

Una metodología de diseño de infraestructura costera considerando cambio climático

A coastal infrastructure design methodology considering climate change

DOI: <https://doi.org/10.21703/0718-2813.2024.36.2998>

Fecha de entrega: 26 de febrero 2024

Fecha de aceptación: 9 de julio 2024

Patricio Winckler^{1,2,3}, Javiera Mora², César Esparza⁴ y Sebastián Vicuña^{2,4,5}

¹ Universidad de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Valparaíso, Chile, patricio.winckler@uv.cl (orcid: 0000-0003-2100-293X)

² Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN), Santiago, Chile

³ Centro de Observación Marino para Estudios de Riesgos del Ambiente Costero (COSTAR), Valparaíso, Chile

⁴ Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Santiago, Chile

⁵ Pontificia Universidad Católica de Chile, Centro Interdisciplinario de Cambio Global, Santiago, Chile

Ante las brechas detectadas en la práctica de la ingeniería nacional, se propone una metodología para integrar los efectos del cambio climático en el diseño de infraestructura costera y portuaria. La metodología considera cuatro etapas: 1) selección de forzantes climáticos a escala global, 2) procesamiento de forzantes climáticos a escala regional, 3) procesamiento de variables de diseño a escala local y 4) aplicación en diferentes ámbitos del diseño de infraestructura. La metodología integra el cálculo de variables oceanográficas (e.g. presión atmosférica, viento, oleaje, marea astronómica, marea meteorológica y aumento del nivel del mar) en un diagrama de flujo que puede interactuar con otras variables de diseño, como los sismos y tsunamis. Se presentan ejemplos sobre cálculos de operatividad portuaria, nivel del mar extremo en playas, sobrepaso de obras marítimas y erosión de playas. Proponemos que el estado desarrolle las etapas 1) y 2), dando acceso libre a los actores que participan en el diseño de infraestructura costera y portuaria.

Palabras clave: diseño de obras marítimas, downtime operacional, inundación costera, sobrepaso de obras costeras y erosión de playas

Given the gaps detected in the national engineering practice, a methodology is proposed to integrate the effects of climate change in the design of coastal and port infrastructure. The methodology considers four stages, namely: 1) selection of climatic drivers on a global scale, 2) processing of climatic drivers on a regional scale, 3) processing of design variables on a local scale and 4) application in different areas of infrastructure design. The methodology integrates the calculation of oceanographic variables (e.g. atmospheric pressure, wind, waves, astronomical tide, meteorological tide and sea level rise) in a flow diagram that can interact with other design variables, such as earthquakes and tsunamis. Examples are presented on calculations of port operational downtime, extreme sea levels on beaches, wave overtopping of maritime works and beach erosion. We encourage state agencies to develop stages 1) and 2), providing open access to stakeholders involved in the design of coastal and port infrastructure.

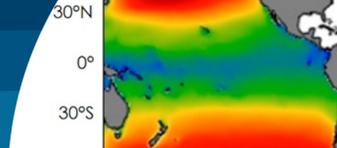
Keywords: design of maritime works, operational downtime, coastal flooding, wave overtopping, beach erosion

Introducción

En el marco de la revisión del Plan de Adaptación y Mitigación de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático 2017-2022 (MOP y MMA, 2017), desarrollado para el Ministerio de Obras Públicas (MOP) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) por el Centro de Cambio Global UC y CIGIDEN (CCG-CIGIDEN, 2024),

se propone una metodología para integrar los efectos del cambio climático en el diseño de infraestructura costera y portuaria.

En la actualidad, los Términos de Referencia de las consultorías desarrolladas por la Dirección de Obras Portuarias del MOP incluyen los ejes de adaptación y mitigación, indicando que “el consultor deberá proponer



soluciones específicas que a su juicio permitirán que las alternativas propuestas se adecuen a nuevas condiciones asociadas al cambio climático, en especial a la variación del nivel medio del mar y a un aumento de la altura del oleaje". Respecto del aumento del nivel medio del mar, la DOP hace referencia a valores asociados a un escenario optimista (RCP2.6) y adverso (RCP8.5) citando al Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC). En lo relativo a oleaje, la DOP recomienda calcular una altura significativa asociada a un determinado período de retorno, obtenida, por ejemplo, de acuerdo a la metodología ROM (PPEE, 2007) y tomar el valor del límite superior de la banda de confianza. La DOP deja al consultor proponer otros criterios más adecuados para definir la tormenta de diseño, sin especificar opciones. En este contexto, se detectan las siguientes brechas:

- El nivel medio del mar se considera para escenarios RCP (*Representative Concentration Pathways*) asociados el Quinto Informe del IPCC, denominado AR5 (IPCC, 2013) y menciona el *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (IPCC, 2019). No obstante, no se consideran los nuevos escenarios SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*) propuestos por el sexto informe, denominado AR6 (IPCC, 2021).
- El oleaje se incluye sólo a partir de la altura significativa, omitiendo otros parámetros relevantes para el diseño, como el período, la dirección, la duración de las tormentas o la forma espectral del oleaje. Asimismo, el procedimiento se basa en el cálculo de valores extremos a partir de un hindcast¹ de oleaje, sin considerar los efectos que el cambio climático puede tener en el clima durante la vida útil de la obra. En otras palabras, la práctica se basa en el supuesto de que el clima de oleaje es estadísticamente estacionario, y que las condiciones históricas se repetirán en el futuro.
- No se contempla el efecto del cambio climático en la presión atmosférica y el viento, que en conjunto definen la marea meteorológica.

¹ Un hindcast corresponde al proceso de utilizar datos históricos de viento para modelar numéricamente el oleaje ocurrido en el pasado. Un hindcast se usa para comprender eventos históricos, o como benchmark para modelos climáticos.

- A excepción del nivel medio del mar, no se contemplan diferentes escenarios (RCP o SSP), sean ellos optimistas o pesimistas. Asimismo, no se contempla la incertidumbre estadística asociada al uso simultáneo de varios modelos de circulación general (GCM; *General Circulation Model*) en la estimación de las variables. Finalmente, no se especifican horizontes temporales de análisis durante la vida útil de la obra, que podrían promover trayectorias de adaptación costera (Haasnoot *et al.*, 2019).
- No se contempla la combinación estadísticamente consistente de variables oceánicas -como el oleaje, la marea astronómica, la marea meteorológica y nivel medio del mar- en la definición de las condiciones operacionales ni valores de diseño de la infraestructura costera y portuaria.
- No se especifican metodologías asociadas a cálculos específicos como el downtime operacional, los niveles del mar extremos, el sobrepaso de obras marítimas, la erosión de playas y el diseño de obras marítimas, algunos de los cuales surgen como la combinación del oleaje, la marea astronómica, la marea meteorológica y el nivel medio del mar.

Para abordar estas brechas, se propone una metodología para incorporar el efecto del cambio climático en las variables que se utilizan para el diseño de infraestructura costera (viento, oleaje, marea meteorológica y el nivel medio del mar) considerando diferentes horizontes temporales, escenarios (RCP o SSP) y modelos de circulación general (GCM). Se introducen dos métodos de cálculo, específicamente, el análisis estacionario de dos ventanas temporales y el análisis no estacionario de series de tiempo largas.

Metodología propuesta

La metodología presentada en la Figura 1 considera cuatro etapas:

1. Selección de forzantes climáticos a escala global
2. Proceso de forzantes climáticos a escala regional
3. Proceso de variables de diseño a escala local
4. Elementos de diseño de infraestructura

Las etapas 1 y 2 son muy demandantes como para su

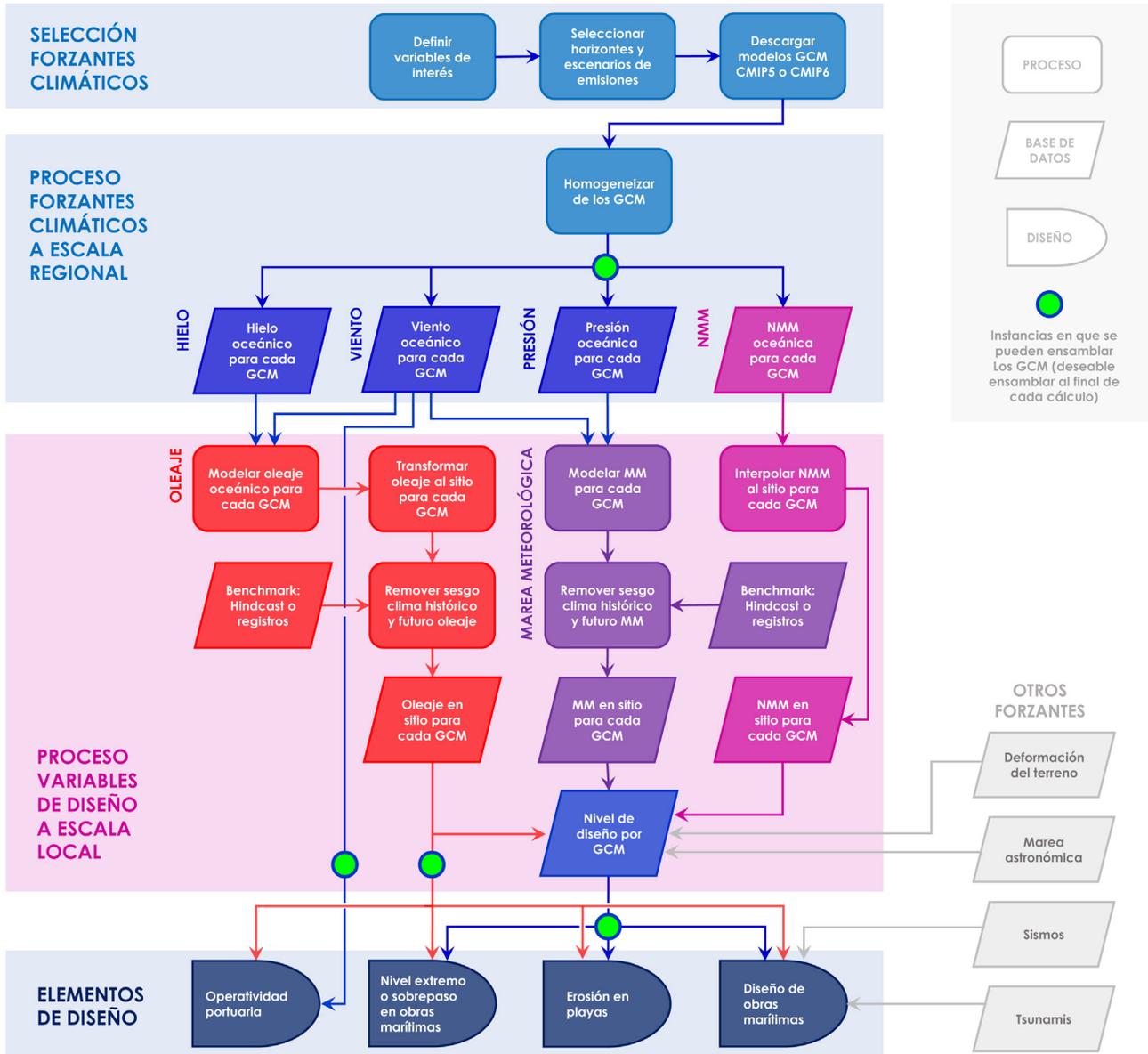
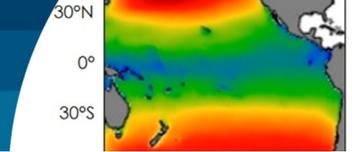
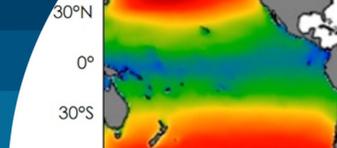


