronosticada por el SMA (Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria 2016).

Asociado a los sistemas de predicción, de una red de monitoreo para el levantamiento de datos estadísticos anuales que capturen implícitamente el efecto de cambio climático, ayudará a un mejor pronóstico de la variación de los periodos de retorno asociados a los diseños actuales y por tanto a una selección adecuada de las medidas complementarias de adaptación y el análisis de la evolución de los periodos de retorno.

Actualmente el concepto de vulnerabilidad se enmarca bajo el concepto de amenaza múltiple de las infraestructuras de un país: sismo, ciclones, precipitaciones extremas, etc. En Chile, ya existe una red de boyas de la NOAA (boyas dart) para alertas de tsunamis como consecuencia de terremotos en lo profundo de la corteza terrestre, pero estas boyas no están diseñadas para medir oleaje como variable climática y tampoco existe un sistema suficientemente amplio de monitoreo climático, para considerar las amenazas del oleaje extremo y aumento del nivel del mar bajo contexto de cambio climático. Si se tienen a disposición este sistema, se integrará al criterio de evaluación de amenazas múltiples, aumentando por lo tanto la resiliencia de los sistemas de infraestructura de Chile y fortaleciendo el análisis multiamenaza.

Considerando la condicionalidad geográfica que aplica principalmente al aumento del nivel medio del mar, el cual, se estima más bien, su reducción en la macrozona norte de Chile por el levantamiento de la placa tectónica y que puede validarse con una red de monitoreo. Por otra parte, también es necesario un sistema de monitoreo en las regiones de mayor exposición e impacto de las variables de cambio climático, a efectos de reducir las pérdidas económicas y humanas, considerando en este caso a la Región V de Valparaíso, donde se ha registrado el mayor número de impactos y daño a causa de esas variables, y considerando además que se

ubica el puerto más importante de Chile y el importante valor comercial de esta región a efectos de exportación e importación.

El monitoreo podrá establecerse con conexión remota y antena a los sistemas de tecnología actual para efectos de actualización científica y tecnológica, permitiendo su constante perfeccionamiento en el futuro y generando datos para investigaciones en las universidades chilenas e institutos asociados a la infraestructura de zona costera, así como establecer un sistema de red informática que pueda estar a disposición de la ciudadanía que desee consultar y conocer el estado de su infraestructura y alertas de marejadas, mediante por ejemplo, aplicaciones de Smartphone. Otro punto muy importante, es que abre la oportunidad de un sistema integrado de estimación de riesgo para Chile bajo escenarios reales ocurridos o simulados, similar al software HAZUS de los Estados Unidos, para generación de mapas de riesgos, amenaza y vulnerabilidad del País, inclusive con posibilidad de estar integrado a la metodología HAZUS.

Finalmente, es importante destacar que la adaptación al cambio climático es un proceso dinámico altamente influenciado por aspectos sociales, económicos, institucionales, de gobernanza, tecnológicos, de mercado, etc. e incluso las sociedades con una alta capacidad de adaptación siguen siendo vulnerables a dicho fenómeno, que contempla variabilidad climática y s eventos climáticos extremos.

11.4. Análisis de factibilidad de aplicación de sistemas de monitoreo y alerta temprana

En tal sentido y como producto del análisis multicriterio, se ha determinado que los sistemas de monitoreo de amenazas y de servicios de infraestructura más relevantes son:

- Uso de datos de observación terrestre o imágenes satelitales, para determinar mediante un software de modelamiento las proyecciones de deslizamientos o remociones en masa para la región de Chile más vulnerable a este tipo de eventos como es Atacama y Antofagasta, administrado por Sernageomin y conectado al Centro de Alerta Temprana de la ONEMI (CAT).
- Uso de sistemas de vigilancia de playas de la región de Valparaíso, para el pronóstico y modelamiento de marejadas y subida del nivel del mar, administrado por el SHOA y conectado al Centro de Alerta Temprana de la ONEMI (CAT).
- Sistema comunitario de inspección de obras hidráulicas, que permitan anticiparse a los efectos de del cambio climático y cuenten con la capacidad de generar alertas sobre potenciales deficiencias en el funcionamiento o capacidad de dichas obras, este sistema debe ser administrado por la municipalidad y liderado por el MOP.

Considerando que, dentro del alcance de este estudio, se contempla el desarrollo de un análisis financiero para verificar la viabilidad de asignación de recursos de organismos multilaterales

para sistemas de monitoreo y alerta temprana, se destaca la importancia de desarrollar una propuesta específica que recoja una descripción y datos lo más aproximados posibles, sobre un eventual sistema, esto con el fin de hacer un ejercicio realista y determinar qué tanto es factible la adquisición de fondos por MOP u otras instituciones de Chile. En tal sentido a continuación se describen los sistemas de monitoreo propuestos alineados con los casos de estudio analizados en este reporte.

11.5. Ficha de sistema de monitoreo y alerta temprana para servicios de infraestructura hidráulica

Para el caso de los servicios de infraestructura de control aluvional en Quebrada Paipote se hace prioritario y necesario de manera urgente proponer e implementar sistemas de alerta temprana (SAT) que le permitan a la comunidad estar informados en tiempo real y ponerse en un lugar seguro al momento de gestarse flujos de detritos o aluviones.

Tabla 53. Ficha de sistema de monitoreo propuestos para servicios de infraestructura hidráulico

Nombre de sistema de monitoreo	Monitoreo de quebradas – sistema de alerta temprana (SAT) de aluviones
Objetivo	Instalación de un conjunto de sensores y dispositivos que permitan el monitoreo del caudal y altura de escurrimiento de flujos aluvionales del cauce del río, con el objetivo recoger datos en tiempo real de tormentas para así generar alertas o avisos anticipados de potenciales aluviones.
Descripción del funcionamiento	El monitoreo se debe realizar a la cantidad de agua caída por lluvia en los eventos de tormentas y también a la humedad antecedente del terreno donde se encuentran las cuencas. Se debe por ende instalar una serie de estaciones pluviométricas en distintas zonas de la cuenca (baja/media/alta) y además se debe instalar estaciones de monitoreo de la humedad del terreno también en zonas distintas y representativas de la cuenca. Estas mediciones deben ir acompañadas con medición de la temperatura. El monitoreo de las variables caudal y altura de escurrimiento se logran gracias a la implementación de una serie de sensores a lo largo del lecho del cauce de quebradas o microcuencas, donde se proyecta la localización de sensores de ultrasonidos y radar, y limnímetros respectivamente. Como complemento se pueden instalar una serie de geófonos a lo largo del cauce para así tener señales de vibraciones o temblores locales que pueda generar el proceso de fluidización del aluvión a lo largo de su trayecto. Todos estos sensores una vez que detectan una señal fuera de lo normal, envían una comunicación a sistemas de sirenas sonoras y luces de emergencia que se activan y a la vez envían a través de sistema de teléfono mensajes de texto dando aviso de un evento extremo de aluvión. Además, se complementa el sistema con una red de cámaras de televisión de circuito cerrado para así observar el cambio en el cauce de las quebradas.

Requerimientos técnicos	<ul style="list-style-type: none"> • Conexión a red de telefonía local Como alternativa se sugiere considerar fibra óptica o señal satelital. • Infraestructura de soporte de cámaras de televisión • <i>Datalogger</i> en cada una de las estaciones • Centro de monitoreo y vigilancia de cuencas • Software de procesamiento de datos y predicción de riesgo aluvional • Autoabastecimiento de energía para estaciones a través de paneles fotovoltaicos 	
Factibilidad de implementación local	Zona Norte	Alta
	Zona Central	Alta
	Zona Sur	Media
Costos de implementación	2 a 5 MM US\$	
Fuente	Swiss guidelines for flood events ¹⁵	

Fuente: Elaboración propia.

11.6. Ficha de sistema de monitoreo y alerta temprana para servicios de infraestructura de manejo de cauce

Para el caso de los servicios de infraestructura de manejo de cauce en Mataquito se hace prioritario y necesario de manera urgente proponer e implementar sistemas de alerta temprana (SAT) que le permitan a la comunidad estar informados en tiempo real y ponerse en un lugar seguro al momento de gestarse desborde del río y las consecuentes inundaciones de zonas agrícolas, ganaderas y residenciales.

