

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA OPERACIÓN E  
INFRAESTRUCTURA DE LOS PUERTOS DE CHILE**

**PATRICIO WINCKLER G.<sup>1,2,3</sup>**  
**CÉSAR ESPARZA A.<sup>4</sup>**  
**JAVIERA MORA G.**  
**MANUEL CONTRERAS-LÓPEZ<sup>1</sup>**  
**OSCAR MELO C.<sup>5</sup>**

**RESUMEN**

Los impactos del cambio climático en la operación e infraestructura de 8 puertos de Chile (Arica, Iquique, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio y San Vicente) se analizan con base en el marco conceptual del IPCC. Se exploran los impactos a) en la operación portuaria mediante el cálculo de las horas y el costo asociado a los cierres de puerto y b) en la infraestructura portuaria mediante el sobrepaso de oleaje, como indicador del daño estructural. Para el impacto operacional, se calcula el clima de oleaje para un período histórico (1985-2004) y para proyecciones de mediados (2026-2045) y fines de siglo (2081-2100) para el escenario RCP 8.5. Los resultados indican que la operatividad portuaria mejorará en algunos puertos y en otros empeorará a mediados de siglo, mientras que, para finales de siglo, todos los puertos mejorarán su operación producto de la migración al sur de la zona de generación de oleaje. En cuanto a los impactos en la infraestructura, se complementan las proyecciones del clima de oleaje con las de aumento del nivel medio del mar. Los resultados indican que a mediados de siglo el sobrepaso aumentará levemente en los puertos del norte mientras que en los del sur se reducirá ligeramente. Sin embargo, para finales de siglo, el sobrepaso aumentará en toda la región, impulsado esencialmente por el aumento del nivel del mar. Esta metodología de evaluación de los impactos puede extrapolarse a otros sistemas productivos, como caletas pesqueras, instalaciones industriales, desaladoras y terminales de regasificación, entre otras.

---

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso - email: patricio.winckler@uv.cl

<sup>2</sup> Centro de Observación Marino para Estudios de Riesgos del Ambiente Costero (COSTAR).

<sup>3</sup> Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN).

<sup>4</sup> Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile.

<sup>5</sup> Centro Interdisciplinario de Cambio Global, Pontificia Universidad Católica de Chile.

# 1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático se entiende como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. Dado que la atmósfera y el océano son sistemas acoplados, el cambio climático altera también el clima oceánico, generando impactos en sistemas costeros como los puertos y su infraestructura. El sistema portuario chileno cumple un rol estratégico para la integración comercial con el mundo pues transfiere el 90% del comercio internacional (Morales et al., 2020). Además de las empresas portuarias, existen decenas de concesionarias, puertos privados, instalaciones industriales y puertos pesqueros que conforman el sistema. Durante los episodios de mal tiempo, los puertos se cierran para garantizar la seguridad de las naves, carga y operadores. Esta facultad de la Autoridad Marítima comprende una serie de medidas que incluyen la suspensión total o parcial del tránsito y/o actividades marítimas, de remolcadores y de los botes salvavidas (Marítimo Portuario, 2017) que implican pérdidas económicas de millones de dólares a los actores de la cadena logística en puertos altamente complejos. Por ejemplo, De acuerdo a la Cámara Marítima y Portuaria de Chile, el costo de inactividad por 585 días de cierres debidos a marejadas entre julio de 2020 y julio de 2021 fue de US\$ 345,5 millones para todo el sistema portuario chileno, costo que considera el cese de operaciones de los puertos, de las navieras, del embarcador y los efectos en los transportistas y destinatario (El Mercurio, 2021).

La Tabla 1 muestra que, entre los años 2008 y 2018, se registraron 17.153 horas de cierres en siete puertos principales, valor que, multiplicado por el costo por hora de cierre de cada puerto, se traduce en una pérdida del orden de ~US\$ 12 millones anuales por concepto de tarifas de atraque y servicio a la carga en el muelle (esto es, sin considerar los efectos sobre la cadena logística del transporte). Antofagasta, seguido de Arica e Iquique, fueron los puertos más afectados, aunque como se ha divulgado en forma profusa en los medios, en los últimos años, San Antonio ha experimentado un crecimiento notorio en cierres de puerto por marejadas. Ejemplo son las 1.842 horas sin atención de naves producto de cierres entre mayo de 2020 y 2021 (Portal Portuario, 2021).