Figura 1: Diagrama de flujo con la metodología de cálculo de las variables utilizadas en el diseño de obras costeras y portuarias considerando cambio climático.

desarrollo en el marco de una consultoría. A nuestro juicio, estas debieran ser abordadas por el Estado, el cual debiera disponer de proyecciones de las variables (viento, oleaje, marea meteorológica y nivel medio del mar) en nodos oceánicos distanciados, por ejemplo, cada 1° o 2° de latitud. Existen precedentes como el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá *et al.*, 2026, 2017), proyecto FONDEF IDeA financiado por recursos públicos desarrollado por la Escuela de Ingeniería Oceánica de la Universidad de

Valparaíso para la DOP, y que dispone en forma gratuita de una base de datos de oleaje en aguas profundas cada 2° de latitud entre 01/01/1980 y el 31/12/2015, un libro y un sitio de descargas con material científico². También se pueden utilizar bases de datos disponibles en repositorios de acceso libre, que se detallan en la siguiente sección Etapa 1. Las etapas 3 y 4 consideran técnicas convencionales que son acometidas regularmente por las consultoras en

² <https://oleaje.uv.cl/descargas.html>



el marco de proyectos de la DOP. Estas etapas permiten escalar las proyecciones globales y regionales al diseño de infraestructura costera y portuaria.

Adicionalmente, en el diseño de infraestructura se debe considerar la interacción de los forzantes meteorológicos (a escala de horas a días) y climáticos (a escala decadal) con otros forzantes como la deformación del terreno, la marea astronómica, las ondas infragravitatorias o los meteotsunamis, que no son incluidos en la metodología pues su caracterización se basa en métodos de otra naturaleza.

Etapa 1: Selección de forzantes climáticos a escala global

Las etapas 1 y 2 consideran los siguientes forzantes climáticos a escala oceánica: Hielo oceánico, viento, presión atmosférica y nivel medio del mar (NMM). Estas forzantes a escala oceánica permiten definir, en etapas posteriores, las variables de diseño a escala local que se utilizan para el diseño: oleaje, marea meteorológica (*storm surge*) y el nivel medio del mar. Los pasos para la descarga y asignación puntual de los modelos GCM son los siguientes:

Selección de horizontes temporales

La definición de los horizontes de tiempo de análisis depende del tipo de infraestructura. Por ejemplo, obras diseñadas usando eventos de alto impacto y baja recurrencia (e.g. rompeolas) deben ser analizadas usando proyecciones de clima de largo plazo, durante la vida útil (i.e. considerar periodo hacia finales de siglo). La selección puede considerar dos opciones, siendo el “análisis estacionario entre dos ventanas temporales” más simple y el “análisis no estacionario” relativamente complejo:

- **Análisis estacionario entre dos ventanas temporales:** Considera uno o más horizontes futuros que abarcan la vida útil y donde se evalúan los cambios respecto de un período histórico. Cada ventana de tiempo se estudia mediante un análisis estadístico estacionario clásico, calculando valores de una variable o combinación de variables para diferentes períodos de retorno. La ventaja del análisis estacionario en dos ventanas temporales es que requiere la aplicación

de procedimientos de análisis de valores extremos conocidos en la consultoría, pero a un conjunto de GCM.

- **Análisis no estacionario:** Considera un horizonte que cubre toda la vida útil de la obra, y en el cual se evalúa el cambio gradual de las variables de interés mediante un análisis estadístico no estacionario (Baldan *et al.*, 2022). Este enfoque es más complejo que el análisis estacionario dentro de dos ventanas temporales.

La Figura 2 ilustra ambos tipos de análisis utilizando como ejemplo proyecciones de 21 GCM para el aumento del nivel medio del mar (SLR por sus siglas en inglés).

En el análisis estacionario, los horizontes futuros se comparan con un periodo histórico, que se considera como base para calcular los cambios. Es importante que en el período histórico se cuente con una base de datos utilizada como referencia (*benchmark*³) con el cual efectuar correcciones por sesgo (sección Etapa 2). Cabe notar que el uso de períodos iguales o superiores a 20 años para todos los horizontes garantiza la homogeneidad estadística y permite reducir los efectos de variabilidad climática asociados, por ejemplo, al fenómeno del Niño. No obstante, para evitar posibles efectos asociados a otras oscilaciones decadales (Pacific Decadal Oscillation PDO, Southern Annular Mode SAM), este período puede ser mayor (30 años) en la medida que las bases de datos sean largas. Se pueden también utilizar otros horizontes y períodos históricos, dependiendo del proyecto.

El análisis no estacionario, en contraste, requiere de técnicas más elaboradas. Gironás y Yáñez (2021) presentan metodologías utilizadas en el diseño hidrológico en condiciones estacionarias y no estacionarias, que pueden aplicarse a variables oceánicas. También se puede aplicar el método de Mentaschi *et al.* (2016), que consiste en tomar una serie temporal no estacionaria, transformarla a estacionaria, ajustar la serie transformada a una distribución de valores extremos y realizar una transformación inversa para calcular la recurrencia.

³ Por ejemplo, un hindcast de oleaje debidamente calibrado y validado, o registros instrumentales

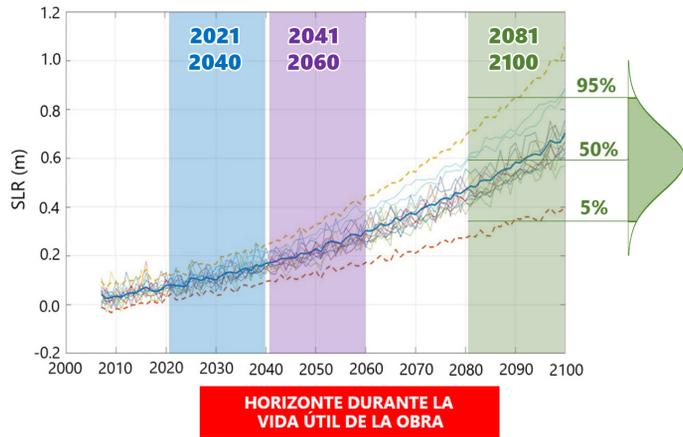
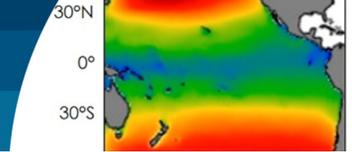


Figura 2: Opciones de selección de horizontes ilustradas para SLR en el escenario RCP 8.5. Se muestran tres horizontes propuestos en IPCC (2021)⁴, cuyos cambios se calculan en forma estacionaria y se comparan con el período histórico (1985-2004). Se ilustran, además, las bandas de confianza del 5% y 95% para el horizonte lejano. En rojo se muestra un horizonte que cubre la vida útil de la obra, donde se analizan las señales en forma no estacionaria

Selección escenarios de emisiones

En la selección de escenarios de emisiones de GEI, se debe privilegiar el uso de CMIP6⁵ sobre CMIP5⁶ (Coupled Model Intercomparison Project), por incluir GCM de última generación y porque su uso estará vigente hasta el próximo informe del IPCC. En cuanto a los escenarios de emisiones, es común incorporar un escenario intermedio y uno pesimista de trayectorias socioeconómicas compartidas pues ello permite un enfoque conservador al evaluar amenazas que puedan afectar la infraestructura.

⁴ El análisis estacionario se basa en el informe del IPCC (2021), que considera los siguientes horizontes de 20 años cada uno.

- Horizonte cercano (2021-2040): Período de tiempo donde no se ven diferencias importantes en incertidumbre asociada a escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (GEI), pero sí en las realizaciones de los GCM. Este horizonte es importante para la implementación de medidas de adaptación de corto plazo que permitan reaccionar a las tendencias que ya se están observando.
- Horizonte intermedio (2041-2060): Período de tiempo donde el incremento de 2°C es muy probable para los escenarios más desfavorables y poco probable para los menos desfavorables. La incertidumbre es intermedia entre los escenarios cercano y lejano.
- Horizonte lejano (2081-2100): Período de tiempo que muestra la gran incertidumbre asociada a las políticas de mitigación. Este horizonte es muy lejano para el diseño de medidas de adaptación, pero relevante para ilustrar esfuerzos requeridos en mitigación.

⁵ <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>

⁶ <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>

Para variables disponibles en CMIP6, se sugiere utilizar un escenario de emisiones intermedio SSP2-4.5 y una pesimista SSP5-8.5 para evaluar los cambios esperados respecto de un período histórico.

