

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

Resumen Ejecutivo
Ministerio del Medio Ambiente
22 de octubre de 2019

Equipo consultor del estudio

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

Contraparte técnica del Ministerio del Medio Ambiente

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

Cómo citar este informe

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

Resumen del estudio

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Contenidos

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 OBJETIVOS	10
1.2 ESTRUCTURA DEL INFORME	11
1.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO	11
1.4 EQUIPO DE TRABAJO	13
1.5 AGRADECIMIENTOS	14
1.6 GLOSARIO	15
1.7 ACTIVIDADES DE EXTENSIÓN	17
2 CONTEXTO INSTITUCIONAL	17
3 MARCO TEÓRICO	20
3.1 VARIABLES FÍSICAS RELEVANTES EN LA COSTA	20
3.2 MAREJADAS Y CAMBIOS EN EL NIVEL DEL MAR	21
3.3 ANÁLISIS DE RIESGO	22
4 ANÁLISIS DE AMENAZAS	25
4.1 ANÁLISIS HISTÓRICO DEL IMPACTO DE MAREJADAS	25
4.2 OLEAJE	28
4.2.1 Análisis histórico	28
4.2.2 Cambios entre la proyección (2026-2045) y el período histórico (1985-2004)	30
4.3 NIVEL DEL MAR	35
4.3.1 Análisis histórico	35
4.3.2 Cambios entre la proyección (2026-2045) y el período histórico (1985-2004)	35
4.4 COTA DE INUNDACIÓN	38
5 ANÁLISIS DE EXPOSICIÓN	42
5.1 MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL	42
5.1.1 Modelo de elevación digital para todo Chile	42
5.1.2 Modelo de elevación digital para comunas críticas	45
5.1.3 Estimación área expuesta	48
5.2 INVENTARIO DE EXPOSICIÓN	51
5.3 TALLERES Y ACTIVIDADES DE VINCULACIÓN	59
6 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD	61
6.1 SISTEMAS HUMANOS Y NATURALES	61
6.2 PLAYAS	64
6.3 PUERTOS	67
6.4 CALETAS DE PESCADORES	69
6.5 HUMEDALES	71
7 ANÁLISIS DE RIESGOS	73
7.1 PLAYAS	73
7.2 PUERTOS	76
7.3 CALETAS DE PESCADORES	80

8	RECOMENDACIONES Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN.....	82
8.1	MEJORAS AL ANÁLISIS DE AMENAZA.....	82
8.2	MEJORAS AL ANÁLISIS DE EXPOSICIÓN.....	82
8.3	MEJORAS AL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD.....	83
8.4	MEJORAS AL ANÁLISIS DE RIESGO.....	83
8.5	PLAYAS.....	84
8.5.1	<i>Estudios complementarios.....</i>	84
8.5.2	<i>Estrategias de adaptación.....</i>	84
8.6	PUERTOS.....	86
8.6.1	<i>Estudios complementarios.....</i>	86
8.6.2	<i>Estrategias de adaptación.....</i>	86
8.7	CALETAS DE PESCADORES.....	87
8.7.1	<i>Estudios complementarios.....</i>	87
8.7.2	<i>Estrategias de adaptación.....</i>	88
8.8	HUMEDALES.....	90
9	REFERENCIAS.....	91

1. INTRODUCCIÓN

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

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

1.1 OBJETIVOS

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

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

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

1.2 ESTRUCTURA DEL INFORME

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

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

El presente Resumen Ejecutivo presenta los principales aspectos de cada uno de los volúmenes específicos. Adicionalmente cubre algunos elementos no contenidos en estos volúmenes que surgen de la capacidad de integrar las materias y generar conclusiones que permitan avanzar en el diseño de medidas de adaptación a los riesgos identificados.

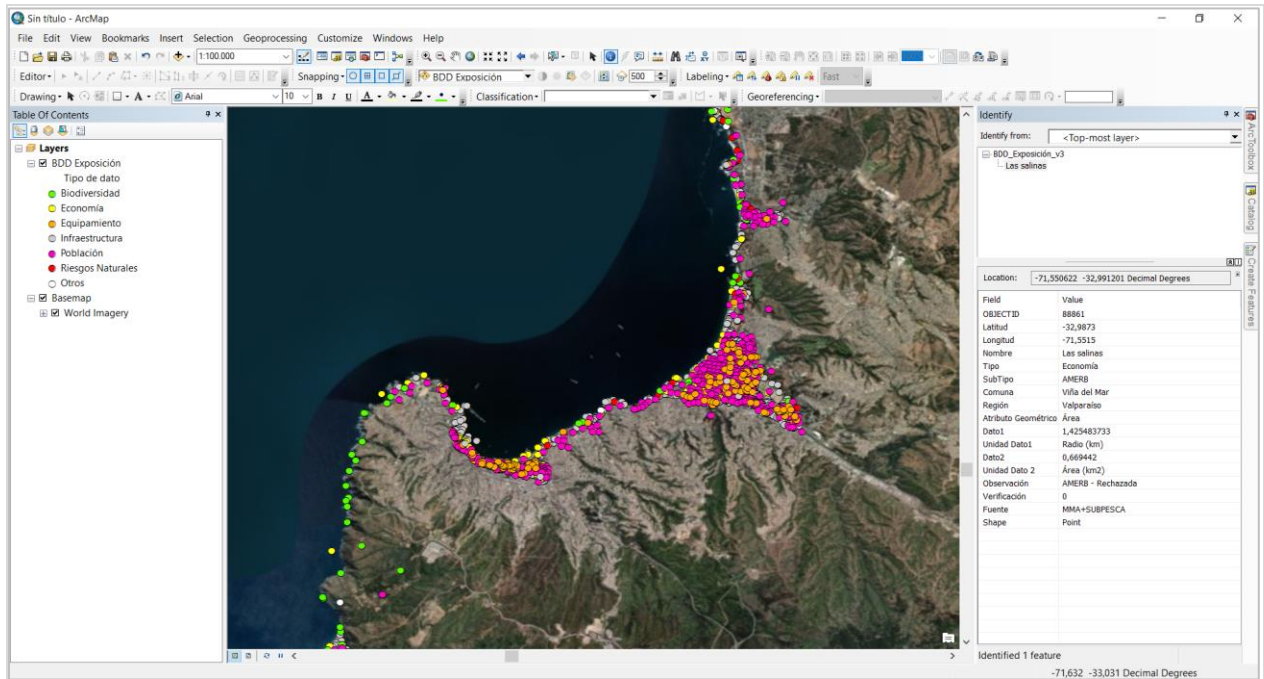
1.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO

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

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

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

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



El SIG se estructuró de la siguiente manera:

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

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

comunas.

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

1.4 EQUIPO DE TRABAJO

El equipo de trabajo está conformado por 21 académicos y profesionales de apoyo de la Pontificia Universidad Católica de Chile, de la Universidad de Valparaíso, de la Universidad de Playa Ancha, de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y la Universidad Católica del Maule (Figura 2). El trabajo se desarrolla bajo la coordinación del Centro UC de Cambio Global (CCG-UC⁴), centro de investigación interdisciplinario cuya misión es promover la colaboración académica (nacional e internacional) para investigar los fenómenos relacionados al cambio global, abordando integralmente las dimensiones biofísicas y humanas. Miembros del equipo de trabajo son también parte del Centro Integrado de Gestión de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN⁵), centro de investigación de excelencia que tiene como misión desarrollar, integrar y transferir conocimiento científico, y formar capital humano avanzado que contribuya a reducir las consecuencias sociales de los eventos naturales extremos. Se cuenta también con el apoyo del Centro de Observación Marino para estudios de Riesgos del Ambiente Costero de la Universidad de Valparaíso (COSTAR-UV⁶).

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

⁴ <https://cambioglobal.uc.cl/>

⁵ <http://cigiden.cl/en/>

⁶ <https://costar.uv.cl/>

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



1.5 AGRADECIMIENTOS

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

1.6 GLOSARIO

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

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

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

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

1.7 ACTIVIDADES DE EXTENSIÓN

En el marco del proyecto se efectuaron más de 30 charlas de difusión en Chile, 3 en el extranjero, y se tuvo una amplia cobertura en los principales canales de televisión, radios y medios escritos de cobertura nacional (Figura 3).

Figura 3: Ejemplos de noticias sobre resultados del estudio, en portada cuerpo de Innovación de El Mercurio de Santiago y portadas en el Mercurio de Antofagasta.



2 CONTEXTO INSTITUCIONAL

En esta sección se realiza una revisión de los planes y políticas que tienen relación con los impactos del cambio climático en zonas costeras, con el objetivo de tener un panorama del estado de avance de políticas en esta materia. Se revisan en orden cronológico las políticas, planes o estrategias relacionadas con la adaptación, impactos y riesgos asociados al cambio climático, omitiendo aquellas relacionadas con mitigación.

En el marco de la Estrategia Nacional de Cambio Climático, en 2008 se elaboró un estudio sobre **Vulnerabilidad y adaptación en zonas costeras y recursos pesqueros** como parte de un proyecto GEF⁷ orientado a cumplir con los compromisos de la CMNUCC. El estudio evaluó los efectos de incrementos en el nivel del mar en áreas costeras del Golfo de Arauco, y los impactos del cambio climático sobre la anchoveta, la merluza común y la sardina común. También, se midieron cotas de inundación en áreas costeras de Arica, Valdivia y Puerto Montt (CONAMA, 2008).

⁷ Global Environmental Facility por sus siglas en inglés. Es un fondo para abordar temáticas medioambientales a nivel internacional creado en 1992.

Figura 4: Reportaje Meganoticias “¿Chile sin playas?: Peligra borde costero por el Cambio Climático”⁸, con más de 1 millón de visitas, donde aparecen la Ministra Carolina Schmidt, además de Carolina Martínez y Patricio Winckler, ambos investigadores del proyecto.



Por otra parte, se elaboró la **Primera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático** bajo la CMNUCC (MMA, 1999). Las zonas costeras se mencionan en el estudio, pero no se incluyen resultados relevantes. En este reporte no se identifican medidas de adaptación o instrumentos orientados a identificar impactos en zonas costeras. En la **Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático** (MMA, 2011) ante la CMNUCC tampoco se aborda de manera sustancial la temática específica de las zonas costeras. Sin embargo, en la **Tercer Comunicación Nacional sobre Cambio Climático** ante la CMNUCC (MMA, 2016), se reconoce que, si bien las zonas costeras no se han identificado como un sector prioritario para el desarrollo de un Plan de Adaptación Nacional, su vulnerabilidad y particularidades no son menores. En este sentido, respecto de la 2CN se reconocen una serie de avances que pueden servir de insumos para definir medidas de adaptación:

- Se han mejorado los cálculos de las tasas de cambio del nivel medio del mar (NMM), y se dispone de una representación del litoral continental y de Isla de Pascua.
- Se ha incorporado la preocupación por las alteraciones del oleaje incidente en nuestras costas y un eventual aumento e intensidad de las marejadas.
- En los últimos años varios trabajos han abordado la preocupación creciente por los efectos sobre la pesca y la acuicultura, pero se han focalizado en la zona sur y austral.

⁸ <https://www.facebook.com/watch/?v=517916628774959>

Dentro de sus líneas prioritarias de acción en el eje de adaptación, el PANCC 2008-2012 buscó “Estimar los impactos del cambio climático en la infraestructura mayor y en zonas urbanas costera bajas...” (CONAMA, 2008). Las medidas específicas para dicha línea de acción se encuentran las medidas enfocadas en 3 grandes grupos:

- Generar información de los riesgos e impactos en infraestructura y zonas costeras
- Adaptación en el diseño de Infraestructura
- Mejora de los instrumentos de planificación urbana

Según la evaluación de término del PANCC, el estado de cumplimiento de dichas medidas fue media. Se destacaron los avances en el desarrollo de estudios de adaptación de la infraestructura de grandes obras costeras, y un bajo avance en la incorporación de consideraciones de cambio climático en instrumentos de planificación territorial. El actual PANCC 2017-2021 separa las medidas de adaptación entre infraestructura pública como un sector específico y las zonas urbanas costeras contenidas en el plan ciudades (Ministerio del Medio Ambiente, 2017a). En su eje de adaptación, el **Plan de Acción de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático** contempla medidas en el borde costero asociadas a las competencias de la Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas, que actualmente se encuentran en estado de implementación.

A nivel de planes de adaptación sectoriales, el **Plan de Adaptación de Pesca y Acuicultura** establece dos medidas específicas que responden a la amenaza generada por un aumento del nivel del mar y por el aumento de los eventos extremos de oleaje. Estas medidas de acción son:

- N°15: Sistema de predicción de condiciones climáticas para la Pesquería Artesanal y la Acuicultura
- N°25: Adaptación de la infraestructura portuaria de la pesca artesanal a los posibles impactos del cambio climático

Según el segundo reporte del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, estas medidas de acción presentan 0% de avance al 2017 (Ministerio del Medio Ambiente, 2017b). Sin embargo, el Plan de adaptación y mitigación de los servicios de infraestructura al cambio climático, puesto en marcha el año 2017, incorpora medidas de adaptación orientadas a disminuir los riesgos del aumento del nivel del mar y eventos extremos (marejadas, oleaje). Respecto a los otros planes de adaptación sectorial, no se identifican mayores relaciones y/o avance en dicha materia.

De la revisión de los antecedentes disponibles, se concluye que Chile posee varios instrumentos de política pública que están orientados a disminuir la vulnerabilidad ante los impactos de las zonas costeras a distintas escalas y sectores. No obstante, el grado de detalle de eventuales políticas, planes e instrumentos específicos es aún insuficiente y requiere de un estudio más detallado de las amenazas, exposición, vulnerabilidad y riesgo de los sistemas naturales y humanos que residen en la zona costera.

Los objetivos de este estudio se enmarcan en esta necesidad de seguir avanzando en la definición de medidas de adaptación específicas para las zonas costeras del país.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 VARIABLES FÍSICAS RELEVANTES EN LA COSTA

El territorio costero es uno de los ambientes más dinámicos del planeta, donde interactúan agentes meteorológicos, geológicos y oceánicos en distintas magnitudes y escalas espacio-temporales. En un contexto de cambio climático, el conocimiento de estos agentes es de fundamental importancia para resguardar la seguridad de los asentamientos humanos, reducir los impactos de las obras costeras y garantizar el desarrollo de la industria portuaria. La Figura 5 presenta algunas variables físicas relevantes en el estudio de los procesos costeros, a las que se suman aquellas de naturaleza hidrológica e hidráulica que definen el comportamiento de las desembocaduras, las variables arquitectónicas y urbanísticas que establecen criterios de emplazamiento, las variables biológicas, oceanográficas y la ecológicas que permiten evaluar el impacto sobre el medio biótico y físico, además de otras variables que rigen los marcos político, económico, turístico, social, legal y ambiental en los que se enmarcan las actuaciones costeras.

Figura 5: Algunas variables típicas de un proyecto de ingeniería marítima.



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

corrientes oceánicas, por su parte, se generan producto del forzamiento del viento en la superficie del océano. El aumento de la temperatura, asimismo, es causante de la expansión térmica del océano y del derretimiento de los glaciares, que en conjunto explican el aumento del nivel absoluto del mar. Por otra parte, existen otras variables de origen astronómico (marea astronómica) o geofísico (sismos y tsunamis), que no son sensibles al cambio climático, pero sí explican la configuración de las costas. En este estudio, el análisis se restringe al oleaje en condiciones medias y extremas (marejadas) y a los cambios que experimentará el nivel del mar producto del cambio climático.

3.2 MAREJADAS Y CAMBIOS EN EL NIVEL DEL MAR

Harley (2017) define una marejada (*coastal storm*) como una perturbación meteorológica inducida en las condiciones marítimas locales que tiene el potencial de alterar significativamente la morfología costera y exponer la costa al oleaje, las corrientes y/o la inundación. Las marejadas se asocian con el paso de ciclones tropicales o extra-tropicales que pueden impactar en forma local a la línea de costa o ser de generación distante. Las marejadas también pueden coincidir con vientos fuertes y/o precipitaciones que, junto con las condiciones marítimas anómalas, contribuyen a la severidad de una tormenta. Para efectos cuantitativos, la definición de marejadas en este informe se implementa seleccionando aquellos eventos extremos de oleaje cuya altura significativa sobrepasa cierto umbral. De esta forma, se excluye el análisis de la ocurrencia conjunta de los eventos extremos de oleaje con otros fenómenos como los meteotsunamis, la marea meteorológica, la marea astronómica y las ondas largas. Esta limitación obedece a la gran complejidad asociada a implementar este tipo de estudios a escala nacional. A modo de simplificación, estos fenómenos de origen meteorológico serán cuantificados, pero no necesariamente combinados en forma temporal, con los eventos extremos de oleaje.

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

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

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

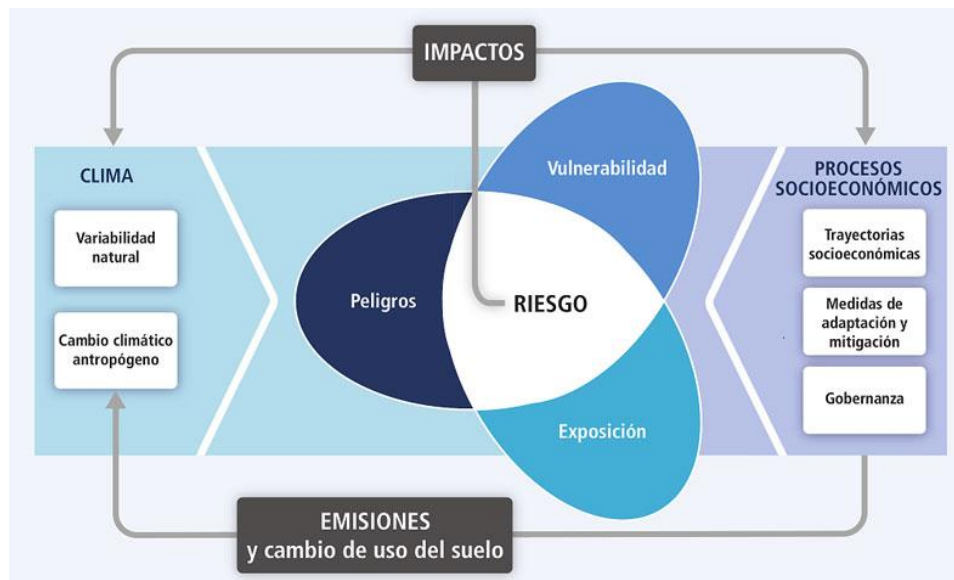
- Pérdida de deltas
- Intrusión salina en acuíferos
- Otros efectos

Dada la variedad de impactos asociados al cambio climático, en este estudio el análisis se restringe en forma genérica a los efectos en sistemas humanos y naturales y en forma específica a playas, humedales, puertos y caletas de pescadores.

3.3 ANÁLISIS DE RIESGO

El marco conceptual que permite caracterizar los riesgos asociados al cambio climático fue el desarrollado en el Informe Especial de Cambio Climático y Eventos Extremos y el Quinto informe del IPCC (IPCC, 2014). En este marco conceptual se establecen las relaciones básicas existentes entre la vulnerabilidad, exposición y amenazas climáticas (Figura 6).

Figura 6: Marco conceptual del análisis de amenaza, exposición, vulnerabilidad y riesgo. El riesgo de los impactos conexos al clima se deriva de la interacción de los peligros (o amenaza) conexos al clima con la vulnerabilidad y la exposición de los sistemas humanos y naturales. Los cambios en el sistema climático (izquierda) y los procesos socioeconómicos, incluidas la adaptación y mitigación (derecha), son impulsores de peligros, exposición y vulnerabilidad. (IPCC, 2014a).



De acuerdo a este marco conceptual, la ocurrencia de un riesgo ocurre cuando existe i) una amenaza de tipo climático, ii) un sistema natural o humano que se ve expuesto a dicha amenaza y iii) que a la vez es vulnerable a la misma. Si no ocurren estos tres factores no existe el riesgo, ni su manifestación (que corresponde al desastre). La amenaza de origen climático se asocia a una variabilidad natural intrínseca al sistema climático, pero ésta puede verse exacerbada o disminuida producto del cambio climático de origen antropogénico.

En este estudio se analizan en forma separada las siguientes componentes del análisis en la zona costera de Chile continental e insular

- Amenaza de marejadas y cambios en el nivel del mar considerando el escenario de emisiones RCP 8.5 (capítulo 4 de este resumen ejecutivo y volumen 1 del informe).
- Exposición de sistemas humanos y naturales en los primeros 10 m sobre el nivel medio del mar (capítulo 0 de este resumen ejecutivo y volumen 2 del informe).
- Vulnerabilidad de los sistemas identificados en el estudio de exposición, con énfasis en sistemas humanos y naturales playas, puertos, caletas de pescadores, humedales e islas oceánicas (capítulo 6 de este resumen ejecutivo y volúmenes 3 a 8 del informe).
- Riesgos de los sistemas identificados en el estudio de exposición, con énfasis en playas, puertos, caletas de pescadores, humedales e islas oceánicas (capítulo 0 de este resumen ejecutivo y volúmenes 3 a 8 del informe).
- Finalmente se entregan recomendaciones considerando el diseño de un plan de adaptación a los riesgos que se caracterizan en zonas costeras de Chile (capítulo 8 de este resumen ejecutivo y volúmenes 3 a 7 del informe).

En este informe se analiza el riesgo de todos los sistemas humanos y naturales ubicados en zonas costeras bajo los 10 [m] sobre el nivel medio del mar. Los sistemas humanos y naturales inventariados en el Volumen 2 incluyen población, infraestructura costera, equipamiento comunal, sistemas naturales, actividades económicas locales, educación, emergencia y seguridad, energía, patrimonio, medio ambiente y conservación y turismo. También se incluyen playas, caletas, puertos y humedales, pero estos son analizados con mayor profundidad en volúmenes independientes. Cabe mencionar que, dada la gran cantidad y complejidad de subsistemas existentes, el análisis se reduce a evaluar si cada objeto del inventario de exposición será o no inundado durante la proyección (2026-2045) bajo el escenario RCP 8.5, esto es, si su cota estará bajo la cota de inundación (sección 4.4) proyectada.

Adicionalmente se caracteriza en detalle la vulnerabilidad de los siguientes sistemas:

- Playas
- Caletas
- Puertos
- Humedales

Estos componentes representan una fracción de los sistemas costeros de interés, pero han sido seleccionados por su relevancia en el desarrollo de los territorios expuestos. La Tabla 1 presenta las amenazas, vulnerabilidades y riesgos de los sistemas analizados en este estudio. En las amenazas se incluyen aquellas que no son de origen climático pero que juegan un rol muy relevante en los eventuales impactos sobre los sistemas analizados (no se evalúa la vulnerabilidad y riesgo de las amenazas no climáticas).

Tabla 1: Amenazas, vulnerabilidades y riesgos de los sistemas analizados en este estudio. Se incluyen amenazas no climáticas solo para constatar que los impactos pueden tener otros orígenes (no se utilizaron para evaluar vulnerabilidad ni riesgo).

Sistema	Amenazas		Vulnerabilidad		Riesgo	Impacto
	No climáticas	Climática	Tipo	Indicador	Indicador	
Sistemas humanos y naturales	Geológicos ¹ Cambios uso de suelo Contaminación	Marejadas Nivel del mar	Operacional Estructural	Ubicación respecto de superficie inundada	No se analiza por la gran cantidad y complejidad de entidades (76) del inventario de exposición	Inundación genera trastornos operacionales y daño estructural
Humedales	Geológicos ¹ Cambios uso de suelo Especies invasoras Contaminación	Marejadas Nivel del mar Caudales	Funcional Ecológica	Cambios históricos en área del espejo de agua	Cambios en sobrepaso de oleaje y caudales aportantes	Cambios en salinidad generan impactos en la biología del humedal
Playas	Geológicos ¹ Cambios uso de suelo	Marejadas Nivel del mar	Estructural	Cambios históricos en superficie de playas	Cambios en superficie e impacto económico	Pérdida de playas genera impacto económico
Puertos	Geológicos ¹	Marejadas	Operacional	Cierres de puerto históricos	Downtime ² e impacto económico	Cierres de puertos genera impacto económico en la cadena logística
Caletas	Geológicos ¹ Sobre explotación	Marejadas	Operacional	Cierres de puerto históricos	Downtime ² e impacto económico	Cierres de puertos genera impacto económico por merma en desembarques

1: Las amenazas no climáticas de interés son los terremotos y los tsunamis

2: El downtime operacional, corresponde al porcentaje de tiempo en que un sitio de atraque no está disponible para una determinada nave debido a la acción de agentes ambientales, como el viento, el oleaje, la marea, la corriente y la neblina, entre otros.

4 ANALISIS DE AMENAZAS

En este estudio se consideran como amenazas las marejadas (oleaje extremo) y los cambios en el nivel medio del mar. Se analiza también el viento, como forzante del oleaje, y la cota de inundación como un indicador de la amenaza. El estudio se basa en i) un análisis histórico del comportamiento estadístico de las variables relevantes que caracterizan ambas amenazas y ii) la evaluación de los cambios entre la proyección (2026-2045) y el período histórico (1985-2004). Los resultados se resumen a continuación.

4.1 ANÁLISIS HISTÓRICO DEL IMPACTO DE MAREJADAS

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

La caracterización de los impactos asociados a las marejadas se basa en los trabajos de Brito (2009), Campos-Caba (2016), Hernández y Hormidas (1926) y Moraga (2018). Asimismo, se revisaron diversas fuentes de prensa, páginas web, información disponible en servicios como la ONEMI y el MOP, periódicos impresos en la Biblioteca Nacional de Chile (Santiago) y Biblioteca Santiago Severín (Valparaíso). Para completar los años 2016 y 2017, se recurrió a los certificados de cierre de puertos, informados por las Capitanías de Puerto de la Armada. Finalmente, se consultaron documentos que reportan marejadas puntuales (Martínez et al., 2018, Winckler et al., 2017) que han generado pérdida de playas, daños importantes en la infraestructura y equipamiento del borde costero (Figura 7).

En este estudio, la información se estructuró en una base de datos desagregada por comunas. Para contar el número de marejadas, se consideraron aquellos sucesos con al menos 1 día de separación temporal (una marejada puede durar más de 1 día) y 1 región de separación espacial (en 1 día puede ocurrir más de 1 marejada en el litoral del país). Con estos criterios se identificaron 2257 días entre enero de 1975 y diciembre de 2017 (14% del tiempo) en que alguna comuna del país fue afectada por una marejada. Al agregar comunas y regiones colindantes, se concluye que los eventos alcanzan a 866 para dicho período. A modo de ejemplo, en la Figura 8 se muestran las series de tiempo anuales del número de marejadas para las regiones de: a) Arica y Parinacota, b) Antofagasta, c) Valparaíso y d) Biobío.

Cabe notar que este análisis extiende en forma sustantiva el realizado por Campos-Caba et al. (2015), quienes identificaron 117 eventos de marejadas con algún tipo de efecto en las costas chilenas entre 1924 y 2015.