El primer esfuerzo sistemático por comprender el impacto del clima futuro en los puertos se presenta en el estudio Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile<sup>6</sup> (MMA, 2019). El estudio evaluó el riesgo de inoperatividad a medio siglo (2026-2045) para el escenario RCP 8.5 respecto de una ventana histórica (1985-2004) en los mismos puertos analizados en este texto. El estudio identifica, asimismo, 171 terminales marítimos y 475 elementos de infraestructura costera<sup>7</sup> que podrían ser vulnerables ante el impacto combinado de las marejadas y el aumento del nivel medio del mar. Por otra parte, el Atlas de Riesgos Climáticos<sup>8</sup> (MMA, 2020; Winckler et al., 2020a) analiza las cadenas de impacto para 546 caletas pesqueras y los 8 puertos analizados, con el objetivo de jerarquizar aquellas unidades que requieren mayor atención. Las lecciones recogidas de estos estudios se extienden para el escenario RCP 8.5 para fines de siglo (2081-2100) en este documento.

---

<sup>6</sup> <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/publicaciones-destacadas/>

<sup>7</sup> <https://ide.mma.gob.cl/> bajo el link “cambio climático”.

<sup>8</sup> <https://arclim.mma.gob.cl/>

Año	Arica	Iquique	Antofagasta	Coquimbo	Valparaíso	San Antonio	San Vicente	Total
2008	0	0	0	0	0	6	11	17
2009	31	31	0	0	0	6	0	68
2010	445	19	992	0	0	87	6	1.549
2011	355	65	459	66	0	208	0	1.153
2012	58	127	537	0	10	0	14	746
2013	161	0	842	0	0	5	0	1.008
2014	184	208	1.563	0	0	5	55	2.015
2015	246	288	1.726	100	41	0	22	2.423
2016	599	155	2.056	4	25	7	0	2.846
2017	0	44	2.262	0	0	0	0	2.306
2018	1.329	160	1.533	0	0	0	0	3.022
<b>2008-2018</b>	<b>3.408</b>	<b>1.097</b>	<b>11.970</b>	<b>170</b>	<b>76</b>	<b>324</b>	<b>108</b>	<b>17.153</b>
Pérdidas Anuales (miles US\$)	2.029,9	283,4	9.315,4	16,1	206,9	59,9	60,0	11.971,9

Tabla 1: Cantidad de horas de cierres de puerto obtenida de SERVIMET (2008 a 2014) y certificados de cierres de puertos (2015 a 2018). En la última fila se muestran las pérdidas anuales por cierres de puertos, según Winckler et al. (en elaboración).

## 2 MARCO CONCEPTUAL

En la evaluación del riesgo asociado al cambio climático, es usual utilizar aquella propuesta por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2014), que se basa en la evaluación del peligro o amenaza, la exposición y la vulnerabilidad (Figura 2). La exposición corresponde a 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. La amenaza es un proceso físico que puede ocasionar impactos a la salud, daños a la propiedad, pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales, económicos o ambientales. La vulnerabilidad es la propensión de un sistema a ser afectado negativamente y se divide en la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación. Finalmente, el riesgo contempla estas tres componentes y su definición específica depende del sistema de interés y la disciplina desde la cual se evalúe.



Figura 2: Modelo conceptual del riesgo de cambio climático (IPCC, 2014).

En este estudio, el análisis de las amenazas se centra en los cambios de las variables relevantes entre un período histórico y proyecciones a diferentes horizontes. Se modela el nivel del mar medio mensual (NMM) y el clima de oleaje cada 3 horas para el período histórico (1985-2004) y proyecciones a medio siglo (2026-2045) y fin de siglo (2081-2100) a partir de varios Modelos de Circulación General (GCM) que reproducen los procesos físicos, termodinámicos y químicos del sistema climático. La Figura 3 ilustra, a modo de ejemplo, el procedimiento de cálculo para la generación de oleaje a partir de 6 GCMs, procedimiento que se repite para el NMM con 20 GCMs (MMA, 2019, Vol.2).