Tabla 54. Ficha de sistema de monitoreo propuestos para servicios de infraestructura hidráulico

Nombre de sistema de monitoreo	Monitoreo de lecho del cauce del río – sistema de alerta temprana
Objetivo	. Instalación de un conjunto de sensores y dispositivos que permita el monitoreo del caudal y altura de escurrimiento de crecidas del río o cauce con el objetivo recoger datos en tiempo real de tormentas y escorrentía para así generar una alerta o aviso anticipado de potenciales inundaciones.
Descripción del funcionamiento	El monitoreo se debe realizar a la cantidad de agua caída por lluvia en los eventos de tormentas y también a la humedad antecedente del terreno donde se encuentran las cuencas. Junto con el monitoreo de lluvias se debe hacer un seguimiento a la cobertura de nieve y medición de línea de nieves o isoterma cero. Se debe por ende instalar una serie de estaciones pluviométricas y nivométricas en distintas zonas de la cuenca (baja/media/alta) y además se debe instalar estaciones de monitoreo de la

¹⁵ https://www.sistemaprotezionecivile.it/allegati/1149_Svizzera_Risk_Management.pdf

	<p>humedad del terreno también en zonas distintas y representativas de la cuenca. Estas mediciones deben ir acompañadas con medición de la temperatura en distintas escalas espaciales de la cuenca.</p> <p>El monitoreo de las variables caudal y altura de escurrimiento se logran gracias a la implementación de una serie de sensores a lo largo del lecho del río principal y afluentes tributarios, donde se proyecta la localización de sensores tipo radar, y limnómetros respectivamente. Es importante colocar esta instrumentación para que así se pueda tener registros de crecidas o avenidas extremas y no solo valores medio de caudal como se cuenta hoy en día. Todos estos sensores una vez que detectan una señal fuera de lo normal, envían una comunicación a sistemas de sirenas sonoras y luces de emergencia que se activan y a la vez envían a través de sistema de teléfono mensajes de texto dando aviso de un evento extremo de crecida del río. Además, se complementa el sistema con una red de cámaras de televisión de circuito cerrado para así observar el cambio de régimen en el flujo del río. De acuerdo a los datos recibidos, el sistema puede interpretar si los regímenes de flujo son nivales, pluviales o mixtos.</p>	
Requerimientos técnicos	<ul style="list-style-type: none"> • Conexión a red de telefonía local • Infraestructura de soporte de cámaras de televisión • <i>Datalogger</i> en cada una de las estaciones • Centro de monitoreo y vigilancia de cuencas • Software de procesamiento de datos y predicción de riesgo de inundaciones • Acceso a estaciones pluviométricas y nivométricas • Autoabastecimiento de energía para estaciones a través de paneles fotovoltaicos 	
Factibilidad de implementación local	Zona Norte	Baja
	Zona Central	Media
	Zona Sur	Alta
Costos de implementación	5 a 10 MM US\$	
Fuente	Flood control in the Netherlands ¹⁶	

Fuente: Elaboración propia.

11.7. Ficha de sistema de monitoreo y alerta temprana para servicios de infraestructura de zona costera

Para el caso de los servicios de infraestructura de manejo de cauce en el Paseo -Juan de Saavedra se hace prioritario y necesario de manera urgente proponer e implementar sistemas

¹⁶

https://www.researchgate.net/publication/237956136_Flood_management_options_for_The_Netherlands

de alerta temprana (SAT) que le permitan a la comunidad estar informados en tiempo real y ponerse en un lugar seguro al momento de gestarse la inundación costera.

Tabla 55. Ficha de sistema de monitoreo propuestos para servicios de infraestructura de zona costera

Nombre de sistema de monitoreo	Sistema de monitoreo y alerta integrado de zona costera V región
Objetivo	Implementar un sistema de monitoreo de distintas variables meteorológicas, oceanográficas y marítimas (Ej. Altura de ola) bajo una red amplía a lo largo de la costa donde se ubiquen los principales servicios de infraestructura más vulnerables integradas a una plataforma capaz de crear simular escenarios de marejadas y que esté conectado a un sistema de alerta temprana (SAT).
Alcance	El sistema de monitoreo y predicción tiene como objetivo estimar la altura de oleaje para un evento dado. Depende de los datos de entrada obtenidos en tiempo real por el sistema de monitoreo el sistema no predice el nivel medio del mar (es dato de entrada), tampoco predice los cambios morfodinámicos en la costa (erosión y sedimentación), pero las estimaciones del oleaje pueden servir de referencia como dato de entrada para estimación de esos cambios en otro modelo.
Descripción del funcionamiento	<p>Existe un modelo numérico computacional, de simulación del evento del temporal del 8-8-15, donde se estima la altura de oleaje a lo largo de la costa de Valparaíso, considerando información estadística de boyas de la DOP, Fugro-Oceanor, Ifremer, ERA-Interim, NOAA, EEM y Boya Watchkeepr. Sin embargo, la data no aglomera las mediciones de oleaje a largo plazo (máximo anual) para uso de distribuciones extremas o grandes valores, imposibilitando la validación de los modelos numéricos durante estos eventos extremos.</p> <p>Por ello, el modelo numérico desarrollado (Winkler P, 2015), es posible adaptarlo bajo escenarios futuros simulados considerando una data generada por una red de monitoreo ampliada que considere: comportamiento del viento, presión atmosférica y altura de oleaje bajo efecto de cambio climático, aumentando la precisión del modelo. Vale destacar, que estos modelos se basan en una grilla o malla modelada frente a la costa, posiblemente basado en un análisis de elementos finitos, que simule altura de oleaje para condiciones simuladas como, por ejemplo, un incremento del 10 % de la velocidad del viento (Takagi et al. 2012), baja de la presión atmosférica o la proyección de aumento del nivel del mar de 33 cm, considerado para el paseo bajo el escenario RCP 8.5 para Chile, sobre la altura de ola que impacta en la V región.</p> <p>Recordemos también, que el rediseño de paso de ajustó a un periodo de retorno de 100 años para estabilidad de la defensa y 8 años por sobrepaso</p>

	<p>en la berma inferior. Ya adelantábamos en el entregable 2 del proyecto, que la CEPAL pronosticó para Valparaíso y otras 3 localidades de Chile una disminución de los periodos de retorno, que implica un aumento de la probabilidad de ocurrencia de la altura de oleaje asociada a los periodos de retorno del rediseño, por lo que implica un riesgo mayor. Por ello, es necesario fortalecer y ampliar la red de monitoreo existente, lo cual permitirá recalibrar la proyección de los periodo de retorno (Tr) para la zona y que será útil además para otras infraestructuras costeras de la región de Valparaíso.</p> <p>Así mismo, el comportamiento del oleaje frente al paseo, la erosión y sedimentación, puede observarse con un sistema de cámaras instaladas para tal efecto, con observación en tiempo real y para efectos de proyectar el cambio morfodinámico en la costa del paseo, sobre su defensa ribereña, y el oleaje y mareas.</p>
<p>Requerimientos técnicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ampliar red de monitoreo del oleaje con mayor número de boyas para Valparaíso que ayude a recalibrar modelos de predicción y sistema instalado de cámaras para monitoreo real en variables como la erosión y sedimentación sobre el paseo asociados al oleaje y mareas. • <u>Modelo numérico de predicción de oleaje</u>: Es posible desarrollar un modelo de predicción que se alimente de la data recibida en tiempo real y pronostique el incremento de la altura de oleaje con gráfico de colores (malla o grilla) sobre una zona específica de la costa, objeto de interés. El modelo de predicción puede estar basado en modelos de elementos finitos que generen el diagrama de colores que indica la altura de oleaje. Desarrollar el software requiere del apoyo conjunto entre DMC, ONEMI, DOP y las Universidades; o bien recurrir a software ya existente que predice el comportamiento del oleaje sobre diversos tipos de costas y puertos. Se requiere para un modelo de predicción numérico lo siguiente: • Identificación del problema físico: predecir la altura significativa de la ola para un evento extremo dado en tiempo real. Considerar el comportamiento del mar aguas adentro asociado a la variación del viento y presión, para lo cual, existen modelos de balance energético que simulan estas acciones, como el SWAN (más efectivo en bahías abiertas) o el MSP (recomendado por admitir reflexión por obstáculos o construcciones costeras, es decir, bahías confinadas o cerradas). • Parámetros de entrada: asociados a la ecuación diferencial que gobierna el fenómeno físico de origen o propagación del oleaje (meteorológico), la ecuación de cálculo de la altura de oleaje como <i>Stoke</i> o <i>Mild Slope</i> que admiten las condiciones de contorno: batimetría y superficie libre (espejo de agua); entre algunos parámetros tenemos la pendiente del fondo marino, profundidad, nivel medio del mar, densidad del medio continuo o fluido (agua de

mar), etc., considerando además la influencia del viento y presión atmosférica que inciden en la altura de oleaje (SWAN y MSP). En línea general, la ola dependerá de la batimetría, viento y presión. Otros parámetros para considerar para obtener la altura total de ola son: el nivel medio del mar y la marea astronómica.