Figura 7: Playa Yolanda a) previo y b) después del temporal del 8 de agosto de 2015 (Winckler et al., 2017).
c) Durante la reparación efectuada por la Dirección de Obras Portuarias.

a)



b)



c)

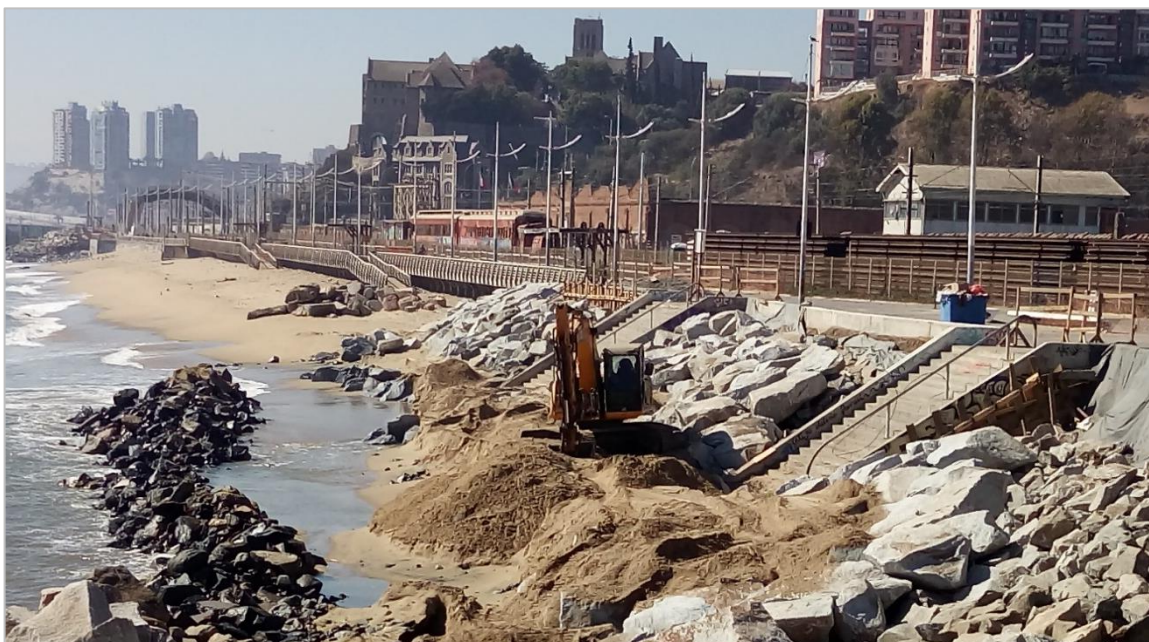
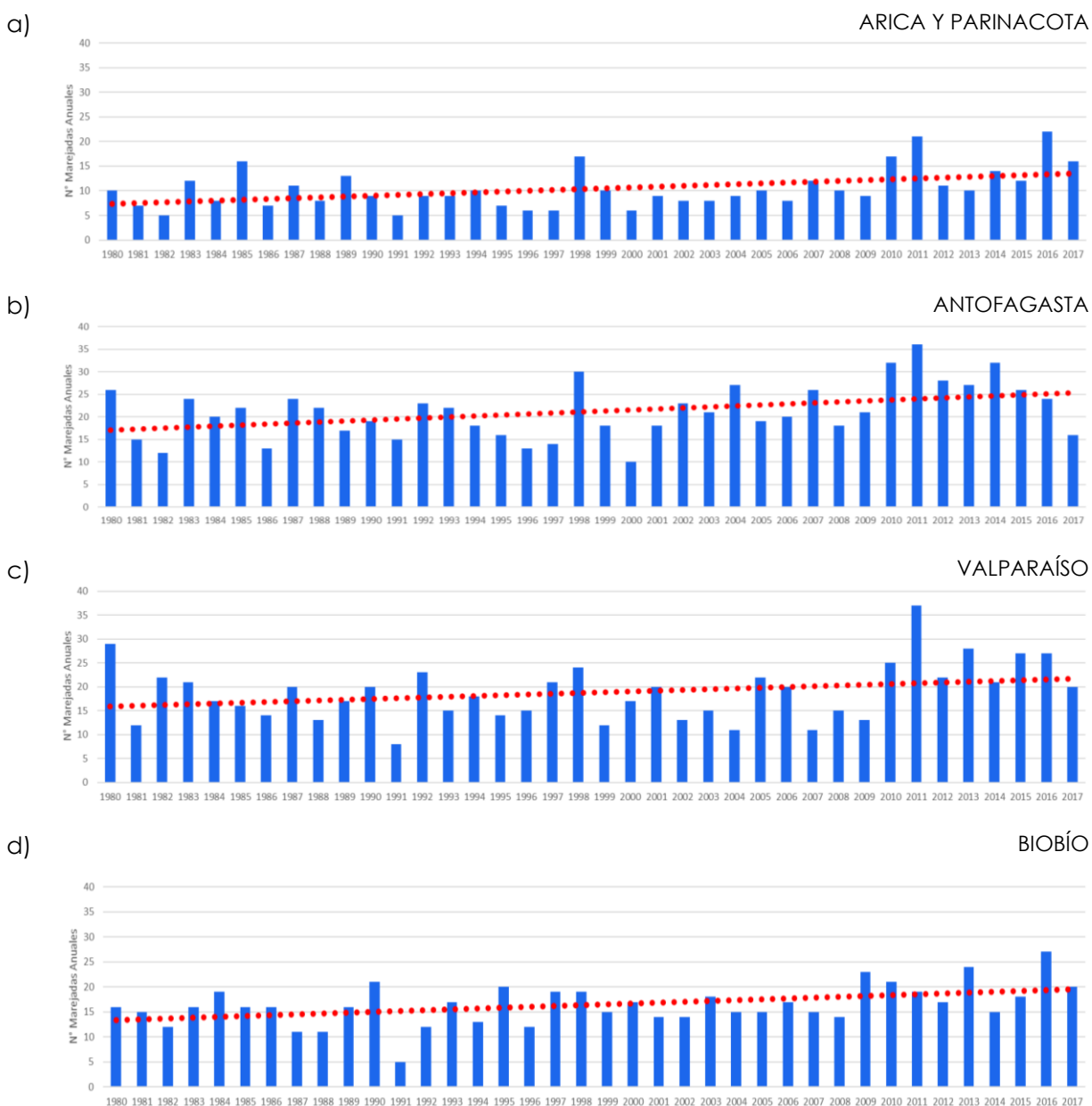


Figura 8: Series de tiempo anuales y tendencia lineal (en rojo) ajustada para el número de marejadas por región entre 1980 y 2017 para las regiones de a) Arica y Parinacota, b) Antofagasta, c) Valparaíso y d) Biobío. Fuente: Elaboración a partir de diversas fuentes recopiladas en el Volumen 1 (sección 4.2).



Lamentablemente y salvo excepciones (Campos et al., 2015; Winckler et al., 2017) no existen estudios detallados del costo de los daños asociados a las marejadas. Campos et al. (2015), por ejemplo, estima en \$6.830.000.000 los daños por marejadas identificados para el año 2015. Al comparar esto con la inversión realizada por la Dirección de Obras Portuarias para el año 2014, la cual es cercana a 56 mil millones de pesos (DOP-MOP, 2014), se obtiene que los daños generados corresponden a un 12%.

4.2 OLEAJE

4.2.1 Análisis histórico

El análisis histórico del oleaje se basa en estadísticas cada 3 horas entre 1980 y 2015 (35 años) en puntos espaciados latitudinalmente cada 2° frente a la costa chilena. Las estadísticas están disponibles en el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016, 2017). Se estiman las tendencias lineales para las series de tiempo de altura significativa, período peak y dirección media mediante el estimador no paramétrico propuesto por Theil-Sen (Theil, 1950; Sen, 1968), con una banda de confianza del 95% para cuantificar la incertidumbre. El análisis histórico se divide en un análisis del clima medio de oleaje y en un análisis de casos extremos.

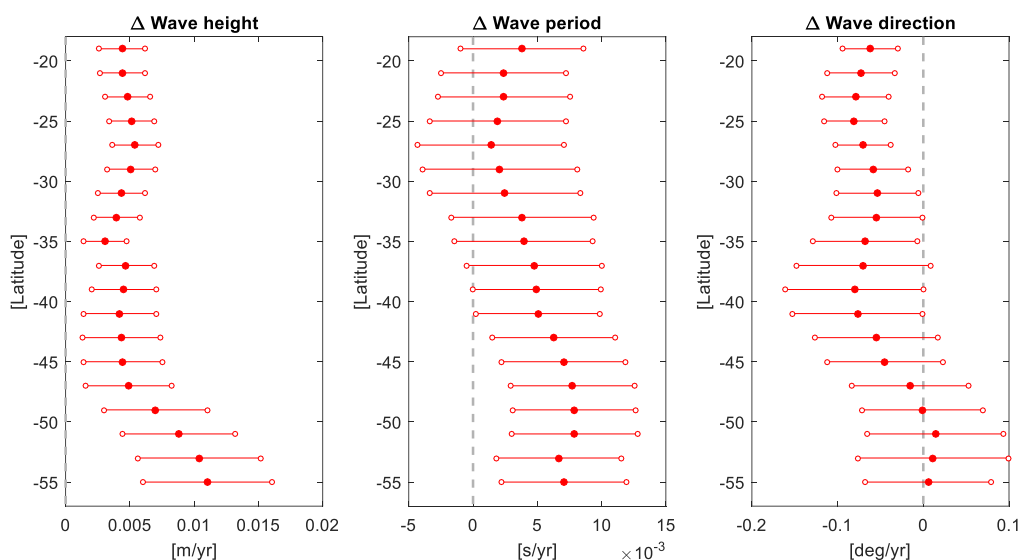
4.2.1.1 Clima medio

Las tendencias anuales en los parámetros estadísticos del clima del oleaje se muestran en la Figura 9. Las alturas significativas muestran un aumento en el rango de 0.003 y 0.011 [m/año] en todo el país, siendo espacialmente estables al norte de 47°S y aumentando de manera importante hacia el sur (Figura 9, izquierda). Este rango equivale a un aumento de casi 0.1 [m] en el norte y 0.4 [m] entre 1980 y 2015, que es sustancial en comparación con las alturas significativas promedio anuales de 2 a 4 [m] que se registran en el país (Beyá et al., 2016). En otras palabras, el cambio en la altura significativa ha aumentado entre 10% y 20% dentro en los 36 años analizados. Los intervalos de confianza del 95% son bastante grandes y comparables con la magnitud de la tendencia anual, y aumentan hacia el sur debido al incremento en la señal. Estos resultados son consistentes con los encontrados por Molina et al. (2011), quienes calcularon un aumento de 10 [cm] en la altura significativa y una desviación de 12° hacia el sur en base a los 20 años de los datos de las proyecciones retrospectivas para el centro de Chile; sus resultados demostraron ser sensibles a los eventos ENSO (tanto en su fase cálida: El Niño, como en su fase fría: La Niña).

Los períodos peak muestran un aumento en el rango de 0.001 y 0.008 [s/año], siendo los cambios menores hacia el norte y máximos en el sur de la Patagonia (Figura 9, centro). Esto se traduce en un aumento en los períodos por debajo de 0.3 [s] entre 1980 y 2015, que es bastante pequeño (0.4% a 3.5%) en comparación con el rango típico de 8 a 10 [s] en las costas chilenas (Beyá et al., 2016). Independientemente de las tendencias positivas entre 19°S y 37°S, los intervalos de confianza del 95% alcanzan valores negativos, por lo que cualquier conclusión es discutible en esta región. Al sur de los 39°S, los intervalos de confianza son siempre positivos.

La Figura 9 (derecha) representa un giro al sur del orden de 0.1°/año en la dirección del oleaje entre 19°S y 41°S, que es equivalente a 3.5° entre 1980 y 2015. Entre 43°S y 49°S la tendencia media sigue siendo negativo, pero el intervalo de confianza abarca tanto valores positivos como negativos. Las estaciones entre 51°S y 55°S muestran un ligero giro al norte en la dirección del oleaje, pero su valor se ve eclipsado por los intervalos de confianza relativamente grandes. En síntesis, en las últimas décadas se observa un cambio hacia el sur en la dirección de las olas en alta mar entre la estación más al norte a 19° y 47°S. Este cambio podría atribuirse a la deriva hacia el sur del anticiclón del Pacífico (Schneider et al., 2017). Este giro al sur del oleaje en aguas profundas podría tener consecuencias en playas arenosas relativamente largas y abiertas.

Figura 9: Tasa de variación anual de la altura significativa (izquierda), período peak (centro) y dirección media (derecha) en 19 nudos numéricos cada 2° entre 19°S y 55°S, obtenidos del Atlas de Oleaje (Beyá et al., 2017) entre 1980 y 2015. En todos los trazados, los puntos rojos representan la media, mientras que los intervalos de confianza del 95% se muestran en barras y círculos horizontales.



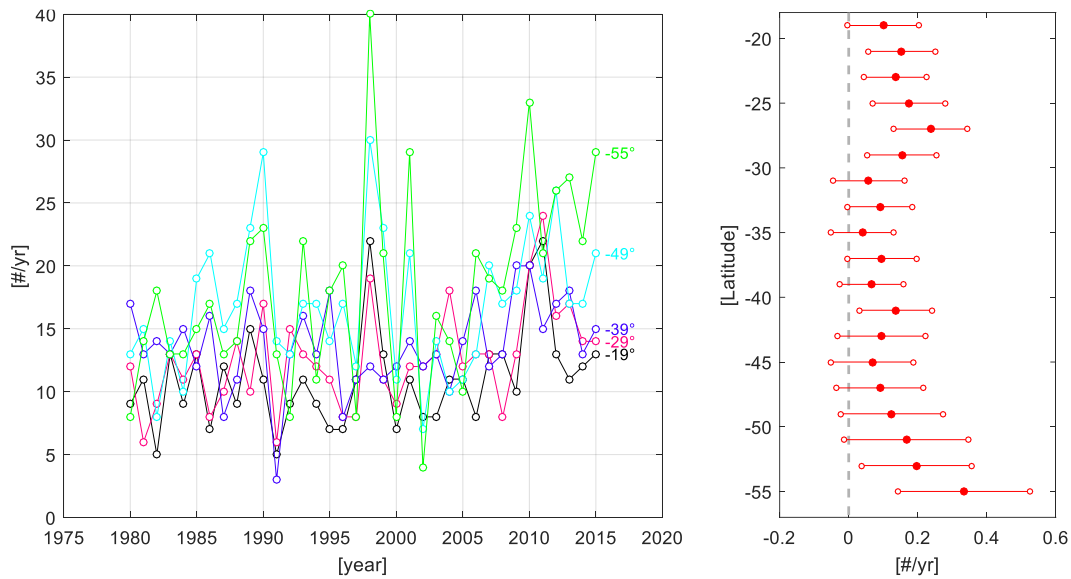
4.2.1.2 Clima extremo (marejadas)

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

La cantidad de eventos extremos por año y la tasa anual de cambio de esta cantidad en 19 nudos numéricos cada 2° entre 19°S y 55°S entre 1980 y 2015, se muestran en la Figura 10. El análisis indica que existe un aumento generalizado en la frecuencia de eventos extremos en todo el país. Las tasas positivas varían entre 0.1 a 0.3 [eventos/año], que son equivalentes a aproximadamente 4 a 12 eventos más en la actualidad en comparación con los años ochenta.

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

Figura 10: Número de eventos extremos para los nodos 19°S, 29°S, 39°S, 49°S y 55°S (izquierda), obtenidos de data del Atlas de Oleaje (Beyá et al., 2017). Tasa de variación anual del número de eventos extremos por año. Los puntos rojos representan la media y los intervalos de confianza del 95% se muestran en barras y círculos blancos.



Dado que el criterio de umbral utilizado para seleccionar eventos extremos se basa únicamente en la altura significativa, los resultados no coinciden con relatos de daños para algunos eventos (Campos-Caba, 2016). Un análisis completo del clima extremo en la costa depende también del período y dirección del oleaje, así como los procesos físicos inducidos por la morfología y batimetría costera de cada sitio. Este tipo de análisis es explorado para algunos sistemas en este estudio, como playas (sección 7.1) y puertos (sección 0).

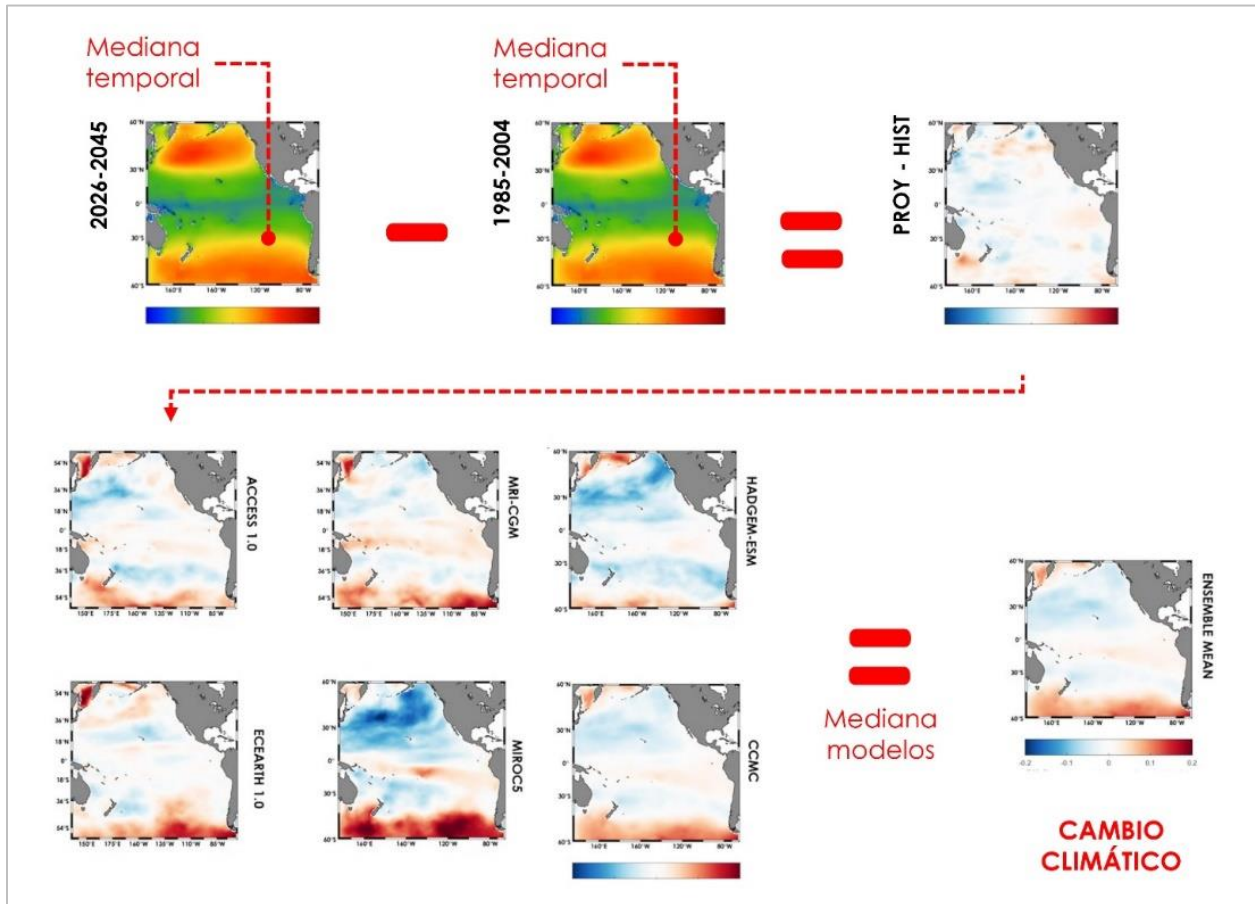
4.2.2 Cambios entre la proyección (2026-2045) y el período histórico (1985-2004)

Para evaluar el impacto del cambio climático, se evalúa los cambios de las características del oleaje entre la proyección (2026-2045) y el período histórico (1985-2004). El estudio contempla la generación del oleaje en el Océano Pacífico mediante el software Wavewatch III (Tolman, 2014) utilizando las parametrizaciones presentadas por Beyá et al. (2016) y 6 campos de viento del CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) que muestran buen performance para efectos de generación de oleaje (Hemer & Trenham, 2015).

Dado que un modelo predice el cambio de una variable climática, basado en un conjunto específico de parametrizaciones físicas, condiciones iniciales e incertidumbres conocidas y desconocidas, las proyecciones de cada modelo no corresponden a una imagen exacta del clima futuro. Esta variación obliga a resumir el conjunto de varias proyecciones mediante un *ensemble median* (mediana de las proyecciones de múltiples modelos climáticos cuantitativos para una variable). La Figura 11 muestra el esquema de cálculo utilizado para una variable genérica. Para cada uno de los 6 modelos de viento, se genera un modelo de oleaje. En cada

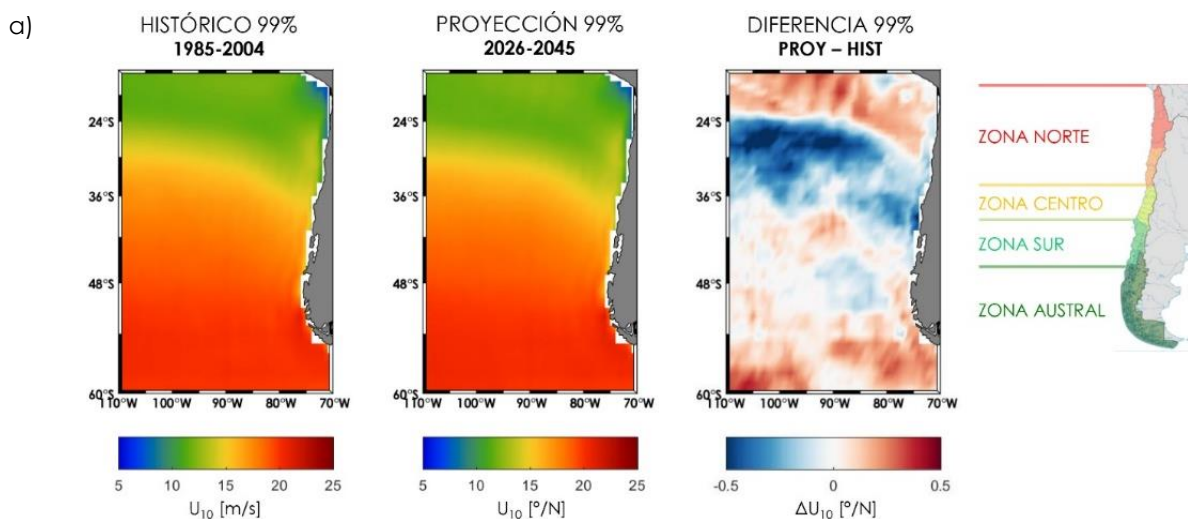
punto del espacio, se calcula una mediana temporal para el período histórico y la proyección. Luego se resta el valor de dicha variable histórica a la proyectada. El procedimiento se realiza para 6 modelos y luego se calcula, para cada punto, la mediana entre modelos, la que se atribuye al cambio climático del arreglo de modelos.

Figura 11: Esquema del cálculo del efecto del cambio climático. Arriba se muestra la resta de las medianas temporales de un modelo. Abajo se muestra la diferencia entre medianas temporales para los 6 modelos utilizados, a partir de la cual se calcula la mediana entre modelos, que se atribuye al cambio climático.



Los campos de viento a 10 [m] sobre el nivel del mar se presentan en la Figura 12 para el período histórico, la proyección y para la diferencia entre ambos. Se muestra el percentil 99% como un ejemplo de viento intenso, pero no necesariamente extremo. En general, el viento tenderá a aumentar en la zona norte y a disminuir en las zonas centro y sur. La zona austral presentará cambios muy variables. La implicancia del viento local en la generación de oleaje es relativa, pues su comportamiento depende de la transferencia de energía en todo el Océano Pacífico. En casos extremos como el temporal del 8 de agosto de 2015 (Winckler et al., 2017), no obstante, los vientos locales han resultado determinantes en las características de las marejadas.

Figura 12: Campos de viento a 10 [m] sobre el nivel del mar para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 99% frente a Chile.



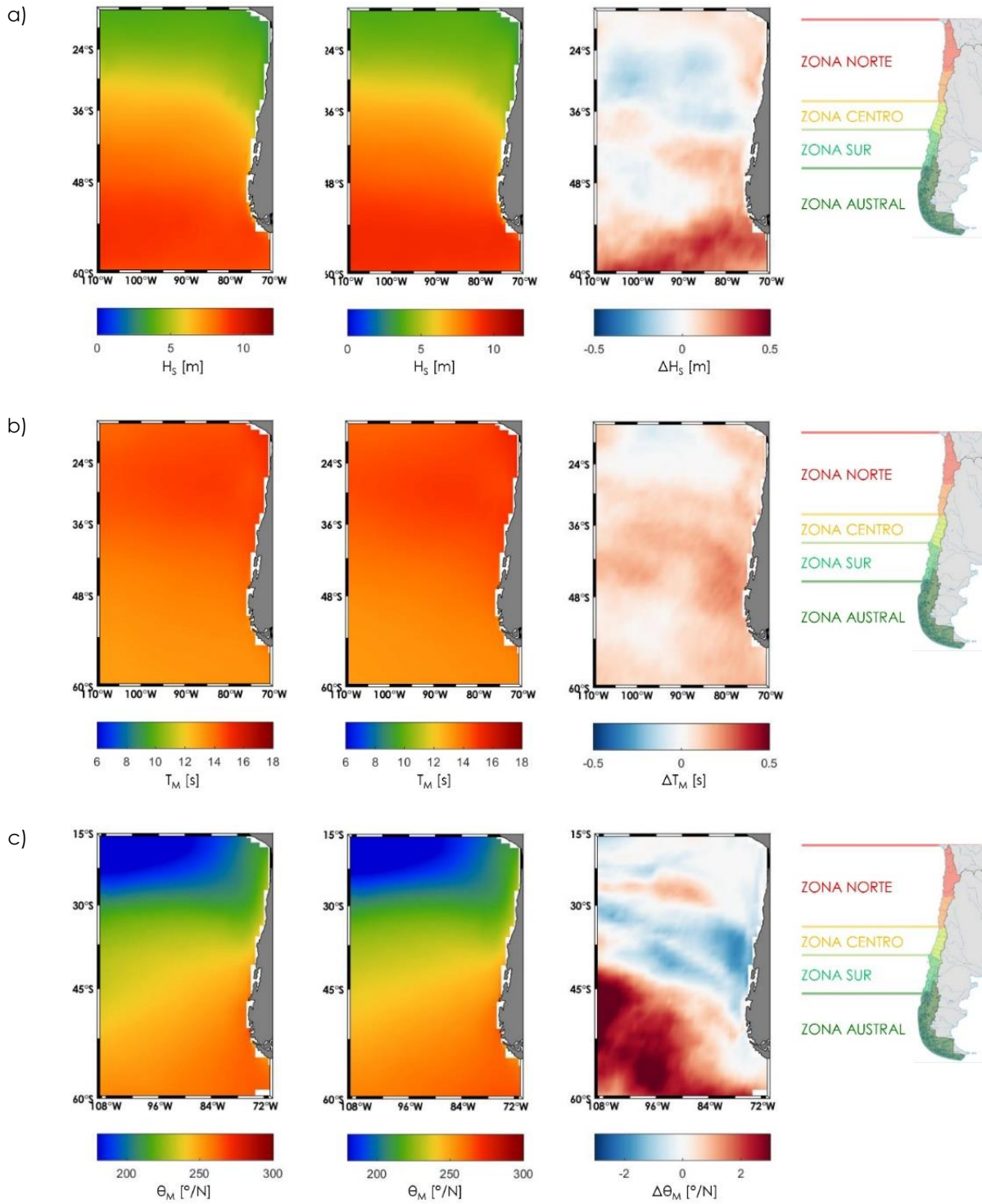
Los campos de oleaje se presentan en la Figura 13. Se observa que la altura significativa asociada al clima medio (50%) y aquella que caracteriza eventos intensos pero no extremos (99%) tiende a experimentar cambios menores en todo el territorio, salvo por el extremo austral. El período medio aumenta en todas las costas y la dirección del oleaje presenta un giro moderado al sur atribuible a la migración al sur del Anticiclón Permanente del Pacífico Sur (Schneider, 2017) que se asocia a un desplazamiento también al sur de la zona de generación del oleaje. La Tabla 2 presenta un resumen de las tendencias identificadas en cada una de estas variables en cuatro zonas de Chile continental, tanto para el percentil 99% como para la mediana (50%), que constituye un indicador del clima medio.

Tabla 2: Resumen de diferencias de parámetros de viento y oleaje entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) frente a Chile. Celdas sin descriptor representan cambios despreciables.

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



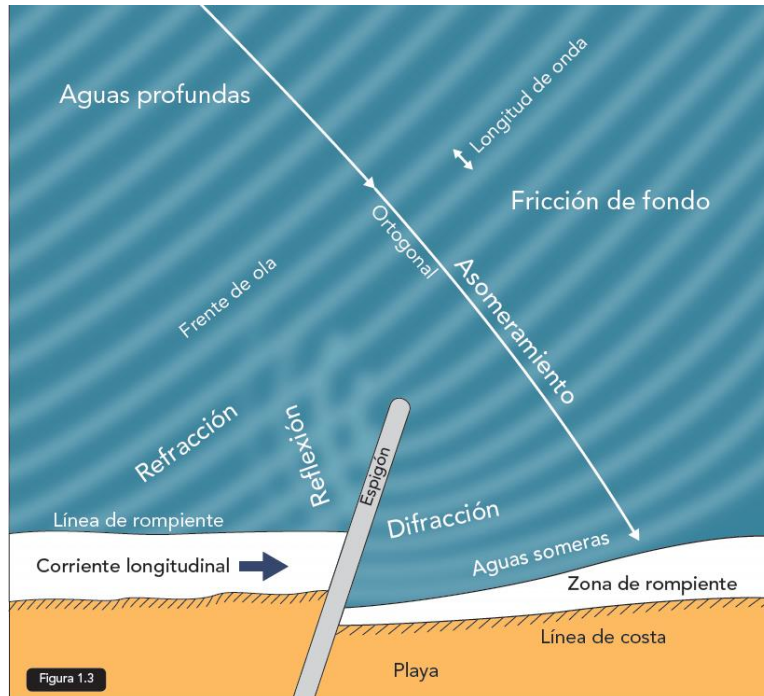
Figura 13: Campos de a) altura significativa, b) período medio y c) dirección media de oleaje para el período histórico (1985-2004) y proyección (2026-2045), además de la diferencia entre ambos para el percentil 99% frente a Chile.



Para el análisis de riesgo se transformó la estadística del oleaje desde aguas profundas a la costa (Figura 14) mediante una metodología simplificada de baja resolución, gran cobertura y una

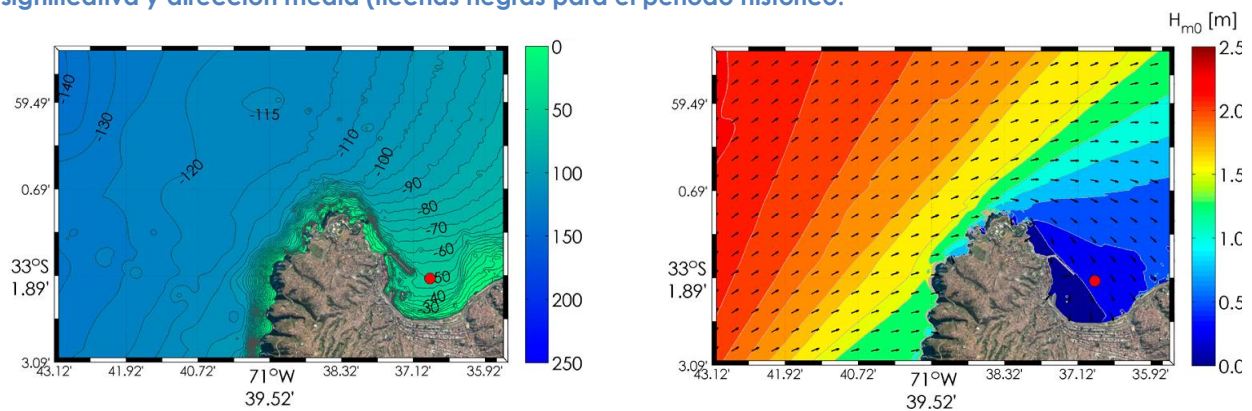
física simplificada (asomeramiento y refracción) para el análisis de las 18.376 entradas asociadas a 76 tipos de entidades definidas para los sistemas humanos y naturales (Volumen 3) y 546 caletas de pesca artesanal (Volumen 7).