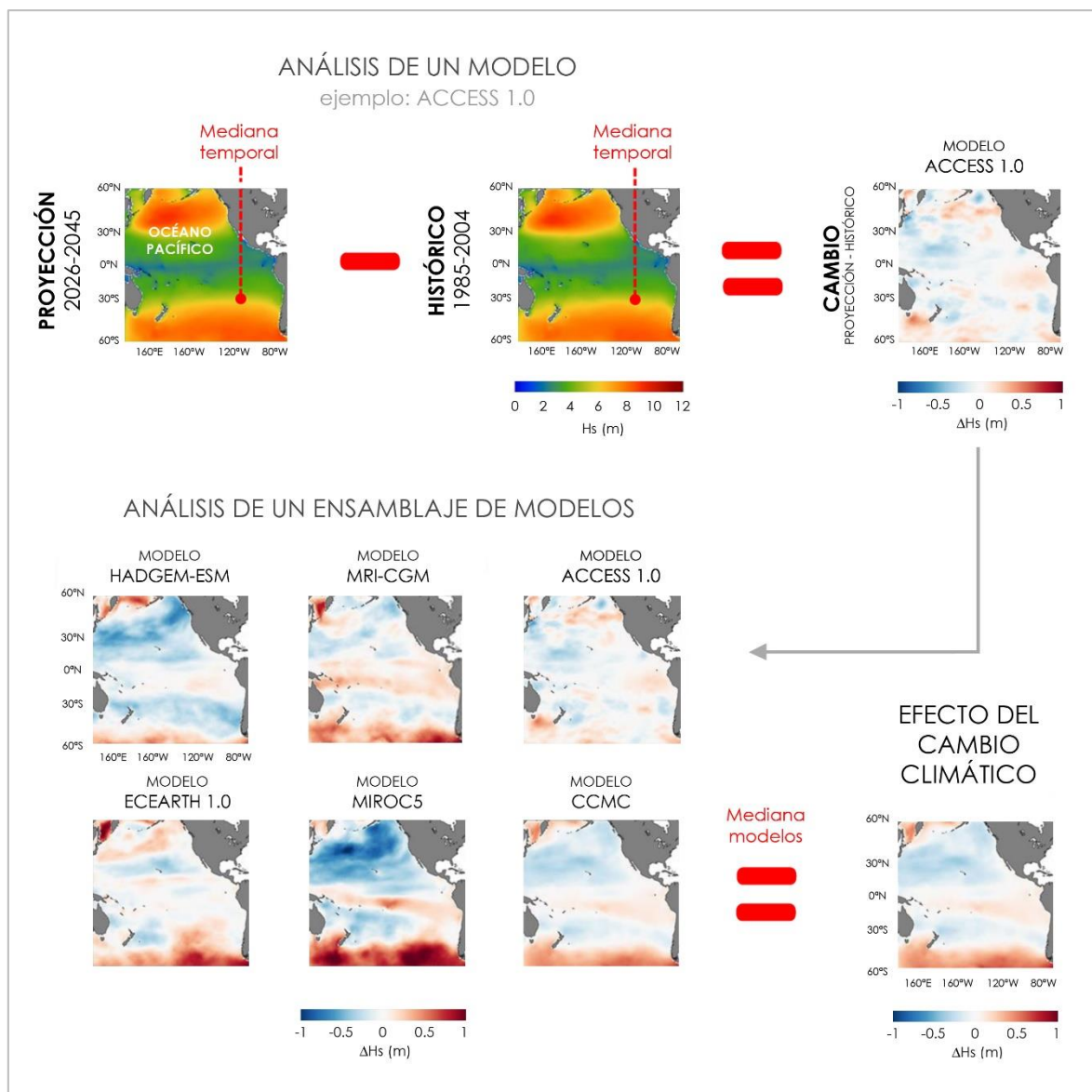


Figura 3: Cálculo del efecto del cambio climático del oleaje para el escenario RCP 8.5. Arriba: mediana temporal de la altura significativa  $H_s$  en el Océano Pacífico del GCM ACCESS 1.0 para el período histórico (1985-2004), la proyección (2026-2045) y la diferencia atribuida al cambio climático. Abajo: diferencia entre medianas para 6 GCMs, a partir de la cual se calcula la mediana entre modelos.

Los GCM se encuentran bajo el *Coupled Modeling InterComparison Project 5* CMIP5 (Taylor et al., 2012), proyecto que permite que diversos centros efectúen simulaciones considerando la estandarización de metadatos, condiciones iniciales, parametrizaciones físicas y trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero (*Representative Concentration Pathways*, RCP) definidas sobre supuestos de crecimiento de población, producción de energía, alimentos y uso de la tierra (IPCC, 2014). El escenario se nombra según el forzamiento radiativo alcanzado el año 2100, ej.  $\sim 8.5 \text{ W/m}^2$  para el escenario RCP8.5. En este estudio se utiliza el escenario de emisiones RCP8.5, correspondiente a una condición *business as usual*, en ausencia de una rigurosa mitigación climática.

### 3 PROYECCIÓN DEL OLAJE

Las proyecciones del clima de oleaje bajo un contexto de cambio climático (Figura 3) se efectúan a partir de los campos de viento superficiales globales y concentraciones de hielo marino disponibles en seis GCM correspondientes al escenario RCP 8.5. Estas variables se usan para forzar el modelo espectral WWIII (Tolman et al., 2019) que se basa en un balance entre la evolución de la energía y términos asociados al crecimiento y disipación del oleaje (Ardhuin et al., 2010) en todo el Océano Pacífico. El oleaje en cada puerto se calcula para cada GCM tanto para el período histórico como para las proyecciones a medio y fin de siglo utilizando el modelo numérico SWAN (Massey et al., 2011) que permite caracterizar el patrón de oleaje local. Como resultado de este proceso, se obtienen patrones de propagación de oleaje local y 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 y otros parámetros como el periodo y la dirección. La Figura 4 muestra, a modo de ejemplo, un modelo de transformación de oleaje desde aguas profundas al puerto de Antofagasta.