- Validación de resultados: simulación de los eventos extremos pasados y sistema de monitoreo con boyas al momento de eventos extremos (calibración sobre la marcha del evento), a efectos de ajustar el modelo para aproximarse al resultado real.
- La red de mareógrafos debe emitir una señal remota o vía satélite, en tiempo real a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y esta, una vez procesado los resultados, enviará la información de impacto al Centro de Gestión de Desastres (ONEMI) para emisión de alerta temprana a la población (considerar aplicaciones de Smartphone integradas al sistema de predicción); la emisión de datos desde los mareógrafos en tiempo real.
- En caso de no disponer de un nuevo sistema de boyas, la segunda opción es depender del sistema de boyas instalados actualmente a efectos de estimar variaciones del viento y presión atmosférica, o bien, de la predicción de las variables hidrometeorológicas emitido por el Instituto de Meteorología en Chile a través del sistema satelital, como datos de entrada para una simulación.
- Si no se dispone de una red de boyas existente, como tercera opción, establecer una data de entrada arbitraria o estimada a partir de la información existente para efectos de simulación. Se podrá incrementar alturas de oleaje: 4,5,6 y 7 metros, por ejemplo, en los contornos de la grilla mar adentro o simular incremento del viento (Ej. 10 % incremento velocidad del viento en el modelo SWAN, Takagi et al. 2011), de tal forma que tengamos escenarios preelaborados a efectos de seleccionarlos para una situación dada y generar la alerta.
- La batimetría local puede obtenerse con el uso de Drones acuáticos para la infraestructura de zona costera de objeto de estudio; en el caso presente, ya existe un precedente de batimetría con 4 pendientes levantadas usadas para el paseo Juan de Saavedra, sin embargo, se considera insuficiente para efectos de desarrollar un modelo numérico, por lo que para obtener las condiciones de contorno es necesaria la batimetría 3D basada en la tecnología LIDAR. Esta herramienta es bastante económica respecto al uso de otras y necesaria cuando el análisis se reduce a franjas costeras más locales.
- De igual manera, es posible establecer un sistema de conexión al software de predicción en tiempo real; por ejemplo establecer conexión entre las boyas de monitoreo mar adentro, enviando datos de altura de ola, viento y presión mar adentro, al software de predicción con horas de anticipación; el software podrá hacer un incremento de los valores de viento y presión, hasta un umbral límite establecido por DMC (modelos de predicción meteorológicos) y

	<p>estimar la altura de ola que impactará la zona de interés, enviando la notificación de impacto a la ONEMI y esta lanzar la alerta de impacto por oleaje extremo. En este punto de alerta temprana, es posible notificar a la población en tiempo real mediante uso de aplicaciones celulares que envíe el mensaje de alerta inmediata a la ciudadanía.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alternativo al uso de un modelo numérico de predicción, puede considerarse el uso del sistema de predicción meteorológico basado en imágenes satelitales, para efectos de predecir donde impactará el oleaje y establecer un modelo de predicción de la altura de impacto basado en inteligencia artificial (por ejemplo, redes neuronales artificiales) partiendo de data existente. Sin embargo, a precisión de los valores de predicción dependerá del número de datos existentes. • <u>Modelo numérico de predicción meteorológica</u>: está fuera del alcance de este proyecto y corresponde al estudio científico de las variables hidrometeorológicas para predicción de su comportamiento, considerando inclusive el efecto por cambio climático. Es de vital importancia porque en la medida que el modelo sea preciso, lo será el modelo numérico de predicción de altura de oleaje, ya que este último se alimentará de los datos proyectados del primero. • <u>Monitoreo por sistema de videocámaras en la costa</u>: ubicadas a cada 1500 o 2000 metros se puede tener un sistema de cámaras grabando la costa en tiempo real. El sistema se utiliza a nivel mundial y se denomina ARGUS. Este sistema se enfoca en estudiar los cambios morfológicos en la costa (erosión / sedimentación), pero no determinar el comportamiento del oleaje. Sin embargo, existen un proyecto de investigación (<i>Planning for an Australian National Coastal Observatory: monitoring and forecasting coastal erosion in a changing climate</i>, Ian L. Turner, Australia, 2011) donde se desarrolla un modelo genérico para observar el comportamiento del oleaje y los cambios morfodinámicos en la costa. Este modelo contempla el sistema de monitoreo de cámaras y 02 boyas oceanográficas para medición de altura de oleaje para efectos de calibrar un modelo de simulación (SWAN, MIKE21), y también se levanta la batimetría del fondo marino del área de interés, con el apoyo de la oficina NSW de Medio Ambiente y Patrimonio de Australia desde tierra mediante un “jetski” o moto de 4 ruedas y completado con moto acuática a profundidades entre 10 y 30 metros y a intervalos de 250 metros a lo largo de la costa. Este sistema combina uso de boyas, batimetría y red de cámaras. Este proyecto ha recopilado información de oleaje y cambio de la línea de la costa durante 3 años en sitios específicos y el objetivo a largo plazo es generar un modelo de predicción alternativo a los modelos numéricos, comparando los videos recopilados con las cámaras del oleaje y lo recopilado con las boyas. Este sistema puede también ayudar a soportar modelos numéricos de predicción. 	
<p>Factibilidad de implementación local</p>	<p>Zona Norte</p>	<p>Media</p>
	<p>Zona Central</p>	<p>Alta</p>
	<p>Zona Sur</p>	<p>Media</p>

Costos de implementación	Adquisición y Mantenimiento de 01 boya (incluyendo personal): 700.000 \$ Suponiendo uso de 5 boyas: 3.500.000 \$ Dron acuático equipado para batimetría (incluyendo personal): 4.000 \$ Desarrollo Sistema Numérico de Predicción de Oleaje: 30.000 \$ Costo total: 3,5 MM US\$
---------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan algunas de las recomendaciones más relevantes de acuerdo con el análisis hecho para el desarrollo de la propuesta de sistema de monitoreo para la región de Valparaíso Paseo Juan de Saavedra:

- Combinar un sistema genérico de video cámaras soportado con equipos de levantamiento de batimetría y boyas oceanográficas, con un modelo numérico computacional de predicción. El primero sistema ayudaría a validar el segundo. El segundo sistema podría predecir escenarios futuros de comportamiento de oleaje.
- Ambos sistemas propuestos, requieren necesariamente de la recopilación de datos de altura de oleaje, viento y presión atmosférica en sitio, es decir, uso de boyas oceanográficas. Por el antecedente del proyecto en Australia mencionado anteriormente, se requerirían entre 02 y 03 boyas.
- En el caso de no poder adquirir boyas nuevas, revisar la posibilidad de emplear las existentes en el País.
- En el caso de no disponer de las boyas existentes, debe separarse el sistema de monitoreo por cámaras y el modelo numérico de simulación. El primero, por sí solo, no determina el comportamiento del oleaje, pero si ayuda a conocer el comportamiento de los cambios morfodinámicos de la línea de costa y en esa línea debe ir orientado. El segundo puede alimentarse con data existente y escenarios futuros preestablecidos.
- La disposición de un servicio de batimetría es obligatoria, para efectos de predicción del oleaje y como variable de diseño. Existen diversas formas de levantar batimetría, entre las más practicas están uso de "jetski" desde tierra enlazado a motos acuáticas con sistema de sondas, o bien el uso de drones acuáticos submarinos basados en tecnología LIDAR.
- Considerar un modelo de predicción numérica enlazado a un sistema de alerta temprana en tiempo real. Se recomienda comenzar a realizar proyectos piloto de esta índole.
- Los sistemas de alerta temprana protegen vidas y pueden incorporarse mediante aplicaciones vía Smartphone.
- Recordar que la data existente de los últimos años contiene implícitamente el efecto de cambio climático, pero es necesario disponer de todos los datos existentes a la fecha desde el siglo pasado para visualizar mejor ese efecto. Frente a datos insuficientes para eventos extremos, aplicar simulaciones de Montecarlo para reproducir nuevos datos artificiales partiendo de la existente.