Figura 14: Procesos costeros que experimenta el oleaje al sentir el fondo (Adaptado de Svendsen, 2006).



Con el objeto de hacer un análisis fino, para las 35 playas (Volumen 4) y los 9 puertos (Volumen 5) se consideró una transferencia espectral de mayor detalle, que además del asomeramiento y la refracción, permite calcular la difracción en oleaje irregular (Figura 15).

Figura 15: Transformación de oleaje al puerto de Valparaíso. Izquierda: Batimetría en [m]. Derecha: Altura significativa y dirección media (flechas negras para el período histórico).

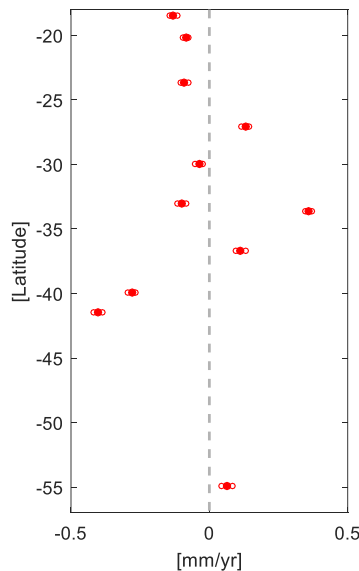


4.3 NIVEL DEL MAR

4.3.1 Análisis histórico

Las tendencias del NMMR para 11 mareógrafos (Figura 16) muestran una distribución espacial no homogénea en el margen continental, con estaciones que muestran aumentos de hasta 0,38 [mm/año] en San Antonio (33,6°S) o disminuciones de hasta -0,40 [mm/año] en Puerto Montt (41,5°S). Con excepción de Caldera (27,1°S), las estaciones del norte, que cubren un área de casi 1600 [km], muestran una caída de -0,13 a -0,04 [mm/año]. La porción central del país muestra una tendencia ascendente con valores máximos de 0,36 [mm/año] en San Antonio y 0,11 [mm/año] en Talcahuano (36,7°S). Los grandes cambios en las tendencias entre las estaciones vecinas de Valparaíso y San Antonio pueden atribuirse a los efectos locales. Hacia el sur, Corral (39,9° S) y Puerto Montt muestran las mayores caídas en el nivel del mar en todo el país. En el mar interior chileno (41°S - 47°S) no hay registros a largo plazo del nivel del mar, mientras que, en Puerto Williams, el aumento es relativamente pequeño. La incertidumbre, cuantificada por el intervalo de confianza del 95%, es pequeña debido a la buena longitud temporal de los datos.

Figura 16: Tasa anual de cambio del NMMR en 11 estaciones mareográficas cuya extensión abarca entre 32 y 73 años. En todos los trazados, los puntos rojos representan la media, mientras que los intervalos de confianza del 95% se muestran en barras y círculos horizontales.



4.3.2 Cambios entre la proyección (2026-2045) y el período histórico (1985-2004)

En este estudio se utilizaron los resultados correspondientes al análisis de los mismos 21 modelos procesados para la preparación del AR5 (Church et al., 2013a, 2013b). Estos modelos simulan el cambio del nivel del mar asociado a expansión térmica, junto con resultados del periodo preindustrial; este último, necesario para remover la expansión térmica causada por la deriva climática en las temperaturas del océano profundo.

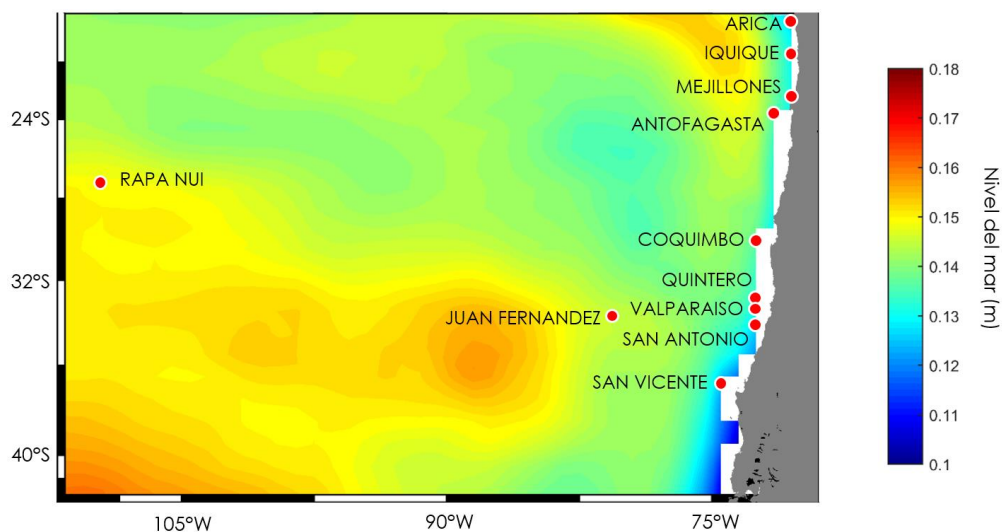
Los forzantes geofísicos que estos modelos incluyen son:

- 5 componentes de hielo (dinámica y balance superficial en Groenlandia, dinámica y balance superficial en Antártica, glaciares)
- 3 componentes oceánicos (altura relativa del nivel del mar, anomalía global de la altura termostérica del nivel del mar y efecto de barómetro invertido)
- Almacenamiento de agua en tierra
- Ajuste isostático glacial (cambio del nivel del mar respecto a la tierra)

La presentación de los datos corresponde a una grilla de $1^\circ \times 1^\circ$, en un dominio espacial de -90°N a 90°N y 0°E to 360°E . El periodo de tiempo abarcado 94 años entre 2007 y 2100, con periodicidad anual. Utilizando los pixeles de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ más próximos a Chile continental, se procedió a una interpolación lineal para obtener data cada 5 [km]. Para Rapa Nui y la isla Robinson Crusoe, en el Archipiélago Juan Fernández, se tomaron los pixeles más cercanos. Cabe notar que, a diferencia de los escasos modelos de viento (utilizados para generar campos de oleaje), los modelos de nivel del mar cubren rangos bastante más amplios y sin lagunas temporales.

En la Figura 17 se muestra el mapa de distribución de la mediana (a partir de los 21 modelos del AR5) de las proyecciones del cambio del nivel del mar correspondiente al periodo 2026-2045. Se observa un gradiente latitudinal moderado, con valores en la mediana que van de 0.14 [m] en la zona norte, a 0.10 [m], hacia el sur de los 36°S , lo cual estaría asociado al efecto isostático de la región glacial en el sur de Chile.

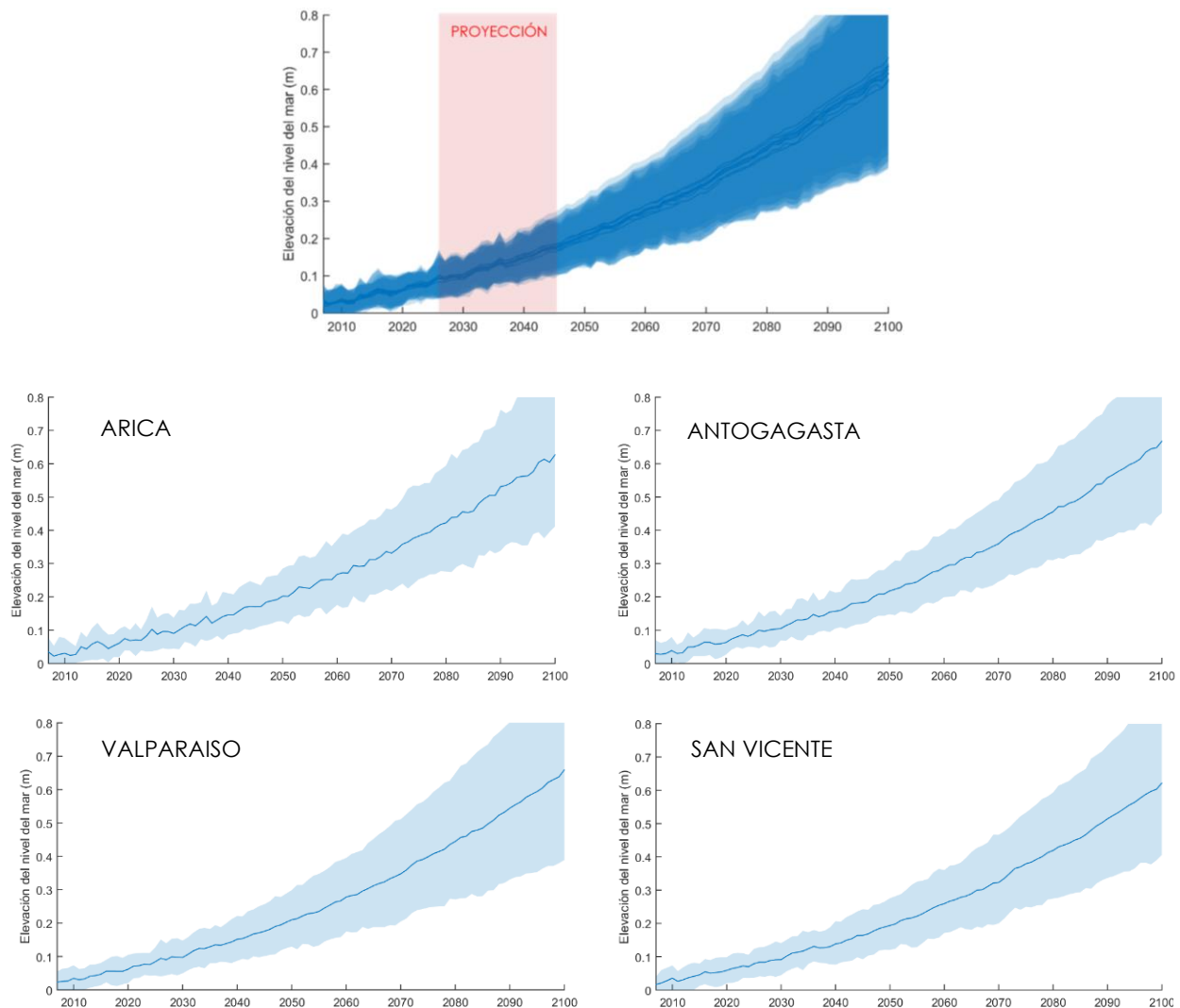
Figura 17: a) Incremento del nivel del mar respecto entre la mediana de la proyección (2026-2045) respecto de la mediana del período histórico (1986-2005). Los puntos rojos corresponden a los nodos más cercanos a los puertos en los cuales se efectúa la proyección. Esta gráfica no contempla los efectos de deformación vertical de la corteza terrestre producto del ciclo sísmico.



En la Figura 18 se presentan la superposición de las proyecciones del nivel medio del mar, correspondientes al periodo 2010-2100, las cuales fueron calculadas en los nodos más cercanos

a los principales puertos entre 18°S y 37°S, indicados en la Figura 17, además de las proyecciones para Arica, Antofagasta, Valparaíso y San Vicente. Se observa que las proyecciones son relativamente uniformes en todo el país. Las proyecciones entre el periodo actual y la proyección (2026-2045) exhiben una tendencia aproximadamente lineal, la cual incrementa la tasa de aumento hacia la segunda mitad del siglo XXI. La magnitud del ascenso en la proyección fluctúa entre 0.15 y 0.18 [m] y el rango de incertidumbre entre modelos alcanzan del orden de ± 0.10 [m] a lo largo de Chile. Estos resultados son consistentes con Slangen (2014) y Yan (2012). Cabe señalar que el trabajo de Albrecht & Shaeffer (2016), enfocado también en las costas de Chile, no sigue precisamente la metodología de los trabajos mencionados, por lo que no es estrictamente comparable a los resultados de este estudio.

Figura 18: Arriba: Nivel del mar respecto al promedio 1986-2005 en [m], a partir de 21 modelos del CMIP5 (AR5). Las líneas corresponden a los puertos de Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio y San Vicente, junto con sus respectivas bandas de error. Se indica la ventana a partir de la cual se estimó la mediana del periodo 2026-2045. Abajo: Proyecciones del nivel del mar respecto al promedio 1986-2005 en [m]. Las líneas corresponden a la mediana y el celeste las bandas de error. Esta gráfica no contempla los efectos de deformación vertical de la corteza terrestre producto del ciclo sísmico.



4.4 COTA DE INUNDACIÓN

El cambio climático supone importantes aumentos en el sobrepaso de obras marítimas e inundación en los paseos marítimos de las ciudades costeras. En la Figura 19 se muestra un ejemplo del sobrepaso ocurrido durante el temporal del 8 de agosto de 2015 en Valparaíso, que causó el corte del metro costero durante una semana (Winckler et al., 2017). El sobrepaso puede significar un riesgo a la seguridad de las personas y vehículos, e importantes consecuencias en la estabilidad de las defensas costeras. Una medida para cuantificar el impacto de este tipo de fenómenos en las ciudades costeras es la cota de inundación.

Figura 19: Arriba: Sobrepaso en Av. España, Valparaíso, debido al temporal del 8 de agosto de 2015 (Winckler et al., 2017). Producto de las olas, se destruyó la defensa y se cortó la línea del metro entre Valparaíso y Limache. El flujo llegó incluso a la avenida, lo que se evidencia en el desplazamiento de las barreras tipo New Jersey en la esquina inferior derecha de la foto.



La cota de inundación se puede descomponer como la contribución de diferentes dinámicas como los cambios del nivel medio del mar, la marea astronómica, la marea meteorológica, el setup y runup de oleaje, las ondas infragravitatorias, los tsunamis, los cambios verticales del terreno y el efecto de los caudales efluentes en ríos, entre otros. En este estudio, la cota de inundación histórica (C) respecto al Nivel de Reducción de Sondas⁹ (NRS) se define como

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

⁹ El Nivel de Reducción de Sondas (NRS) se define en Chile como el nivel más bajo que alcanza la marea estando la luna en perigeo, durante una sicigia.

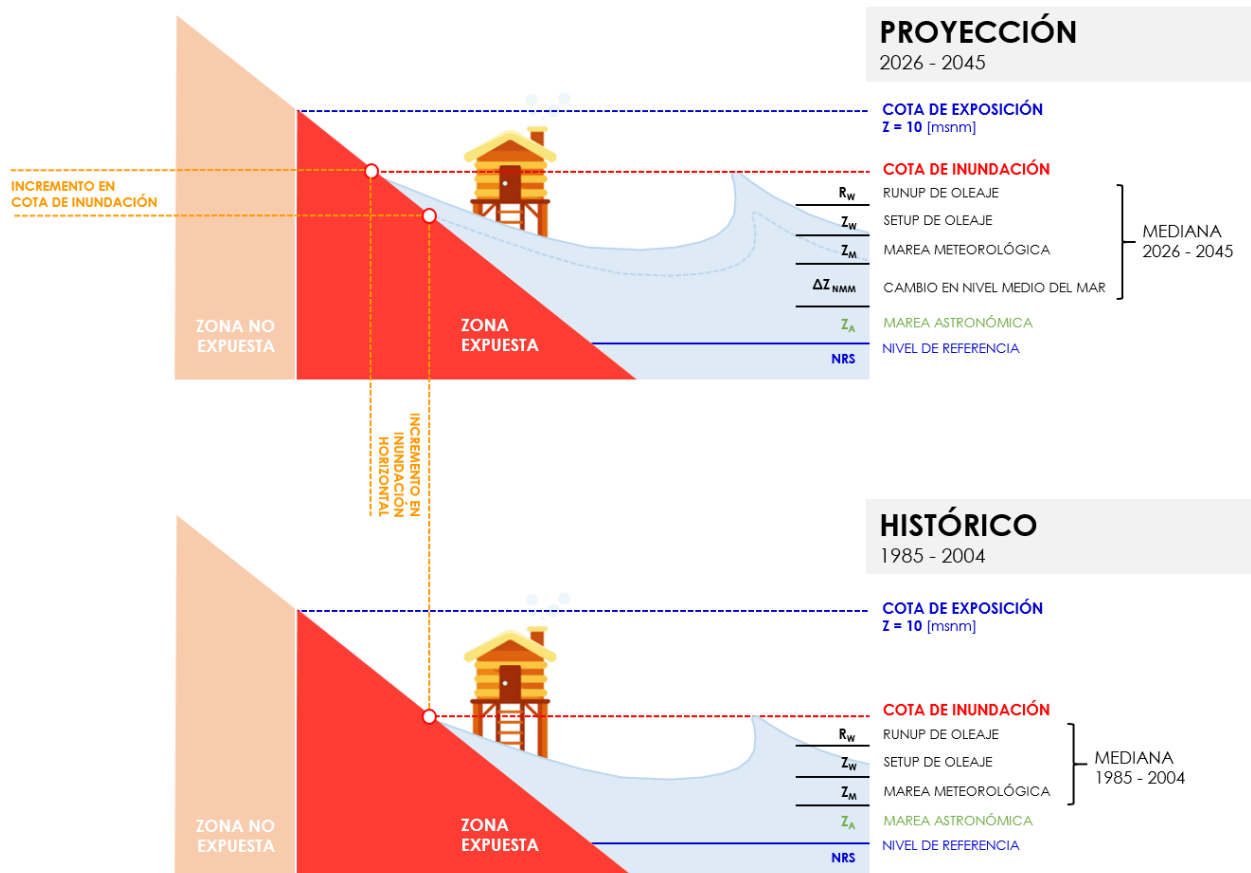
Donde todos los términos de la derecha se calculan para el período histórico (Figura 20, arriba). La cota de inundación futura (Figura 20, abajo), se calcula con la expresión:

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

Donde:

- ΔZ_{NMM} Diferencia entre el Nivel Medio del Mar para la proyección ($Z_{NMM\ 2026-2045}$) y el período histórico ($Z_{NMM\ 1985-2004}$), calculada latitudinalmente cada 5 [km].
- Z_A Semiамplitud de la marea astronómica (máximo valor para cada puerto patrón).
- Z_M Marea meteorológica producto de la acción combinada de cambios en la presión atmosférica y el viento. Esta variable fue obtenida de CEPAL (2015).
- Z_W Sobreelevación producto de los cambios espaciales de momentum que experimenta el oleaje en las inmediaciones de la rotura. A diferencia del runup y por definición, esta es una magnitud promediada en el período.
- R_W Runup producto del ascenso instantáneo del oleaje en la costa. En este estudio se usa el $R_W^{2\%}$, que corresponde al valor que es excedido el 2% del tiempo en un estado de mar (intervalo durante el cual se asume que el oleaje es estadísticamente estacionario).

Figura 20: Definición de componentes utilizadas para el cálculo de la cota de inundación.



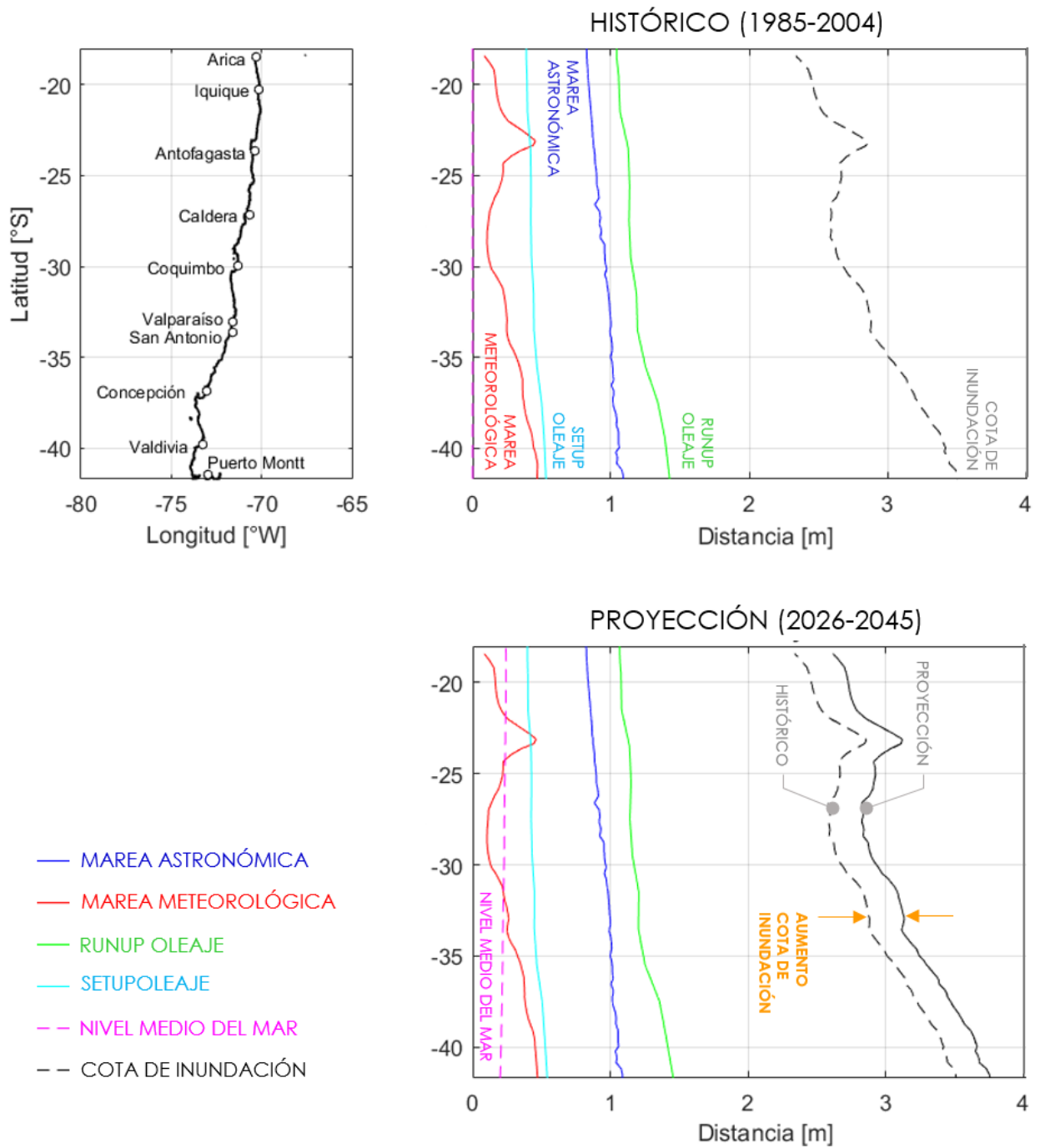
El runup y el setup se calculan a partir de los datos de oleaje en aguas profundas, propagados cada 5 [km] a la costa considerando sólo los efectos de refracción y asomeramiento¹⁰ mediante la Teoría Lineal del Oleaje y la Ley de Snell. La propagación se efectúa para la altura significativa asociada al percentil 99%, y coeficientes de agitación generados con el período medio y dirección media asociados al percentil 50%. Estos resultados representan una aproximación de gran cobertura. Resultados más específicos como los presentados para los puertos (Volumen 5) requieren del análisis local que considera procesos físicos adicionales a la refracción y el asomeramiento, como la reflexión o la difracción, que ocurren en las dársenas y costas de alta pendiente.

La Figura 21 muestra la cota de inundación, junto a todas las componentes utilizadas en su cálculo¹¹. Se observa que valores mínimos de ~2.5 [m] NRS en el extremo norte a ~3.5 [m] NRS en el Canal Chacao para el escenario histórico y de entre ~2.8 [m] a ~3.8 [m] NRS para ambos extremos. El aumento de la cota de inundación abarca desde +0.23 a +0.29 [m] en los extremos sur y norte, respectivamente, y se debe principalmente al aumento del nivel del mar, cuyo aumento abarca desde +0.20 a +0.24 [m] para dichos extremos, respectivamente. La marea meteorológica y la contribución del oleaje, si bien son importantes en determinar la cota de inundación, no experimentan cambios sustantivos entre ambos períodos.

¹⁰ La **refracción** es el proceso por el cual el oleaje cambia su altura y dirección producto de cambios en la batimetría. El **asomeramiento** es el proceso por el cual el oleaje aumenta la altura y reduce su celeridad debido a la reducción de la profundidad en las cercanías de la costa. El asomeramiento es responsable, en última instancia, de la rotura del oleaje. La **difracción** es el proceso por el cual el oleaje reduce su altura y cambia la dirección debido a la presencia de obstáculos (como los rompeolas utilizados en los puertos). La **reflexión** es el proceso por el cual el oleaje cambia bruscamente de dirección por la presencia de obstáculos.

¹¹ Debido a la dificultad de generar una línea de costa al sur del Canal Chacao y en razón de la escasez de asentamientos costeros expuestos al Océano Pacífico en y al sur de Chiloé, se optó por hacer el análisis de vulnerabilidad (dependiente de la cota de inundación) en la zona costera al norte del Canal Chacao.

Figura 21: Cota de inundación entre Arica y el Canal Chacao para el período histórico (arriba) y para la proyección (abajo). En el panel de abajo se muestra también la cota de inundación histórica para facilitar la comparación entre ambos períodos.



5 ANALISIS DE EXPOSICION

El análisis de exposición se basa en la generación de un modelo de elevación digital (sección 5.1), la generación de un inventario de exposición (sección 5.2) y en la ejecución de talleres y reuniones con actores con competencias en materias relacionadas con la costa (sección 5.3).

5.1 MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL

Se elaboró un modelo de elevación digital bajo los 10 metros sobre el nivel del mar (10 [msnm] en adelante) utilizando bases de datos satelitales (ASTER GDEM-2, ALOS WORLD 3D y ALOS PALSAR), información del IGM, planos de borde costero del SHOA y líneas costeras de la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (SUBPESCA) y del Instituto Nacional de Estadísticas (INE). La cota 10 [msnm] corresponde a las denominadas LECZ (*Low Elevation Coastal Zones*), definida como el área contigua a lo largo de la costa bajo dicha cota (McGranahan et al., 2007).

5.1.1 Modelo de elevación digital para todo Chile

Para el modelo de elevación digital para todo Chile se generó un mosaico con las escenas descargadas de las bases de datos satelitales. Se aplicó un filtro de paso bajo de 3x3 píxeles a los mosaicos nacionales y regionales de los modelos, con objeto de homogeneizar los datos para facilitar la identificación de la cota 10. Además, se proyectó la curva de 10 [msnm] en todo Chile, utilizando las curvas de nivel y cotas oficiales del IGM junto con la línea de costa del INE. Para ello, se generó un modelo tridimensional de terreno para cada región utilizando triangulación lineal simple, el cual luego se transformó a formato Ráster, generando un nuevo modelo de elevación digital de 5 [m] de resolución (Figura 22). El área obtenida fue revisada manualmente y comparada con las observaciones realizadas en las campañas de terreno entre noviembre de 2018 y septiembre de 2019. De esta manera se obtuvo el área expuesta nacional (Figura 23), incluyendo las islas de Rapa Nui (Figura 24) y el Archipiélago Juan Fernández (Figura 25).

Figura 22. Proceso de elaboración del modelo de elevación digital IGM.

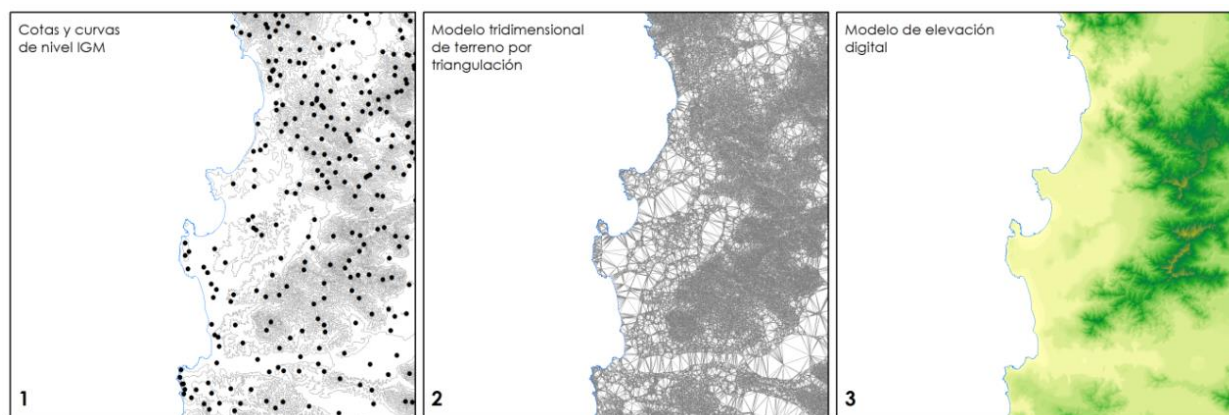


Figura 23. Área expuesta identificada para 104 comunas de Chile consideradas en este estudio. No se incluye Rapa Nui y el Archipiélago Juan Fernández.