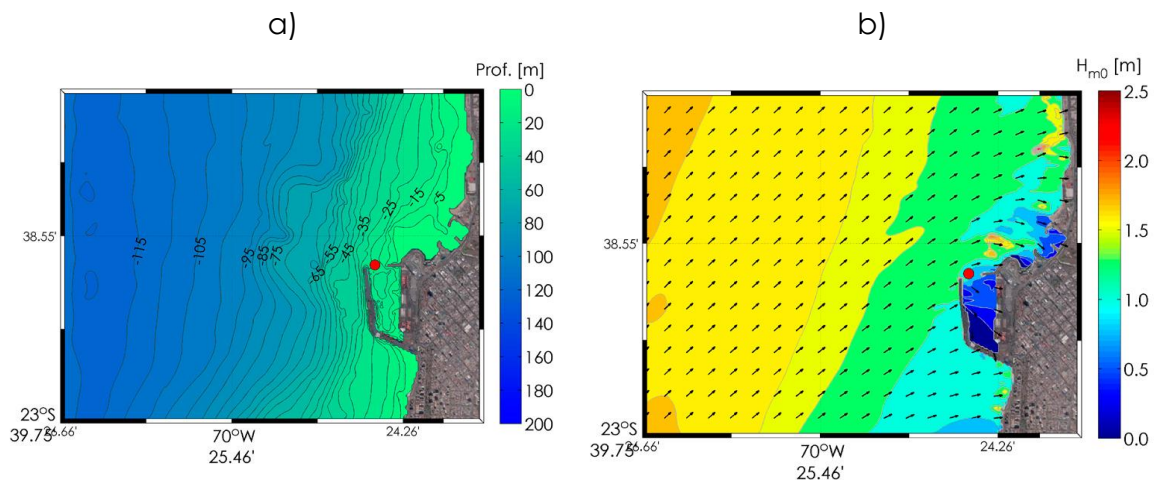


Figura 4: Modelo típico de transformación de oleaje desde aguas profundas al puerto de Antofagasta. Se muestra a) batimetría con curvas de nivel y b) el patrón de altura significativa y dirección de oleaje. En el nodo rojo se calcula la estadística de oleaje incluida en la Figura 5.

La estadística se calcula en forma independiente para cada GCM en cada nodo representativo (nodo rojo, Figura 4) y luego requiere de una corrección por sesgo (Lemos et al., 2020), de modo de que para el período histórico (1985-2004) exista coincidencia entre todos los GCM con un modelo validado. A modo de ejemplo, la Figura 5 muestra la estadística de altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) en Antofagasta, expresada mediante curvas de excedencia, para el período histórico y las proyecciones a medio y fines de siglo (a) previo y (b) luego de aplicada la corrección por sesgo. Notar que la corrección por sesgo implica que, para el período histórico, todas las curvas coinciden con un modelo validado, en este caso el CFSR. Este análisis puntual en Antofagasta se realiza para los 8 puertos analizados.