- Para efectos de predicciones simuladas más confiables, promover y apoyarse con estudios probabilísticos que partan de las simulaciones. Los modelos probabilísticos ayudaran a calibrar los periodos de retorno asociados a las probabilidades de ocurrencia de un evento extremo y calibrar los modelos numéricos de predicción y simulación de escenarios de oleaje extremo bajo influencia de cambio climático. Apoyarse con modelos probabilistas existentes como los escenarios RCP.
- De lo anterior, se resumen las necesidades futuras para monitoreo y predicción: sistema de monitoreo con video cámaras, sistema de monitoreo con boyas oceanográficas, sistema numérico de simulación y predicción de oleaje, equipos para levantamiento de batimetría, simulaciones y modelos probabilistas, revisión de los códigos de diseños (periodos de retorno) y desarrollo de sistema de alerta temprana.
- Implementar la metodología de diagnóstico de vulnerabilidad en infraestructura de zonas costeras bajo impacto de cambio climático, desarrollada en este proyecto.

12. SISTEMATIZACIÓN DE FONDOS INTERNACIONALES EN MATERIA DE CAMBIO CLIMATICO

En esta sección se plantea el desarrollo de tablas comparativas que presentan los detalles de los fondos climáticos que operan actualmente en la región y que financian medidas concretas de adaptación similares a las identificadas tras el análisis de la vulnerabilidad de obras de infraestructura hidráulicas y de zona costera. Para la identificación de dichos fondos se podrían aplicar los siguientes criterios:

- Fondos que financian la adaptación al cambio climático;
- Chile puede recibir fondos de dichas instituciones financieras internacionales;
- Los diferentes fondos que financian actividades similares a las propuestas de sistemas de monitoreo y alerta temprana como medidas de adaptación.

Estos han sido los principales utilizados para el mapeo de los fondos internacionales a los que se podría acceder, con el objetivo de obtener financiamiento a las medidas de propuestas. En tal sentido, a continuación, se desarrollará una tabla con información relevante sobre cada fuente de financiamiento identificada.

12.1. Fondos internacionales de adaptación al cambio climático

La siguiente tabla resume, la información más relevante para desarrollar el análisis de factibilidad de sistemas de monitoreo y alerta temprana como medidas de adaptación al Cambio climático de los servicios de infraestructura de control aluvional, manejo de cauce y zona costera. Los principales descriptores, a desarrollar son:

- Fondo: Identificación del fondo
- Objetivo del fondo: Fin del financiamiento

- Sector/Foco temático: Enfoque de financiamiento puede referirse a una descripción general o específica (Ej. Mitigación y adaptación al cambio climático o adaptación al cambio climático en infraestructura)
- Tipo de actividades financiadas: Descripción que abarca el financiamiento tanto de iniciativas de inversión como medidas *soft* asociadas a gestión de recursos, gestión del conocimiento o de la información entre otras.
- Modalidades de acceso: Descripción general sobre los distintos instrumentos y/o canales de financiamiento usados por el fondo (Ej. Acceso a través de *loans* y entidades acreditadas por el GCF))
- Elegibilidad: Descripción sobre el tipo de organización/institución o proyecto elegible para ser financiado.

Tabla 56. Principales fondos internacionales de financiamiento de medidas de adaptación de infraestructura al cambio climático

Fondo	Objetivos	Sector/Foco temático	Tipo de actividades financiadas	Modalidades de acceso	Elegibilidad
Adaptation Fund (AF)	El objetivo del AF es apoyar actividades de adaptación concretas que reduzcan los efectos adversos del cambio climático que enfrentan las comunidades, los países y los sectores.	Adaptación al cambio climático Resiliencia Gestión del riesgo de desastres Los recursos naturales y el medio ambiente	Las actividades apoyadas incluyen: - Gestión de recursos hídricos, gestión de tierras, agricultura, salud, desarrollo de infraestructura, ecosistemas frágiles; - Mejorar la vigilancia de las enfermedades y los vectores afectados por el cambio climático y los sistemas relacionados de pronóstico y alerta temprana, y en este contexto mejorar el control y la prevención de enfermedades. - Apoyar la creación de capacidad, incluida la capacidad institucional, para	Se puede acceder a los recursos financieros del Fondo de Adaptación mediante la presentación de una propuesta de proyecto / programa a través de entidades de implementación nacionales, regionales o multilaterales acreditadas. Las propuestas de proyectos / programas son consideradas por la Junta del Fondo de Adaptación tres veces al año. Se puede acceder al Fondo a través de la modalidad de acceso directo, a través de entidades implementadoras nacionales y regionales. Esto permite a las entidades acceder directamente al financiamiento y administrar todos los aspectos de sus proyectos, incluido el diseño, la implementación, el monitoreo y la evaluación. Los documentos de la solicitud se pueden encontrar aquí: https://www.adaptation-fund.org/apply-funding/project-funding/project-proposal-materials/	Instituciones acreditadas de países en desarrollo Partes en el Protocolo de Kyoto. Hay tres categorías de instituciones acreditadas: - Entidades implementadoras nacionales (NIE) - Entidades implementadoras regionales (RIE) - Entidades de Implementación Multilateral (MIEs) El proceso de acreditación se describe aquí: https://www.adaptation-fund.org/apply-funding/accreditation/ Promedio de 17 y 27 meses para acreditar a las entidades implementadoras nacionales / regionales y

			medidas preventivas, planificación, preparación y gestión de desastres relacionados con el cambio climático; - Fortalecimiento de los centros nacionales y regionales existentes o el establecimiento de redes de información para responder rápidamente a los fenómenos meteorológicos extremos, utilizando la tecnología de la información tanto como sea posible.		multilaterales, respectivamente, en los últimos cuatro años.
European Investment Bank (EIB)ⁱ	EIB es el banco de la Unión Europea (UE). Representa los intereses de los Estados miembros de la UE. Trabaja en estrecha colaboración con otras instituciones	Innovación y habilidades Acceso a financiación para pequeñas empresas. Infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> • Promoción de la cohesión económica y social en la UE; • Mejora de la infraestructura de transporte y telecomunicaciones de la UE. • Suministro seguro 	Para acceder a los recursos financieros del EIB, los proponentes del proyecto deben presentar a la Dirección de Operaciones del Banco una descripción detallada de su proyecto junto con los posibles acuerdos de financiamiento. Más información sobre la documentación requerida está disponible en: http://www.eib.org/infocentre/publications/all/application-document-for-an-eib-loan.htm	Los proponentes de proyectos elegibles incluyen entidades del sector público y privado. Cualquier proyecto promovido debe estar en línea con los criterios de elegibilidad del BEI y ser financieramente y económicamente sólido. BEI