El escenario de emisiones SSP2-4.5 (*Middle of the Road*) plantea un escenario intermedio que asume que las tendencias sociales, económicas y tecnológicas no se desviarán de los patrones históricos, en tanto que el escenario SSP5-8.5 (*Fossil-fueled Development*) prevé un crecimiento impulsado por combustibles fósiles, un alto desafío en mitigación y bajo en adaptación. Actualmente CMIP6 no dispone de algunas variables oceánicas, por lo que se recomienda utilizar un escenario intermedio RCP4.5 y uno pesimista RCP8.5 del CMIP5, que son equivalentes en cuanto al forzamiento radiativo.

Selección modelos de circulación general

La selección de GCM considera: a) la disponibilidad en los escenarios y horizontes analizados, b) que la data sea manipulable y c) que los GCM tengan una resolución espacial y temporal adecuada para la variable en cuestión. La Figura 3 ilustra, a modo de ejemplo, la cantidad de GCM para el NMM disponibles en CMIP5, tres horizontes escogidos y el período histórico.

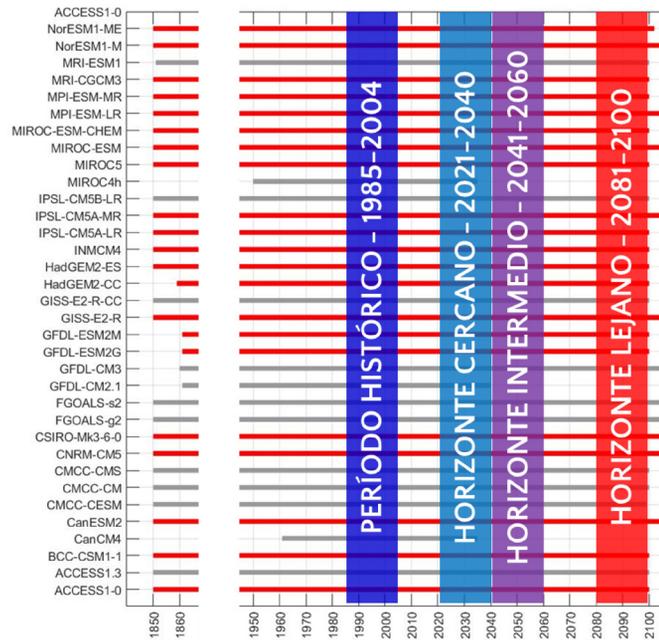
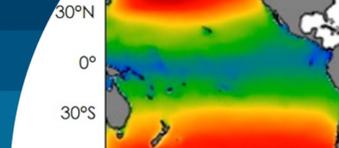


Figura 3: GCM para nivel del mar disponibles en CMIP5. Las barras rojas representan aquellos GCM con lo que se cuenta con información para el análisis y las barras grises representan GCM que no pueden utilizarse en el cálculo.



Descarga de modelos del CMIP5 o CMIP6

Existen muchas bases de datos disponibles para variables oceánicas, algunas de las cuales se presentan en la Tabla 1. La más recurrida para estudios de cambio climático es el *World Climate Research Programme* para CMIP5 y para CMIP6 que contienen todas las realizaciones de los GCM, tanto históricas como futuras, para distintas variables. Para cada una, se debe descargar el clima histórico a lo menos desde el año inicial del periodo histórico y las proyecciones. Los archivos están en formato netCDF (.nc) que permiten el almacenamiento a bajo costo computacional de grillas que contienen el espacio de toda la superficie de la Tierra. De los modelos disponibles, hay un número importante que tiene más de una realización, es decir, que tiene diferencias en las condiciones iniciales. Si bien típicamente se escoge una realización por modelo para el análisis, estudios de eventos climáticos extremos y de selección de modelos, sugieren incluir la mayor cantidad de realizaciones posibles, dado que la variabilidad climática interna que motiva la construcción de distintas realizaciones de un mismo GCM puede amplificar o reducir la ocurrencia de eventos extremos.

Etapa 2: Proceso de forzantes climáticos a escala regional

El proceso de forzantes climáticos a escala regional busca generar campos de variables como el viento, la presión atmosférica, el nivel medio del mar o parámetros estadísticos asociados al oleaje en grandes regiones del Océano Pacífico. Estos campos sirven para comprender los patrones de cambio asociados a una variable, pero requieren de un escalamiento al sitio (*downscaling*), para ser utilizados en el diseño. Es decir, esta es una etapa intermedia dentro del proceso de cálculo de los valores de diseño. La Figura 4 ilustra, a modo de ejemplo, los campos de altura significativa de oleaje (99%) para un período histórico y los cambios esperados a fin de siglo XXI, analizados mediante un análisis estacionario para cada horizonte en forma independiente.

Homogeneización de los GCM

La etapa de homogeneización de los GCM consiste en uniformar el formato de los archivos, resolución temporal y espacial, con el objetivo efectuar el análisis estadístico

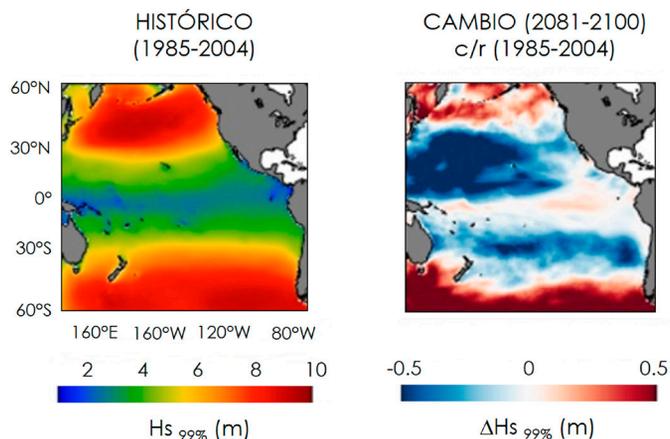


Figura 4: Campos de altura significativa de oleaje (99%) para el período histórico (1985-2004) y cambios para fin de siglo (2081-2100), ambos relativos al período histórico (adaptado de Winckler *et al.*, 2022a)

de todos los GCM considerados para una variable. Esta metodología se denomina proceso de “ensamblaje” (*ensemble*). Cabe notar las proyecciones de un GCM no representan una imagen del clima futuro, puesto que incluso múltiples proyecciones asociadas a un mismo modelo no son concordantes en sí. Esto crea la necesidad de resumir el conjunto de varias proyecciones en un *ensemble*.

Ensamblaje de los GCM

El ensamblaje de modelos busca establecer métricas estadísticas asociadas al conjunto de GCM, de modo de definir valores más probables (media, mediana), rangos (máximos y mínimos) e incertidumbres (desviación estándar, bandas de confianza) de las variables para horizontes y escenarios seleccionados⁷. La Figura 5 ilustra el procedimiento de ensamblaje para un análisis estacionario buscando calcular el cambio entre un horizonte y el período histórico.

Resultados de la etapa B

Esta etapa concluye con la generación de campos bidimensionales a escala regional de variables relevantes para el posterior cálculo de las variables de diseño de infraestructura marítima. Las variables son: Hielo oceánico, viento, presión atmosférica y NMM. El hielo oceánico y el viento se utilizan para modelar los campos

⁷ Un *ensemble median*, por ejemplo, se calcula como la mediana de las proyecciones de múltiples GCMs para una variable.

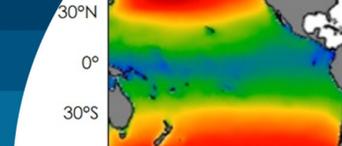
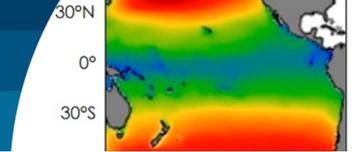


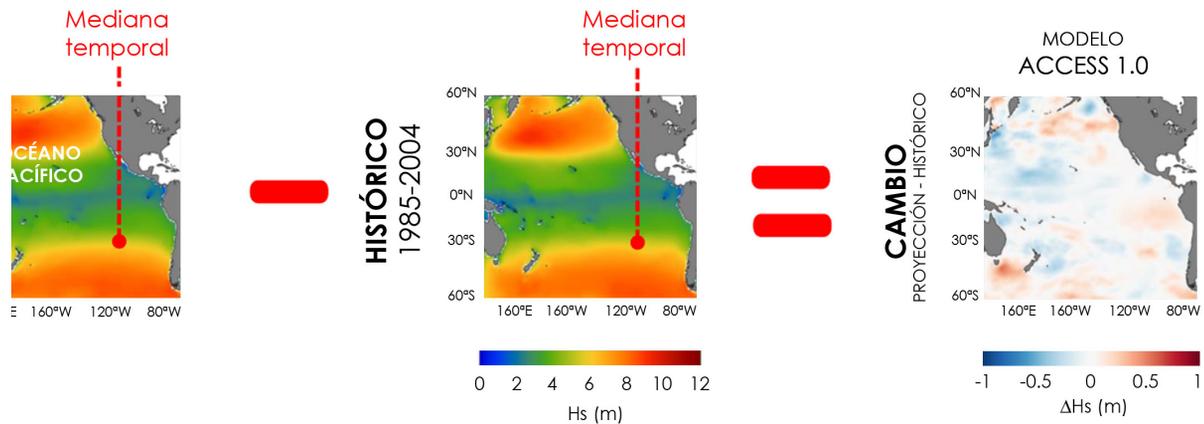
Tabla 1: Bases de datos de nivel del mar, oleaje y marea meteorológica.