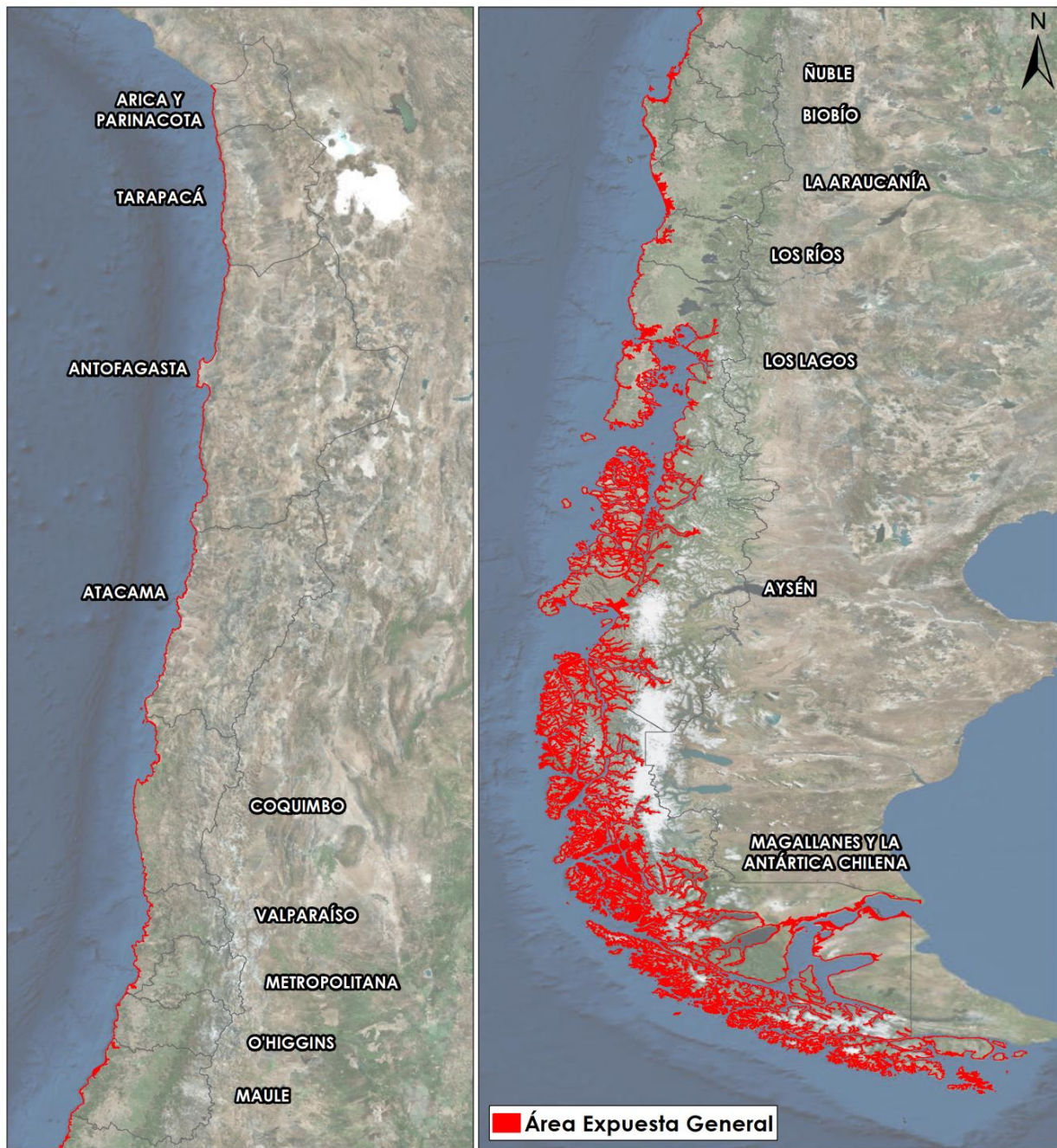


Figura 24. Área expuesta en Rapa Nui. Se incluyen también algunos sistemas analizados en el estudio.

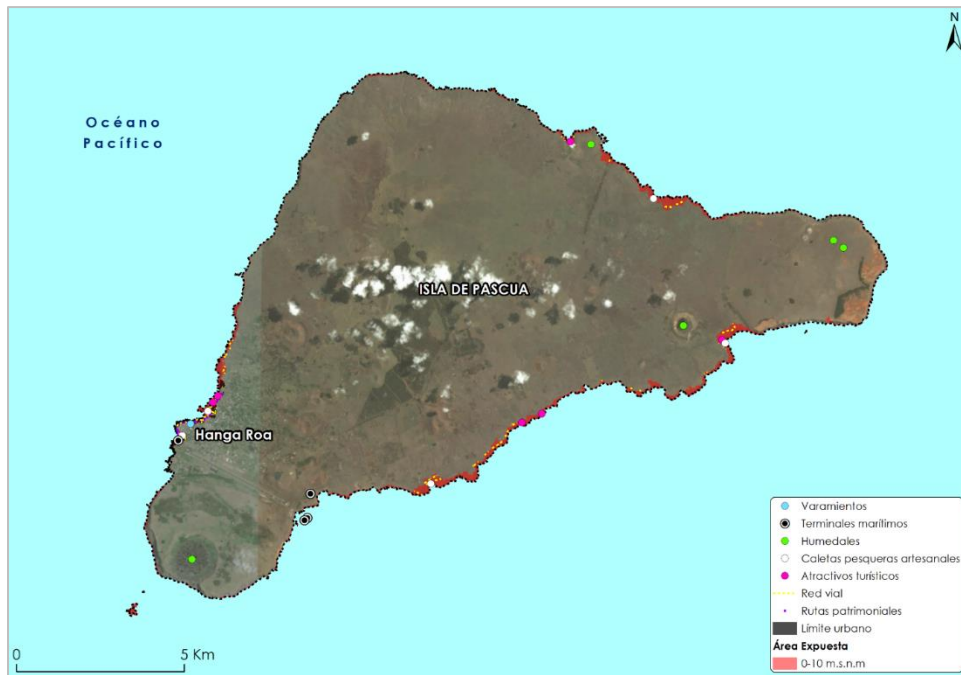


Figura 25. Área expuesta en la Isla Robinson Crusoe y la Isla Santa Clara, en el Archipiélago Juan Fernández¹².



¹² No se considera la Isla Alejandro Selkirk pues no se cuenta con una topografía de calidad para definir la costa de los 10 [msnm].

5.1.2 Modelo de elevación digital para comunas críticas

Con objeto de mejorar los resultados obtenidos de las bases de datos satelitales, se incorporaron los planos de borde costero del SHOA en 10 de las 12 comunas declaradas como críticas este estudio. Se contó con planos de borde costero de Antofagasta, Coquimbo, Viña del Mar, Valparaíso, Pichilemu, Talcahuano, Coronel, Arauco, Puerto Saavedra y Valdivia. En Rapa Nui y Juan Fernández no se contó con dichos planos. Como se muestra en la Figura 26, el incluir los planos de borde costero aumentó significativamente la calidad del modelo de elevación digital de estas comunas.

A partir de los planos de borde costero, se extrajeron las cotas y curvas de nivel con objeto de mejorar la precisión del área expuesta identificada. Los archivos vectoriales extraídos se georeferenciaron según el huso al que pertenecen (18/19 S) y los valores altimétricos fueron ingresados de forma manual. Además, la ubicación de las cotas (punto x,y) se corrigió de forma manual debido al desfase que presentaban en relación con las curvas de nivel, situación que podía generar errores en la elaboración de los modelos de elevación digital de alta resolución. De esta manera, se elaboró un modelo de elevación digital de 1 [m] de resolución para la franja costera de las comunas críticas identificadas en este estudio, utilizando la línea de costa del INE como forzante (cota 0), las cotas y curvas de nivel del IGM y las extraídas desde los planos de borde costero del SHOA. Así, se obtuvo la curva de los 10 [msnm] para las comunas críticas identificadas en este estudio. En la Figura 27 se presenta el área expuesta identificada para las comunas críticas identificadas en este estudio¹³.

¹³ El área expuesta es superior al área vulnerable. La primera surge de la elección de los 10 [msnm] para delimitar las *Low Elevated Coastal Zone* (McGranahan et al., 2007) en tanto que el área vulnerable surge que intersectar la cota de inundación (sección 4.4) con el modelo de elevación digital (sección 6.1).

Figura 26. Ejemplo cómo los planos de borde costero del SHOA mejora significativamente el modelo de elevación digital obtenido a partir de información satelital en las comunas críticas. En el panel izquierdo se muestra el área expuesta calculada para Coquimbo a partir de información satelital. A la derecha se muestra el modelo de 1 [m] de resolución junto con la curva de los 10 [m] calculada a partir de planos de borde costero.

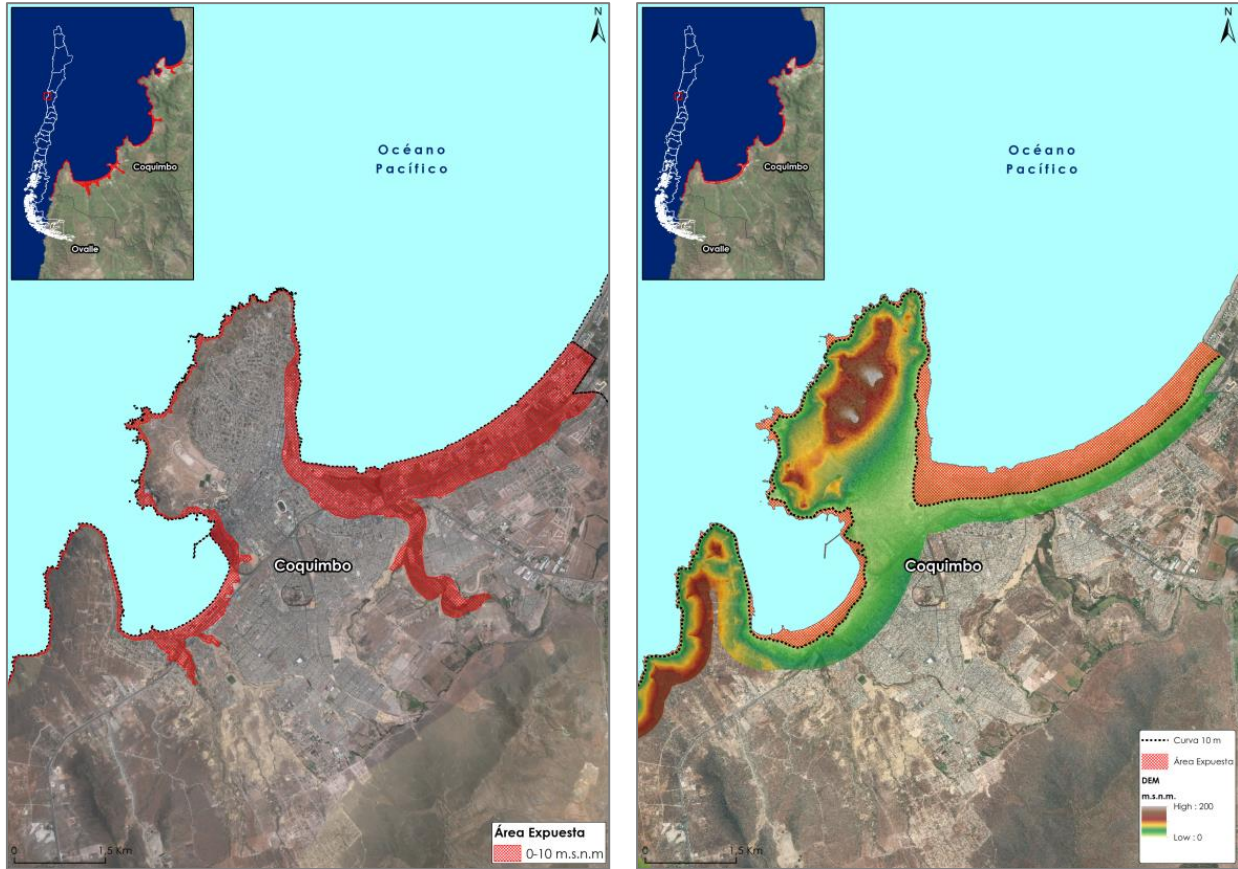
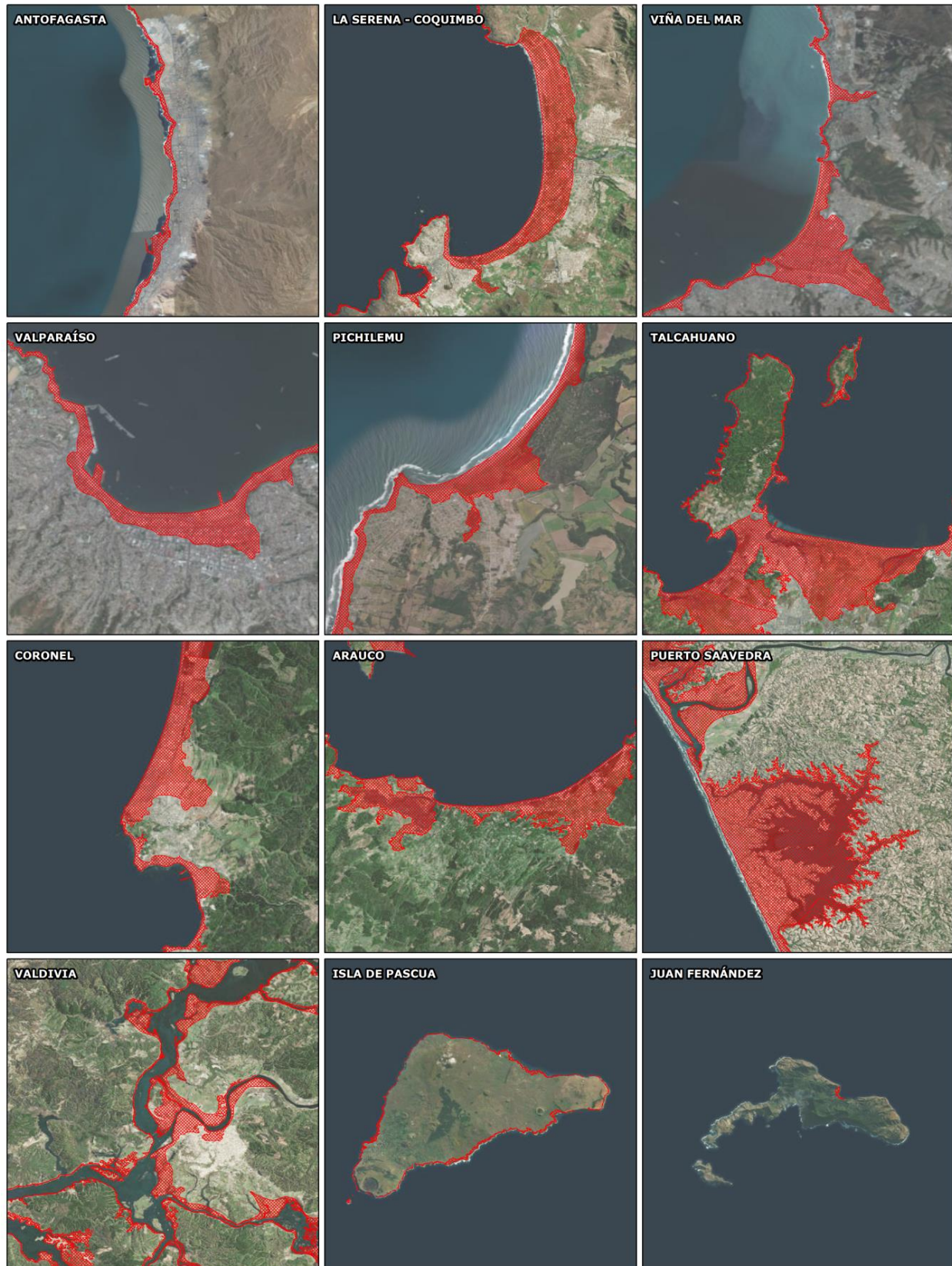


Figura 27. Área expuesta identificada para las comunas críticas identificadas en este estudio.



5.1.3 Estimación área expuesta

Para estimar el área expuesta, se compararon las líneas de costa de la SUBPESCA y del INE¹⁴. Ambas representan el nivel del mar al momento de la fotografía que sirvió de base para su digitalización, por lo que difieren de manera sustancial, siendo este uno de los principales problemas enfrentados en este estudio. La falta de un criterio estandarizado para digitalizar zonas con un comportamiento macromareal¹⁵ induce errores significativos, puesto que la distancia horizontal entre la pleamar y la bajamar puede llegar a decenas o centenas de metros. Fue tal la magnitud de problemas encontrados en los canales y fiordos ubicados al sur de Puerto Montt, que se sugiere a mediano plazo priorizar la confección de una línea costera con metodologías estandarizadas para esta zona.

Los resultados de exposición obtenidos al sur de Puerto Montt son poco confiables debido a la dificultad de generar una línea de costa en la zona de canales y fiordos. Por ello y en razón de la escasez de asentamientos costeros expuestos al Océano Pacífico en y al sur de Chiloé insular, se optó por hacer el análisis de vulnerabilidad en la zona costera al norte del Canal Chacao.

En total se obtuvieron 15.766 [km²] de área expuesta para las comunas de Chile, incluyendo Rapa Nui y Juan Fernández, lo que representa el 4,05% del territorio nacional. En términos porcentuales, la comuna de Hualpén [49,39%], Talcahuano [47,4%], Puerto Saavedra [39,28%] y Maullín [34,28%] son las más expuestas de Chile Continental. Por el contrario, las comunas con menor porcentaje comunal expuesto corresponden a Copiapó [0,06%], Antofagasta [0,08%], Torres del Paine [0,1%], Camarones [0,01%] y Huara [0,1%].

Cabe mencionar que la definición del área expuesta, y en particular del inventario de exposición, puede servir como insumo para la evaluación del riesgo de tsunamis en Chile. A la fecha, el SHOA tiene una colección de Cartas de Inundación por Tsunami (CITSU)¹⁶ que definen la amenaza en de tsunamis forma determinística mediante modelación numérica en función de un evento máximo probable. Las CITSU no consideran la exposición, vulnerabilidad ni riesgo de las ciudades afectadas. El inventario de exposición generado en este estudio, que cubre hasta los 10 [msnm], no obstante, debiera ser extendido a cotas superiores que podrían ser alcanzadas por un tsunami extremo.

¹⁴ Cabe destacar que la línea de costa del INE demostró ser más precisa en lugares poblados, mientras que línea de SUBPESCA fue más precisa en lugares donde se emplazan las caletas pesqueras artesanales. Sin embargo, gran parte del territorio costero rural no posee una buena representación de su línea de costa, siendo este uno de los mayores problemas al momento de calcular el área expuesta.

¹⁵ La clasificación macromareal representa lugares donde el rango de mareas es mayor a 4 [m].

¹⁶ <http://www.shoa.cl/php/citsu.php>

Figura 28: Área total obtenida bajo los 10 [msnm] en comunas costeras continentales, en [km].

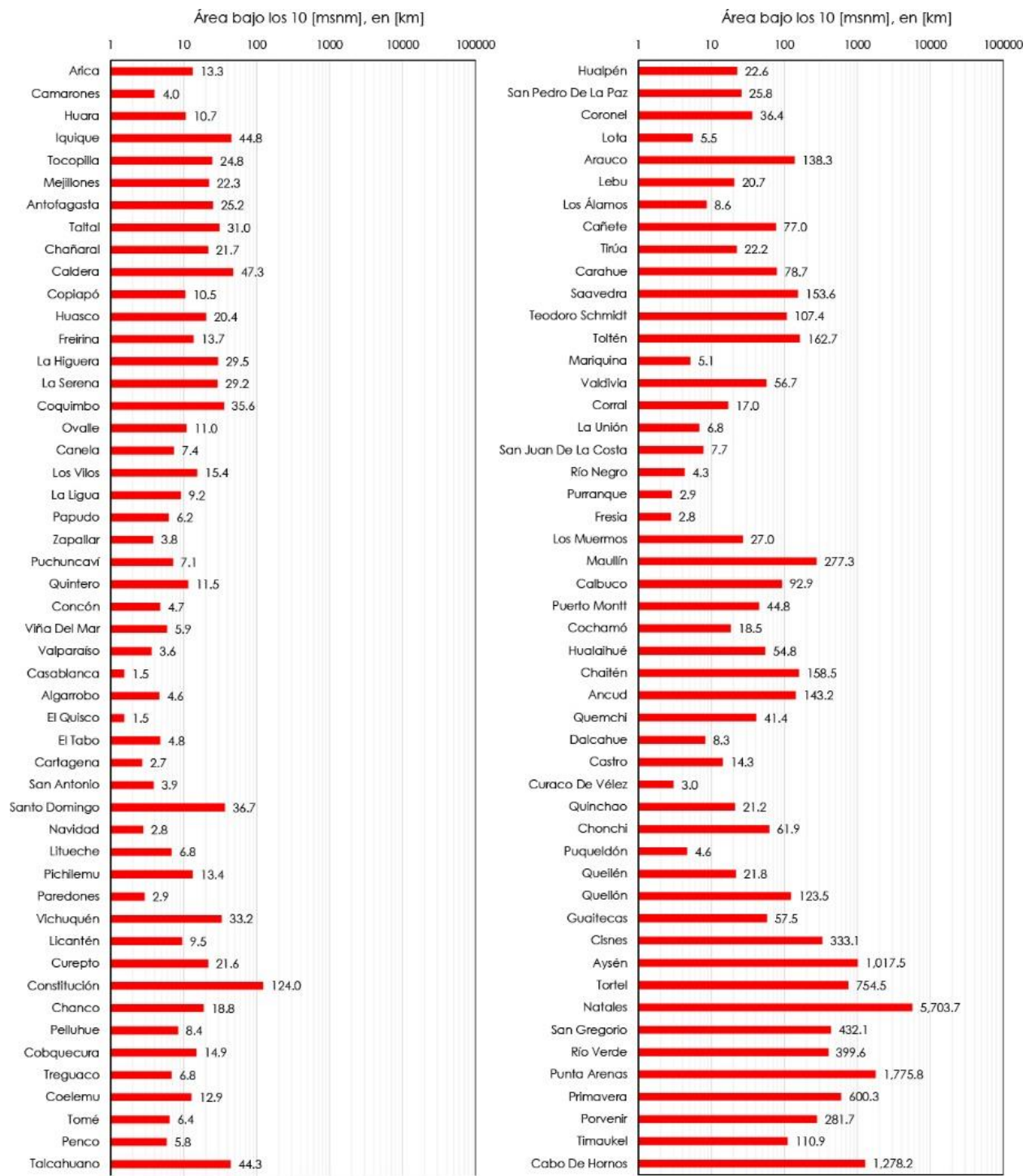
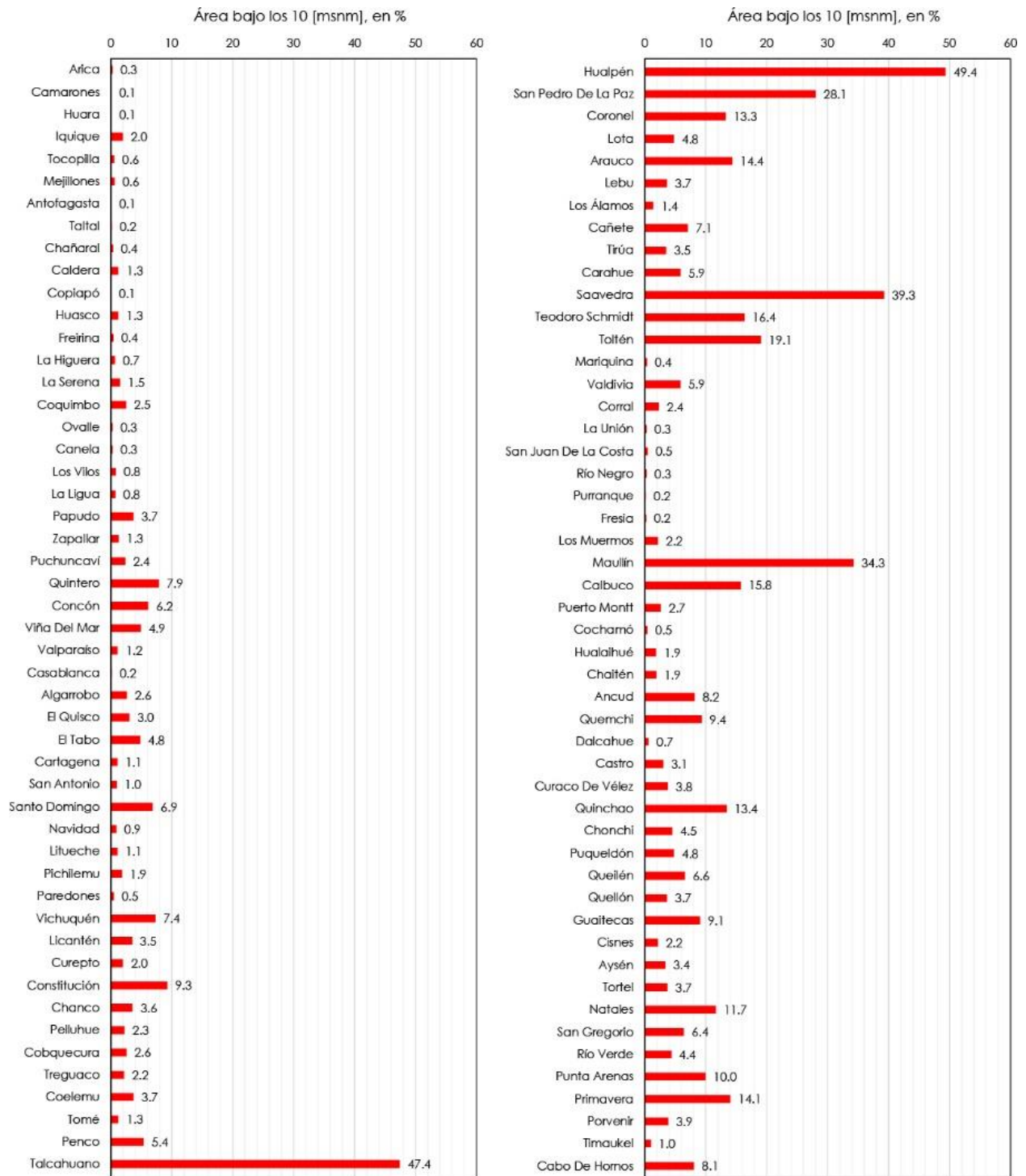


Figura 29: Área total obtenida bajo los 10 [msnm] en comunas costeras continentales, en %.



5.2 INVENTARIO DE EXPOSICIÓN

Para la elaboración del inventario de exposición, se utilizó información oficial del sitio IDE Chile¹⁷ e información del Censo 2017¹⁸. Se solicitó además información a 16 servicios públicos a través del Ministerio del Medio Ambiente y se recurrió a otras bases de datos (e.g. geoportales) y archivos de estos consultores. La base de datos se agrupó en 6 categorías:

- Población
- Infraestructura
- Equipamiento
- Economía
- Sistemas naturales
- Otros

Cada categoría se procesó de manera independiente cruzando los registros con el área bajo los 10 [msnm]. Una vez identificados los elementos, se estandarizó la data siguiendo el siguiente formato:

- Nombre del elemento.
- Categoría, subcategoría y entidad, según se define en la Tabla 3.
- Geometría para definir la característica geométrica de la entidad. Se consideran los tipos:
 - Punto: el elemento no tiene una extensión considerable (e.g. muelles, colegios).
 - Línea: el elemento tiene una longitud considerable (e.g. red vial).
 - Área: el elemento tiene una superficie considerable (e.g. límite de un área urbana).
- Datos y unidades que definen la entidad. Se consideran:
 - Área en [km²] del polígono que ocupa el elemento. Este campo sólo se incorporó en bases de datos que provienen de información poligonal.
 - Longitud en [km] que ocupa el elemento. Este campo sólo se utilizó en elementos lineales.
 - Radio en [km] del polígono que ocupa el elemento. Este campo sólo se incorporó en bases de datos que provienen de información poligonal.

¹⁷ <http://www.ide.cl/>

¹⁸ <http://www.censo2017.cl/>

- Observación: Campo para almacenar aclaraciones sobre un registro.
- Verificación: Campo binario que indica si se contó con algún tipo de verificación del elemento incorporado [1] o no [0]; ya sean fotografías, datos de campo, información bibliográfica, etc.
- Fuente de información que originó el dato incorporado.
- Latitud y longitud (en datum WGS 84), Comuna y Región. Para elementos lineales o poligonales, se utilizó el centroide. Las coordenadas geográficas se trabajaron con un máximo de 6 decimales, con objeto de garantizar una precisión de 1 [m].

La base de datos final consta de 174.746 elementos, 6 categorías y 98 entidades (Tabla 3). No todos estos elementos fueron incorporados finalmente en el inventario de exposición. Ejemplos de elementos no incorporados son los límites comunales, la instrumentación costera y los registros asociados a riesgos naturales. De esta forma, el inventario de exposición se compone de 18.376 elementos, repartidos en 76 entidades. La Figura 30 muestra la distribución espacial de los elementos catastrados.

Figura 30: Distribución espacial de los elementos del inventario de exposición bajo los 10 [msnm].

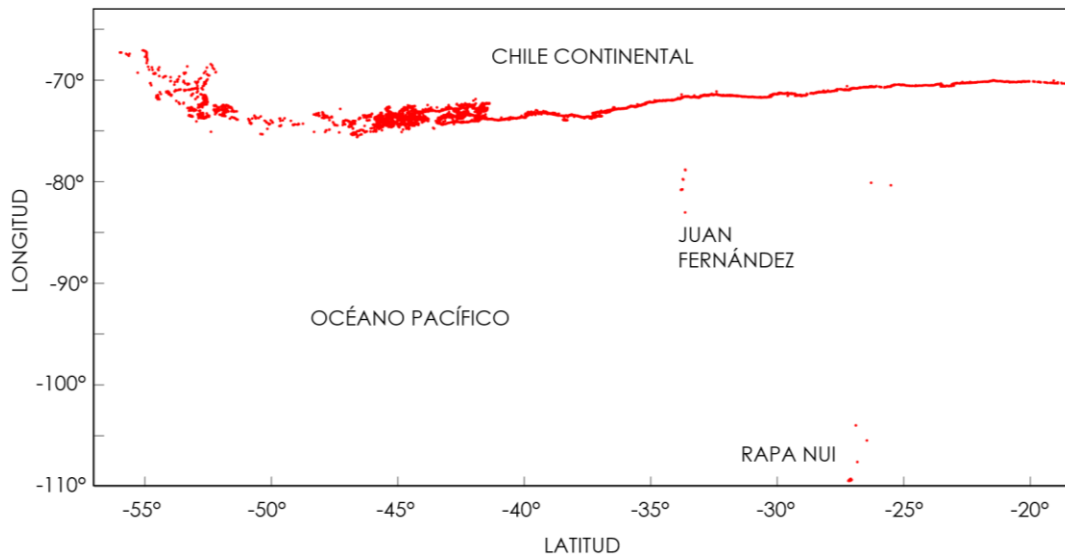


Tabla 3: Total de entidades catastradas en este estudio.