	<p>de la UE para implementar la política de la UE.</p> <p>Ofrece financiación y experiencia para proyectos de inversión sostenible que contribuyen a los objetivos de la política de la UE.</p>	<p>Clima y medio ambiente</p>	<p>de energía, producción, transferencia y distribución, uso más eficiente de la energía, suministro de energía alternativa;</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de una economía de la UE competitiva, innovadora y basada en el conocimiento; • Inversión en capital humano; • Esquemas del entorno natural y urbano. • Desarrollo de pequeñas y medianas empresas; • Proyectos industriales que mejoren la competitividad de la UE; • Apoyar las políticas de cooperación exterior y desarrollo de la UE. 	<p>El proponente del proyecto puede establecer contactos iniciales con el BEI para discutir una propuesta y debe proporcionar información suficiente para que el BEI pueda evaluar si el proyecto cumple con los objetivos de préstamo del BEI y tiene un plan de negocios bien desarrollado. Los proponentes deben proporcionar una descripción detallada de sus inversiones de capital y posibles acuerdos de financiamiento.</p>	<p>presta directamente a grandes proyectos individuales.</p> <p>Los criterios de elegibilidad para las finanzas combinadas se pueden encontrar aquí: https://goo.gl/GqKqku</p>
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>GEF-Special Climate Change Fund (SCCF)ⁱⁱ</p>	<p>El SCCF se estableció para financiar actividades, programas y medidas relacionadas con el cambio climático que son complementarios a los financiados a través del área focal de cambio climático del FMAM, bajo sus ventanas de financiamiento: i) Adaptación al cambio climático, ii) Transferencia de tecnología, iii) Mitigación en sectores seleccionados, y iv) Diversificación económica.</p>	<p>Adaptación y mitigación</p>	<p>El SCCF tiene dos ventanas activas (1) Adaptación y (2) Transferencia de tecnologías. Su instrumento de gobierno también le permite apoyar (3) proyectos sobre energía, transporte, industria, agricultura, silvicultura y gestión de residuos; y (4) actividades para apoyar a los países en desarrollo cuyas economías dependen en gran medida de los ingresos generados por la producción, el procesamiento y la exportación o del consumo de combustibles fósiles y productos asociados de uso intensivo de energía para diversificar sus economías.</p>	<p>El proponente del proyecto puede presentar un concepto de proyecto a la Secretaría del FMAM a través de uno de los organismos de implementación del FMAM, con una carta de respaldo del gobierno del país (proporcionada por el Punto Focal Operativo del FMAM designado en el país).</p> <p>Mientras que para proyectos de tamaño mediano (más pequeños o de hasta \$ 1M), no se requiere una solicitud de respaldo del CEO, para proyectos de tamaño completo (más de \$ 1m), la agencia de implementación debe presentar una solicitud de respaldo del CEO después de que el proyecto haya aprobado por el Consejo. Una vez que el CEO del FMAM respalda el proyecto, la financiación se entrega a la Agencia de Implementación.</p>	<p>Todos los países no incluidos en el Anexo 1 son elegibles para solicitar el financiamiento del FMAM. Sin embargo, el FMAM da prioridad a los países más vulnerables de África, Asia y los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo (PEID).</p> <p>Cabe señalar que solo se proporciona financiamiento para abordar los impactos del cambio climático además de las necesidades básicas de desarrollo en los sectores socioeconómicos vulnerables. Los proyectos no necesitan generar beneficios ambientales globales mientras se pueda demostrar la adicionalidad.</p>
-------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Global Environment Facility (GEF) Trust Fund - GEF 6</p>	<p>El Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) tiene como objetivo ayudar a abordar los problemas ambientales más apremiantes del mundo. Los fondos del FMAM están disponibles para países en desarrollo y países con economías en transición para cumplir con los objetivos de los convenios y acuerdos ambientales internacionales.</p>	<p>Cambio climático Los recursos naturales y el medio ambiente La biodiversidad Conservación Manejo de recursos naturales</p>	<p>E 1) Sistemas alimentarios, uso de la tierra y restauración; 2) Ciudades sostenibles; y 3) Manejo Forestal Sostenible Para más información consultar Anexo A del GEF- 7: https://www.thegef.org/documents/gef-7-programming-directions</p>	<p>Las entidades acreditadas presentan propuestas de proyectos a la Secretaría del FMAM. El proceso de acreditación se describe aquí: https://www.thegef.org/documents/accreditation-gef-project-agencies</p> <p>Las agencias elegibles para la acreditación incluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Instituciones nacionales - Organizaciones regionales. - Organizaciones de la sociedad civil / organizaciones no gubernamentales. -Agencias y programas especializados de las Naciones Unidas, y - Otras organizaciones internacionales. <p>Se puede acceder a la financiación del FMAM a través de entidades acreditadas, denominadas Agencias de Proyectos del FMAM. Trabajarán directamente con la Secretaría y el Fideicomisario del FMAM para ayudar a los países receptores en la preparación y ejecución de los proyectos financiados por el FMAM, lo que les permitirá acceder directamente a los recursos de los fondos fiduciarios administrados por el FMAM.</p>	<p>- Países elegibles: los países pueden ser elegibles para recibir financiamiento del FMAM de una de las siguientes maneras: a) si el país ha ratificado los convenios, el FMAM cumple y cumple con los criterios de elegibilidad decididos por la Conferencia de las Partes de cada convenio; o b) si el país es elegible para recibir financiamiento del Banco Mundial (BIRF y / o AIF) o si es un receptor elegible de asistencia técnica del PNUD a través de su objetivo para las asignaciones de recursos desde el núcleo (específicamente TRAC-1 y / o TRAC- 2).</p>
<p>Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR)ⁱⁱⁱ</p>	<p>El GFDRR tiene como objetivo reducir la vulnerabilidad de los países en desarrollo a los peligros naturales y</p>	<p>Cambio climático Resiliencia Gestión del riesgo de desastres Gestión de</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Acceso abierto a información de riesgo. - Infraestructura resiliente - Ciudades resilientes - Servicios de 	<p>Se puede acceder a la financiación del GFDRR mediante la presentación de una propuesta de proyecto a la Secretaría del GFDRR a través del sitio web del GFDRR.</p> <p>La solicitud se evalúa según los siguientes criterios de revisión:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Coherencia con la misión del GFDRR: el proyecto 	<p>Chile es uno de los países que pueden acceder al GRDRR. Chile cuenta actualmente con dos proyectos activos financiados por GRDRR: https://www.gfdrr.org/chile</p>

	ayudarlos a adaptarse al cambio climático.	desastres Alivio de desastres Reducción de Desastres	Hidromet. - protección financiera - Resiliencia comunitaria. - Resiliencia al cambio climático - Recuperación resistente - género	propuesto debe estar en línea con el objetivo del GFDRR de incorporar la GRD y apoyar el desarrollo sostenible. <ul style="list-style-type: none"> • Compromiso del gobierno: la propiedad del país de las actividades específicas debe demostrarse claramente. • Coordinación de donantes: El proyecto debe promover una coordinación efectiva con las actividades de los socios de GFDRR. Las actividades específicas de cada país no deben entrar en conflicto con los programas del Banco Mundial y otros donantes. Evaluación: <ul style="list-style-type: none"> • Los proponentes que cumplen con los criterios de elegibilidad y evaluación son notificados por la Secretaría del GFDRR para preparar una propuesta detallada. • La Secretaría del GFDRR evalúa las propuestas detalladas. • La propuesta se presenta al donante correspondiente para su no objeción, si la propuesta se financiará con fondos no básicos. • Si la propuesta se financiará con fondos básicos, la propuesta se enviará al Grupo Consultivo para su no objeción. Una vez que se aprueba una actividad, la Secretaría del GFDRR y los proponentes firman un Acuerdo de Subvención / Memorando de Entendimiento.	
GCF^{iv}	El FVC promueve un cambio de paradigma hacia vías de desarrollo resistentes a las emisiones y al clima	Adaptación y Mitigación Sectores de adaptación: - Seguridad	El FVC financia actividades para habilitar y respaldar la adaptación, la mitigación (incluida REDD +), el	Los proponentes del proyecto pueden presentar una propuesta de financiamiento a través de las Autoridades Nacionales Designadas (NDA). Los países elegibles tienen acceso directo a través de entidades subnacionales, nacionales y regionales	Las entidades públicas y privadas son elegibles siempre y cuando cumplan con los requisitos de acreditación. Estos pueden incluir: ministerios

	<p>con bajas emisiones al brindar apoyo a los países en desarrollo para que limiten o reduzcan sus emisiones de gases de efecto invernadero y se adapten a los impactos del cambio climático, considerando las necesidades de aquellos países en desarrollo particularmente vulnerables a la Efectos adversos del cambio climático.</p>	<p>sanitaria, alimentaria y del agua; - Medios de subsistencia de personas y comunidades; - Ecosistemas y servicios ecosistémicos; - Infraestructura y entorno construido. Sectores de mitigación: - Acceso a energía de baja emisión y generación de energía; - Transporte de bajas emisiones. - Edificios energéticamente eficientes, ciudades e industrias;</p>	<p>desarrollo y la transferencia de tecnología, el desarrollo de capacidades y la preparación de informes nacionales.</p>	<p>acreditadas. También se puede acceder a los fondos del FVC a través de entidades acreditadas internacionales, como bancos multilaterales de desarrollo y agencias de la ONU. El GCF ha establecido una instalación del sector privado (PSF) para maximizar la participación del sector privado. El PSF tiene como objetivo movilizar fondos a escala de inversionistas institucionales como bancos comerciales, fondos de inversión, compañías de seguros, pensiones y fondos de riqueza; y trabajar con micro, pequeñas y medianas empresas locales y desbloquear soluciones innovadoras para abordar los impactos del cambio climático.</p>	<p>nacionales o agencias gubernamentales, bancos nacionales de desarrollo, fondos nacionales para el clima, bancos comerciales, instituciones financieras, etc.</p>
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