Variable	Base de datos	Descripción		Link
Nivel del mar	SROCC	Escenarios RCP 8.5 y RCP 4.5, datos anuales desde 2007 hasta 2100.	22 nodos en la costa de Chile. SLR (Sea Level Rise)	https://www.ipcc.ch/report/ar6/sr/srocc/download/SROCC_Ch04-SM_DataFiles.zip
	CMIP5	21 GCM's, escenarios RCP 8.5 y RCP 4.5, serie de tiempo anual desde 2007 hasta 2100	22 nodos en la costa de Chile. Contribuciones: Capas de hielo de Groenlandia y la Antártida, Hielo glaciar, almacenamiento de agua en tierra, termoesterica oceánica, SSH (Dynamic Sea Surface Height). SLR (Sea Level Rise)	https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip5-ipsl/
	GESLA	Serie de tiempo horaria	Arica (1982-1998); Antofagasta (1945-2018); Caldera (1980-1998); Valparaíso (1996-1998); Puerto Montt (1980-2018); Puerto Williams (1985-1998); Isla Diego Ramírez (1993-1994); San Félix (1987-2018); Juan Fernández (1977-1984); Isla de Pascua (1995-1996)	https://gesla787883612.wordpress.com/
	IH Cantabria	Un valor por nodo	160 nodos en la costa de Chile. Considera a) Nivel medio del mar y nivel medio del mar relativo en 2040 y b) Tendencia media del nivel medio del mar relativo y nivel medio del mar entre 2010 y 2040.	http://www.c3a.ihcantabria.com/
	GTSM	4 GCM's escenario SSP5-8.5 Datos anuales desde 1950 hasta 2050 4 GCM's escenario SSP5-8.5 Serie de tiempo horaria desde 1979 hasta 2018	Nivel medio del mar Nivel total de agua	https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-water-level-change-indicators-cmip6?tab=form https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-water-level-change-timeseries-cmip6?tab=form
Oleaje	CMIP5	6 GCM's escenarios RCP4.5 y RCP 8.5, serie de tiempo cada 3 horas	22 nodos en la costa de Chile Periodos: 1985-2004, 2026-2045 y 2081-2100	https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip5-ipsl/
	CMIP6	2 GCM's escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, serie de tiempo cada 3 horas	22 nodos en la costa de Chile Periodos: 1985-2004, 2026-2045 y 2081-2100	https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip6-ipsl/
	IH Cantabria	Un valor por nodo	160 nodos en la costa de Chile. Condiciones estacionales, eventos extremos, tendencia del oleaje y parámetros del oleaje (dirección del flujo medio de energía, y Hs12)	http://www.c3a.ihcantabria.com/
Marea meteorológica	ADCIRC	Serie de tiempo horaria desde 1985 hasta 2021	142 nodos en las costas de Chile	
	IH Cantabria	Un valor por nodo	160 nodos en la costa de Chile. Condiciones extremas (Tr 50, 100, 250 y 500 años) y cuantiles (90 y 99)	http://www.c3a.ihcantabria.com/
	GTSM	4 GCM's escenario SSP5-8.5 Un valor por nodo	142 nodos en las costas de Chile Cambio absoluto de 4 GCM's y su ensemble Percentiles y periodos de retorno del cambio absoluto	https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-water-level-change-indicators-cmip6?tab=form https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-water-level-change-timeseries-cmip6?tab=form



ANÁLISIS DE UN MODELO

ejemplo: ACCESS 1.0



ANÁLISIS DE UN ENSAMBLAJE DE MODELOS

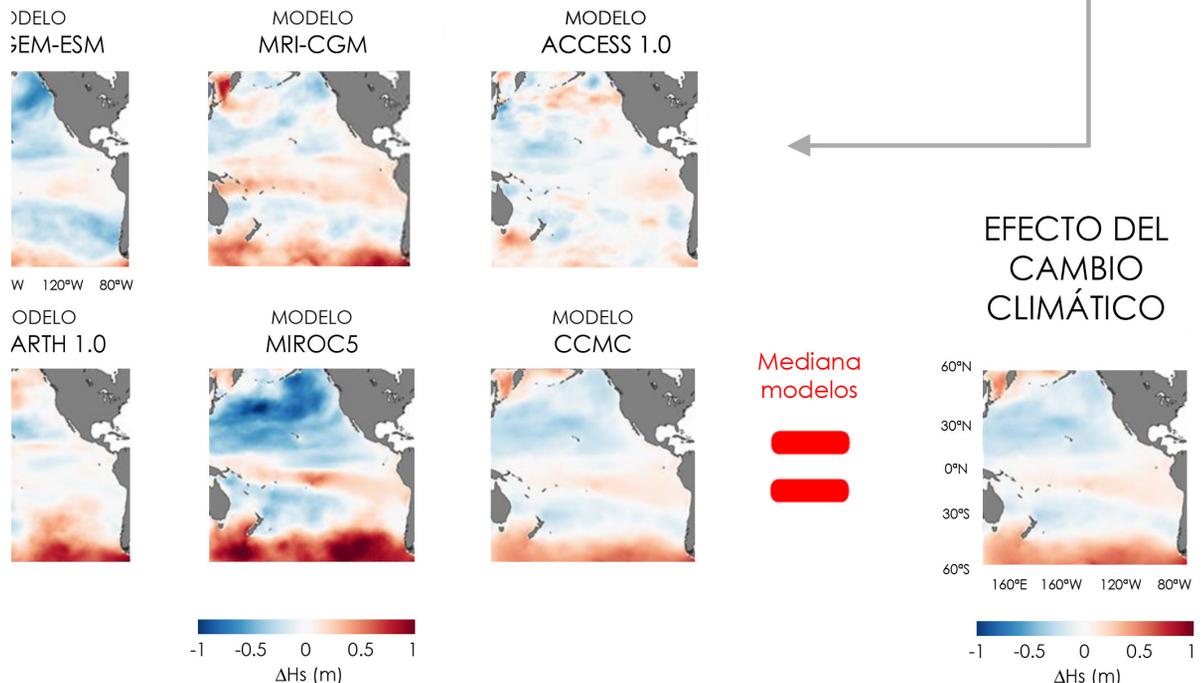
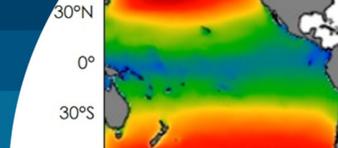


Figura 5: Cálculo del cambio climático del oleaje para el escenario RCP 8.5 (2026-2045) respecto del período histórico (1985-2004). Arriba se muestra la mediana temporal de la altura significativa en el Océano Pacífico de un GCM (ACCESS 1.0) para el período histórico, la proyección y la diferencia atribuida al cambio climático. Abajo se muestra la diferencia entre medianas para 6 GCM (ACCESS 1.0, CMCC, EC-EARTH 1.0, MIROC5, MRI-GCM y HADGEM), a partir de la cual se calcula la mediana (Winckler *et al.*, 2022a)

de oleaje en el Océano Pacífico a escala regional. El viento y la presión atmosférica se utilizan para modelar la marea meteorológica mediante modelos de onda larga (e.g. ADCIRC) o mediante metodologías simplificadas en caso de que no se disponga de herramientas de modelación (e.g.

barómetro invertido). A diferencia del oleaje y la marea meteorológica, el NMM es una variable que se extrae directamente de CMIP5 y sólo requiere una posterior interpolación al sitio de interés.



Etapa 3: Proceso de variables de diseño a escala local

El procesamiento de diseño a escala local depende de las especificidades de cada variable. No obstante, y en forma adicional a los procedimientos de calibración y validación que permiten optimizar el grado con que el modelo reproduce un fenómeno, es necesario efectuar correcciones por sesgo para cada variable y cada GCM. La corrección por sesgo se presenta en varios puntos del diagrama de flujo de la Figura 1.

Remoción de sesgo

Para efectuar una remoción por sesgo, se debe recurrir a una base de datos de referencia disponible (*benchmark*) para el período histórico, que puede ser un modelo de reanálisis, registros *in situ* o sensores remotos. Luego, se implementa una corrección de sesgo de cada GCM, siguiendo alguna de las metodologías propuestas por Lemos *et al.* (2020).

La corrección por sesgo consiste en corregir los GCM en la ventana histórica de modo que coincida con la curva de probabilidad del *benchmark*, para luego aplicar la misma corrección a las curvas de probabilidad de los horizontes de proyección. De los métodos disponibles, la corrección por percentiles es simple de implementar, aun cuando asume la hipótesis de que el clima es estadísticamente estacionario en el período histórico.

La Figura 6 ilustra un ejemplo de corrección por sesgos por percentiles de datos de altura significativa de oleaje para diferentes GCM para el período histórico, y proyecciones a medio y fin de siglo en Antofagasta, Chile, aplicando esta metodología. En este caso, el *benchmark* utilizado corresponde a los campos de oleaje generados con campos de viento del Climate Forecast System Reanalysis (CFSR; Saha *et al.*, 2010) pues han mostrado ser una excelente estimación de registros obtenidos por boyas frente a las costas chilenas (Beyá *et al.*, 2017). A continuación, se ilustran en forma general los procedimientos de cálculo asociados a cada variable a escala local.

Oleaje

El cálculo del oleaje en un sitio se basa en el siguiente procedimiento:

- Etapas 1 y 2: Generación del oleaje a escala global (Océano Pacífico) a partir de los datos de viento y hielo oceánico para cada GCM o, alternativamente, descarga de GCM de oleaje disponibles en otras bases de datos (Figura 4).
- Etapa 3: Transformación de oleaje espectral desde aguas profundas al sitio de estudio para cada GCM mediante alguna metodología que permita la transferencia de grandes volúmenes de datos de aguas profundas al sitio de estudio (Figura 7). Cabe notar que la propagación de oleaje para cada estado de mar durante 20 o 30 años, tanto para el período histórico como los horizontes debe repetirse para cada GCM, lo que hace crecer exponencialmente la cantidad de cálculos respecto de un hindcast convencional utilizado en la consultoría⁸.
- Remoción de sesgo de estadística de oleaje en el sitio para cada GCM, según se explica en esta sección (Figura 6).
- Ensamblaje de GCM tanto para el período histórico como para los diferentes horizontes en el sitio y obtención de valores de diseño.

Los GCM para el cálculo del oleaje se seleccionan conforme a resolución espacial y a la disponibilidad de datos de viento y hielo oceánico, que en conjunto permiten utilizar modelos de generación de oleaje⁹ en el Océano Pacífico (Figura 4). Alternativamente, se puede recurrir a las escasas bases de datos de oleaje con proyecciones CMIP5 tipo COWCLIP2.0 (Morim *et al.*, 2019) o estudios previos (CEPAL, 2015).

La transformación del oleaje desde aguas profundas a cada sitio se puede obtener utilizando modelos numéricos que promedian la fase en profundidades intermedias¹⁰ y modelos que resuelven la fase en zonas muy bajas o donde las obras marítimas inducen difracción y reflexión¹¹. El procedimiento de generación y transformación del oleaje al sitio es una tarea de carácter convencional en la consultoría

⁸ Esta demanda adicional de recursos computacionales y humanos podría implicar un aumento en los costos asociados a implementar este tipo de metodologías.