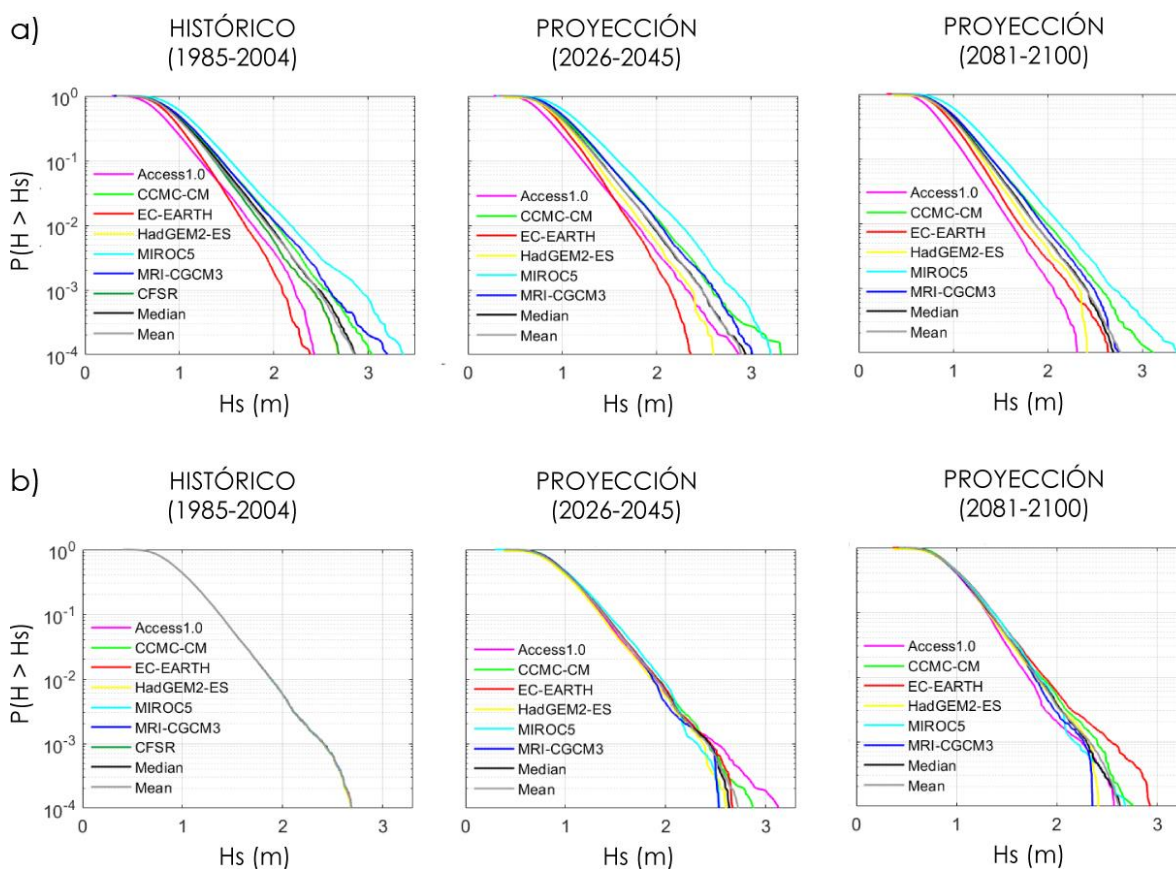


Figura 5: Curvas de excedencia de los GCM y la mediana de la altura significativa ( $H_s$ ) para el período histórico (1985-2004), la proyección a medio siglo (2026-2045) y fin de siglo (2081-2100) en Antofagasta. Se muestran los modelos sesgados en (a) y los modelos corregidos por sesgo en (b), aplicando la metodología de (Lemos et al., 2020). La mediana y la media, tanto histórica como para las proyecciones, se incluyen en líneas negra y verde oscuro, respectivamente.

#### 4 OPERATIVIDAD PORTUARIA

Para calcular el impacto económico de los cierres futuros de puertos, se calcula el porcentaje de tiempo que un sitio de atraque no está disponible para una determinada 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. A partir de las Recomendaciones de Obras Marítimas 3.1-99 (PPEE, 1999), se utilizan valores límites de  $H_s^{lim} = 1,5$  m para casos donde el oleaje pega por la banda al casco del buque y  $H_s^{lim} = 2,0$  m para aquellos donde este pega por la proa o popa. Estos valores corresponden a un buque portacontenedores, que es el que atraca con mayor frecuencia según la estadística de buques atendidas (MMA, 2019, Vol.5). 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.

La Figura 6 ilustra los cambios en el *downtime* entre el período histórico y las proyecciones a mediados y fines de siglo para los umbrales definidos. Para mediados de siglo, 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 son menores pues se traducen en aumentos o reducciones de *downtime* bajo las 200 horas anuales.