Categoría	Subcategoría	Entidad	Cantidad	Atributo Geométrico	Índice Exposición	Número de entidades
Población	Poblados	Poblados costeros	477	Punto	Si	1
	Límites Urbanos	Límites urbanos	118	Área	Si	1
	Áreas Urbanas	Áreas urbanas consolidadas	26	Área	Si	1
	Censo 2017	Manzanas Censales Urbanas y Rurales	11234	Punto	No	2
Infraestructura	Transporte	Puentes	470	Punto	Si	1
		Red vial	81616	Línea	No	1
	Industria	Establecimientos Industriales Químicos	35	Punto	Si	1
		Establecimientos Registro Emisiones y Transferencia de Contaminantes	1033	Punto	Si	1
		Instalación Tratamientos de Residuos	10	Punto	Si	1
	Energía	Hidrocarburos: Almacén de combustible, Biomasa, Gaseoducto, oleoducto	45	Punto	Si	4
		Termoeléctricas	24	Punto	Si	1
		Subestaciones eléctricas	47	Punto	Si	1
	Agua	Infraestructura Sanitaria (SISS): Planta Tratamiento AP, Planta Tratamiento AS, Planta Elevadora AP, Planta Elevadora AS, Punto de Captación, Emisario	499	Punto	Si	6
		Plantas Desaladoras	20	Punto	Si	1
	Marítimo	Cables Submarinos	20	Punto	Si	1
		Astilleros y varaderos	13	Punto	Si	2
		Catastro Borde Costero: Muelle, rampla, paseo costero, embarcadero, defensa costera, borde costero	475	Punto	Si	6

Categoría	Subcategoría	Entidad	Cantidad	Atributo Geométrico	Índice Exposición	Número de entidades
		Terminales Marítimos estatales, privados, boyas	171	Punto	Si	3
		Puertos Privados y Estatales	26	Punto	Si	2
		Faros	2	Punto	Si	1
		Clubes marinos: Cendyr Náuticos, clubes de Yates, clubes náuticos	21	Punto	Si	3
		Marinas	4	Punto	Si	1
	Instrumentos costeros	Acelerógrafos CSN	34	Punto	No	1
		Multiparámetros CSN	4	Punto	No	1
		Estación calidad de agua	25	Punto	No	1
		Estaciones Meteorológicas	60	Punto	No	1
		Boyas DART	5	Punto	No	1
		Estaciones Nivel del Mar SHOA	43	Punto	No	1
Equipamiento	Bomberos	Compañías de Bomberos	102	Punto	Si	1
		Cuerpos de Bombero	23	Punto	Si	1
	Policía	Carabineros	65	Punto	Si	1
	Educación	Establecimientos Educativos	645	Punto	Si	1
		Jardines Infantiles INTEGRA	56	Punto	Si	1
		Jardines Infantiles JUNJI	119	Punto	Si	1
	Salud	Centros de Salud	1	Punto	Si	1
		Atención Secundaria	6	Punto	Si	1
		Consultorios	71	Punto	Si	1

Categoría	Subcategoría	Entidad	Cantidad	Atributo Geométrico	Índice Exposición	Número de entidades
		Hospitales	13	Punto	Si	1
		Postas Rurales	97	Punto	Si	1
Economía Local	Turismo	Atractivos Turísticos	755	Punto	Si	1
		Monumento Histórico	138	Punto	Si	1
		Zonas Típicas	25	Punto	Si	1
		Inmuebles de conservación histórica	222	Punto	Si	1
		Zonas de conservación histórica	15	Punto	Si	1
		Zonas de interés turístico	15	Punto	Si	1
		Bienes Nacionales Protegidos	22	Punto	Si	1
		Rutas Patrimoniales	1885	Línea	No	1
	Pesca y Acuicultura	AMERB	1358	Área	Si	1
		Áreas Apropriadas para la Acuicultura	1383	Área	Si	1
		Caletas Pesca Artesanal	546	Punto	Si	1
		Concesiones Acuicultura	5300	Área	Si	1
Pueblos Originarios ECMPO		129	Área	Si	1	
Sistemas Naturales	Dunas	Dunas	256	Punto	Si	1
	Humedales	Humedales	1692	Punto	Si	1
	Playas	Playas	1172	Punto	Si	1
	Áreas Protegidas	Áreas Protegidas SNASPE	81	Área	Si	1
		Otras Categorías de Conservación sitios Ramsar, áreas protegidas privadas, áreas de acceso protegido, áreas	312	Área	Si	7

Categoría	Subcategoría	Entidad	Cantidad	Atributo Geométrico	Índice Exposición	Número de entidades	
		marinas protegidas, bienes nacionales protegidos, monumentos naturales, otros					
		Sitios Prioritarios para la Conservación: sitios estrategias regionales de conservación, sitios prioritarios	128	Área	Si	2	
	Suelos	Formaciones Vegetacionales Gajardo			Área	No	1
		Pisos Vegetacionales de Piscoff			Área	No	1
		Desertificación	11531		Área	No	1
		Erodabilidad	6536		Área	No	1
		Erosividad	7447		Área	No	1
		Biodiversidad	Listado de Especies	93		Punto	Si
	Catastro Bosque Nativo		29744		Área	No	1
	Varamientos		3872		Punto	No	1
	Otros	Hitos	Hitos geográficos: Límites comunales costeros, Hitos geográficos relevantes	53		Punto	No
Riesgos Naturales		Catastro Remoción en Masa	157		Punto	No	1
		Inundación SHOA	72		Área	No	1
		Peligros Volcánicos	2052		Área	No	1
Total registros en la base			174746			98	
Total registros considerados en índice			18376			76	

En relación con los resultados, se concluye que a nivel nacional, un total de 972.623 personas se encuentran viviendo bajo los 10 [msnm], lo que corresponde a un 5,53% de la población nacional.

En lo relativo a vivienda, se identificaron un total de 482.122 viviendas bajo la cota de 10 [msnm], lo que corresponde a un 7,42% del total nacional. Del total de viviendas, 479.780 (99,51%) corresponden a viviendas particulares y 2.342 (0,49%) a viviendas colectivas. Del total de viviendas particulares, solo 321.744 (67,06%) se encontraban con moradores presentes en el momento del censo, identificándose un total de 327.847 hogares diferentes, con una composición promedio de 2,97 personas por hogar. En la Tabla 4 se muestra la composición de las viviendas particulares según su tipo. Esta población se distribuye en 621 asentamientos poblados (ciudades, pueblos, aldeas, caseríos), incluyendo los asentamientos humanos rurales irregulares.

Tabla 4: Composición Viviendas particulares según su tipo.

Tipo de Vivienda Particular	Número Total	Porcentaje
Casa	364.904	76,06
Departamento en edificio	99.401	20,72
Vivienda tradicional indígena (ruka, pae pae u otro)	211	0,04
Pieza en casa antigua o conventillo	1.918	0,40
Mediagua, mejora, rancho o choza	9.671	2,02
Móvil (carpa, casa rodante o similar)	361	0,08
Otro tipo de vivienda particular	3.314	0,69
Total	479.780	100,01

Con respecto a la infraestructura costera, de catastraron un total de 84.702 entidades, de las cuales, 81.616 corresponden a tramos de la red vial que se encuentran bajo los 10 [msnm]. En la Figura 31 se muestra un ejemplo del inventario de exposición para los entidades de infraestructura marítima y energética. La totalidad de los elementos están disponibles en el SIG (Sección 1.3).

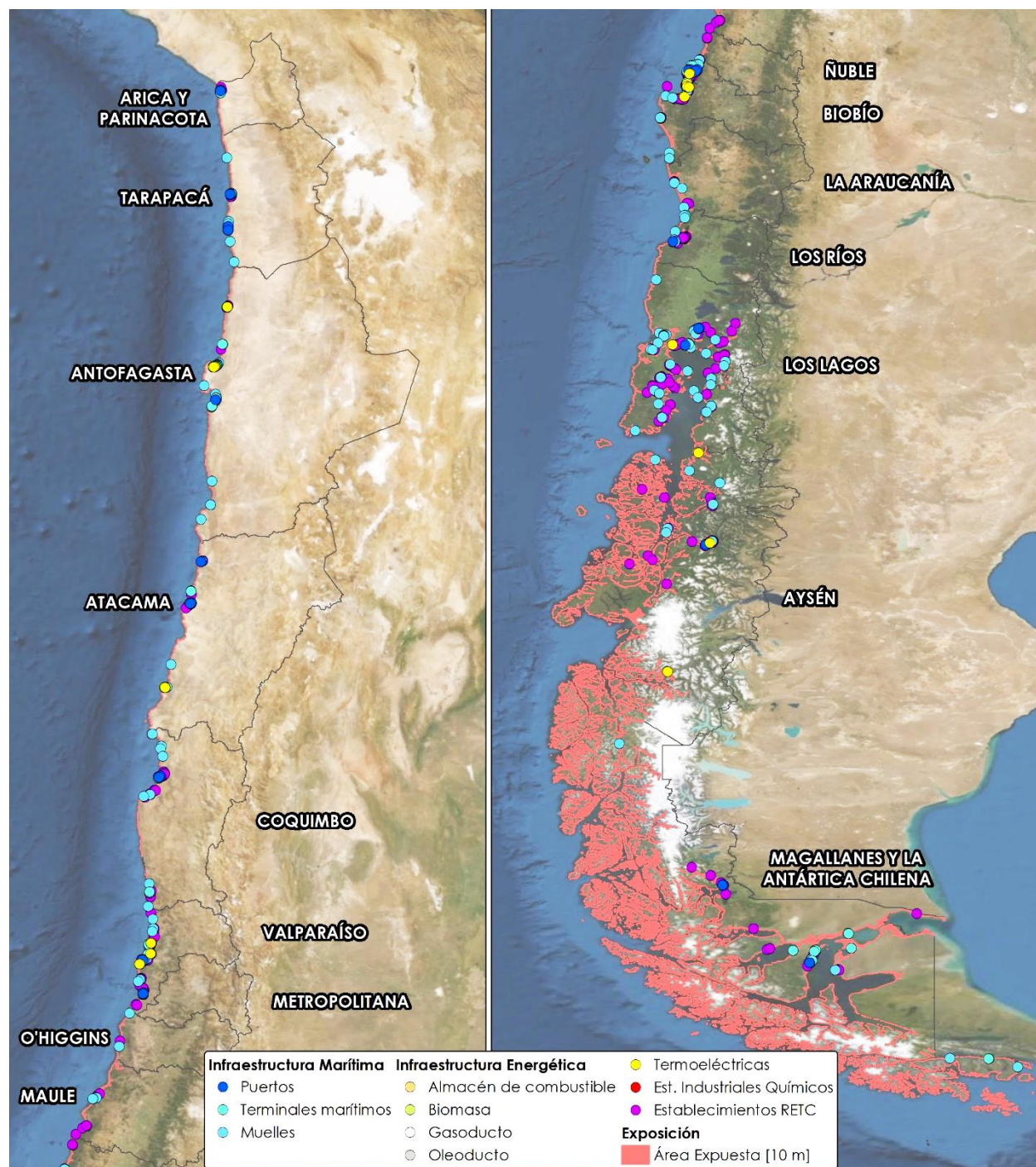
El equipamiento comunal (es decir instalaciones de bomberos, salud, educación y policía) bajo la cota de 10 [msnm] alcanza a las 1.198 edificaciones y se concentra en las regiones de Valparaíso, Biobío y Los Lagos.

El inventario de exposición fue entregado al Ministerio del Medio Ambiente. A la fecha de entrega de este informe, se estudiaba la posibilidad de disponerlo en la Base Digital Del Clima¹⁹ y a medio plazo en el sitio SINIA²⁰.

¹⁹ <http://basedigitaldelclima.mma.gob.cl/>

²⁰ <http://ide.mma.gob.cl/>

Figura 31: Ejemplo del inventario de exposición para la categoría de Infraestructura en Chile continental. Específicamente entidades asociadas a infraestructura marítima y energética.



5.3 TALLERES Y ACTIVIDADES DE VINCULACIÓN

Se efectuaron talleres en las ciudades de Valparaíso, Concepción y Antofagasta, a los cuales asistieron autoridades regionales y municipales, profesionales y técnicos de los servicios públicos, representantes de los puertos e industrias relevantes emplazadas en la zona costera, consultores y académicos con líneas de investigación en temas costeros y/o cambio climático.

En cada taller se separaron los participantes en grupos de trabajo, dirigidos por un facilitador (Figura 32). Se utilizó una cartografía del litoral de la región con los tres sectores más urbanizados (Figura 33) en la que cada grupo identificó sistemas naturales y humanos, medios de subsistencia, servicios y recursos ambientales, infraestructura, edificaciones, actividades y/o activos económicos, sociales y culturales en lugares que podrían verse afectados. Una vez que el mapa estuvo completo, cada grupo designó un representante para exponer la cartografía en la actividad plenaria, resaltando aquellos lugares relevantes junto con las principales observaciones y conclusiones del grupo.

Figura 32: Cartografía participativa en el taller de Antofagasta y exposición grupal en el taller de Concepción.



Adicionalmente, cada participante contestó individualmente un cuestionario con preguntas identificando las amenazas del cambio climático que afectan la región, las comunas costeras más (y menos) expuestas al cambio climático, los sistemas naturales o humanos, medios de subsistencia, servicios y recursos ambientales, infraestructura y/o activos económicos, sociales, culturales en lugares que más (y menos) podrían verse afectados en la región por el cambio climático, entre otras. La información de la cartografía y los cuestionarios fue procesada, a analizada e incorporada al Inventario de exposición.

Figura 33: Ejemplo de cartografía participativa utilizado en el taller de Valparaíso.



Durante el estudio y a petición de la contraparte de la Oficina de Cambio Climático del Ministerio del Medio Ambiente²¹ (OCC-MMA), se desarrollaron reuniones de trabajo con el Servicio Meteorológico de la Armada, el Ministerio de Desarrollo Social, el Ministerio de Ciencias, el Equipo Técnico Interministerial de Cambio Climático²², el CORECC de la región de Valparaíso, la Comisión de Desarrollo de Isla de Pascua CODEIPA y el Alcalde de Rapa Nui, Sr. Pedro Edmunds Paoa.

Asimismo, el Prof. Winckler (Jefe de Proyecto) fue nominado por la OCC-MMA como miembro del Subcomité Técnico del "Proyecto de Conocimiento para el Desarrollo en gestión de riesgos vinculados al cambio climático en zonas costeras de América Latina y el Caribe" cuyo objetivos, entre otros, son desarrollar una Guía metodológica de análisis de los riesgos en la costa de América Latina y el Caribe frente al cambio climático, la variabilidad climática y los eventos extremos, así como para la implementación de medidas de reducción del riesgo orientada a atender las problemáticas propias de la región. El proyecto, que terminará en 2021, servirá de insumo para el futuro Plan Sectorial de Borde costero, contemplado en la Ley Marco de Cambio Climático, actualmente en tramitación y cuya elaboración corresponderá al Ministerio de Defensa Nacional.

²¹ <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/oficina-de-cambio-climatico-del-ministerio-del-medio-ambiente/>

²² El ETICC está integrado por los puntos focales de los ministerios competentes en materia de Cambio Climático (Ministerios de Hacienda, Relaciones Exteriores, Defensa Nacional, Desarrollo Social, Agricultura, Educación, Energía, Salud, Vivienda y Urbanismo, Obras Públicas, Transporte y Telecomunicaciones, Minería Pública, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, Corporación de Fomento de la Producción del Ministerio de Economía, Ministerio del Medio Ambiente, entre otros) y la Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático.

6 ANALISIS DE VULNERABILIDAD

El análisis de vulnerabilidad toma en cuenta la manera en que las amenazas de origen climático afectan las condiciones físicas (estructurales) y operacionales de los distintos elementos expuestos en un sistema costero. Cada elemento tendrá su manera propia de responder a cada una de las amenazas consideradas, condición que se le conoce también como sensibilidad o fragilidad climática. En esta sección se analizan los sistemas humanos y naturales ubicados en zonas costeras bajo los 10 [msnm]. También se analizan con mayor profundidad playas, caletas de pescadores, puertos y humedales en capítulos independientes.

6.1 SISTEMAS HUMANOS Y NATURALES

Los sistemas humanos y naturales considerados son los indicados en la Tabla 3. Cabe mencionar que, dada la gran cantidad y complejidad de entidades existentes, el análisis se reduce a evaluar si cada objeto del inventario de exposición será o no inundado durante la proyección (2026-2045) bajo el escenario RCP 8.5, esto es, si su cota estará bajo la cota de inundación proyectada.

Adicionalmente, y en volúmenes separados, se dan cuenta de los esfuerzos para caracterizar la vulnerabilidad de playas, caletas, puertos y humedales. Estos componentes representan una fracción de los sistemas costeros de interés, pero han sido seleccionados por su relevancia en el desarrollo de los territorios expuestos. La Tabla 1 presenta las amenazas, vulnerabilidades y riesgos de los sistemas analizados en este estudio. En las amenazas se incluyen aquellas que no son de origen climático pero que juegan un rol muy relevante en los eventuales impactos sobre los sistemas analizados.

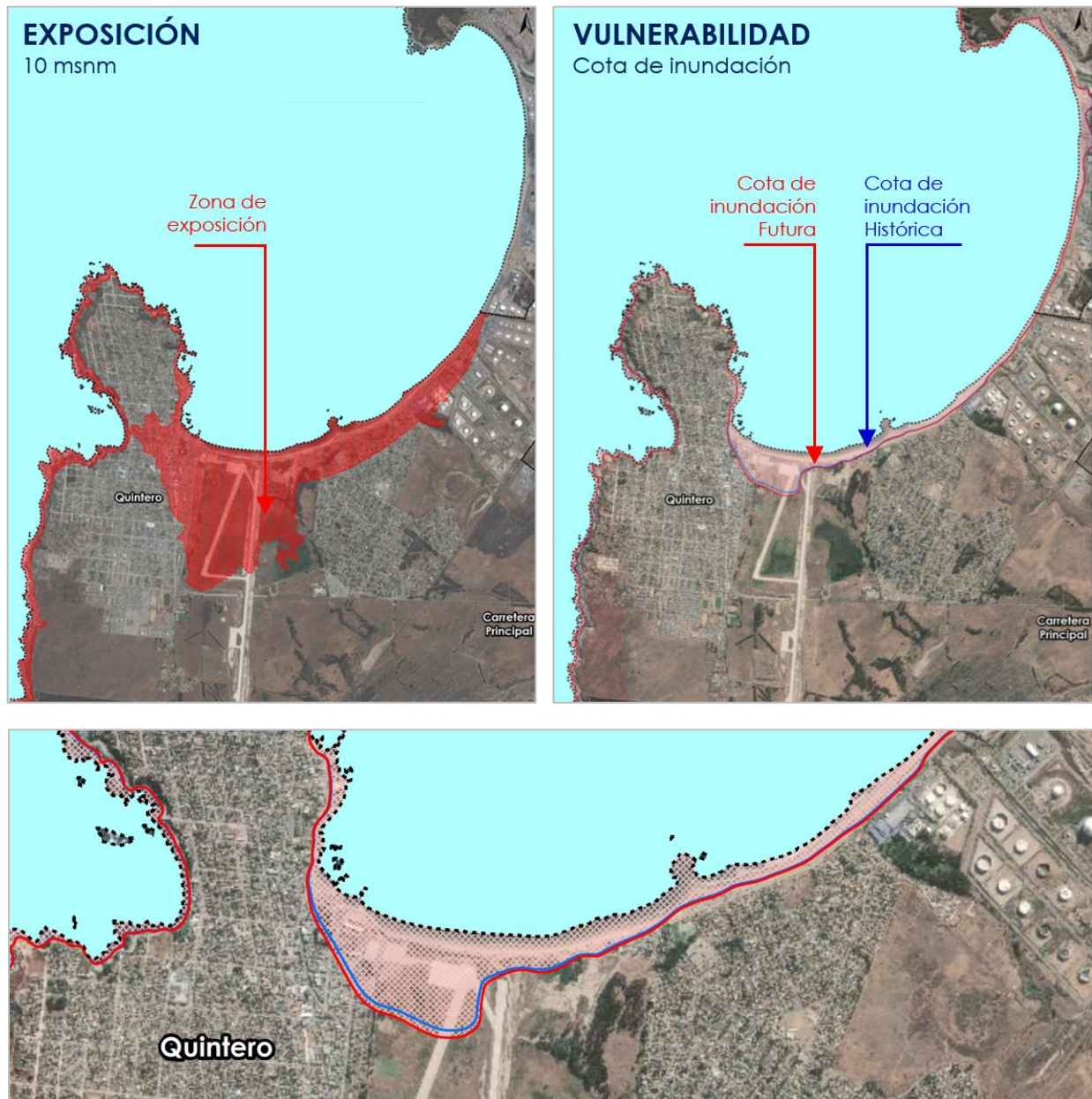
Para realizar el catastro de elementos vulnerables, se replicó la metodología del inventario de exposición, cruzando la base de datos de elementos expuestos, con las cotas de inundación históricas y las cotas de inundación proyectadas para mediados de siglo con el escenario RCP 8.5. La diferencia en el número de elementos de exposición que se encuentran entre ambas cotas, corresponde a una estimación de la vulnerabilidad por cambio climático a nivel comunal.

La Figura 34 muestra un ejemplo del área considerada en el inventario de exposición y las áreas utilizadas para el inventario de vulnerabilidad histórica y futura en la Bahía de Quintero. Este tipo de cartografía se replica para las 71 comunas que se ubican al norte del Canal Chacao. Como se mencionara previamente, dada la baja calidad de los modelos de elevación digital y líneas de costa disponibles (cuyo error es mucho mayor a los cambios esperados en la cota de inundación), no tiene sentido evaluar comunas ubicadas en la zona de fiordos y canales.

Cabe notar que la diferencia horizontal en la línea de inundación presentada en la Figura 34 no es tan significativa pues se asocia a aumentos en la cota de inundación del orden de 20 a 30 [cm] a nivel nacional entre el período histórico y la proyección (Figura 21). Estas diferencias en cota de inundación, no obstante, pueden ser significativamente superiores para eventos más

extremos a los utilizados en este estudio²³ pues, como se deduce del análisis de clima extremo de oleaje (Volumen 1), para probabilidades de excedencia de más de 5 años, las diferencias entre el período histórico y la proyección son mucho mayores que para el percentil 99%.

Figura 34: Ejemplo de la zona bajo los 10 [msnm] considerada en el inventario de exposición (izquierda) y la zona entre la línea de costa y cota de inundación histórica y futura donde se cuantifica la vulnerabilidad en la Bahía de Quintero (derecha). Abajo se muestra un detalle de la diferencia de cotas de inundación histórica (azul) y futura (rojo)



²³ En este estudio se usó una altura significativa asociada al percentil 99%, la que es excedida en promedio 4 días al año.

A partir de dicho análisis, se evaluaron los diferentes subsistemas que caracterizan los sistemas humanos y naturales, entre los que se destacan:

- Número de manzanas censales
- Población (número de personas)
- Número de viviendas
- Número de Puentes
- Puntos de la red vial
- Hidrocarburos
- Infraestructura Sanitaria
- Establecimientos de Bomberos
- Establecimientos de Salud
- Establecimientos de Educación
- Establecimientos de Policía
- Elementos de Turismo Vulnerables

Algunos resultados relevantes se presentan a continuación:

- Del total de población y vivienda en el área vulnerable, se encuentran
 - 589 manzanas censales vulnerables
 - 46357 personas
 - 18338 viviendas
- Del total de elementos de infraestructura, se encuentran
 - 17 puentes
 - 4245 puntos de la red vial que totalizan 493 [km]
 - 8 centros de distribución de energía por hidrocarburos
 - 1 central termoeléctrica y 2 subestaciones
 - 53 elementos de infraestructura sanitaria
- Con respecto al equipamiento comunal, se encuentran
 - 10 edificaciones de bomberos
 - 7 establecimientos de salud
 - 49 establecimientos de educación
 - 5 establecimientos de policía
- Por último, se localizaron 358 elementos asociados al turismo, concentrados en la zona centro-norte (Antofagasta – Valparaíso), Maule y Sur (Biobío – Los Ríos).

6.2 PLAYAS

El cambio climático puede suponer una variación en la cota de inundación en una playa y un retroceso o avance de la línea de costa. A nivel mundial, Bird (2011) indica que cerca del 70% de las playas retrocedieron por efecto de la erosión entre 1976 y 1984, en tanto que los estudios en Chile son escasos (Martínez et al., 2018). Los cambios en la posición de la línea de costa en escalas de tiempo de décadas pueden ser atribuibles a las siguientes causas:

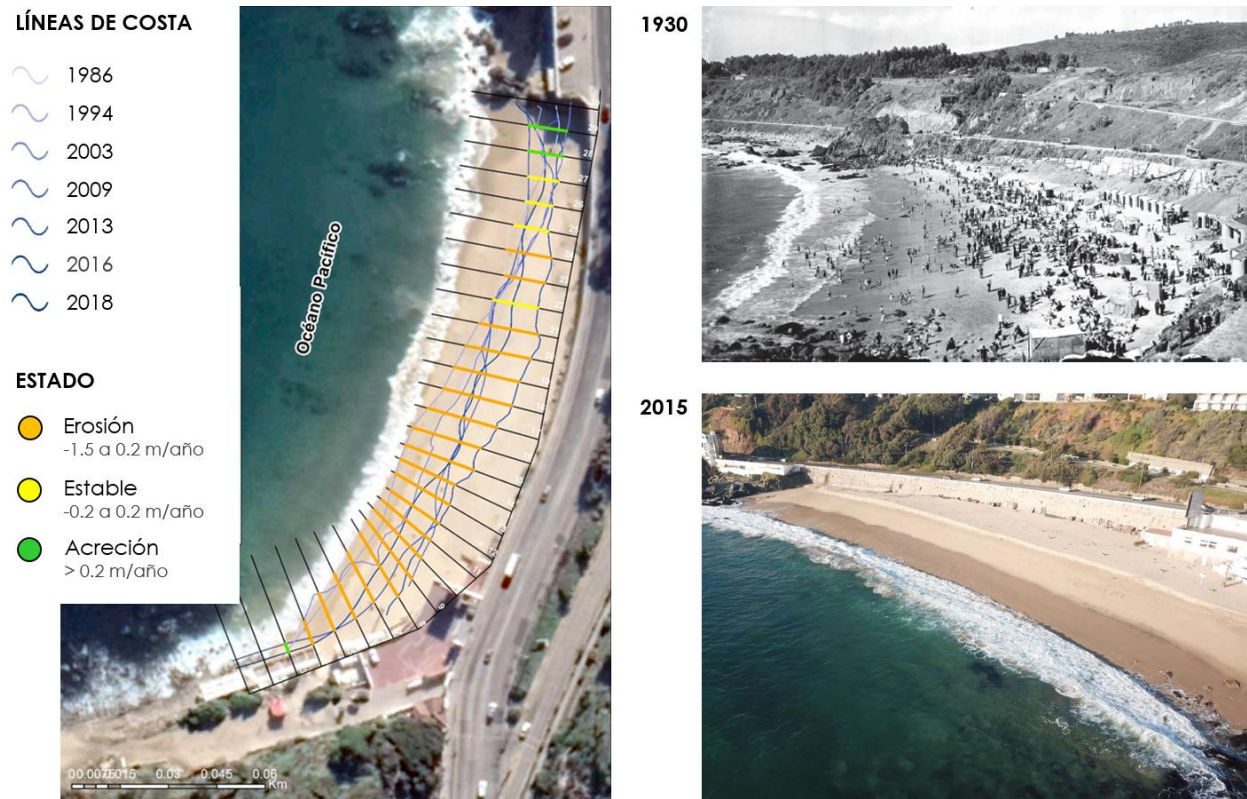
- **Factores oceanográficos** asociados a i) el incremento en la frecuencia e intensidad de marejadas, ii) cambios en la dirección del flujo medio de energía del oleaje y iii) el aumento del nivel medio del mar absoluto
- **Factores geofísicos** asociados a i) la subsidencia o el levantamiento cósmica durante eventos recientes o ii) cambios más lentos ocurridos durante las diferentes etapas del ciclo sísmico
- **Factores antrópicos** asociados a i) los cambios en el aporte sedimentario de los ríos debidos a la expansión urbana de las cuencas, ii) la extracción de arenas para construcción, iii) la construcción de presas y embalses sin un debido sistema de gestión de sedimentos, iv) efectos locales debido a la construcción de obras costeras y v) la extracción de algas en zonas expuestas al oleaje
- **Factores hidrológicos** asociados a i) la variabilidad climática manifestada en eventos como la megasequía de la zona central (CR², 2015) o ii) procesos a mayores escalas asociados al cambio climático.

En este estudio se determinaron los cambios en la posición de la línea litoral para 35 playas en las regiones de Antofagasta, Coquimbo, Valparaíso, O'Higgins y Biobío. Para ello se utilizó el software DSAS (Thieler et al., 2009), fotografías aéreas, fotografías satelitales y levantamientos topográficos de líneas litorales. Las tasas de erosión, en se calcularon ajustando una recta a la posición de la línea de costa en el tiempo (procedimiento denominado LLR, *linear regression rate*) y se clasificaron de acuerdo a las categorías de Rangel et al. (2016).