⁹ e.g. WAVEWATCH III

¹⁰ e.g. SWAN, STWAVE, MIKE21 SW

¹¹ e.g. FUNWAVE, GCWAVE MIKE 21 BW

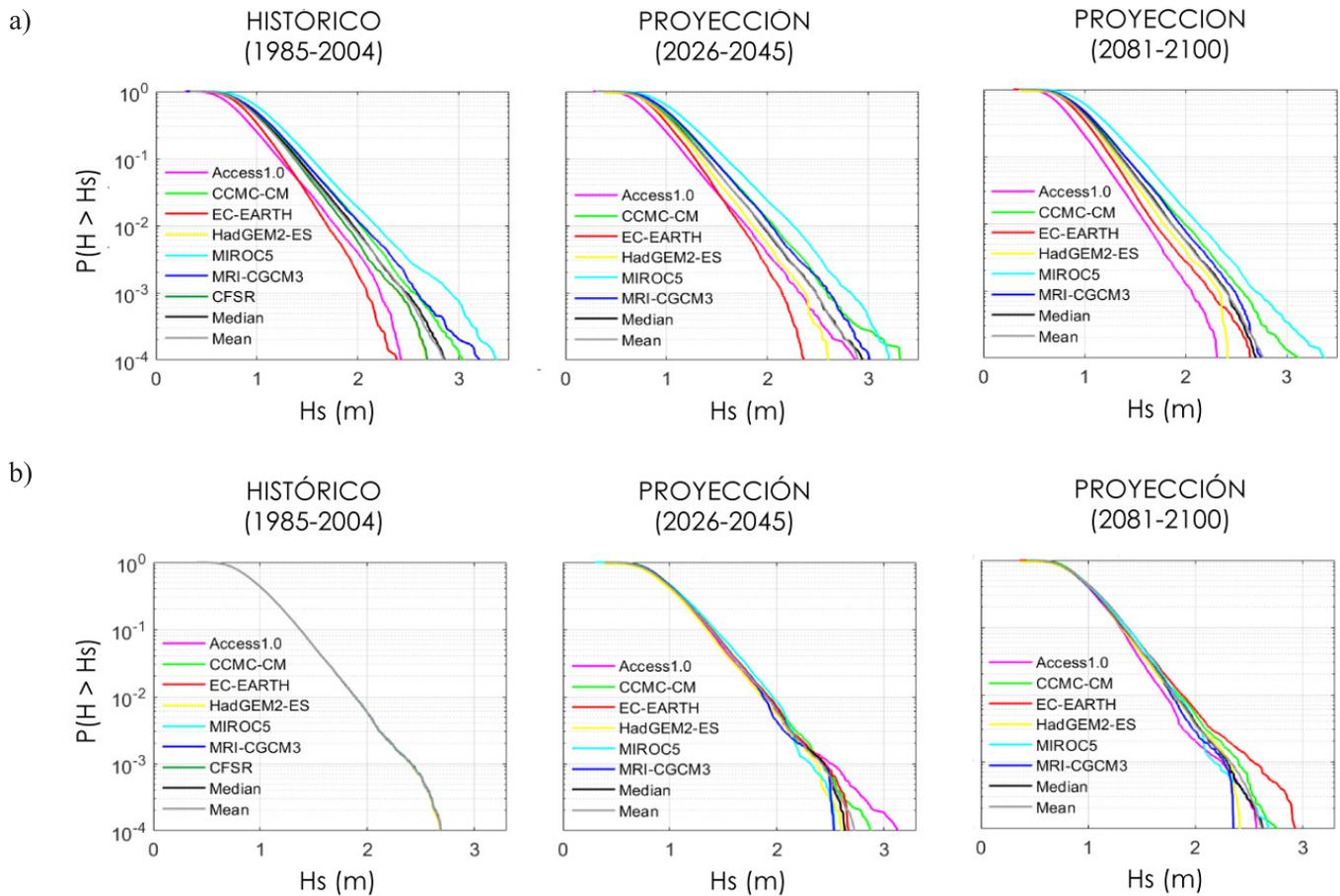
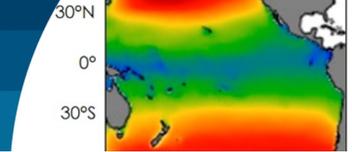


Figura 6: Ejemplo de corrección por sesgos de datos de oleaje para diferentes GCM. Se muestran las curvas de excedencia de modelos, (a) sesgados y corregidos, (b) de la altura significativa (H_s) para el período histórico y proyecciones a medio y fin de siglo en Antofagasta, Chile (círculo rojo en Figura 7). La mediana y la media se incluyen en líneas negra y verde oscuro, respectivamente (Winckler *et al.*, 2022a).

nacional y, por tanto, no se profundiza en este artículo. La novedad de esta metodología es que el procedimiento de cálculo se efectúa para cada GCM, tanto para el período histórico como la proyección, en tanto que actualmente el cálculo se restringe a un solo *hindcast* y sólo para un período histórico.

La Figura 7 muestra, a modo de ejemplo, las salidas de un modelo de transformación de oleaje desde aguas profundas a un nodo en la bocana de acceso del puerto de Antofagasta. Como resultado de este proceso, se obtienen series de tiempo de espectros direccionales en la bocana de cada puerto, a partir de las cuales se calculan curvas de excedencia de alturas significativas sesgadas (Figura 6 a) y corregidas por sesgo (Figura 6 b). Se pueden también obtener parámetros como el periodo y la dirección.

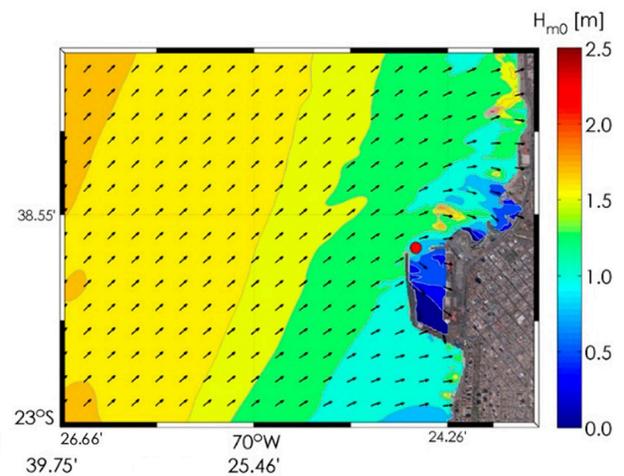
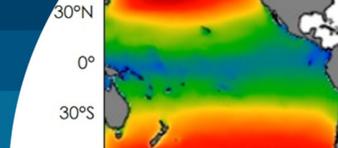


Figura 7: Modelo típico de transformación de oleaje desde aguas profundas a un sitio. Se muestra el patrón de altura significativa y dirección de oleaje en el puerto de Antofagasta. En el nodo rojo se calcula la estadística de oleaje incluida en la Figura 5 (Beyá *et al.*, 2017)



Marea meteorológica

La marea meteorológica (*storm surge*) corresponde a un aumento del nivel del mar que se genera debido a una baja presión atmosférica (*barometric setup*) y vientos fuertes (*wind setup*) que ocurren durante los temporales. El cálculo puede basarse en modelos de onda larga¹², de uso incipiente en la consultoría, sobre dominios de integración suficientemente grandes para capturar la ciclogénesis que los genera (Figura 8). Alternativamente, se pueden explorar bases de datos disponibles (Muis *et al.*, 2020) o estudios previos (CEPAL, 2015).

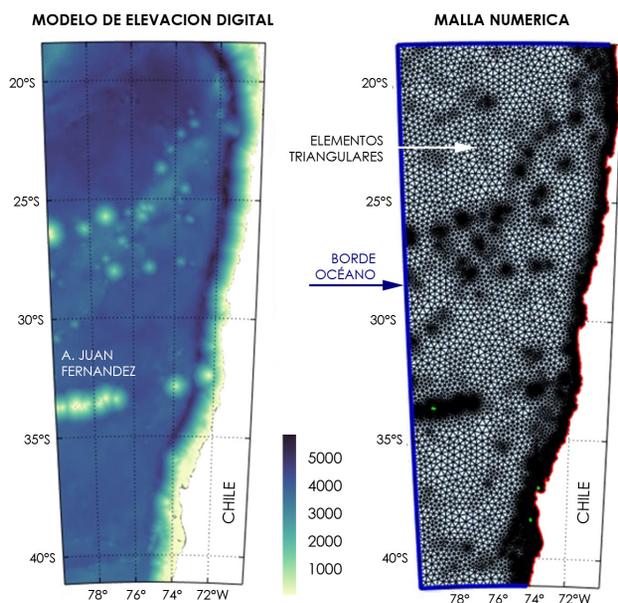


Figura 8: Malla numérica utilizada para calcular la marea meteorológica a partir de datos de viento y presión atmosférica para cada GCM tanto para el período histórico como para un horizonte de análisis (Esparza, 2023)

Nivel medio del mar

El NMM corresponde al promedio anual del nivel instantáneo del mar y se calcula a partir de varios procesos físicos (Church *et al.*, 2013; IPCC, 2013). Para efectos prácticos, existen numerosas bases de datos que consideran todos esos procesos en un solo valor de aumento del NMM, lo que simplifica los cálculos asociados a una consultoría. Por ejemplo, existen herramientas que permiten obtener proyecciones del NMM a escala regional, como el *IPCC WGI Interactive Atlas*, que proporciona proyecciones

¹² e.g. ADCIRC, SWASH, CROCO, SUNTANS, MIKE21 HD, DELFT3D, TELEMAC2D, ROMS.

a nivel regional para diferentes GCM, escenarios SSP y horizontes¹³ y herramientas que disponen de proyecciones SSP en sitios específicos, como el *Sea Level Projection Tool* desarrollado por la NASA¹⁴. Existe también una base de datos disponible con una resolución de 1°x1° de la Universidad de Hamburgo para 21 GCM bajo el escenario RCP 8.5 entre 2007-2100 en relación con el período de referencia 1986-2005. Los resultados pueden mostrarse mediante series de tiempo (Figura 2) o como campos espaciales (Figura 9). Se observa que, para ambos escenarios y para los tres horizontes, existe un aumento que crecerá exponencialmente a medida que avance el siglo, para llegar a valores de ~0.6 m (escenario SSP5-8.5, en el horizonte 2081-2100).