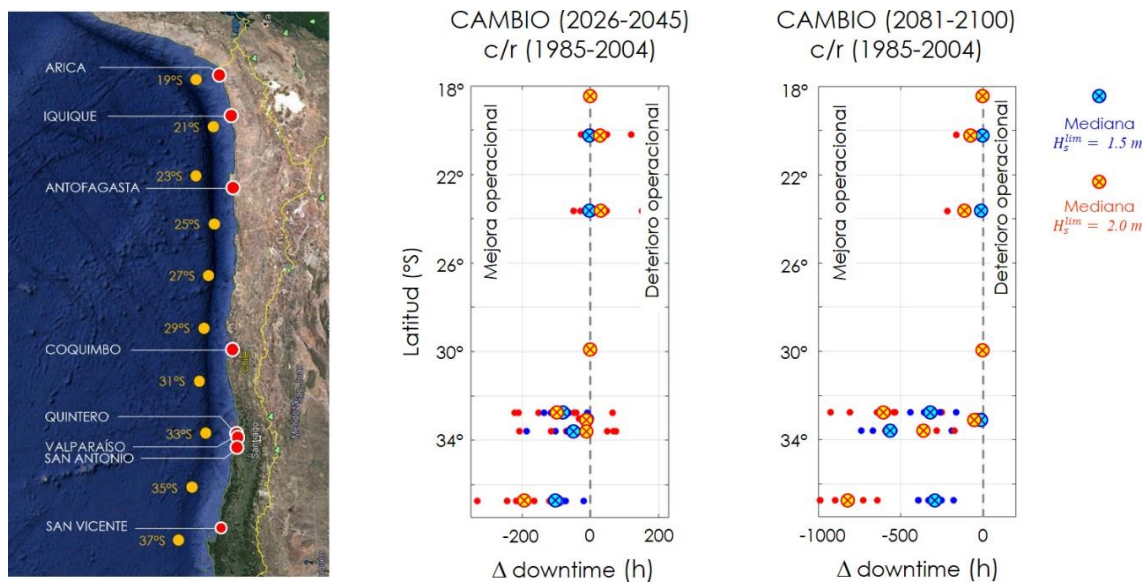


Figura 6: Cambios en el *downtime* operacional (en horas/año) entre el período histórico (1985-2004) y la proyección a medio siglo (2026-2045) y fines de siglo (2081-2100) para umbrales de operación asociados a un buque portacontenedores, definidos por  $H_s^{lim} = 1.5$  m para oleaje pegando por la banda (puntos rojos simbolizan cada GCM y cruz la mediana entre los modelos) y  $H_s^{lim} = 2.0$  m para oleaje pegando por la proa o popa (puntos azules simbolizan cada GCM y cruz la mediana entre los modelos). El mapa muestra los puertos analizados en este estudio en círculos rojos. Los círculos amarillos son los puntos en aguas profundas a partir de los cuales se transforma el oleaje a los puertos analizados.

El *downtime* se reducirá para la proyección a fin de siglo en prácticamente todos los puertos, lo que generará una mejora en las condiciones operativas. Esta tendencia se atribuye, a modo

de hipótesis, a la migración al sur del Anticiclón Permanente del Pacífico Sur (Rykaczewski et al., 2015, Winckler et al., 2020b) y por ende de la zona de generación de oleaje. Así, al ser el oleaje generado más hacia el sur y a más distancia de los sitios analizados, se produce un decaimiento en la altura de ola y un giro al sur, que se traduce en un mayor abrigo de aquellos puertos orientados hacia el norte.

Para calcular el impacto económico se multiplican los aumentos (reducciones) de *downtime* por el valor económico del tiempo perdido (ganado), utilizando las tarifas de cobro por i) hora de atraque y metros de eslora y ii) movimiento de carga, obtenidas de información pública de empresas portuarias del Estado. Para el primer cobro, se calcula la eslora promedio a partir de las Toneladas de Registro Grueso (TRG) y el número de naves recaladas en el año 2017 en cada puerto según la autoridad marítima (DIRECTEMAR, 2018), valor que es transformado en TRG promedio y luego a eslora utilizando tablas de las ROM 3.1-99 (PPEE, 1999). Para el cálculo del cobro por movimiento de carga, se suman los volúmenes de importación y exportación de cada zona portuaria según autoridad marítima para 2018 a partir de datos del Servicio Nacional de Aduanas, y son asignados a cada puerto en forma proporcional a partir del número de sitios de cada uno. Los detalles se incluyen en Winckler et al. (en elaboración).

El análisis en los puertos analizados muestra que en ambas proyecciones existirá una reducción de las pérdidas operacionales por cierres de puerto. De hecho, sólo algunos puertos tendrán pérdidas para mediados de siglo y reducirán el *downtime* a finales de siglo, si todas las demás variables permanecen constantes. En forma agregada, para mediados de siglo se espera una reducción en la pérdida por *downtime* de US\$ 14,9 millones anuales respecto del período histórico y para finales de siglo, una reducción en la pérdida neta de US\$ 35,5 millones anuales por conceptos de tarifas atraque y movimiento de carga en el muelle.

Estos cálculos, sin embargo, no consideran pérdidas por el hecho que cuando el puerto opera con holguras, se podrían recuperar estos servicios con posterioridad. Tampoco se consideran servicios como el practicaaje, el almacenamiento en tierra y aquellos que se generan en la cadena logística del transporte o el uso de sistemas de alerta temprana de marejadas (e.g. <https://marejadas.uv.cl>), que en conjunto mejorarían las condiciones operacionales. Asimismo, se excluye el análisis diferenciado por muelle, el tipo de nave atendida, las características de los equipos utilizados en las operaciones, el uso de modelos de agitación portuaria y de buque atracado, la proyección del movimiento de naves o el uso de nuevas tecnologías de atraque dinámico –como la tecnología de amarre *shore tensión* utilizada en Arica y Puerto de Ventanas-, que permiten las maniobras en condiciones de oleaje más severas.