- > -1.5 m/año : Erosión alta
- -0.2 y -1.5 m/año : Erosión
- -0.2 y $+0.2$ m/año : Estado estable
- $> +0.2$ m/año : Acreción

El análisis cubre desde 39 años (La Serena; 1978 – 2017) a sólo 3 años (Lebu-Tirúa; 2013-2016), pero en 33 playas exceden los 20 años. Los resultados fueron integrados en forma de cartas de erosión costera al SIG. La Figura 35 muestra un ejemplo de aplicación del procedimiento en Playa Las Salinas, Viña del Mar. Cabe notar que procedimiento no permite establecer las causas de la erosión, sino sólo evaluar los cambios que la línea de costa experimenta.

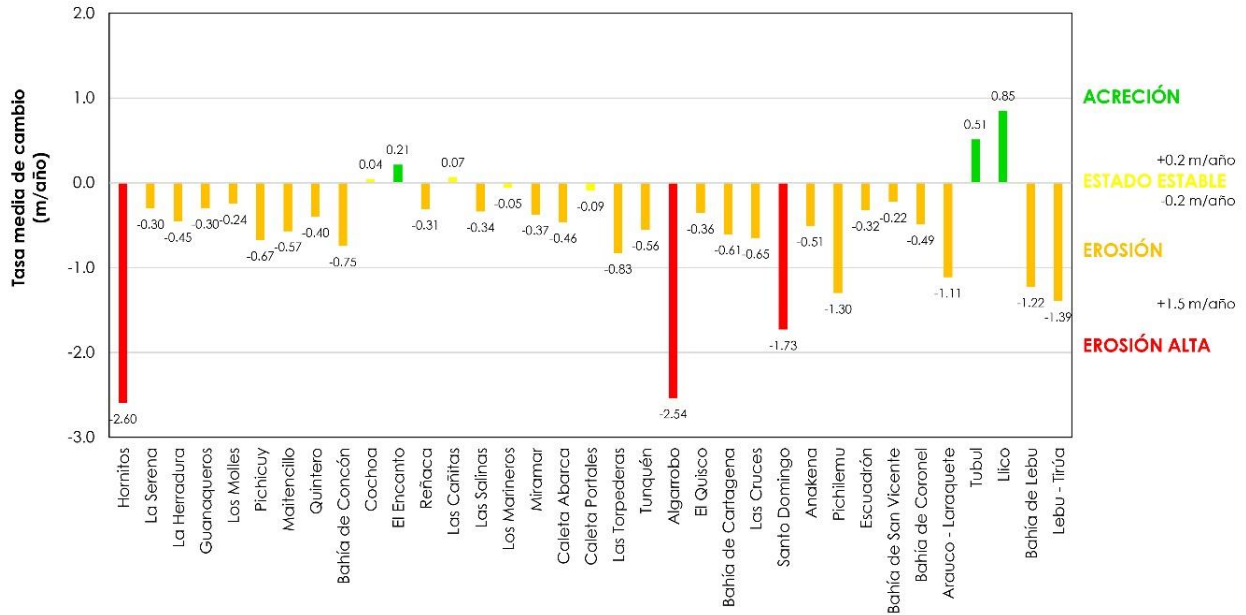
Figura 35: Evolución de la línea de costa en Playa Las Salinas para el período 1986-2018. Se muestran también fotografías de 1930 y luego de la marejada del 8 de agosto de 2015 (Winckler et al., 2017)



Los resultados indican que el 80% de las playas analizadas presentan estados erosivos (Figura 36). Específicamente, el 9% de estas playas presenta erosión alta, el 71% erosión, el 11% un estado estable y solo un 9% acreción. Las playas con erosión alta corresponden a Hornitos (Región de Antofagasta), Algarrobo y Santo Domingo (Región de Valparaíso) y corresponden a playas de ensenada donde se desarrollan extensos litorales arenosos, asociados a antiguos campos dunares y humedales costeros. Pichilemu también experimentó una marcada erosión producto de una subsidencia de 40 cm ocurrida durante el terremoto del 27 de febrero de 2010. Este mismo efecto se ha descrito para la bahía de Santo Domingo, donde los efectos tanto en la geomorfología de la playa así como en su morfodinámica fueron notables.

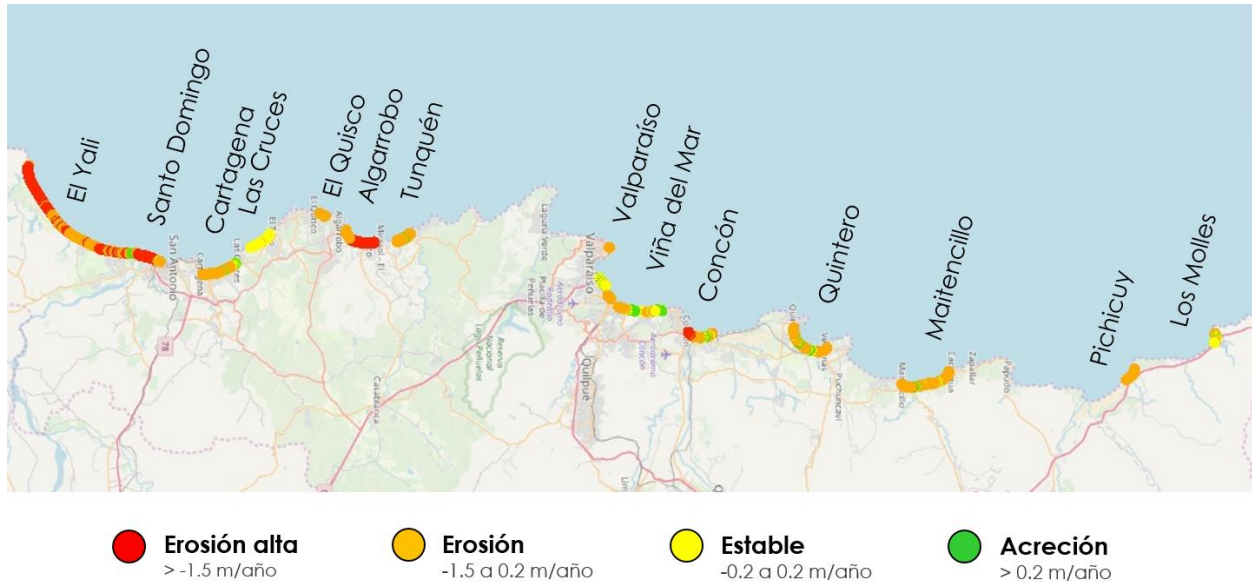
Las playas con estado estable son Cochoa, Las Cañitas, Los Marineros y Caleta Portales, todas playas urbanas localizadas en Viña del Mar y Valparaíso. A excepción de Los Marineros, todas corresponden a playas de bolsillo o playas encajadas, cuyo abastecimiento sedimentario depende de aportes locales. Las playas en estado de acreción son El Encanto, en Viña del Mar, además de Tubul y Llico, ubicadas en la Región del Biobío. Estas dos últimas playas experimentaron alzamientos costeros de gran magnitud durante el terremoto del 27 de febrero de 2010, lo cual se reflejó en un aumento del ancho de la playa que puede explicar la acreción como fenómeno local.

Figura 36: Estado de erosión, estabilidad o acreción para las playas analizadas



La distribución espacial de los cambios asociados a la línea litoral se integra en mapas regionales. Por ejemplo, la Figura 37 muestra los resultados en la Región de Valparaíso, que se caracteriza por el tener afluencia de turistas de la macrozona central de Chile y la zona colindante en Argentina. La región presenta un proceso erosivo generalizado, que es muy marcado en El Yali (posiblemente producto del terremoto de 2010), Algarrobo y Concón.

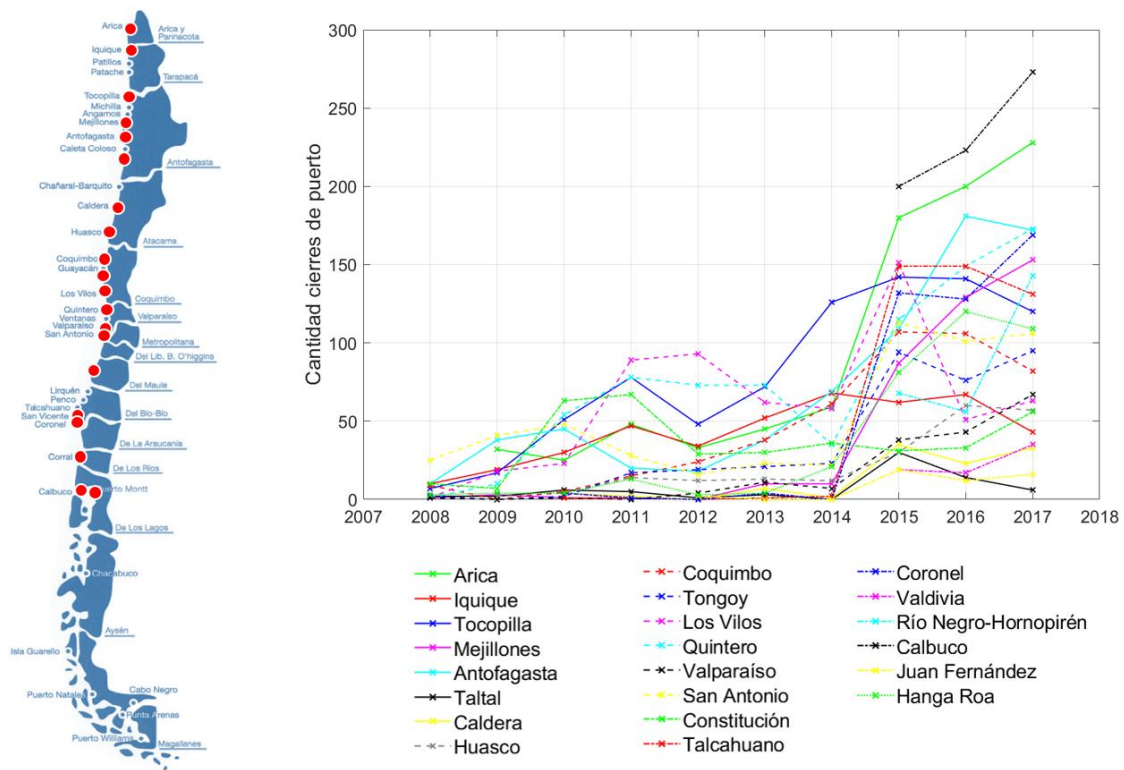
Figura 37: Cambios en la línea litoral para playas de la Región de Valparaíso.



riesgo que consiste en comparar el downtime operacional²⁴ de los puertos para el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045). A la luz de los resultados, se proponen medidas de adaptación específicas para las instalaciones portuarias.

La cantidad de cierres de puerto por año para las 19 capitanías expuestas al Océano Pacífico que respondieron a la solicitud de certificados vía transparencia se ilustra en la Figura 39 y Tabla 6. Entre 2008 y 2017 se registraron 9097 cierres de puerto. Los puertos con mayor cantidad de cierres son Arica (850), Tocopilla (802) y Quintero (761). Aun cuando las estadísticas de cierres de puerto son relativamente cortas como para atribuir este comportamiento al cambio climático, se observa un incremento notorio en la mayoría de los puertos.

Figura 39: Cantidad de cierres de puerto por año en 19 capitanías expuestas al Océano Pacífico a partir de estadística proporcionada por SERVIMET (2008 a 2014) y certificados de cierres de puertos (2015 a 2017). En este estudio se define, como primera aproximación, que un cierre de puerto ocurre cuando al menos uno de los terminales en un puerto está cerrado.



La información que contienen los certificados de cierres de puertos no es uniforme, presentando bases incompletas, formatos incompatibles y no comparables. El cruce entre la estadística de cierres de puertos y los parámetros de oleaje en las cercanías de los puertos (Volumen 5) muestra que, aun cuando las capitanías tienen planes de alerta ante condiciones de tiempo adversas, los cierres por marejadas no se correlacionan bien con los parámetros de oleaje modelados.

²⁴ Porcentaje de tiempo en que un sitio de atraque no está disponible para una determinada nave debido a la acción de agentes ambientales (viento, oleaje, marea, corriente y neblina, entre otros).

6.4 CALETAS DE PESCADORES

Chile existe un total inscrito de 24806 mujeres y 114764 hombres en la pesca artesanal (Tabla A1, Volumen 7), con un desembarque de alrededor de 1,5 millones de toneladas. La pesca artesanal incluye una variedad de actividades extractivas que incluyen el buceo, la recolección y la pesca. Además, la actividad extractiva se puede desarrollar desde la orilla, embarcado en botes de hasta 12 [m] de eslora o en embarcaciones entre los 12 y 18 [m]. La distribución del número de caletas, registros de pesca artesanal y embarcaciones por región, entre otras estadísticas relevantes, se ilustran en la Tabla 5.

Tabla 5: Distribución del número de caletas, Registros de pesca artesanal y embarcaciones por región y las distribuciones porcentuales de cada parámetro. Se agrega la longitud costera en km y el número de caletas, pescadores y embarcaciones presentes por kilómetro en cada caleta. Observar que se han dejado aparte las islas oceánicas y comunas interiores.

Región	N° Caletas	N° Registros de Pesca Artesanal	N° Embarcaciones	Longitud Costera (km)	% Caletas	% Pescadores	% Embarcaciones	N° caletas por km	N° Pescadores por km	N° Embarcaciones por km
Arica	2	1758	280	130	0,37	1,26	2,16	0,02	13,48	2,15
Tarapacá	14	2499	326	411	2,56	1,79	2,51	0,03	6,08	0,79
Antofagasta	28	4169	547	912	5,13	2,99	4,21	0,03	4,57	0,6
Atacama	30	5338	527	725	5,49	3,82	4,06	0,04	7,36	0,73
Coquimbo	34	8489	1245	670	6,23	6,08	9,59	0,05	12,66	1,86
Valparaíso	32	7098	843	435	5,86	5,09	6,49	0,07	16,33	1,94
O'Higgins	8	1130	65	128	1,47	0,81	0,5	0,06	8,84	0,51
Maule	16	3972	476	251	2,93	2,85	3,66	0,06	15,84	1,9
Ñuble	5	310	32	60	0,92	0,22	0,25	0,08	5,14	0,53
Biobío	81	31235	3296	641	14,84	22,38	25,38	0,13	48,73	5,14
Araucanía	9	1877	196	203	1,65	1,34	1,51	0,04	9,25	0,97
Los Ríos	25	5991	654	724	4,58	4,29	5,04	0,03	8,27	0,9
Los Lagos	220	48323	3009	4806	40,29	34,62	23,17	0,05	10,05	0,63
Aysén	20	6098	499	26029	3,66	4,37	3,84	0	0,23	0,02
Magallanes	13	10510	842	70083	2,38	7,53	6,48	0	0,15	0,01
Juan Fernández	2	463	72	90	0,37	0,33	0,55	0,02	5,15	0,8
Rapa Nui	5	297	79	135	0,92	0,21	0,61	0,04	2,2	0,59
Comunas interiores	2	13	1	110	0,37	0,01	0,01	0,02	0,12	0,01
Total	546	139570	12989	106544	100,00	100,00	100,00			

Debido a su geomorfología costera, gran parte de las caletas de Chile están expuestas a los agentes oceánicos pues, salvo aquellos ubicados en la zona de los fiordos y canales, se encuentran abiertos al Océano Pacífico. Durante los episodios de mal tiempo, las actividades de la pesca artesanal se detienen, según diferentes alturas de ola, que permiten el desarrollo de faenas pesqueras. Estas horas o días en que la actividad extractiva no se desarrolla puede significar pérdidas importantes en toneladas capturadas que puede representar una importante valoración económica.

Un tipo de evidencia de la vulnerabilidad de origen meteorológico (y por ende climático al analizarla en un plazo temporal mayor) que afecta la actividad pesquera artesanal corresponde a los cierres de puerto, pues generan mermas en los ingresos de los pescadores. En la Figura 39 y Tabla 6 se ilustran la cantidad de cierres de puerto por año en 19 capitanías expuestas al Océano Pacífico a partir de estadística proporcionada por SERVIMET (2008 a 2014) y certificados de cierres de puertos (2015 a 2017). A este tipo de evidencia se deben sumar los cierres de puertos decretados por los Alcaldes de mar, que no forman parte del personal de la Armada de Chile, pero responden a la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante.

Tabla 6: Cantidad de cierres de puerto por año en 19 capitanías expuestas al Océano Pacífico a partir de estadística proporcionada por SERVIMET (2008 a 2014) y certificados de cierres de puertos (2015 a 2017). En este estudio se define, como primera aproximación, que un cierre de puerto ocurre cuando al menos uno de los terminales en un puerto está cerrado.

Puerto	SERVIMET (2008 a 2014)							Certificados de cierres			Total
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Arica	-	32	25	48	33	45	59	180	200	228	850
Iquique	10	19	30	47	34	52	68	62	67	43	432
Tocopilla	7	17	51	78	48	72	126	142	141	120	802
Mejillones	1	3	1	1	0	10	10	87	129	153	395
Antofagasta	10	38	45	20	18	38	69	109	181	172	700
Taltal	2	2	6	5	1	3	0	30	14	6	69
Caldera	-	-	4	2	0	7	1	35	23	33	105
Huasco	-	2	4	14	12	13	12	30	60	57	204
Coquimbo	9	0	5	15	24	38	61	107	106	82	447
Tongoy	2	0	2	17	19	21	23	94	76	95	349
Los Vilos	1	18	23	89	93	62	58	151	51	63	609
Quintero	1	10	54	78	73	73	35	115	149	173	761
Valparaíso	1	0	1	0	4	11	7	38	43	67	172
San Antonio	25	41	48	28	16	23	22	113	101	106	523
Constitución	10	7	63	67	29	30	36	31	33	56	362
Talcahuano	-	-	1	1	0	1	2	149	149	131	434
Coronel	-	-	4	1	0	4	0	132	128	169	438
Valdivia	-	-	-	-	-	-	-	19	17	35	71
Río Negro-Hornopirén	-	-	-	-	-	-	-	68	56	143	267
Calbuco	-	-	-	-	-	-	-	200	223	273	696

Puerto	SERVIMET (2008 a 2014)							Certificados de cierres			Total
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Juan Fernández	-	-	-	-	2	0	0	19	12	16	49
Hanga Roa	3	4	4	13	3	4	21	81	120	109	362
Total	82	193	371	524	409	507	610	1992	2079	2330	9097

En este estudio se analiza el impacto asociado a la pérdida de desembarque de caletas de pescadores debido a oleaje. Es concreto, se evaluaron pérdidas en desembarque y su valoración mediante un análisis asociado al periodo de tiempo (en horas) durante el cual las condiciones del mar no permiten la realización de actividades pesqueras. Este análisis se realiza cada 2° de latitud. Se calcula el tiempo anual en que no se pueden realizar actividades pesqueras basadas en la altura significativa del oleaje con la estadística de oleaje para el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045), además de la diferencia. Por "downtime de pesca" nos referimos al tiempo en el que las condiciones de mar no permiten disponibilidad para que determinadas actividades de pesca puedan realizarse producto del oleaje. Este procedimiento trae implícito el supuesto de que la amenaza (oleaje) cambia debido al cambio climático pero la vulnerabilidad, caracterizada mediante los criterios de operación asociada a diferentes artes de pesca, permanece constante en el tiempo. En la evaluación del impacto económico se estima como el impacto directo asociado a desembarques y no incluye la pérdida de bienes y servicios generados a través de la cadena de valor del recurso.

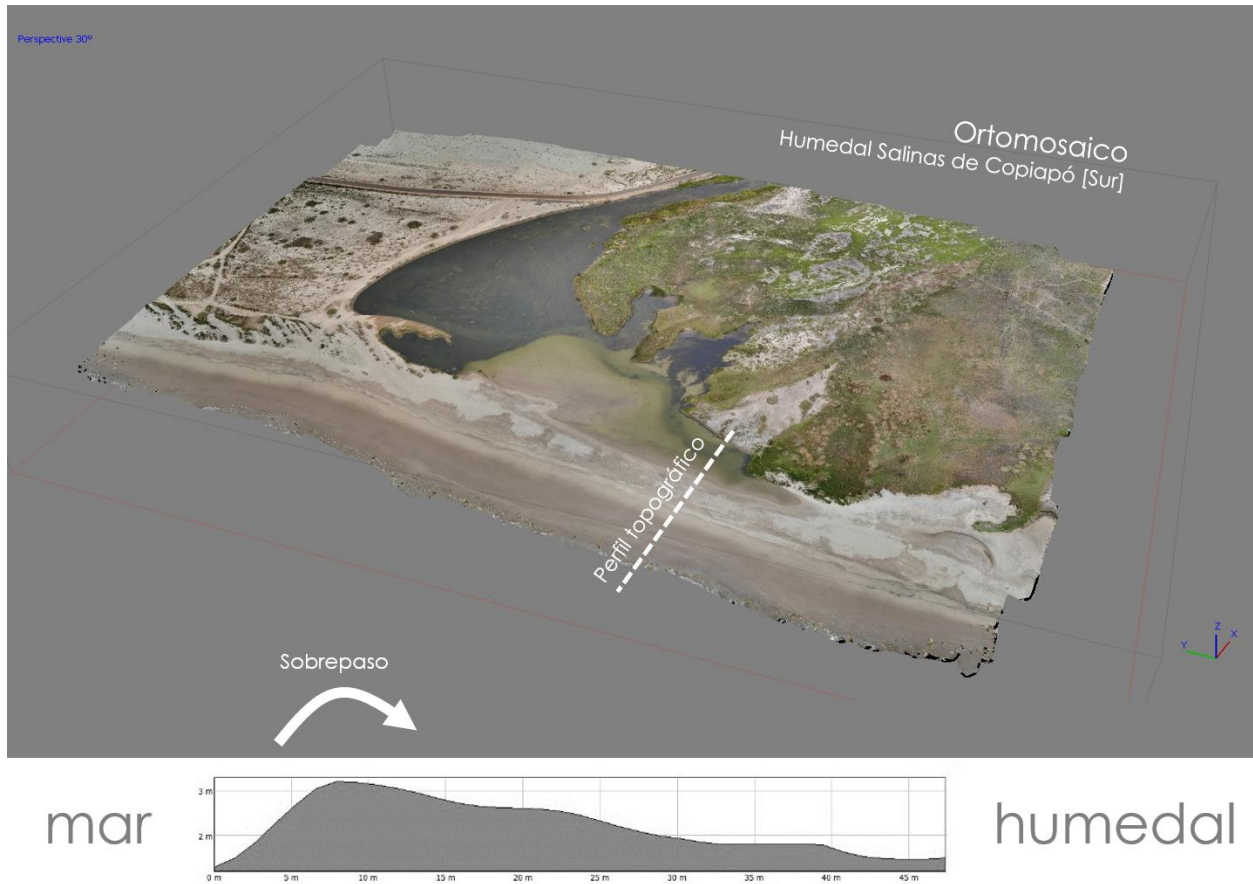
6.5 HUMEDALES

El estudio de vulnerabilidad de humedales presenta la distribución regional y comunal de los 1692 humedales costeros identificados en el inventario de exposición.

Para análisis específicos y dependiendo del tipo de información disponible o generada, se efectuaron un análisis histórico de los caudales aportantes a 6 humedales, análisis de marejadas y nivel del mar, análisis morfológico de los humedales con el objeto de calcular las tasas de cambio de espejos de agua y la cota de las barras (Figura 40), y un análisis de comunidades de plantas.

A nivel específico y dependiendo de la disponibilidad de información y levantamientos en terreno, se identifica una tendencia general a la reducción del área de los espejos de agua (18 de 21 casos analizados) que podría explicarse por la reducción de los caudales (6 ríos analizados). Debido al incremento histórico de la frecuencia e intensidad de las marejadas extremas, los episodios de sobrepaso que aportan agua salada a los humedales podrían generar cambios en el patrón de dominancia de las especies vegetales levantadas en los humedales costeros. No obstante, los cambios identificados en los humedales podrían deberse a otros factores no estudiados como la influencia de perturbaciones naturales provenientes de la cuenca (aluviones), al efecto del pastoreo ejercido por vacas y caballos, al pisoteo de turistas y al efecto combinado de dichos factores, tsunamis y tormentas marinas.

Figura 40: Ortomosaico del humedal Salinas de Copiapó [Sur]. Se muestra también un perfil topográfico en el sector más bajo de la barra arenosa, por donde existe una mayor probabilidad de sobrepaso durante una marejada.

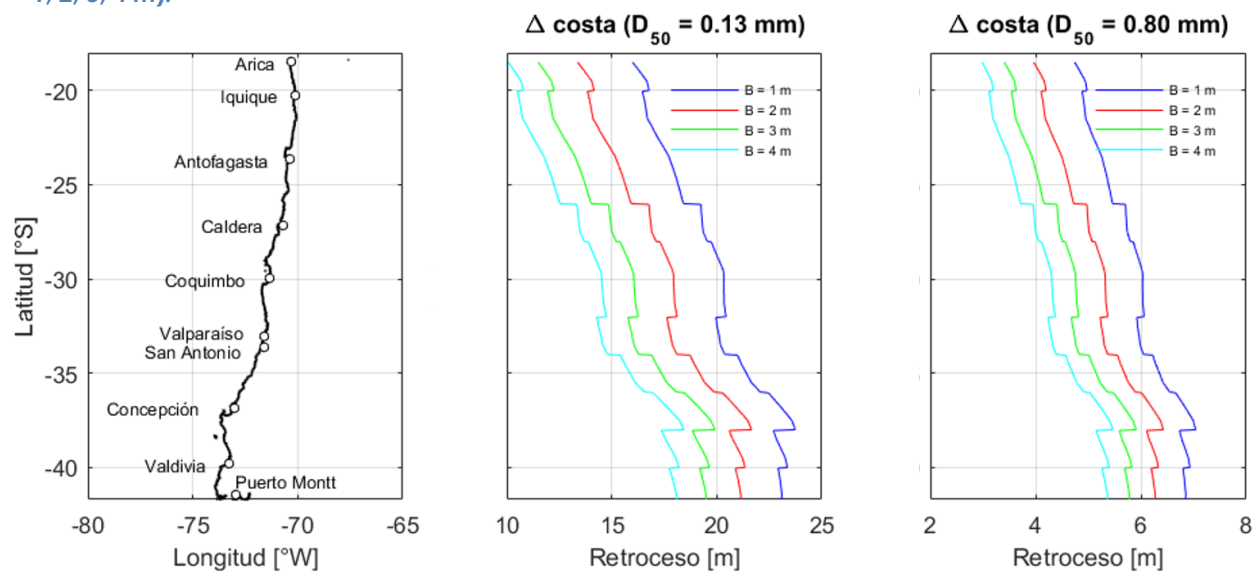


7 ANÁLISIS DE RIESGOS

7.1 PLAYAS

El estudio de evolución de la línea de costa en el escenario RCP 8.5 para la proyección (2026-2045) indica que las playas ubicadas entre Arica y el Canal Chacao experimentarán retrocesos medios de entre 3 y 23 [m], dependiendo del tamaño del grano y de la altura de la berma de la playa (Figura 41). Playas con tamaños de sedimentos finos experimentarán mayores retrocesos que playas de arena gruesa en tanto que playas con menor altura de la berma serán más erosionadas que aquellas con mayor altura. Asimismo, las playas tenderán a girar en sentido anti horario enfrentando direcciones más hacia el SW (Figura 42 y Figura 43). La tendencia es que playas largas tiendan a experimentar erosión en sus extremos sur y acreción en sus extremos norte, aun cuando la erosión y acreción respectiva sea del orden de metros.

Figura 41: Retroceso de la línea de costa debido al efecto conjunto de cambio en el nivel medio del mar y proyecciones de altura de ola. El retroceso corresponde a la diferencia entre la posición de la línea de costa proyectada (2026-2045) y la posición en el período histórico (1985-2004). Se presentan resultados para tamaño de sedimento²⁵ de $D_{50} = 0.15$ y 0.8 [mm] para diferentes cotas de la berma de la playa de playa ($B = 1, 2, 3, 4$ m).



²⁵ El diámetro D_{50} es la mediana de la matriz sedimentaria, obtenida mediante un análisis granulométrico.

Figura 42: Dirección normal a las playas asociada al percentil 50 % y 99% para el periodo histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045).