Nivel de diseño

El nivel de diseño es definido en esta metodología por una combinación de la marea meteorológica, incluidos en ella los efectos de presión atmosférica (*barometric setup*) y viento (*wind setup*), además de la marea astronómica¹⁵ y el levantamiento por oleaje (*wave setup*). También puede incluir el levantamiento del eje hidráulico en torno a las desembocaduras de ríos, ondas infragravitatorias, tsunamis, meteotsunami y cambios del terreno, que no son incluidos en esta metodología. Esta definición tampoco considera el efecto de las olas individuales, considerado en la sección Nivel del mar extremo en playas. Con ello, el nivel de diseño respecto del nivel de reducción de sondas actual (*ND*) se define a partir de un modelo aditivo lineal (Figura 10):

$$ND = MM + MA + SLR \quad (1)$$

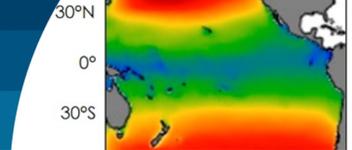
donde *MM* es la marea meteorológica, *MA* la marea astronómica y *SLR* el aumento del nivel medio del mar (sección anterior). *ND* no contempla las deformaciones del terreno producto del ciclo sísmico, pero podrían incluirse mediante un análisis de sensibilidad de las deformaciones ΔZ históricas obtenidas en el sitio de proyecto. Así, la fórmula puede extenderse:

$$ND = MM + MA + SLR \pm \Delta Z \quad (2)$$

¹³ <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>

¹⁴ <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>

¹⁵ La marea astronómica no se analiza en esta metodología.



donde el signo positivo se asocia a subsidencia y el negativo a solevantamiento del terreno.



Figura 9: Aumento del nivel medio del mar promedio para los horizontes cercano (2021-2040), mediados de siglo (2041-2060) y finales de siglo (2081-2100) en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, asociados al percentil 50%

Existen estudios que compilan valores de deformación del terreno en las cercanías de los 7 puertos estatales chilenos (Winckler *et al.*, 2022b) y en 45 playas ubicadas entre Iquique y el Golfo de Arauco (Martínez *et al.*, 2021) que sirven de ejemplo de aplicación. Este nivel de diseño se calcula para cada GCM y debiera ser ensamblado estadísticamente.

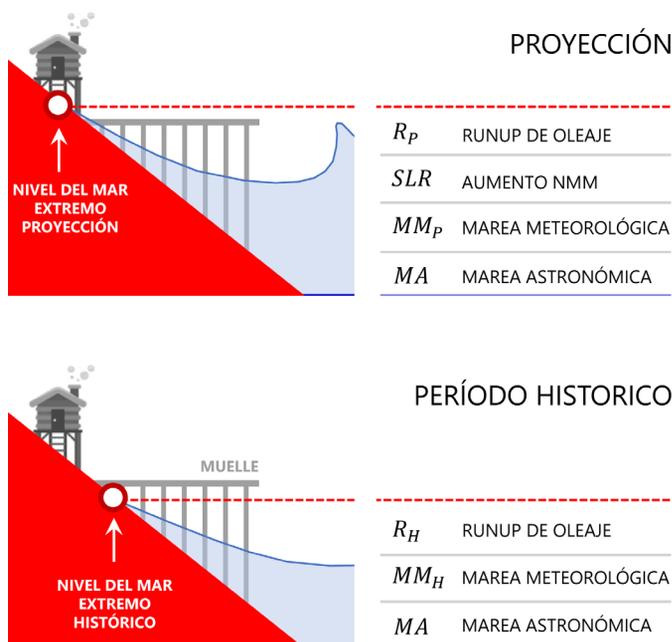


Figura 10: Componentes que definen el nivel de diseño ND, que no considera el runup del oleaje, y el nivel del mar extremo ESL

Etapa 4: Elementos de diseño de infraestructura

Los elementos de diseño de infraestructura pueden dividirse, entre otros, en operatividad portuaria, nivel del mar extremo, sobrepaso de obras marítimas, erosión de playas y diseño de obras marítimas. A continuación, se ilustran algunas aplicaciones que incorporan el cambio climático en la definición de las variables, citando las publicaciones correspondientes. Las aplicaciones deben leerse como meros ejemplos donde los autores tomaron decisiones metodológicas en función del tipo de estudio, disponibilidad de data y supuestos.

Operatividad portuaria

Para calcular los cierres futuros de puertos, caletas y otras instalaciones portuarias que atienden a naves, se puede caracterizar del clima de oleaje mediante curvas de excedencia de altura significativa (Figura 6b), a partir de las cuales se calcula el porcentaje de tiempo que un sitio de atraque no está disponible para una nave debido a la acción del oleaje (*downtime*). Para calcular el *downtime*, se asume que el puerto se cierra cuando la altura significativa excede un cierto umbral, que dependerá del tipo de nave y variable que lo causa (viento, oleaje y/o corrientes). Existen diversos estándares que definen dichos umbrales, como la ROM 3.1-99 (PPEE, 1999), que se enfoca en naves mayores, o las recomendaciones del PIANC (1995), que, además de dar especificaciones para naves mayores, proporciona umbrales para naves menores como las que operan en puertos pesqueros y caletas.

Para ilustrar el cambio en el *downtime* por efecto del cambio del clima de oleaje, se resume el trabajo de Winckler *et al.* (2022b), quienes analizan la operatividad portuaria y el impacto económico asociado calculando las horas de cierres de puerto debido a las marejadas en siete puertos estatales en Chile. A partir de las ROM 3.1-99 (PPEE, 1999), utilizan valores límites de $H_s^{lim} = 1.5$ m para sitios de atraque donde el oleaje pega por la banda al casco de un buque portacontenedores y $H_s^{lim} = 2.0$ m para aquellos donde el oleaje pega por la proa o popa. Este procedimiento supone que sólo el oleaje cambia debido al cambio climático pero los criterios de cierre permanecen constantes, independiente de los avances tecnológicos que permitirán el atraque de naves en condiciones más complejas.

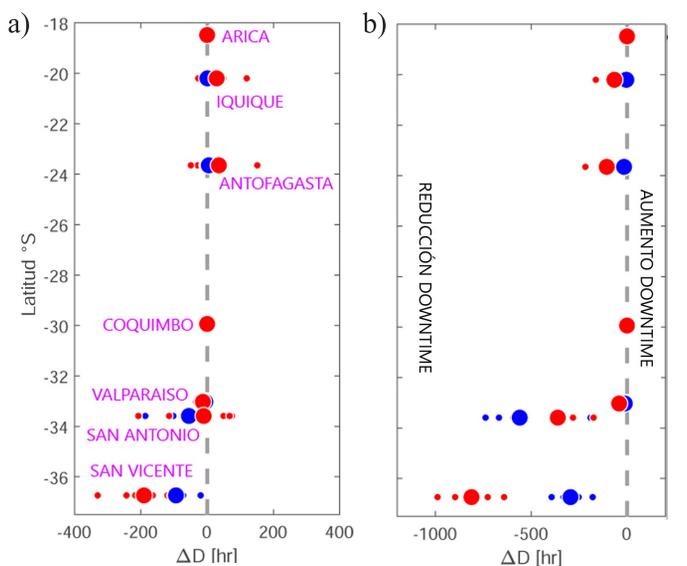
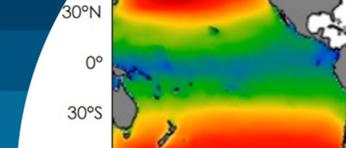


Figura 11: Cambios en el *downtime* operacional (en horas/año) entre el período histórico (1985-2004) y la proyección de a) medio siglo (2026-2045) y b) fines de siglo (2081-2100) para umbrales de operación asociados a un buque portacontenedores, definidos por $H_s^{lim} = 1.5$ m para oleaje por la banda (rojo) y $H_s^{lim} = 2.0$ m para oleaje por proa o popa (azul). Los círculos pequeños simbolizan los cambios por GCM y los grandes representan la mediana (Winckler *et al.*, 2022a)

La Figura 11 ilustra los cambios en el *downtime* operacional entre el período histórico y la proyección a mediados y fines de siglo para los umbrales definidos. Se observa que, para mediados de siglo (Figura 11a), las condiciones operacionales empeorarían en los puertos de Iquique y Antofagasta, permanecerían sin cambios en Arica y Coquimbo, mejorarían levemente en Quintero, Valparaíso y San Antonio y mejorarían significativamente en San Vicente. Los cambios, no obstante, son acotados pues se traducen en aumentos o reducciones de *downtime* operacional bajo las 200 horas anuales. El *downtime* se reduciría a fines de siglo en prácticamente todos los puertos (Figura 11b), lo que generará una mejora en las condiciones operativas.

A partir de estos cálculos, Winckler *et al.* (2022b) analizan el impacto económico de los cierres de puerto, considerando las tarifas de cobro por hora de atraque y metros de eslora y por movimiento de carga. Para quien desee acceder a más detalles, el procedimiento detallado de estos cálculos está disponible en Melo *et al.* (2023).

Nivel del mar extremo en playas

Existen numerosos estudios que abordan las inundaciones

costeras a escala mundial, regional y local. Un *proxy* para evaluar la amenaza de inundaciones costeras es calcular el nivel del mar extremo local, denominado *ESL* en la literatura (*extreme sea level*) que es un nivel excepcionalmente alto y de una duración del orden de horas a días. Para ilustrar el cálculo del *ESL*, se recurre a un estudio en la bahía de Cartagena desarrollado por Esparza (2023), quien lo define a partir de un modelo aditivo lineal:

$$ESL = R + ND \quad (3)$$

donde *R* es el *runup* del oleaje y *ND* es el nivel de diseño ya definido. El *runup* tiene una distribución estadística dentro de un estado de mar y se mide verticalmente desde la línea de aguas quietas. Para efectos de un estudio de cambio climático en playas, se puede utilizar el *runup* excedido por el 2% del número de olas entrantes asociado a un estado de mar, considerando fórmulas como la de Stockdon *et al.* (2006) para cada GCM, y luego ensamblar los resultados de este cálculo obtenido para cada GCM.