## **5 SOBREPASO DE OLEAJE SOBRE ESTRUCTURAS**

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 y edificaciones además de la seguridad de peatones y vehículos. La Figura 7 muestra diferentes tipos de impactos asociados al sobrepaso durante la marejada del 8 de agosto de 2015 en Valparaíso. (Winckler et al., 2017, Carvajal et al., 2017).





Figura 7: Sobrepaso generado por la marejada del 8 de agosto de 2015 en el sector costanera, a un costado del puerto de Valparaíso (The Clinic).

El sobrepaso incorpora variables asociadas al oleaje, al nivel del mar y a las propiedades dinámicas y geométricas de una defensa costera. Esta variable, expresada como el caudal medio por unidad de ancho de defensa costera  $q$ , en  $\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ , se calcula mediante la fórmula empírica de Owen (USACE, 2006; p. VI-5-24):

$$\frac{q}{gH_sT_{om}} = a \exp\left(-b \frac{R_C}{H_s} \sqrt{\frac{s_{om}}{2\pi}} \frac{1}{\gamma_r}\right),$$

donde  $H_s$  es la altura significativa y  $T_{om}$  es el período medio de oleaje. 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  $L_{om} = gT_{om}^2/2\pi$ . Para todos los puertos analizados, se asume un rompeolas idealizado con 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 (o cota de la defensa) de  $R_C = 8$  m sobre el nivel medio del mar para el período histórico, y de  $R'_C = R_C - \Delta z$ , para las proyecciones, donde  $\Delta z = +0.14$  m y  $\Delta z = +0.58$  m corresponde al aumento del nivel medio del mar para mediados y fin de siglo, respectivamente (Figura 7).

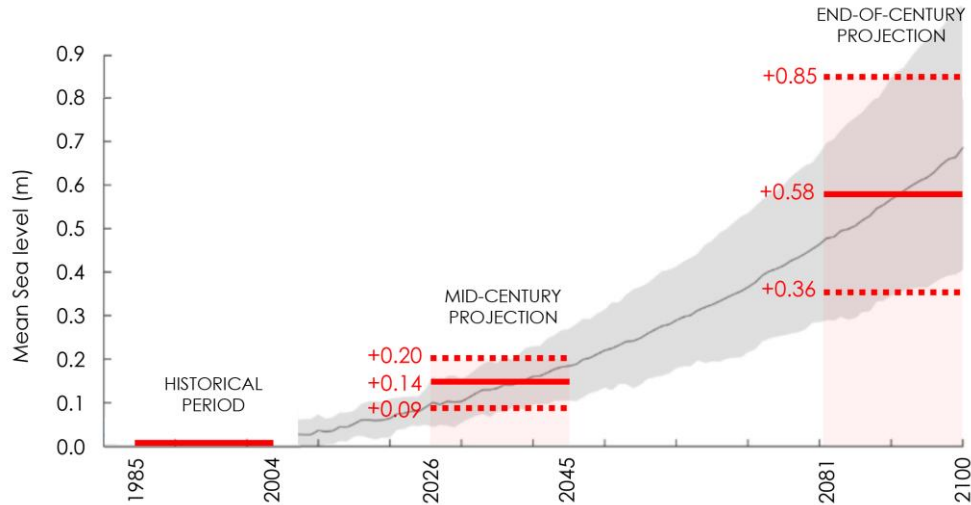


Figura 7: Aumento del nivel medio del mar y cambios para mediados (2026-2045) y fines de siglo (2081-2100) respecto del período histórico (1985-2004) en Antofagasta. La línea negra representa la mediana y la sombra gris el rango de 20 GCM (MMA, 2019, Vol.2).

La Figura 8 muestra los resultados del sobrepaso histórico y los cambios para fines de siglo (2081-2100) en los puertos analizados. Se observa que el sobrepaso está altamente influenciado por el abrigo natural de cada puerto, como los casos de Coquimbo y Valparaíso, que se ubican en sectores protegidos dentro de bahías, lo que explica el bajo sobrepaso.