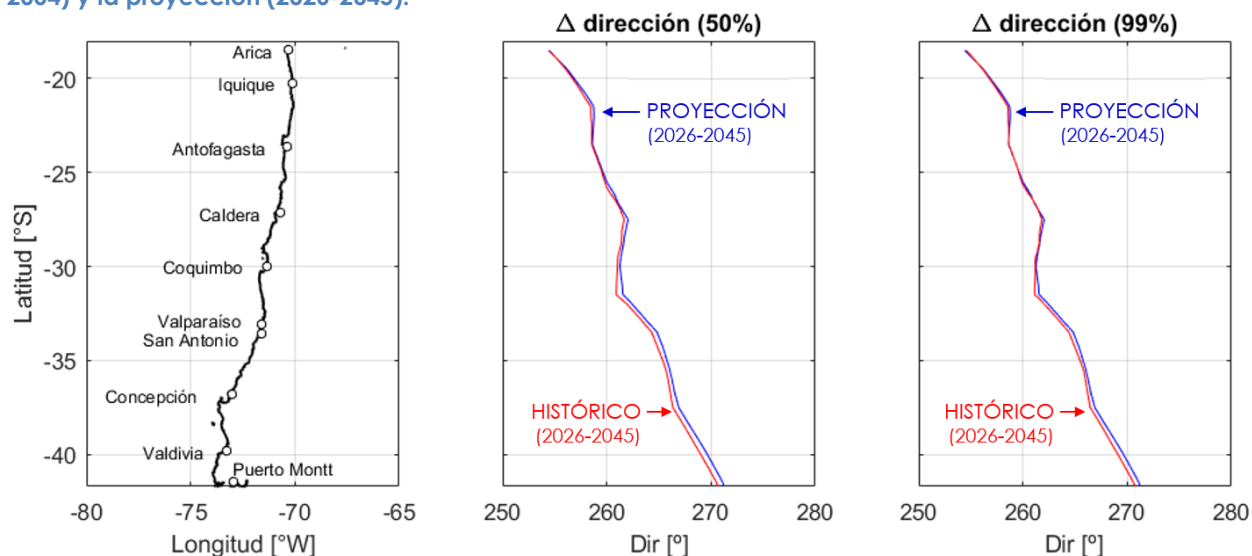
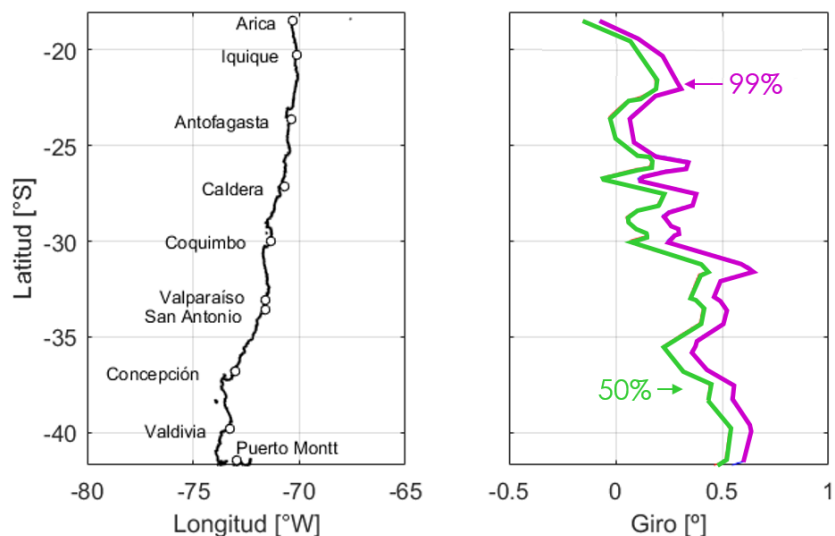
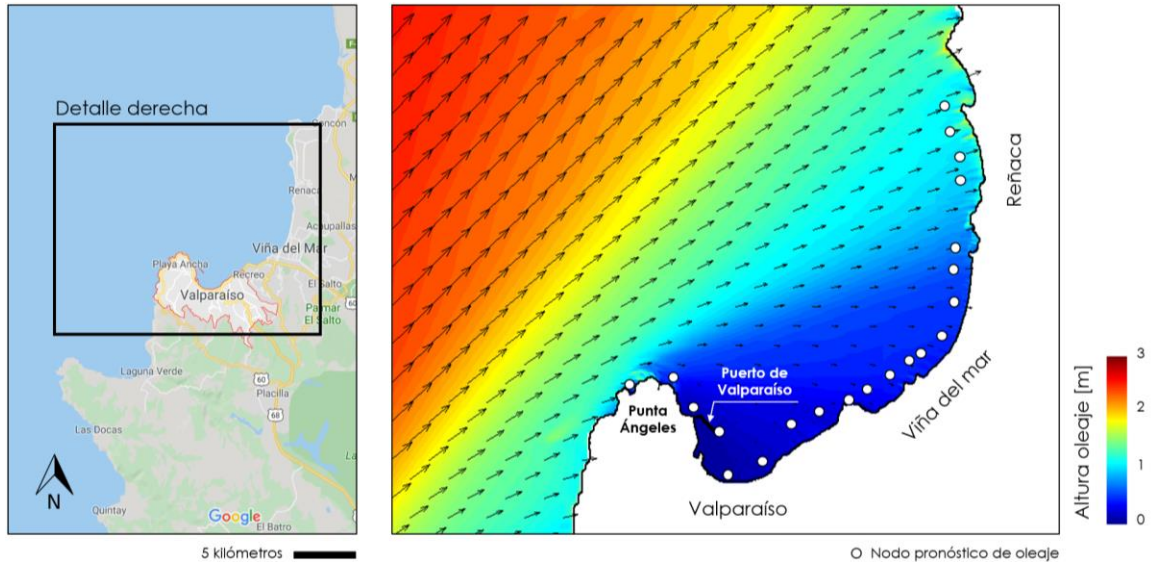


Figura 43: Giro del frente de playa debido a los cambios en la dirección de aproximación del oleaje para datos de dirección del percentil 50 % y 99%. El giro corresponde a la diferencia entre el alineamiento de la línea de costa proyectada (2026-2045) y el alineamiento en el periodo histórico (1985-2004). Los valores negativos significan giro en la dirección horaria y los positivos giros en la dirección antihoraria.



Es resultados de carácter general se refinaron de forma más precisa para algunas playas considerando la propagación del oleaje histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) mediante el método de propagación espectral a la costa (Figura 44). Las playas analizadas se concentran en la bahía de Valparaíso (Cochoa, Reñaca, Las Cañitas, Las Salinas, Los Marineros, Miramar, Caleta Portales, Las Torpederas y San Mateo) además de Hornitos en la Región de Antofagasta y Pichilemu en la Región del Maule. En general, los resultados muestran una tendencia a la erosión y basculamiento en las playas analizadas para la proyección, pero en cuantías menores a las calculadas con la metodología simplificada.

Figura 44: Patrón de propagación de oleaje proveniente del Suroeste a lugares ubicados frente a algunas de las playas en la bahía de Valparaíso. Se ilustra el campo de altura significativa de oleaje (colores) y la dirección local (flechas), además de los nodos de extracción de los datos de oleaje utilizados en el Sistema de Alerta de Marejadas de la Universidad de Valparaíso²⁶. El color azul representa sectores con oleaje de baja altura producto de la protección de la Punta Ángeles y el rojo representa sectores expuestos al oleaje.



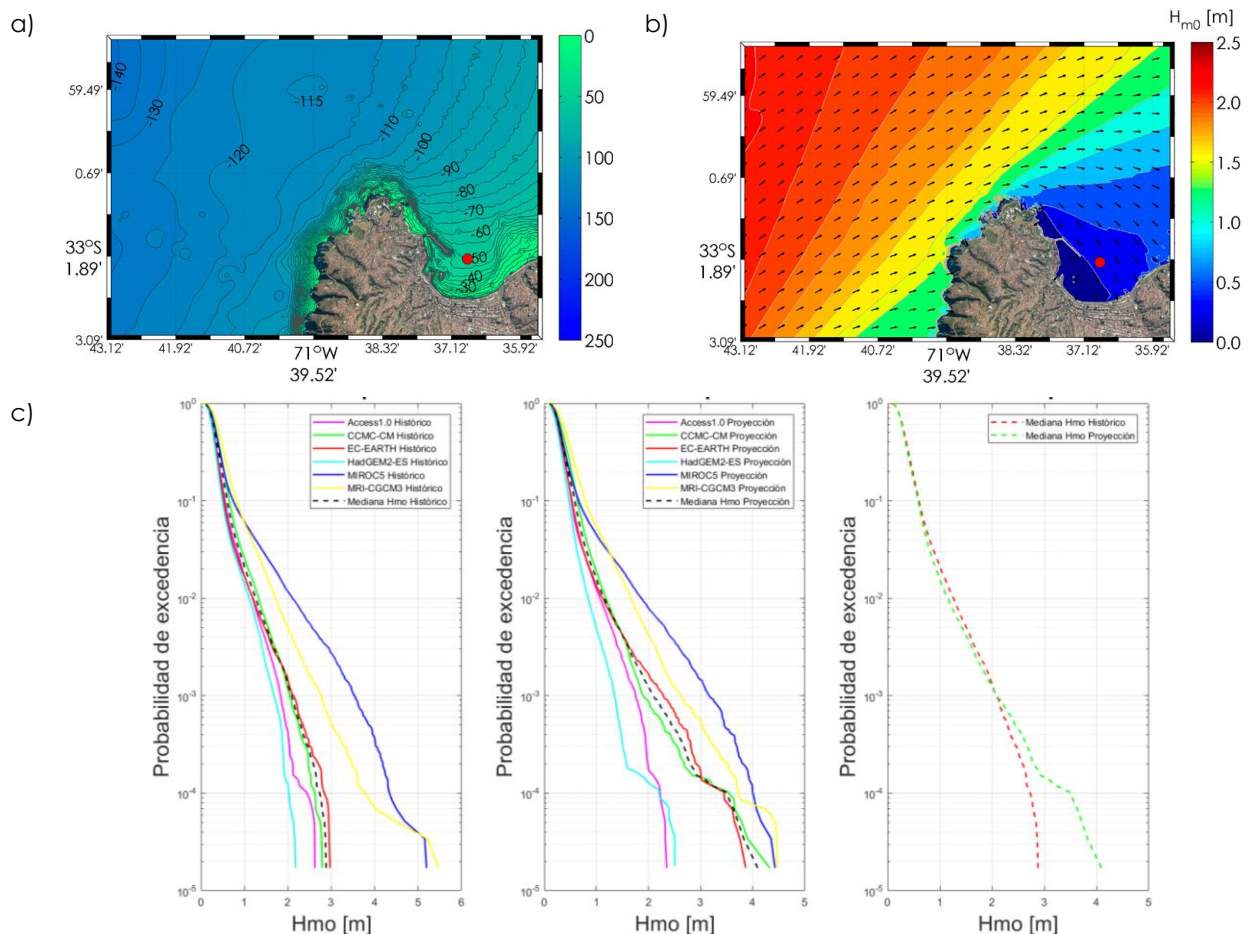
Finalmente, y a modo de ejemplo, se efectúa una estimación del daño económico asociado a la pérdida de área de playas calculada para la proyección. El cálculo se efectuó para playas ubicadas en la bahía de Valparaíso (Reñaca, Las Salinas, Los Marineros, Caleta Portales, Las Torpederas y San Mateo). Para ello se utilizó el número de pernoctaciones obtenido de la encuesta mensual de alojamiento turístico del INE y SERNATUR, para los meses de diciembre de 2016 y enero, febrero y marzo de 2017, para este destino turístico. Se eligieron estos meses ya que es el periodo donde se concentra el uso de las playas. Esto entrega un total 990.048 pernoctaciones para este destino turístico. A partir de esta información y una metodología de valoración (Desvousges et al, 1992; Johnston et al., 2015 y Brouwer, 2000) se calcula una pérdida económica cercana a los 500 mil dólares anuales producto del riesgo de erosión causada por cambio climático para estas playas.

²⁶ marejadas.uv.cl

7.2 PUERTOS

Para evaluar la pérdida de disponibilidad de sitios de atraque, se efectúa un análisis del riesgo asociado a los cierres de puertos a partir de la estimación del clima de oleaje local (Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio y San Vicente). La transformación del oleaje a nodos ubicados en la bocana de acceso de las dársenas portuarias o a puntos representativos de la bahía se realiza a partir de la estadística en aguas profundas para el periodo histórico y la proyección (sección 4.2.2). Como resultado de la transferencia, se obtiene una serie de tiempo en cada puerto, en la forma de espectros bidimensionales a partir de los cuales se calculan curvas de excedencia de altura significativa, periodo medio y dirección media del oleaje. La Figura 45 muestra un ejemplo de este procedimiento en Valparaíso, donde se incluyen las curvas de probabilidad de excedencia de altura significativa para los 6 modelos, la mediana en el período histórico y en la proyección, además de la diferencia entre ambos. Se observa una gran variabilidad entre modelos que se explican en las diferentes parametrizaciones y condiciones iniciales utilizadas para calcular los campos de viento.

Figura 45: Clima de oleaje en el puerto de Valparaíso. a) Batimetría en [m]. b) altura significativa y dirección media. El nodo de evaluación del oleaje se presenta en círculo rojo. c) Probabilidad de excedencia altura significativa para los 6 modelos y mediana en el período histórico 1985-2004 (izquierda) y proyección 2026-2045 (centro). La figura de la derecha muestra la diferencia entre las medianas históricas y de la proyección.



El análisis de riesgo consiste en cruzar límites operacionales con la estadística de oleaje para el período histórico y la proyección, de modo de calcular el downtime operacional de cada puerto. Este cruce se efectúa considerando que los límites operacionales se mantienen constantes en el tiempo, supuesto que trae implícito el que la amenaza (oleaje) cambia debido al cambio climático pero la vulnerabilidad permanece constante en el tiempo. Los límites operacionales definidos en las ROM 3.1-99 (PPEE, 2000) indican que, para el atraque de buques portacontenedores la altura significativa del oleaje no debe superar los 2 [m] y 1.5 [m] para las acciones en sentido longitudinal y transversal al muelle, respectivamente. En la paralización de actividades de carga y descarga de buques, la altura de ola no debe superar los 0.5 [m] y 0.3 [m] para las acciones en sentido longitudinal y transversal al muelle, respectivamente.

El riesgo de cierre de puertos se cuantifica a través de la diferencia del downtime histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045), expresada en términos de probabilidad de excedencia de los límites operacionales, multiplicada por la cantidad de horas en un año (365×24 horas). Los downtime se obtienen del cruce entre los límites operacionales definidos por la ROM 3.1-99 y las curvas históricas y proyectadas de altura significativa. Dada la gran cantidad de información generada, en la Tabla 7 se muestran se presenta sólo Valparaíso y en la Figura 46, donde se incluyen además los puertos de San Antonio y San Vicente.

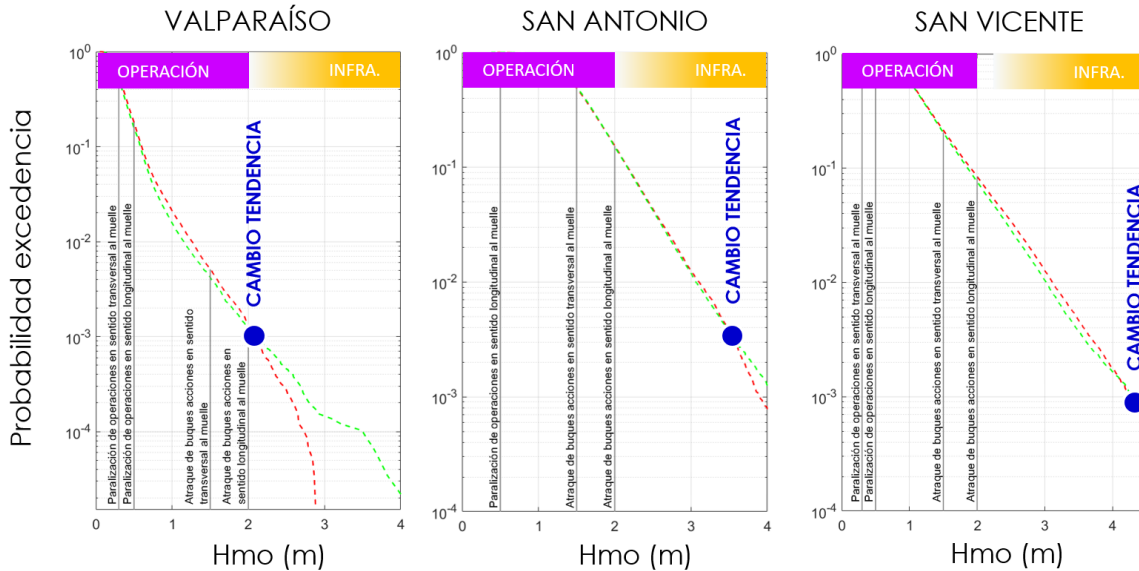
En Valparaíso se observa que, para los límites operacionales, la altura de oleaje en la proyección es levemente menor que la correspondiente al período histórico. Esto puede deberse a un giro al sur de 2° en la dirección del oleaje en aguas profundas (Figura 13c), que generaría una mejor condición de abrigo en la zona más protegida, al sur de la bahía (Figura 45b). El giro al sur de la dirección del oleaje puede atribuirse a la migración al sur del Anticiclón Permanente del Pacífico Sur (Schneider, 2017) que se asocia a un desplazamiento también al sur de la zona de generación del oleaje. En términos prácticos, estos resultados indican que, en Valparaíso, las condiciones operacionales mejorarían levemente en las próximas décadas lo que, sin embargo, no es extrapolable a todos los puertos.

Tabla 7: Downtime en Valparaíso para límites operacionales definidos por la ROM 3.1-99.

Límites operacionales	H _{LIM} [m]	Probabilidad excedencia 1985-2004	Probabilidad excedencia 2026-2045	Downtime 1985-2004 [hr/año]	Downtime 2026-2045 [hr/año]	Diferencia Downtime [hr/año]
Paralización de operaciones Oleaje en sentido transversal	0.3	55.05%	51.58%	4822	4518	-304
Paralización de operaciones Oleaje en sentido longitudinal	0.5	18.00%	15.89%	1577	1391	-184
Atraque de buques Oleaje en sentido transversal	1.5	0.51%	0.42%	44	36	-8
Atraque de buques Oleaje en sentido longitudinal	2.0	0.13%	0.12%	11	10	-1

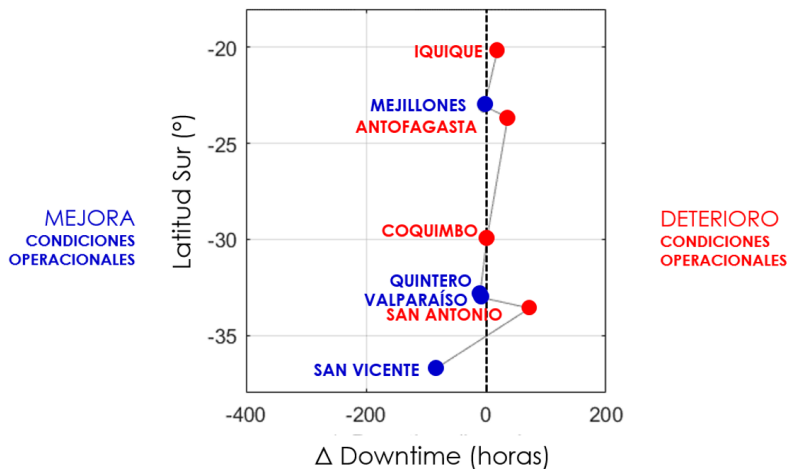
Nota: El downtime es artificialmente grande dado que se utilizan los límites operacionales definidos por la ROM 3.1-99 en el sitio de atraque, donde la agitación es mucho menor que en los nodos donde se calcula el clima de oleaje (fuera de las dársenas portuarias). Por esta razón, los valores de downtime sólo sirven para efectuar comparaciones relativas entre el período histórico y la proyección y no deben ser considerados como valores absolutos.

Figura 46: Ejemplo del cruce entre criterios de cierre de puertos definidos por la ROM 3.1-99 y curvas de excedencia de medianas históricas (rojo) y proyecciones (verde) de la altura significativa (Hmo) en los puerto de Valparaíso, San Antonio y San Vicente. Se muestran además el rango de operación (definido por el máximo límite operacional) y la región donde los valores extremos comienzan a ser relevantes en la resistencia estructural.



La Figura 47 presenta, a modo de ejemplo, el cambio en el downtime en los puertos analizados entre el período histórico y la proyección para el límite operacional de $H_{LIM} = 1.5$ m, y que corresponde al criterio de atraque de buques y oleaje en sentido transversal al muelle. Se observa que algunos puertos mejorarán sus condiciones operacionales (Mejillones, Quintero, Valparaíso y San Vicente) y otros las empeorarán (Iquique, Antofagasta, Coquimbo y San Antonio). No obstante, algunos cambios son poco significativos como para generalizar esta conclusión (Mejillones, Coquimbo, Quintero y Valparaíso) y en otros casos los cambios son más evidentes (San Antonio y San Vicente).

Figura 47: Cambio en el downtime en los puertos analizados entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) para un límite operacional de 1.5 m, definido por la ROM 3.1-99 para el criterio de atraque de buques y oleaje en sentido transversal al muelle.



Asimismo, se constata que, para valores de altura por sobre límites operacionales definidos en la ROM 3.1-99 -esto es, cuando el puerto no opera por marejadas- la proyección muestra mayores alturas que el período histórico en todos los puertos. En Valparaíso, por ejemplo (Figura 46), sobre una altura significativa de 2 m ambas curvas se separan, siendo el clima extremo de la proyección más severo que la historia. Si bien el clima extremo no afecta el downtime pues los buques permanecen a la cuadra del puerto durante las marejadas, este incremento en las alturas extremas puede afectar la integridad de obras costeras, de abrigo, atraque y fondeo de las instalaciones portuarias.

Por otra parte, el incremento de altura, sumado al aumento de los períodos medios atribuible a la migración al sur del Anticiclón del Pacífico Sur y al aumento del nivel del mar (Figura 18), generará un aumento del sobrepaso sobre las obras de defensa, que puede constituirse en una amenaza a la seguridad de las operaciones y daño en el equipamiento en zonas de recepción y acopio de mercancía. Desde la perspectiva de la gestión de la infraestructura, las autoridades portuarias debieran establecer planes de mantención y reparación de obras de atraque y abrigo que serán dañadas con más frecuencia en la medida que avance el siglo.

Para el cálculo del impacto económico de cierre de puertos, se utiliza la diferencia de downtime asociado al oleaje entre la proyección y el período histórico, la que se multiplica por el valor económico del tiempo de perdido asociado al cobro por hora de atraque y metros de eslora y al cobro por movimiento de carga. Este procedimiento se aplica para los terminales ubicados en Arica, Iquique, Antofagasta, Mejillones, Coquimbo, San Antonio, Valparaíso y San Vicente. En términos económicos, el análisis se traduce en pérdidas totales de US\$ 4,12 millones debidas al aumento del downtime y ganancias por US\$ 6,34 millones anuales, dando como resultado unas ganancias netas de US\$ 2,22 millones anuales como efecto del cambio climático en la operación de los puertos analizados.

Esta primera aproximación se restringe a las posibles pérdidas (o ganancias) asociadas a los efectos del cambio climático en la operación de los puertos. Para realizar este análisis se han hecho simplificaciones y supuestos. En primer lugar, se utilizó la tarifa para aproximar la pérdida económica por los cierres de puertos, que no considera pérdidas que pueden ir más allá que la pérdida del servicio o el hecho que en algunos casos, como cuando el puerto opera con holguras, se podría recuperar estos servicios con posterioridad. Tampoco se han considerado otros servicios que podrían verse mermados como por ejemplo el practicaaje y almacenamiento en tierra. Se debe notar también, que por tratarse de un trabajo exploratorio no se intentó hacer una proyección del comercio y movimiento de naves para hacerlo coincidir con el periodo futuro en que se han hecho las proyecciones climáticas.

Este análisis no contempla la evaluación del impacto económico asociado a la pérdida de bienes y servicios que se generan en la cadena logística del transporte. Tampoco se analiza el efecto que los eventos extremos tendrán en la infraestructura portuaria y costera, producto del efecto conjunto del aumento de la intensidad y frecuencia de las marejadas ni del aumento del nivel del mar.

7.3 CALETAS DE PESCADORES

El análisis de riesgo consiste en cruzar límites operacionales de pesca artesanal con la estadística de oleaje para el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045), de modo de calcular el downtime de pesca cada 2° de latitud. Este cruce se efectúa considerando que los límites operacionales se mantienen constantes en el tiempo, supuesto que trae implícito el que la amenaza (oleaje) cambia debido al cambio climático pero la vulnerabilidad permanece constante en el tiempo. Los límites operacionales definidos en base a focus groups y encuestas establecen que operaciones para embarcaciones de menos de 12 [m] sin puertos de embarque y para el buceo se ven limitadas con oleaje cuya altura significativa de oleaje excede los 2 [m]. En operaciones de pesca con muelle y con embarcaciones mayores este límite puede llegar a los 2,5 [m]. El riesgo se cuantifica a través de la diferencia del downtime histórico y la proyección, expresada en términos de probabilidad de excedencia de los límites operacionales, multiplicada por la cantidad de horas en un año (365×24 horas). Luego se estiman las consecuencias de esa diferencia en toneladas de desembarques y su valoración.

La Figura 48 muestra el cambio en el downtime cada 2° entre el período histórico y la proyección para un umbral operacional de 2.0, 2.5 y 3.0 [m]. A partir de esta figura se observa que algunos lugares mejorarán sus condiciones operacionales y otros las empeorarán. La figura además muestra el número de inscripciones en el Registro Pesquero Artesanal. En tonos rojos se encuentran los registros de buzos y recolectores, que se verán afectados más fuertemente por downtime de pesca asociado a un umbral de 2 [m]. En azul se representan los armadores y pescadores que se verán, en general, más afectados por downtime de pesca asociado a un umbral de 2,5 y 3 [m]. Aproximadamente un 23% de los registros pesqueros artesanales se encuentran en zonas con predicciones de aumento en downtime de pesca. Así también, las localidades afectadas principalmente poseen un alto porcentaje de sus caletas con infraestructura en tierra.

Al estimar la cantidad de toneladas perdidas de todos los recursos marinos desembarcados por la pesca artesanal cada 2° de latitud, se observa que gran parte de los impactos previstos ocurren entre los 19°S y 34°S tanto para escenarios donde se asume que la actividad pesquera puede ocurrir en 1/2 (50%) o en 2/3 (66%) de las horas totales disponibles anuales asociadas a condiciones del mar favorables para la pesca (Figura 49). La valoración de las pérdidas de desembarque, calculando el downtime de la actividad con un umbral de 2 [m] y una capacidad de trabajo de la pesca artesanal asociada a 2/3 del total de horas puede llegar a pérdidas económicas cercanas a los US\$ 5,6 millones anuales. Esta cifra se ve reducida a US\$ 1,3 millones anuales al considerar un umbral de operación asociado a los 2,5 [m] de altura de ola. Los valores aumentan considerablemente al considerar que la pesca artesanal puede operar realísticamente solo en el 1/2 del total de horas disponibles anuales. En este escenario, la pérdida anual considerando un downtime de pesca con altura significativa sobre 2 [m] llega a US\$ 7.6 millones anuales y considerando olas de 2,5 [m] llega a US\$ 1,5 millones anuales. Al integrar todos los escenarios, y considerando los valores de desembarque y de precios en playa del año 2017, se estima una pérdida que podría fluctuar entre los US\$ 1,3 y 7,6 millones anuales para las caletas ubicadas entre los 19°S y 34°S. Las pérdidas en desembarque representan alrededor de un 2-5% de capturas actuales. No obstante, estarán concentradas en algunas regiones más que otras.

Figura 48. Diferencia entre downtime de pesca histórico y proyectado cada 2° de latitud para un umbral operacional de 2,0, 2,5 y 3,0 [m] y variables descriptivas de pesca artesanal: número de inscripciones en el Registro Pesquero Artesanal (RPA), % de muelles o ramblas artesanales y % de facilidades en tierra.

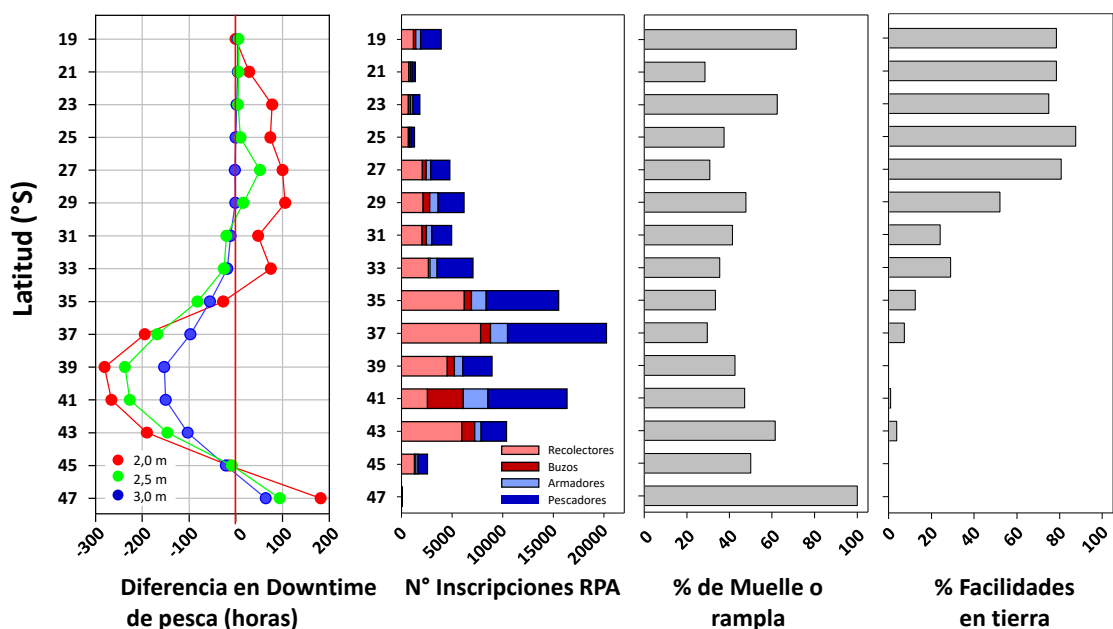
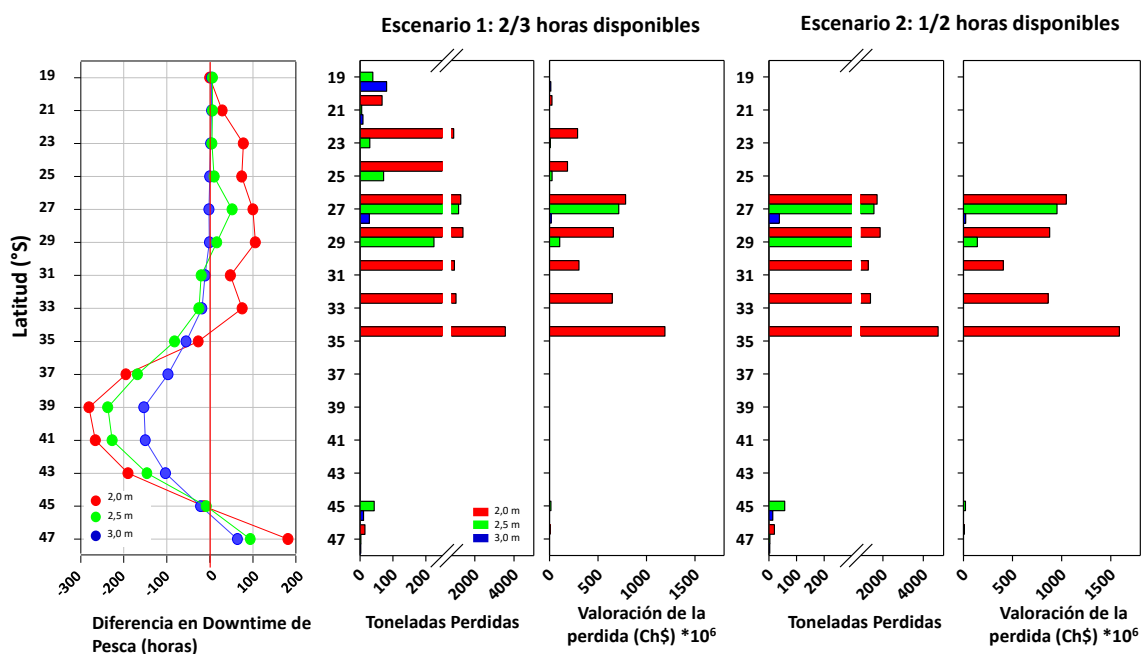


Figura 49: Estimación de diferencias de downtime histórico y las pérdidas de desembarque y valoración de desembarque para umbrales de 2.0 205 y 3.0 [m] de altura significativa de oleaje frente a 2 escenarios posibles de operación de la capacidad pesquera artesanal. Escenario 1: donde la flota puede operar 66% (2/3) de las horas disponibles y Escenario 2 donde la flota puede operar 50% (1/2) de las horas disponibles.