		- Uso sostenible de la tierra y manejo forestal.			
GCCA+	Fortalecer el diálogo y la cooperación sobre el cambio climático entre la Unión Europea (UE) y los países en desarrollo más vulnerables al cambio climático, en particular los países menos adelantados (PMA) y los pequeños Estados insulares en desarrollo (PEID), que son los más afectados por los efectos adversos de cambio climático.	- adaptación - mitigación - DRR - REDD - creación de capacidad	- Incorporación del cambio climático en las estrategias de reducción de la pobreza y desarrollo. - Adaptación, sobre la base de los Programas de Acción de Adaptación Nacional (NAPA) y otros planes nacionales. - Reducción del riesgo de desastres (RRD) - Reducción de emisiones por deforestación y degradación forestal (REDD). - Mejora de la participación en el Mercado Mundial del Carbono y el Mecanismo de	Las agencias gubernamentales que no se benefician del apoyo técnico y financiero de GCCA, pero están dispuestas a participar en dicho programa, deben expresar formalmente su interés a través de la Delegación de la UE en su país. La Delegación de la UE, en colaboración con la sede de la CE, verificará si el país socio cumple con los criterios de selección para la financiación de GCCA y si hay fondos disponibles. En paralelo, puede iniciarse un diálogo sobre posibles áreas de intervención y prioridades. En caso de que no haya fondos disponibles, se puede colocar a los países en una 'lista de espera' hasta que haya nuevos fondos disponibles. Para obtener más información, visite http://www.gcca.eu/about-the-gcca/how-to-participate/Participar	El Fondo utiliza un conjunto de criterios de elegibilidad: - el país debe pertenecer al grupo de PMA o PEID y a los beneficiarios de la ayuda (de acuerdo con las listas oficiales de la OCDE / CAD y la ONU). - Vulnerabilidad del país al cambio climático. - La capacidad de adaptación del país. - Contexto político. Idealmente, el país debería contar con políticas nacionales y / o sectoriales de cambio climático o expresar su intención de prepararlas. Los fondos se asignan según las cifras de población y la disponibilidad de fondos.

			Desarrollo Limpio (MDL)		
International Bank for Reconstruction and Development (IBRD)^v	El IBRD apunta a lograr los siguientes objetivos para el 2030: - Acabar con la pobreza extrema al disminuir el porcentaje de personas que viven con menos de \$ 1.90 por día a no más del 3%; y - Promover la prosperidad compartida al fomentar el crecimiento de los ingresos del 40% inferior para todos los países.	Adaptación y Mitigación	El IBRD financia proyectos en los siguientes sectores: -Agricultura; -Educación; -Energía y extractivas; -Sector financiero; -Salud; - Industria y Comercio; -Información y comunicación; -Administración pública; -Protección social; -Transporte; -Agua/ Saneamiento / Residuos.	El IBRD trabaja con el gobierno de un país prestatario y otras partes interesadas para diseñar una estrategia, denominada Marco de asociación con el país, que identifica las prioridades más altas del país para reducir la pobreza y mejorar los estándares de vida. Estos marcos definen cómo se puede utilizar la asistencia financiera y de otro tipo en el país para tener el mayor impacto. El IBRD y el gobierno preparan un concepto inicial del proyecto y el equipo del proyecto del IBRD define los elementos básicos en una Nota Conceptual del Proyecto. En esta etapa se requieren otros dos documentos: el Documento de información del proyecto, que describe el alcance del proyecto; y la Hoja de datos de salvaguardias integradas, que identifica los problemas clave relacionados con las políticas de salvaguardia del BIRF para los problemas ambientales y sociales.	El IBRD trabaja principalmente con los gobiernos.
International Finance Corporation (IFC)^{vi}	El objetivo de la IFC es ayudar al desarrollo económico alentando el crecimiento de la empresa privada productiva en sus	Adaptación y mitigación	Las prioridades de la CFI en Europa y Asia Central: -Mercados financieros -Infraestructura -Energía y Negocios Climáticos.	Las propuestas de inversión se pueden enviar a la IFC siguiendo la guía disponible en: http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/corp_ext_content/ifc_external_corporate_site/soluciones/propuestas_de_inversion Después de este contacto inicial, la CFI revisa las propuestas de inversión y puede solicitar al proponente	Un proyecto para ser elegible debe: - Estar en un país en desarrollo que sea miembro de la CFI; - Estar en el sector privado; - Tener buenas perspectivas de ser rentable;

	países miembros, particularmente en las áreas en desarrollo.		<ul style="list-style-type: none"> -Negocios -Oportunidades para mujeres. 	que proporcione un estudio de factibilidad detallado o un plan de negocios para determinar si se debe evaluar o no el proyecto.	<ul style="list-style-type: none"> - Beneficiar a la economía local; y - Ser ambiental y socialmente sanos, cumpliendo con nuestros estándares ambientales y sociales, así como con los del país anfitrión. Cabe señalar que la CFI no otorga préstamos directamente a micro, pequeñas y medianas empresas o empresarios individuales, pero varios clientes de inversiones de la CFI son intermediarios financieros que prestan a pequeñas empresas.
--	--------------------------------------------------------------	--	---------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Acclimatise, 2018.

12.2. Análisis comparativo de postulación a fondos internacionales

A continuación, se propone un análisis comparativo de los fondos más relevantes identificados previamente considerando el financiamiento de sistemas de monitoreo integrados con SAT para los servicios de infraestructura de control aluvional y de paseo de zona costera.

Tabla 57. Tabla comparativa de fondos para el financiamiento de sistemas de monitoreo y SAT para servicios de infraestructura

Fondo	Ventajas	Desventajas	Factibilidad
AF	<ul style="list-style-type: none"> Los sistemas de monitoreo de servicios de infraestructura de control aluvional van en línea con el foco temático del fondo (Gestión del riesgo de desastres) Ha considerado previamente el financiamiento de sistemas de alerta temprana. Fortalecimiento de centros nacionales y regionales de respuesta frente a fenómenos meteorológicos extremos Dentro de los criterios de elegibilidad se plantea que sea un país en desarrollo con particularmente vulnerable a los efectos del cambio climático 	<ul style="list-style-type: none"> No existen entidades implementadoras nacionales acreditadas solo entidades multilaterales Proceso de acreditación de entidades nacionales regionales de más de 2 años 	Alta
EIB	<ul style="list-style-type: none"> Oferta financiamiento para infraestructura No implica la intervención de terceras instituciones como entidades acreditadas relación directa con la entidad de financiamiento lo que hace el proceso más ágil. 	<ul style="list-style-type: none"> No se identifica de manera explícita financiamientos hacia sistemas de alerta temprana Debido al monto de la iniciativa de sistemas de monitoreo amerita un modelo de financiamiento compartido mixto o compartido. 	Media
SCCF	<ul style="list-style-type: none"> Financia programas de transferencia de tecnologías, lo que se alinea con las nuevas tecnologías asociadas a los sistemas de monitoreo remoto y SAT 	<ul style="list-style-type: none"> No se identifican experiencias de financiamiento de sistemas de alerta temprana para servicios de infraestructura El Fondo actualmente da más prioridad a los países más vulnerables a los efectos del cambio climático ubicados en África y Asia 	Baja
GEF	<ul style="list-style-type: none"> Financia medidas de adaptación 	<ul style="list-style-type: none"> La elegibilidad depende de 	Media