La Figura 12 muestra el *ESL* para diferentes períodos de retorno en cuatro sitios de la bahía de Cartagena para un escenario histórico (1985-2004) y horizontes a medio siglo (2026-2045) y fines de siglo (2081-2100). Estas curvas corresponden a los *ensembles* de los cálculos obtenidos para 6 GCM.

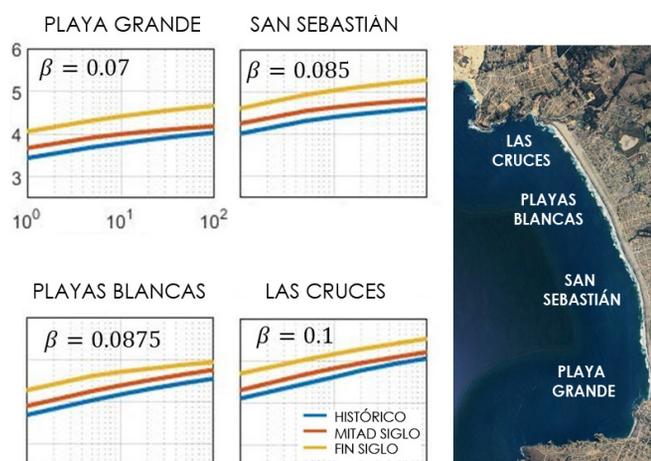
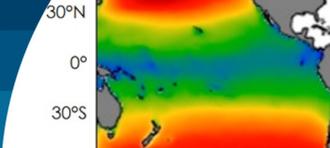


Figura 12: Nivel extremo para diferentes períodos de retorno en seis sitios de la bahía de Cartagena para un escenario histórico (1985-2004) y para horizontes a medio siglo (2026-2045) y fines de siglo (2081-2100) bajo un escenario de emisiones RCP8.5. β representa la pendiente. Se ilustran sólo la mediana de los *ensembles* obtenidos a partir de 6 GCM (adaptado de Esparza, 2023)



Sobrepaso de obras marítimas

El sobrepaso de oleaje sobre defensas costeras es otra medida del impacto del cambio climático en la costa, pues permite cuantificar el daño en defensas, edificaciones y la seguridad de peatones y vehículos. El sobrepaso incorpora variables asociadas al oleaje, al nivel del mar y a las propiedades geométricas de una defensa costera. El cálculo del sobrepaso es un procedimiento convencional en el diseño de obras costeras. Sin embargo, la inclusión de los cambios en el oleaje y el aumento del NMM es relativamente simple si se cuenta con un set de GCM de ambas variables a nivel local (Figura 13). Por ejemplo, Winckler *et al.* (2022b) efectúan cálculos del sobrepaso a partir de 6 GCM de oleaje y 21 GCM de NMM. Dichos resultados se sintetizan a continuación.

El sobrepaso, expresado como el caudal medio por unidad de ancho de defensa costera q , en $m^3/m/s$, se puede calcular mediante diversas fórmulas empíricas. Winckler *et al.* (2022b) utilizan la fórmula de Owen (USACE, 2006; p. VI-5-24), pero podrían utilizarse otras dependiendo de la tipología, condiciones oceanográficas y rango de aplicabilidad:

$$\frac{q}{gH_s T_{om}} = a \exp\left(-b \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{s_{om}}{2\pi}} \frac{1}{\gamma_r}\right) \quad (4)$$

donde H_s es la altura significativa y T_{om} es el período medio de oleaje, y se efectúan los siguientes supuestos. La esbeltez del oleaje se calcula como $S_{om} = H_s / L_{om}$, donde la longitud de onda en aguas profundas se calcula en función del período mediante la expresión $L_{om} = gT_{om}^2 / 2\pi$. Se asume un talud de roca de 1:2, impermeable, coeficientes empíricos $a = 0.013$ y $b = 22$ asociados a dicho talud, geometría de la defensa y tipo de rotura, y un factor de reducción por rugosidad de $\gamma_r = 0.8$. Se asume asimismo un francobordo de $R_c = 8$ m sobre el nivel medio del mar para el período histórico, y de $R_c = R_c - \Delta z$, para la proyección a fin de siglo donde $\Delta z = +0.6$ m corresponde al aumento del NMM para esa ventana temporal. En cada puerto, el oleaje se calcula en las cercanías de la costa mediante una transformación del oleaje desde aguas profundas al sitio. En este caso se calcula el sobrepaso para diferentes períodos de retorno tanto para la ventana histórica (1985-2004) y como para fines de siglo (2081-2100).

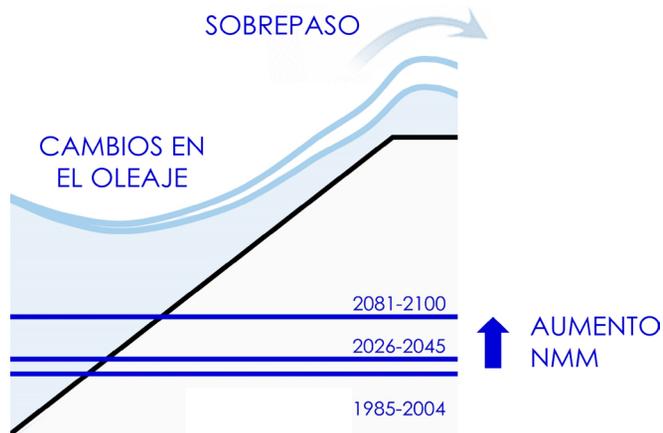


Figura 13: Sobrepaso considerando cambio climático

La Figura 14 muestra los resultados del sobrepaso histórico y los cambios para mediados de siglo (2026-2045). Se observa que el sobrepaso está altamente influenciado por el abrigo natural de cada puerto -Coquimbo y Valparaíso se ubican en sectores protegidos dentro de bahías, lo que explica el bajo sobrepaso. En los puertos del norte y centro se incrementará el sobrepaso producto principalmente, del aumento del NMM, lo que redundará en mayores daños en infraestructura y riesgos a la seguridad de peatones y vehículos. Los puertos del San Antonio sur experimentarían una reducción de sobrepaso, en comparación con el período histórico. Finalmente, en Winckler *et al.* (2022b) se efectúa una discusión sobre cómo se podrían mejorar estos resultados.

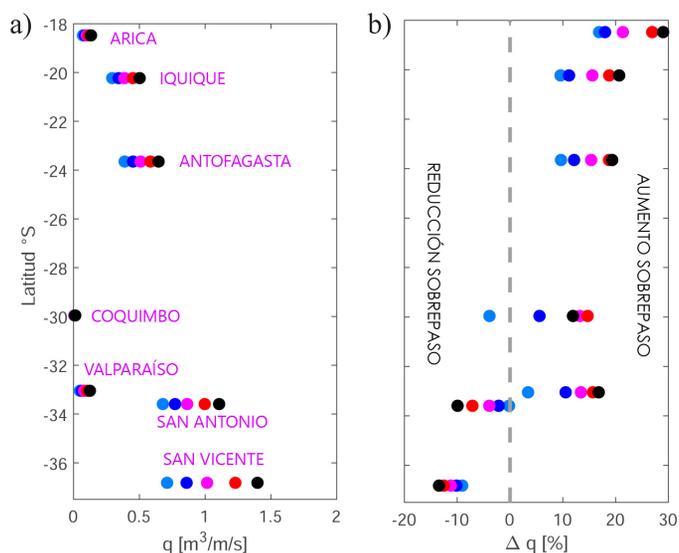
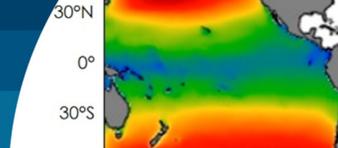


Figura 14: Sobrepaso asociado a diferentes períodos de retorno para el período histórico (1985-2004) y los cambios de dicha variable para mediados de siglo (2026-2045) (adaptado de Winckler *et al.*, 2022a)



Erosión de playas

El cambio climático puede suponer un retroceso, avance o pivoteo de la línea de costa, que se suma a otras posibles causas que explican la erosión (Luijendijk *et al.*, 2018). La pérdida de playas tiene efectos adversos en el turismo, en la pérdida de ecosistemas y en un aumento del daño de las obras costeras que las delimitan. Existen algunos esfuerzos para cuantificar cómo será la erosión de las playas a nivel nacional. Por ejemplo, en Winckler *et al.* (2023) se calcula

la erosión costera a mediados (2026-2045) y fines de siglo (2081-2100) bajo el escenario RCP 8.5 mediante la fórmula de Bruun (1962) a partir de 6 GCM de oleaje y 21 GCM de NMM. La Figura 15 presenta los resultados de erosión en 45 playas entre Iquique y el Golfo de Arauco. Winckler *et al.* (2023) también efectúan cálculos del pivoteo en estas playas.

Los resultados indican que las playas ubicadas entre Arica y el Canal Chacao experimentarán retrocesos medios anuales de hasta 13 m a mediados de siglo y ninguna playa experimentará una desaparición total. Con todo, las playas con menor altura de berma serán más erosionadas que aquellas con mayor altura puesto que tienen mayor volumen de arenas para adaptarse a las nuevas condiciones. Por otra parte, aquellas playas con sedimentos finos experimentarán mayor retroceso que playas de arena gruesa puesto que los finos son menos estables. Cabe notar que estos cálculos no consideran los cambios verticales del terreno asociados al ciclo sísmico, los efectos hidrológicos asociados a cambios en el aporte sedimentario desde las desembocaduras, o el transporte eólico, que también puede jugar un rol relevante en el balance másico de las playas. Un buen antecedente en esta línea, que se focaliza en una bahía en particular, es el estudio “Diagnóstico mejoramiento playa La Serena, Comuna La Serena, región de Coquimbo”, desarrollado por la consultora Aguas y el Instituto Nacional de Hidráulica para la Dirección de Obras Portuarias.