8 RECOMENDACIONES Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN

En este proyecto se ha realizado el primer análisis completo de evaluación de los impactos del cambio climático en zonas costeras en Chile. De este análisis se desprenden una serie de conclusiones y recomendaciones considerando la necesidad de diseñar medidas de adaptación a estos impactos.

8.1 MEJORAS AL ANÁLISIS DE AMENAZA

El análisis de vulnerabilidad efectuado a partir de la cota de inundación se basa en un enfoque que combina variables estimadas en forma determinística (marea astronómica), variable estimadas en forma probabilística en otros estudios (marea astronómica) y variables estimadas en este estudio a partir de varios modelos globales climáticos (oleaje y nivel del mar). La naturaleza de estas variables es disímil y debiera ser combinada en forma rigurosa mediante una aproximación probabilística (Vousdoukas et al., 2018) cuya complejidad dependerá del sistema en estudio. En el caso de la operatividad de puertos, por ejemplo, debieran aplicarse métodos probabilísticos en combinación con proyecciones de cambio climático (e.g. Camus, 2019).

Debido a las deformaciones verticales que ocurren durante el ciclo sísmico y a los tsunamis generados frente a las costas de Chile, se recomienda analizar el problema de inundación costera bajo un enfoque multi-amenaza. Este enfoque es relativamente nuevo en la literatura. Li et al. (2018) evalúa la amenaza de inundación en combinación con el aumento del nivel medio del mar debido al cambio climático.

8.2 MEJORAS AL ANÁLISIS DE EXPOSICIÓN

Los resultados de exposición obtenidos al sur de Puerto Montt son poco confiables debido a la dificultad de generar una línea de costa en la zona de canales y fiordos. Por ello y en razón de la escasez de asentamientos costeros expuestos al Océano Pacífico en y al sur de Chiloé insular, se optó por hacer el análisis de vulnerabilidad en la zona costera al norte del Canal Chacao. Se sugiere a mediano plazo priorizar la confección de una línea costera con metodologías estandarizadas para esta zona.

El inventario de exposición consta de 174.746 elementos, 6 categorías y 98 subcategorías. Este inventario es suficientemente completo y detallado para los propósitos de este estudio. Sin embargo, en el futuro podría ser complementado con antecedentes adicionales, según lo identificados en los 3 talleres realizados:

- En Infraestructura, incorporando la localización de relaves mineros costeros, la red ferroviaria, puentes urbanos y peatonales, red de comunicaciones, pequeñas industrias, comercio, entre otros. En las estructuras marítimas se podría agregar el sistema de señalización para el tráfico marítimo.

- En equipamiento, educación superior, dependencias municipales, servicios públicos.
- En biodiversidad, el Atlas de Aves nidificantes y otras fuentes de información para la distribución de diferentes especies.

Cabe mencionar que la definición del área expuesta, y en particular del inventario de exposición, puede servir como insumo para la evaluación del riesgo de tsunamis en Chile. A la fecha, el SHOA tiene una colección de Cartas de Inundación por Tsunami (CITSU) que definen la amenaza en de tsunamis forma determinística mediante modelación numérica en función de un evento máximo probable. Las CITSU no consideran la exposición, vulnerabilidad ni riesgo de las ciudades afectadas. El inventario de exposición generado en este estudio, que cubre hasta los 10 [msnm], no obstante, debiera ser extendido a cotas superiores que podrían ser alcanzadas por un tsunami extremo.

8.3 MEJORAS AL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD

La diferencia en la línea de inundación entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) calculada en este informe no es tan significativa pues se asocia a aumentos en la cota de inundación del 20 a 30 [cm] a nivel nacional, que están asociados a alturas cuya probabilidad de excedencia es de 99%. Estas diferencias en cota de inundación, no obstante, pueden ser significativamente superiores pues para marejadas extremas, las diferencias entre el período histórico y la proyección son mucho mayores (Volumen 1). A partir de esta conclusión y desde el punto de vista de la gestión de la infraestructura costera, se recomienda evaluar la cota de inundación para eventos extremos, cuyo período de retorno esté asociado al utilizado en el diseño de este tipo de obras.

Debido a la escasez de estudios de vulnerabilidad que den sustento al futuro Plan Sectorial de Adaptación al Cambio Climático en el borde costero contemplado en el Anteproyecto de Ley Marco de Cambio Climático, se propone aplicar metodologías existentes a una resolución de 1 [km] para el litoral entre Arica y Puerto Montt.

8.4 MEJORAS AL ANÁLISIS DE RIESGO

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

Dado que el estudio histórico de oleaje no cubre eventos que ocurrieron antes de 1980, se recomienda explorar otras bases de datos que cubren un lapso mayor, como ERA-20C, que

abarca desde 1900 a 2009 (Poli et al., 2016). Esto permitiría evaluar los efectos del cambio climático a escalas de tiempo mayores.

Se recomienda incluir en un nuevo estudio una evaluación en mayor profundidad de las proyecciones del nivel relativo del mar frente al aspecto sísmico, dado que los cambios verticales de la corteza terrestre debido a los grandes terremotos pueden ser comparables e incluso superiores a aquellos asociados a los cambios del nivel del mar producto del cambio climático.

8.5 PLAYAS

8.5.1 Estudios complementarios

El análisis del daño económico de este tipo podría ser extendido a más playas, con el objetivo de aportar en la decisión de tomar medidas de adaptación como la protección y alimentación artificial (*nourishment*) de playas. La evidencia de que las playas de Chile estarían expuestas a erosión es contundente (este estudio y Martínez et al. 2018), sin embargo, existe en el país poca información respecto de su uso y el valor económico que generan. Una medición mediante encuestas y levantamiento específico en playas relevantes permitirá precisar las estimaciones iniciales que se han realizado en este estudio.

8.5.2 Estrategias de adaptación

Con el objeto de reducir el impacto del cambio climático en playas, dunas y humedales, se recomiendan las siguientes medidas de adaptación:

- Conservación de campos dunares, humedales y campos de algas
- Generación de cuotas de extracción de arenas
- Soluciones de ingeniería verde
- Gestión integrada de zonas costeras y Política nacional de uso del borde costero

8.5.2.1 Conservación de campos dunares, humedales y campos de algas

Las playas, humedales y los campos dunares son afectados por el tránsito de vehículos, el depósito de escombros, la extracción de arenas y la construcción de edificaciones. La regulación de estas actividades es vital para controlar la erosión y conservar las playas, así como reducir el impacto de eventos extremos como tsunamis y marejadas. La implementación de métodos de fijación de arenas mediante vegetación pionera (e.g. *Ammophila arenaria*) y la restricción de acceso a vehículos debieran ser analizadas por las entidades competentes para controlar la erosión (Ministerios de Obras Públicas, Bienes Nacionales y CONAF, entre otros).

Las praderas de macroalgas, por su parte, promueven la atenuación del oleaje y la marea meteorológica, además de estabilizar la costa, gracias a su capacidad de disipar la energía mecánica del oleaje y retener el sedimento. Las algas se extraen mediante la recolección de

orilla, técnica no destructiva que consiste en retirar las algas muertas de la orilla, o arrancar el alga viva completa, técnica que se denomina barroteo. La segunda técnica, sin embargo, tiene efectos nefastos en la biodiversidad marina y en la protección de las playas.

8.5.2.2 Generación de cuotas de extracción de arenas

La extracción ilegal y/o desregulada favorece la erosión de las playas y conduce a alteraciones ecosistémicas que degradan la zona costera en general. La legislación es poco rigurosa en el control de la extracción de arenas provenientes de playas, campos dunares y ríos y existe además escasa fiscalización y control en las áreas afectadas. Por otra parte, las consecuencias que esta actividad tiene en la dinámica sedimentaria no han sido estudiadas en detalle en nuestro país. Por ende, se requiere definir cuotas de extracción de arenas de estos sitios de empréstito de modo de garantizar una gestión sustentable del sistema sedimentológico litoral.

8.5.2.3 Soluciones de ingeniería verde

El paradigma actual consiste en el uso de "infraestructura verde" que responda a las demandas económicas, garantizando el bienestar humano y el funcionamiento del ecosistema (Winckler et al., 2019). Algunos ejemplos de este tipo de soluciones son la restauración de humedales, la rehabilitación y reconstrucción de dunas y playas, el uso de arrecifes artificiales de coral o el uso de cinturones verdes para la protección contra la inundación.

Existen asimismo estrategias encaminadas a adaptarse al eventual retroceso de la costa, que se basan en determinar la posición histórica y futura de la línea de costa (*shoreline retreat management*). Este tipo de soluciones puede ser una alternativa de menor impacto a la rigidización mediante defensas costeras o la alimentación artificial de arenas. En esta línea, se proponen medidas como i) favorecer la migración hacia el interior de marismas y humedales, ii) evitar la construcción de infraestructura en zonas altamente vulnerables, iii) introducir estudios de vulnerabilidad frente al efecto del cambio climático en la planificación territorial de zonas parcialmente recuperables y iv) promover la compra de terrenos con fines de conservación. En Chile, desafortunadamente, existe poca sensibilidad frente a este tipo de soluciones, lo que se evidencia en el excesivo desarrollo inmobiliario en ciudades como Arica, Iquique, Antofagasta, La Serena, Coquimbo, Concón y Talcahuano, cuyo denominador común es contar con terrenos bajos altamente vulnerables a las variaciones del nivel del mar, las marejadas y los tsunamis.

8.5.2.4 Gestión integrada de zonas costeras y Política nacional de uso del borde costero

Desde el punto de vista de la gestión costera, Chile debiera migrar hacia la gestión integrada de zonas costeras, cuyo objetivo es poner en práctica el desarrollo sostenible, la conservación de la zona costera y la mantención de la biodiversidad (Comisión Europea, 1999 en Barragán, 2014). El actual escenario de crecimiento urbano, las actividades económicas de alto impacto están afectando el funcionamiento de los ecosistemas marino-costeros y la provisión de servicios ecosistémicos. Esto hace que sea necesario una revisión crítica de la Política Nacional de Uso del Borde Costero, que ya tiene 25 años sin revisión (CNUBC, 2018), y de su vinculación con instrumentos de planificación territorial.

8.6 PUERTOS

8.6.1 Estudios complementarios

El análisis de cierre de puertos se efectúa en forma gruesa utilizando condiciones límites de operación basadas en la altura significativa (PPEE, 1999). Este análisis puede ser mejorado considerando los movimientos aceptables en los buques en función de las características de los equipos utilizados en las diferentes operaciones (PIANC, 1995).

Los cálculos de downtime son solo una aproximación gruesa, ya que los nodos utilizados para la caracterización del clima de oleaje no están posicionados en los sitios de atraque donde se definen las condiciones límites de operación. Debido a los efectos de difracción y reflexión, la modificación del oleaje entre los puntos de análisis y los muelles es significativa. Asimismo, todos los muelles en cada puerto son analizados mediante sólo un punto, lo que excluye el cierre diferenciado que comienza a darse en algunos de los puertos más grandes en la actualidad. Aun cuando esta aproximación se estima en forma conservadora el valor absoluto del downtime operacional, sí permite establecer cambios relativos y tendencias entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045).

En caso de necesitar estimaciones absolutas del downtime futuro, se recomienda acoplar los resultados obtenidos en los nodos costeros con modelos de agitación portuaria de alta resolución dentro de la dársena. El estudio se puede refinar aún más si se utilizan modelos de buque atracado que, en vez de estimar el downtime en función de un límite operacional de altura de oleaje, lo hagan en función de los movimientos máximos admisibles de la nave. Finalmente, se recomienda aplicar métodos probabilísticos en combinación con proyecciones de cambio climático y modelos de agitación portuaria (e.g. Camus, 2019).

El estudio asume que las condiciones de vulnerabilidad permanecen constantes entre ambos períodos de análisis. No obstante, la vulnerabilidad puede reducirse mediante el uso de obras de infraestructura, como la mejora de las condiciones de abrigo, o soluciones tecnológicas como la mejora de los sistemas de amarre de naves y el uso de sistemas de alerta temprana de marejadas a nivel local.

8.6.2 Estrategias de adaptación

Los cierres de puertos generan mermas en toda la cadena logística de los productos que se transfieren a través de dichas instalaciones. En los próximos años el sector portuario deberá hacer inversiones para adaptarse a los profundos cambios en la tecnología de la industria naviera (e.g. el tamaño de los buques y la forma de transferencia de la carga), a los nuevos estándares en la relación con la comunidad y al cambio climático. El aumento de las marejadas y el incremento esperado del nivel medio del mar, repercutirán en la disponibilidad de sitios de atraque y en los costos de operación y mantención de obras portuarias que se verán afectas a un clima marítimo más severo.

Existe consenso en que el cambio climático afectará la competitividad del sector portuario

mediante el incremento en los costos, la generación de pérdidas por incidentes y beneficios que se deriven de las diferentes acciones de mitigación de gases de efecto invernadero y la adaptación (Becker et al., 2013; Ng et al., 2013; Hippe et al., 2015; McCarron et al., 2018; Yang et al., 2018). Las autoridades portuarias deben integrar la adaptación al cambio climático en la planificación, diseño, operación, mantenimiento y desarrollo de los puertos marítimos, en aras de promover su resiliencia (MinAmbiente, 2017). Específicamente, a objeto de reducir el downtime, se debieran adoptar medidas del tipo:

- Mejoramiento de condiciones de abrigo.
- Adecuación de instalaciones portuarias para minimizar sobrepaso y erosión costera.
- Mejoramiento de sistemas de amarre y atraque de naves.
- Uso de sistemas de alerta temprana de marejadas planificar operaciones.
- Uso de barreras de protección a través de manejo de ecosistemas costeros.

Aquellas instalaciones portuarias que generen planes de adaptación tanto de las operaciones como de la infraestructura al cambio climático tendrán mejores perspectivas de mantener o incluso mejorar su posición relativa en el mercado.

8.7 CALETAS DE PESCADORES

8.7.1 Estudios complementarios

El análisis de cierre de faenas de pesca se efectúa en forma gruesa utilizando condiciones límites de operación basadas en la altura significativa. Este análisis puede ser mejorado considerando las diferencias asociadas a las características locales de cada caleta que pudiesen generar diferencias en los límites de operación. Adicionalmente los cálculos de downtime son solo una aproximación gruesa, ya que los nodos utilizados para la caracterización del clima de oleaje no están posicionados exactamente en las caletas, donde se definen las condiciones límites de operación, sino que integran la información cada 2° de latitud. Se recomienda realizar estudios con mayor nivel de detalle para zonas en que se encontró potencial de impacto alto en downtime de pesca.

Las proyecciones asociadas a cambios en alturas extremas muestran mayores alturas que el período histórico. Si bien este efecto no afecta necesariamente el downtime de pesca, este incremento en las alturas extremas puede afectar las obras de abrigo, atraque y fondeo de las embarcaciones, rampas y muelles e instalaciones en tierra. Desde esa perspectiva, las autoridades debieran establecer planes de mantención y reparación más frecuentes, así como establecer buenos sistemas de alerta temprana para caletas de pescadores.

Las proyecciones asociadas a los cambios en downtime de pesca se focalizan en la zona centro-norte de Chile. Si bien esto es importante de considerar para iniciar planes de adaptación, cabe destacar que existen múltiples otros factores de cambio climático que pudiesen estar afectando a las caletas de pescadores. Por ejemplo, en la zona sur, poco afectada por downtime de pesca asociado a alturas de ola, existen estresores biológicos como las mareas rojas que influyen sobre

las actividades de la pesca artesanal, pudiendo generar una detención de las faenas de pesca de meses. Así también existen caletas de pescadores que pueden ser más vulnerables que otras a la volatilidad de precios de mercado. En este contexto el downtime de pesca asociado a la altura de la ola para asegurar la correcta operación de faenas pesqueras es solo uno de múltiples factores que deben empezar a integrarse a la gestión de pesquerías y la generación de capacidad adaptativa en las comunidades pesqueras artesanales.

8.7.2 Estrategias de adaptación

A continuación, establecemos una serie de recomendaciones asociadas a incrementar la operatividad de caletas pesqueras y a mejorar la gobernanza pesquera como formas de colaborar a que las comunidades de pescadores artesanales tengan las condiciones habilitantes para adaptarse a futuros escenarios.

8.7.2.1 Recomendaciones asociadas a operatividad

Se priorizan 3 tipos de acción que podrían colaborar a reducir el impacto:

- **Mejoramiento de condiciones de abrigo:** El mejoramiento de condiciones de abrigo está normalmente asociado a la extensión de las obras de abrigo de la caleta, buscando reducir los niveles de oleaje al interior y permitiendo a embarcaciones menores acceder al mar bajo condiciones en que no pudiesen acceder desde la orilla. En general es una alternativa de alto costo, pero permite aumentar la accesibilidad a faenas de pesca, de embarcaciones bajo los 12 [m] de eslora con condiciones de oleaje en torno a los 2,5 [m], por ende, reduciendo los efectos negativos del downtime de pesca.
- **Adecuación de instalaciones portuarias para minimizar sobrepaso y erosión costera:** Las proyecciones asociadas a cambios en alturas de oleaje extremas muestra mayores alturas que el período histórico. Este incremento en las alturas extremas puede afectar las obras de abrigo, atraque y fondeo de las embarcaciones, rampas y muelles e instalaciones en tierra. Desde esa perspectiva, las autoridades debieran establecer planes de mantención y reparación más frecuentes y en conjunto con las caletas de pescadores.
- **Uso de sistemas de alerta temprana de marejadas a nivel local:** Según los resultados, las marejadas tendrán impactos diferenciados en diferentes caletas a lo largo del país. La predicción de estos eventos extremos que generan downtime de pesca requiere de sistemas que cuantifiquen el oleaje a nivel local. Chile no posee un sistema de alerta de marejadas local y sólo existen iniciativas con escasa cobertura²⁷. El establecer dicho sistema de alerta de marejadas permitirá la toma de decisiones respecto a la restricción temporal de actividades a nivel local y a tiempo para la gestión de la emergencia, la gestión pesquera, la movilización de recursos y embarcaciones y el cuidado de

²⁷ <https://marejadas.uv.cl/>

infraestructura.

8.7.2.2 Recomendaciones asociadas a gobernanza de pesquerías

Se prioriza la correcta implementación de 2 regulaciones pesqueras que, aunque fueron creadas para mejorar la sostenibilidad de las pesquerías, podrían generar las condiciones necesarias para que pescadores artesanales puedan adaptarse a los impactos del cambio climático en los océanos.

- **Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos:** En Chile, la Autoridad pesquera reconoció explícitamente en el año 1991 la sobreexplotación de algunos recursos pesqueros, lo que llevó a cambios de gobernanza, enfatizando la importancia de establecer una institucionalidad que integre a los usuarios y los tomadores de decisión en el manejo de estos recursos. En la pesca artesanal, esta institucionalidad ha intentado resolver estos desafíos mediante la incorporación de reglas de acceso a los recursos. El año 1991 se implementó un régimen de co-manejo denominado las “Áreas de Manejo y Explotación de recursos Bentónicos (AMERB)” en la cual sindicatos de pescadores artesanales legalmente constituidos pueden postular por la gestión de una destinación marítima con el fin de explotar sustentablemente especies bentónicas como el erizo, loco o lapa. Actualmente existen más de 450 AMERB operativas a lo largo de la costa de Chile. Sin embargo, aún existen problemas con la correcta implementación del modelo, en cuanto existen altos costos de vigilancia de las áreas por parte de pescadores artesanales y existe una falta de flexibilidad respecto a formas de gestionar las cuotas asignadas a las áreas.

Fortalecer el sistema de AMERB como partes integrales de las caletas, institucionalizando medidas adaptativas para la extracción frente a eventos climáticos extremos, previa autorización del Servicio Nacional de Pesca, pudiese ayudar a potenciar la capacidad adaptativa de los pescadores artesanales y reducir los efectos adversos del downtime de pesca asociado a recursos bentónicos y algas a través de un mejor trabajo de acción colectiva entre los socios de las diferentes organizaciones de pescadores.

- **Planes de manejo:** Recientemente, en 2013, Chile reconoció que el sistema AMERB no era suficiente para lograr la sostenibilidad costera y que se necesitaban enfoques complementarios de gobernanza. En consecuencia, Chile aprobó una legislación para crear lo que se ha denominado Planes de Manejo (Planes de Manejo; Ley de Pesca y Acuicultura 20657, 2013). Este nuevo marco regulatorio introduce, cambios en la forma en que se toman decisiones y gestionan las pesquerías. Se le da mayor peso a la ciencia en el proceso de toma de decisión y se incorpora un nuevo “plan de manejo” de mayor relevancia como instrumento regulatorio, que debe ser elaborado por la Autoridad pesquera con asesoría de comités científicos y de comités de manejo. La elaboración de planes de manejo por parte de la autoridad pesquera debe incluir la participación de los comités de manejo, y de esta forma permite la participación de los propios usuarios de recursos pesqueros en la definición de la gestión pesquera, lo que potencialmente podría también favorecer la integración de una variada gama de

conocimientos que aporten a la toma de decisiones en el sector.

Se recomienda incluir aspectos de variabilidad climática y de downtime de pesca en la creación de estos planes de manejo. En los planes se definen reglas de acceso y control sobre los recursos por lo que es una buena instancia para generar alternativas innovadoras para la futura adaptación frente a los cambios. Es importante destacar que en el marco de los comités de manejo se pudiese institucionalizar la necesidad del conocimiento de impactos de cambio climático para la gestión adaptativa de los recursos.

8.8 HUMEDALES

Aun cuando en el estudio se identifica una tendencia a la reducción del área de los espejos de agua y una alteración de los patrones de zonación de especies en los humedales costeros, no fue posible establecer correlaciones causa-efecto de carácter estadística con fenómenos relevantes como la reducción de los caudales aportantes y el aumento de la frecuencia e intensidad de las marejadas extremas. Se recomienda en futuros estudios cruzar estas variables en forma cuantitativa e incorporar otros procesos como la influencia de perturbaciones naturales (aluviones), el pastoreo de vacas y caballos, el pisoteo de turistas y el efecto combinado de dichos factores, tsunamis y tormentas marinas en el análisis. Finalmente, el estudio debiera ampliarse a más humedales costeros.

9 REFERENCIAS

- Albrecht, F., & Shaffer, G. (2016). Regional Sea-Level Change along the Chilean Coast in the 21st Century. *Journal of Coastal Research*, 32(6), 1322–1332. <http://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00192>.
- Appelquist, L. R., & Halsnæs, K. (2015). The Coastal Hazard Wheel system for coastal multi-hazard assessment & management in a changing climate. *Journal of coastal conservation*, 19(2), 157-179.
- Beyá J., Álvarez M., Gallardo A., Hidalgo H., Aguirre C., Valdivia J., Parra C., Méndez L., Contreras C., Winckler P., & Molina M. (2016) Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. ISBN: 978-956-368-194-9. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso.
- Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H. Y Winckler, P. (2017). Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database. *Ocean Modelling*, N° 116, p 16–32.
- Brito, J. L. (2009). Catástrofes históricas naturales y causadas por el Hombre ocurridas en el territorio de San Antonio entre 1556 y el 2008.
- Brouwer, R. (2000). Environmental value transfer: state of the art and future prospects. *Ecological Economics*, 32(1), 137–152. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00070-1)
- Campos-Caba, R. (2016). Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile. Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico, Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile. 136pp.
- Campos-Caba, R.; Beyá, J. y Mena, M. (2015). Cuantificación de los daños históricos a infraestructura costera por marejadas en las costas de Chile. XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.
- Camus, P., Tomás, A., Díaz-Hernández, G., Rodríguez, B., Izaguirre, C., & Losada, I. J. (2019). Probabilistic assessment of port operation downtimes under climate change. *Coastal Engineering*, 147, 12-24.
- CEPAL (2015). Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: dinámicas, tendencias y variabilidad climática.
- Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, (2013a). Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, (2013b). Sea Level Change Supplementary Material. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)].
- Desvousges, W. H., Naughton, M. C., & Parsons, G. R. (1992). Benefit transfer: Conceptual problems in estimating water quality benefits using existing studies. *Water Resources Research*, 28(3), 675–683. <https://doi.org/10.1029/91WR02592>
- DOP-MOP (2014). Balance de gestión integral año 2014. Dirección de Obras Portuarias, Ministerio de Obras Públicas
- Hemer, M. A., & Trenham, C. E. (2016). Evaluation of a CMIP5 derived dynamical global wind wave climate model ensemble. *Ocean Modelling*, 103, 190-203.
- Hernández R. & Hornidas H. (1926). Las obras marítimas de Valparaíso y el puerto de San Antonio. La Concesión de

Quintero. Estudio histórico sobre un gravísimo problema regional a la vez que nacional – con ilustraciones y dibujos hechos especialmente (1900-1926). Imprenta Victoria.

IPCC (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs. IPCC. (2018). GLOBAL WARMING OF 1.5 °C an IPCC special report on the impacts of global.

IPCC (2014a): Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs. (en árabe, chino, español, francés, inglés y ruso).

IPCC (2014b): Anexo II: Glosario [Mach, K.J., S. Planton y C. von Stechow (eds.)]. En: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, págs. 127-141.

Johnston, R. J., Ramachandran, M., & Parsons, G. R. (2015). Benefit Transfer Combining Revealed and Stated Preference Data (pp. 163–189). https://doi.org/10.1007/978-94-017-9930-0_9

Li, L., Switzer, A. D., Wang, Y., Chan, C. H., Qiu, Q., & Weiss, R. (2018). A modest 0.5-m rise in sea level will double the tsunami hazard in Macau. *Science advances*, 4(8), eaat1180.

McGranahan, G., Balk, D., & Anderson, B. (2007). The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and urbanization*, 19(1), 17-37. Paskoff, R., & Manríquez, H. (2004). Las dunas de las costas de Chile. Instituto Geográfico Militar de Chile.

Martínez, C., Contreras-López, M., Winckler, P., Hidalgo, H., Godoy, E. Y Agredano, R. (2018). Coastal erosion in central Chile: A new hazard?, *Ocean & Coastal Management*, 156: 141-155.

Molina, M., Contreras, M., Winckler, P., Salinas S., y Reyes, M. (2011) Consideraciones sobre las Variaciones de Mediano y Largo Plazo del Oleaje en el Diseño de Obras Marítimas en Chile Central. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*. Volumen 123, Número 3, pp. 77-88. (Incluido en Revista Chilena de Ingeniería N°464).

Moraga, B. (2018). Análisis estadístico de la recurrencia de marejadas y tormentas en la región de Valparaíso: correlaciones con el cambio climático antropogénico. Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Estadístico, Universidad de Playa Ancha.

Ortega L., Araya P., Salas V. & Rojas S. 100 años de la construcción del puerto de Valparaíso historia y legado. (2014). Editorial Cataris Creativa. 139 pp.

Poli, P., Hans Hersbach, And Dick P. Dee, Adrian J. Simmons, Frédéric Vitart, Patrick Laloyaux, David G. H. Tan, Carole Peubey, Jean-Noël Thépaut, Yannick Trémolet, Elías V. Hólm, Massimo Bonavita, Lars Isaksen, And Michael Fisher (2016). ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0556.1

Schneider W, Donoso D, Garcés-Vargas J, Escribano R. 2017. Water-column cooling and sea surface salinity increase in the upwelling region off central-south Chile driven by a poleward displacement of the South Pacific High. *Prog Oceanogr* 151: 38-48. doi: 10.1016/j.pocean.2016.11.004.

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

Silva, R. (2005). Análisis y descripción estadística del oleaje. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie de Docencia N°49.

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

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

Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., Ayhan, E. 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. *current version 4.3.

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

Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Jevrejeva, S., Jackson, L. P., & Feyen, L. (2018). Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nature communications*, 9(1), 2360.

Winckler, P., Contreras-López, M., Castilla, J. C. (2019). El cambio climático en el océano y en la zona costera y el océano de Chile. En "El cambio climático en Chile". Eds. Vicuña et al. Ediciones UC.

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