	al cambio climático	<p>si Chile es un receptor atractivo de fondos de financiamiento del WB</p> <ul style="list-style-type: none"> • Su principal foco de financiamiento se encuentra en recursos naturales y biodiversidad 	
GFDRR	<ul style="list-style-type: none"> • Los sistemas de monitoreo y SAT están alineados con el objetivo del fondo • Existen antecedentes de financiamiento de proyectos de gestión de riesgo de desastres, infraestructura resiliente, resiliencia comunitaria y resiliencia general al CC 	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere de intermediarios para su postulación se puede hacer de forma directa • Requiere la coordinación de donantes lo que puede retrasar la liquidación de fondos 	Media
FVC	<ul style="list-style-type: none"> • Existen en curso iniciativas de proyectos que se espera sean financiadas por el FVC en el mediano plazo (Ej. Valhala) • Chile cuenta en la actualidad con entidades nacionales en proceso de acreditación como gestoras de proyectos del FVC • Se puede acceder al fondo a través de entidades acreditadas internacionalmente (Ej. CAF). • Las probabilidades de financiamiento del proyecto aumentan notoriamente cuando se plantean actividades de cofinanciamiento con el sector privado 	<ul style="list-style-type: none"> • Cualquier proyecto presentado amerita como antecedente representar un cambio de paradigma, lo que dificulta el financiamiento de sistemas de monitoreo y SAT, aunque no los excluye, ya que en general este tipo de actividades se inscribe en procesos programáticos más amplios. 	FVC
GCCA+	<ul style="list-style-type: none"> • La elegibilidad de un país depende de su nivel de alta vulnerabilidad al cambio climático requisito con el que Chile cumple 	<ul style="list-style-type: none"> • Financia proyectos en donde se evidencia la cooperación entre países lo que dificulta la aprobación de fondos exclusivamente para un sistema de monitoreo y SAT para Chile 	Media
IBRD	<ul style="list-style-type: none"> • El financiamiento de medidas de adaptación y mitigación al cambio climático se encuentra dentro de sus objetivos • Financia programas de proyección social siendo esta una categoría relevante dentro de 	<ul style="list-style-type: none"> • Implica una gran articulación de distintos actores gubernamentales 	Media

	proyectos de sistemas de monitoreo y SAT		
IFC	<ul style="list-style-type: none"> • El financiamiento de medidas de adaptación y mitigación al cambio climático se encuentra dentro de sus objetivos • Se destaca dentro de sus prioridades la inversión y financiamiento en infraestructura • No amerita el desarrollo de entidades acreditadas 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de una estructura nacional que garantice el cumplimiento de las salvaguardas sociales y ambientales • Fondos dirigidos especialmente a sector privado en donde se demuestre la probabilidad de éxito de un modelo de negocio 	Media

Fuente: Elaboración propia.

13. **CONCLUSIONES**

- Se identifica la oportunidad de crear de la unidad de cambio climático dentro del MOP conformado por un comité técnico con competencias para promover la integración de las variables climáticas prospectivas en cada una de las etapas del ciclo de vida de proyectos de servicios de infraestructura.
- Se identifica la necesidad de desarrollar programas de protección del territorio para diversas amenazas climáticas (Ej. aluviones, marejadas, tormentas cálidas), bajo un enfoque de vulnerabilidad climática prospectiva con el objetivo de definir los requerimientos técnicos y/o servicios de infraestructura necesarios para garantizar la resiliencia climática en infraestructura dentro de las próximas décadas, y que por defecto deberían ser incluidos dentro del proceso de planificación del MOP (Ej. Construcción de mapas de riesgo, medición de vulnerabilidad climática a una alta resolución del territorio, identificación de nuevas oportunidades de financiamiento), con el fin de reducir el enfoque reactivo de las direcciones ante emergencias de origen climático
- Se plantea la necesidad de construir una base de datos prospectivos sobre variables climáticas establecidas como condiciones de borde en el proceso de diseño de obras de infraestructura, mediante el aprovechamiento de los modelos numéricos desarrollados por las universidades con el objetivo de mejorar la resolución territorial y actualizar códigos de diseño.
- Se demostró que mediante la aplicación de la metodología propuesta de integración de las variables climáticas en el diseño de un proyecto (análisis de vulnerabilidad), se pueden identificar y priorizar las distintas medidas de adaptación, grises, verdes, Brown o híbridas para el mejoramiento de la resiliencia de la infraestructura frente a las amenazas climáticas bajo las que se encuentra expuesto en el territorio de Chile.
- Se identifica la necesidad de actualizar los códigos de diseño, en donde se contemple un análisis estadístico de datos climáticos tanto retrospectivo como prospectivo, con el fin de integrar a los modelos probabilísticos convencionales de diseño de servicios de infraestructura, la variabilidad climática de forma sistemática.
- Se destaca la importancia de redefinir los conceptos de evaluación social de proyectos desde la Dirección de planeamiento del MOP, con el objetivo de incorporar los beneficios sociales de implementación de medidas de adaptación e incrementar la factibilidad de proyectos que pueden ser considerados inviables de acuerdo al análisis convencional de costo eficacia o costo efectividad.

14. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

- Acclimatise (2018), Entrevista telefónica realizada a Maribel Hernández, representante oficial para Latinoamérica en fecha de 03 de septiembre de 2018.
- Aleotti P (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. Eng Geol 73(3–4):247–265. doi: 10.1016/j.enggeo.2004.01.007
- Bacchini M, Zannoni A (2003) Relations between rainfall and triggering of debris-flow: case study of Cancia (Dolomites, Northeastern Italy). Nat Hazards Earth Syst Sci 3:71–79.
- Barton, J. (2009). Revisión de marcos conceptuales y análisis de enfoques metodológicos (barreras y viabilidad) para el desarrollo de una infraestructura urbana sostenible y eco-eficiente. CEPAL: Eco-eficiencia y desarrollo de infraestructura urbana sostenible en América Latina y el Caribe (ECLAC-ESCAP. ROA101). Disponible en internet: <https://www.cepal.org/coeficiencia/noticias/paginas/2/36162/Barton.pdf> Visto el 01/09/2018.
- Berti M, Simoni A (2005). Experimental evidences and numerical modelling of debris flow initiated by channel runoff. Landslides 2:171–182. doi:10.1007/s10346-005-0062-4.
- Brand EW, Premchitt J, Phillipson HB (1984) Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong. Proceedings of 4th international symposium on landslides, Canadian Geotechnical Society, Toronto, pp 377–384
- Cannon SH, Ellen SD (1985). Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California. Calif Geol 38:267–272
- CCG, (2012). Adaptación al cambio climático de la infraestructura pública en Chile. Disponible en internet: http://www.dgop.cl/centro_documental/Documents/Areas_DGOP/SEMAT/CCG_UC_MOP_Adaptacion_Cambio_Climatico_Infra_Publica_DIC2012.pdf visto el 01/08/2018.
- Chan RKS, Pun WK (2004). Landslip warning system in Hong Kong. Geotech News 22(4):33–34
- Chang SY (2003) Evaluation of a system for detecting debris flows and warning road traffic at bridges susceptible to debris flow hazard. In: Rickenmann D, Chen CL (eds) Debris-flow hazards mitigation: mechanics prediction, and assessment. Millpress, Rotterdam, pp 731–742.
- Chen C-Y, Chen T-C, Yu F-C, Yu W-H, Tseng C-C (2005) Rainfall duration and debris-flow initiated
- CR2, (2018). Plataforma de simulaciones climáticas para proyectar escenarios futuros. Disponible en internet: <http://simulaciones.cr2.cl/> visto el 01/08/2018.

- Deganutti AM, Marchi L, Arattano M (2000) Rainfall and debris-flow occurrence in the Moscardo basin (Italian Alps). In: Wieczorek GF, Naeser ND (eds) Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment. A.A. Balkema, Rotterdam, pp 67–72.
- DGA, (2016). Atlas del Agua. Disponible en internet: <http://www.dga.cl/DGADocumentos/Atlas2016parte1-17marzo2016b.pdf> visto el 01/08/2018.
- DOP, (2015), Evaluación de riesgos de infraestructura costera en un contexto de cambio climático. Disponible en internet: https://www.researchgate.net/publication/287218556_Evaluacion_de_riesgos_de_infraestructura_costera_en_un_contexto_de_cambio_climatico. visto el 01/08/2018.
- Echaveguren, T. (2016). PROYECTO FONDEF ID14I10309. “Investigación y desarrollo de modelos para cuantificar y mitigar el riesgo de eventos naturales en la red vial nacional”, Universidad de Concepción. Disponible en internet: <http://live.sitios.ing.uc.cl/IIseminarioFondefID14I10309/pdf/2.%20Echaveguren.pdf> Visto el 01/09/2018.
- European Commission (2016), Non-paper Guidelines for Project Manager: Making vulnerable investments climate resilient, Disponible en internet: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/guidances/non-paper-guidelines-for-project-managers-making-vulnerable-investments-climate-resilient/guidelines-for-project-managers.pdf>
- European Commission (2016), Non-paper Guidelines for Project Manager: Making vulnerable investments climate resilient, Disponible en internet: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/guidances/non-paper-guidelines-for-project-managers-making-vulnerable-investments-climate-resilient/guidelines-for-project-managers.pdf>
- Fan J-C, Liu C-H, Wu M-F, Yu SK (2003). Determination of critical rainfall thresholds for debris-flow occurrence in central Taiwan and their revision after the 1999 Chi-Chi great earthquake. In: Rickenmann D, Chen CL (eds) Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment. Millpress, Rotterdam, pp 103–114
- GIZ, (2016). El Libro de la Vulnerabilidad, Concepto y Lineamientos para la evaluación estandarizada de la vulnerabilidad. Disponible en: https://www.adaptationcommunity.net/?wpfb_dl=269
- Gregoretti C, Dalla Fontana G (2007). Rainfall threshold for the initiation of debris flows by channel-bed failure in the Dolomites. In: Chen CL, Major JJ (eds) Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment. Millpress, Rotterdam, pp 11–22.
- Henríquez, C.; Aspee, N.; Quense, J.; 2016, Zonas de catástrofe por eventos hidrometeorológicos en Chile y aportes para un índice de riesgo climático. Disponible en internet: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022016000100003