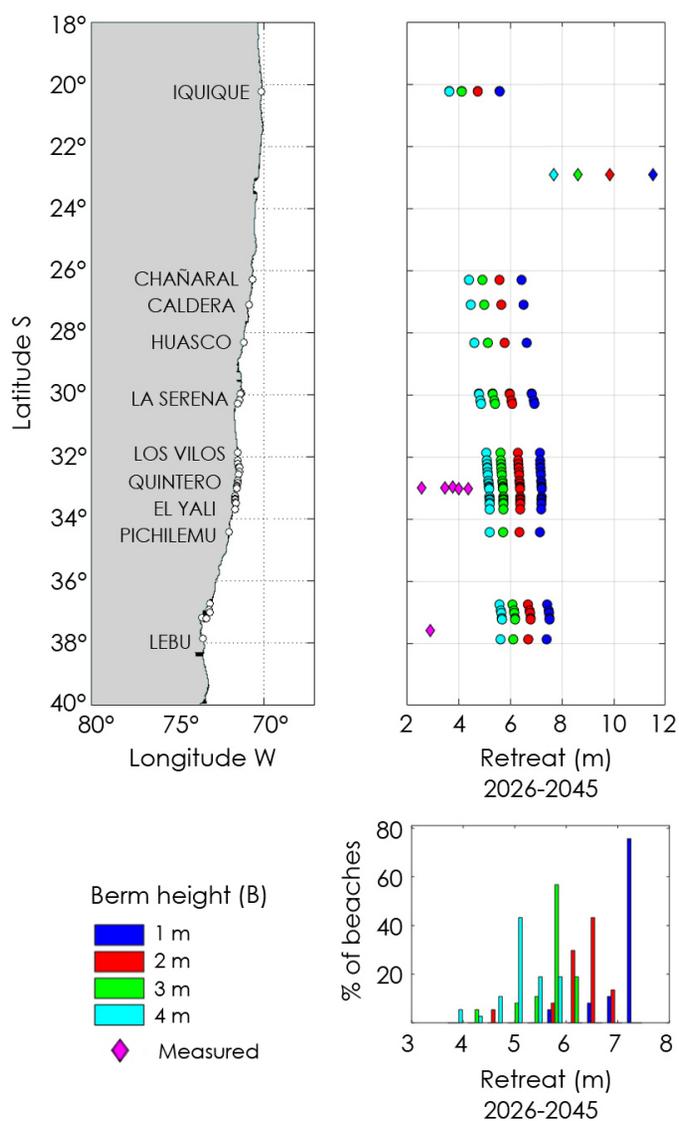
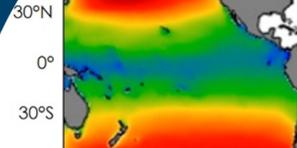


Figura 15: Retroceso de la línea de costa (*retreat*), en metros, debido al efecto conjunto de aumento del NMM y cambios en el oleaje para mediados de siglo (2026-2045) respecto del período histórico. La erosión se calcula para tamaños de sedimento de $d_{50} = 0.3$ mm y diferentes alturas de la berma B. El panel inferior representa un análisis de frecuencia de los paneles superiores (adaptado de Winckler *et al.*, 2023)

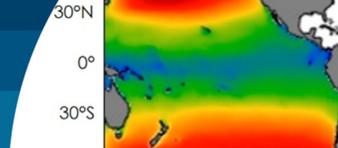
Conclusión

La presente metodología para integrar el cambio climático en el diseño de infraestructura costera y portuaria considera etapas (1 y 2) que exceden las capacidades técnicas y plazos de respuesta de las consultoras chilenas, pues su consecución exige tiempos de preproceso, proceso y postproceso que exceden los plazos asociados a consultorías de la DOP. Por esta razón, se recomienda que el Estado viabilice la disposición de las proyecciones de las variables (vientos, oleaje, marea meteorológica y nivel medio del mar) en nodos oceánicos distanciados cada 1° a 2° de latitud, de modo que sean las consultoras las que, con metodologías convencionales, puedan efectuar la transformación de dichas variables al sector de estudio.



Referencias

- Baldan, D., Coraci, E., Crosato, F., Ferla, M., Bonometto, A. and Morucci, S. (2022). Importance of non-stationary analysis for assessing extreme sea levels under sea level rise. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **22**(11), 3663-3677
- Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H. and Winckler, P. (2017). Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database. *Ocean Modelling* **116**, 16–32
- Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., Aguirre, C., Valdivia, J., Parra, C., Méndez, L., Contreras, C., Winckler, P. et al. (2016). Atlas de Oleaje de Chile. Universidad de Valparaíso: Valparaíso, Chile, ISBN: 978-956-368-194-9. <https://oleaje.uv.cl/descargas.html>
- Bruun, P. (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division* **88**(1), 117-130
- CCG-CIGIDEN (2024). Evaluación de término plan de adaptación y mitigación de los servicios de infraestructura al cambio climático 2017-2022. Reporte Final, 15 de enero de 2024.
- CEPAL (2015). Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe. Dinámicas, tendencias y variabilidad climática. http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3955/4/S1500961_es.pdf
- Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., Gregory, J.M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer D. and Unnikrishnan, A.S. (2013). Sea Level Change. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, vol. 13, 1137–1216. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Esparza, C. (2023). *Extreme sea level projections in Cartagena bay towards mid and end of the twenty-first century under RCP8.5 scenario*. MSc thesis, P. Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Gironás, J. y Yáñez, G. (2021). Impactos y adaptación en infraestructura. En *Cambio Climático en Chile. Ciencia, Mitigación y Adaptación*. Castilla, J.C. et al. (eds.). Centro de Cambio Global UC. Santiago, Chile, <https://ediciones.uc.cl/cambio-climatico-en-chile-ciencia-mitigacion-y-adaptacion-config-9789561424227.html>
- Haasnoot, M., Brown, S., Scussolini, P., Jimenez, J.A., Vafeidis, A.T. and Nicholls, R.J. (2019). Generic adaptation pathways for coastal archetypes under uncertain sea-level rise. *Environmental Research Communications* **1**(7), 071006.
- IPCC (2021). Summary for policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3-34, <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IPCC (2019). IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. H.O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, <https://doi.org/10.1017/9781009157964>
- IPCC (2013). Summary for policymakers. 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, UK and New York, NY, USA.
- Lemos, G., Menendez, M., Semedo, A., Camus, P., Hemer, M., Dobrynin, M. and Miranda, P.M. (2020). On the need of bias correction methods 776 for wave climate projections. *Global and Planetary Change* **186**, 103109



- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G. and Aarninkhof, S. (2018). The state of the world's beaches. *Scientific Reports* **8**: 6641
- Martínez, C., Winckler, P., Agredano, R., Esparza, C., Torres, I. and Contreras-López, M. (2021). Coastal erosion in sandy beaches along a tectonically active coast: The Chile study case. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* **46**(2), 250-271
- Melo, O., Samaniego, J., Carbonell, J.F., Jadrijevic, M. y Briceño, S. (2023). Costos asociados a la inacción frente al cambio climático en Chile: síntesis, Documentos de Proyectos (LC/TS.2023/45), Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL, Santiago, Chile, https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/48880/1/S2300039_es.pdf
- Mentaschi, L., Vousdoukas, M., Voukouvalas, E., Sartini, L., Feyen, L., Besio, G. and Alfieri, L. (2016). The transformed-stationary approach: a generic and simplified methodology for non-stationary extreme value analysis. *Hydrology and Earth System Sciences* **20**(9), 3527-3547
- MOP y MMA (2017). Plan de adaptación y mitigación de los servicios de infraestructura al cambio climático 2017-2022, <https://biblioteca.digital.gob.cl/items/0c06899e-8b85-46bd-b8ee-566de6649d94>
- Morim, J., Trenham, C., Hemer, M., Wang, X., Mori, N., Shimura, T., Timmermans, B., Mentaschi, L., Casas-Prat, M., Semedo, A., Dobrynin, M., Camus, P., Bricheno, L., Feng, Y. and Erikson, L. (2019). COWCLIP2.0 ocean wave climate and extremes statistics from CMIP5-driven wave models. Australian Ocean Data Network. <https://dx.doi.org/10.26198/5d91a9d00d60d>
- Muis, S., Apecechea, M.I., Dullaart, J., de Lima Rego, J., Madsen, K.S., Su, J., Yan, K. and Verlaan, M. (2020). A high-resolution global dataset of extreme sea levels, tides, and storm surges, including future projections. *Frontiers in Marine Science* **7**:263. doi:10.3389/fmars.2020.00263/full
- PIANC (1995). Criteria for movements of moored ships in harbours. A Practical Guide. Report of Working Group no. 24. Supplement to Bulletin no. 88. Brussels, Belgium
- PPEE (1999, 2007). Recommendations for the design of the maritime configuration of ports, approach channels and harbour basins. ROM 3.1-99. English version 2007. Puertos de Estado, Madrid, España.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H. et al. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* **91**(8), 1015-1058
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A. and Sallenger Jr, A.H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering* **53**(7), 573-588.
- USACE (2006). Coastal Engineering Manual. Chapter 5, Fundamentals of Design. Part VI. USA
- Winckler, P., Esparza, C., Mora, J., Agredano, R., Contreras-López, M., Larraguibel, C., Melo, O. Contreras (2022a). Impactos del cambio climático en las costas de Chile. En *Hacia una Ley de Costas en Chile: bases para una Gestión integrada de Áreas Litorales*. Martínez, C. et al. (eds). Serie GEOLibro N°38, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago. <https://geografia.uc.cl/destacados/2543-ya-disponible-geolibro-hacia-una-ley-de-costas-en-chile-bases-para-una-gestion-integrada-de-areas-litorales>
- Winckler, P., Esparza, C., Mora, J., Melo, O. Bambach, N. Contreras-López, M. and Sactic, M.I. (2022b). Impacts in ports on a tectonically active coast for climate-driven projections under the RCP 8.5 scenario: 7 Chilean ports under scrutiny. *Coastal Engineering Journal* **64**(3), 387-405 <https://doi.org/10.1080/21664250.2022.2088194>
- Winckler, P., Agredano, R., Esparza, C., Melo, O., Sactic, M.I. and Martínez, C. (2023). Projections of beach erosion and associated costs in Chile. *Sustainability* **15**(7), 5883. <https://doi.org/10.3390/su15075883>