- Hirano M (1997) Prediction of debris flow for warning and evacuation. In: Armanini A, Michiue M (eds) Recent developments on debris flows. Springer, Berlin, pp 7–26.
- IPCC (2014). Cambio Climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas. Disponible en internet: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf visto el 01/08/2018.
- IPCC (2014). Cambio Climático 2014: Informe de síntesis. Disponible en internet: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf visto el 01/08/2018.
- Itakura Y, Inaba H, Sawada T (2005). A debris-flow monitoring devices and methods bibliography. Nat Hazards Earth Syst Sci 5:971–977.
- Itakura Y, Koga Y, Takahama J, Nowa Y (1997). Acoustic detection sensor for debris flow. In: Chen CL (ed) Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment. American Society of Civil Engineers (ASCE), San Francisco/New York, pp 747–756
- Jakob M, Holm K, Lange O, Schwab JW (2006). Hydrometeorological thresholds for landslide initiation and forest operation shutdowns on the north coast of British Columbia. Landslides 3(3):228–238. doi: 10.1007/s10346-006-0044-1
- Keefer DK, Wilson RC, Mark RK, Brabb EE, Brown WM, Ellen SD, Harp EL, Wieczorek GF, Alger CS, Zarkin RS (1987). Real-time landslide warning during heavy rainfall. Science 238:921–925. doi: 10.1126/science.238.4829.921
- Kung H-Y, Ku H-H, Wu C-I, Lin C-Y (2008) Intelligent and situation-aware pervasive system to support debris-flow disaster prediction and alerting in Taiwan. J Netw Comput Appl 31(1):1–18. doi:10.1016/j.jnca.2006.06.008
- Lampis Andrea, (2012). Universidad Nacional de Colombia, Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático: debates acerca del concepto de vulnerabilidad y su medición. Disponible en internet: <http://bdigital.unal.edu.co/36357/1/37017-173131-1-PB.pdf>
- Liu KF, Chen SC (2003) Integrated debris-flow monitoring system and virtual center. In: Rickenmann D, Chen CL (eds) Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment. Millpress, Rotterdam, pp 767–774.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP), Plan de adaptación y mitigación de los servicios de infraestructura al cambio climático (2016), Disponible en internet: <http://www.dgop.cl/Documents/PlanAccionMop.pdf>, Visto el 01/09/2018.
- MMA, (2016a). Tercera comunicación nacional de Chile ante Convención Marco de Naciones Unidas ante Cambio Climático (CMCC). Disponible en Internet:

<http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/TCN-2016b1.pdf> visto el 01/08/2018.

- MMA, (2016b). Base digital del clima comunal en Chile. Disponible en Internet: http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Clima-Comunal_Informe_Final_29_08_2016-web.pdf visto el 01/08/2018.
- MMA, (2017). Tercer reporte del estado del medio ambiente en Chile. Disponible en internet: <http://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/09/REMA-2017.pdf> visto el 01/08/2018.
- MMA, (2018). Base digital del clima en Chile webpage. Disponible en internet: <http://basedigitaldelclima.mma.gob.cl/> visto el 01/08/2018.
- NOAA-USGS Debris Flow Task Force (2005). NOAA-USGS debris-flow warning system— final report. US Geological Survey Circular 1283, 47 pp
- ONEMI, (2018). Informe semestral de emergencias. Disponible en internet: <http://repositoriodigitalonemi.cl> visto el 01/08/2018.
- ONEMI, Repositorio digital (2018), Definición de Aluvión, Disponible en internet: <http://repositoriodigitalonemi.cl/web/bitstream/handle/2012/1715/ALUVIONES.pdf>, Visto el 01/09/2018.
- ONEMI, Repositorio digital (2018), Definición de Inundación, Disponible en internet: <http://repositoriodigitalonemi.cl/web/bitstream/handle/2012/1714/INUNDACIONES.pdf>, Visto el 01/09/2018.
- ONEMI, Repositorio digital (2018), Definición de Inundación, Disponible en internet: http://repositoriodigitalonemi.cl/web/bitstream/handle/2012/1791/diptico_Marejadas.pdf, Visto el 01/09/2018.
- Pellicer, E., Al-Shubbak, A., y Catalá, J. (2012). Hacia una visión sistémica del ciclo de vida de la infraestructura. Revista de Obras Públicas, Ciencia y Técnica de la Ingeniería Civil. N° 3.532. Año 159, Mayo 2012. ISSN 0034-8619. Disponible en internet: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/46892/PellicerEtAl-ROP-3532.pdf?sequence=2&isAllowed=y> Visto el 01/09/2018.
- Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), 2013, Marco Estratégico para la Adaptación de la infraestructura al Cambio Climático, Disponible en internet: https://cambioglobal.uc.cl/images/proyectos/Documento_32_Marco-Estrategico-Adaptacin--Infraestructura-CC.pdf
- Sernageomin, (2017). Registro de desastres en Chile desde 1980. Disponible en internet: <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Primer-Catastro-Nacional-Desastres-Naturales.pdf> visto el 01/08/2018.

- studies for real-time monitoring. Environ Geol 47:715–724. doi:10.1007/s00254-004-1203-0
- Tanabashi Y (1998) Risk assessment and prediction of debris flow occurrence. J Jpn Soc Nat Disaster Sci 16:293–306
- Thorpe, D., S. (1998). A systems approach for the development and management of physical infrastructure. Unpublished Ph.D. Thesis, Queensland University of Technology. Disponible en internet: https://eprints.qut.edu.au/36067/7/36067_Digited_Thesis.pdf Visto el 01/09/2018.
- U. de Valpo (2016). Análisis histórico de marejadas en Chile. Disponible en internet: <http://oleaje.uv.cl/descargables/Memorias/Memoria%20UV%20Campos%20-%202016%20-%20An%C3%A1lisis%20de%20marejadas%20hist%C3%B3ricas%20y%20recientes%20en%20las%20costas%20de%20Chile.pdf> visto el 01/08/2018.
- U. de Valpo (2018). Atlas de Oleaje. Disponible en internet: <http://www.oleaje.uv.cl/> visto el 01/08/2018.
- Wilson RC, Mark RK, Barbato G (1993). Operation of a real-time warning system for debris flows in the San Francisco Bay Area, California. In: Shen HW, Su ST, Wen F (eds) Hydraulic engineering '93, proceedings of the 1993 conference in San Francisco, vol 2. ASCE, New York, pp 1908–1913
- Wilson RC, Wiczorek GF (1995). Rainfall thresholds for the initiation of debris flows at La Honda, California. Environ Eng Geosci 1(1):11–27
- Zhang S (1993) A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in China. Nat Hazards 7(1):1–23. doi:10.1007/BF00595676
-

ⁱ EIB website (undated): <http://www.eib.org/>

ⁱⁱ GEF website (undated): <https://www.thegef.org/topics/special-climate-change-fund-sccf>

ⁱⁱⁱ GFDRR website (undated): <https://www.gfdrr.org/>

^{iv} GCF website (undated): <http://www.greenclimate.fund/home>

^v IBRD. World Bank website (undated): <http://www.worldbank.org/en/who-we-are/ibrd>

^{vi} IFC website (undated): http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/corp_ext_content/ifc_external_corporate_site/home