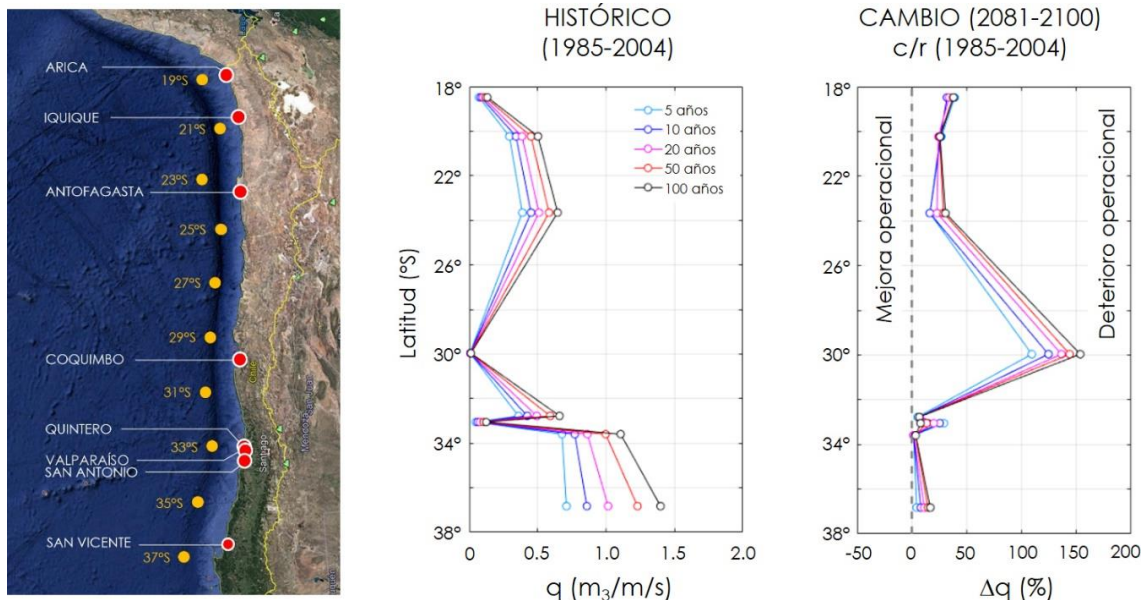


Figura 8: Sobrepaso asociado a diferentes períodos de retorno para el período histórico (1985-2004) y los cambios de dicha variable para fines de siglo (2081-2100).

Para fines de siglo, en todos los puertos se incrementará el sobrepaso producto principalmente, del aumento del nivel medio del mar. A excepción de Coquimbo -cuyo incremento relativo es de ~150%- los puertos del norte experimentarán aumentos significativos del orden de 20% a 40%, lo que redundará en mayores daños en infraestructura y riesgos a la seguridad de peatones y vehículos. Los puertos del centro-sur experimentarán un incremento menor pero no por ello despreciable. Estos cálculos no consideran las futuras obras de abrigo como las contempladas en San Antonio (HR Wallingford, 2018),

## 6 CONCLUSIONES

El análisis de los impactos del cambio climático en los principales puertos de Chile muestra que la operatividad mejorará en algunos puertos y en otros empeorará a mediados de siglo, mientras que, para finales de siglo, todos los puertos mejorarán su operación producto de la migración al sur de la zona de generación de oleaje. En cuanto a los impactos en la infraestructura, a mediados de siglo el sobrepaso aumentará levemente en los puertos del norte mientras que en los del sur se reducirá. Sin embargo, para finales de siglo, el sobrepaso aumentará en toda la región, impulsado esencialmente por el aumento del nivel del mar. A la luz de estos resultados, las empresas portuarias, los concesionarios y el Ministerio de Obras Públicas debieran fortalecer los planes de mantenimiento preventivo y reparación de las obras que serán dañadas con más frecuencia en la medida que avance el siglo.

## REFERENCIAS

- Ardhuin, F., Rogers, E., Babanin, A., Filipot, J.-F., Magne, R., Roland, A., Van Der West-Huysen, A., Queffelec, P., Lefevre, J.-M., Aouf, L., Collard, F. (2010). Semiempirical dissipation source functions for ocean wave Part I: definition, calibration and validation. *J. Phys. Oceanogr.*, 40 (9), 1917–1941.
- Carvajal, M.; Contreras-López, M.; Winckler, P. And Sepúlveda, I. (2017). Meteotsunamis Occurring Along The Southwest Coast Of South America During An Intense Storm. *Pure And Applied Geophysics*. Doi:10.1007/S00024-017-1584-0.
- DIRECTEMAR (2018). Análisis Estadísticas Portuarias. 103 p. Armada de Chile.
- El Mercurio (5 agosto 2021). Puertos suman en total 585 días de cierres en último año y costos llegan a US\$ 345 millones.
- HR WALLINGFORD (2018). HR Wallingford to undertake studies for San Antonio Port Expansion Project. <https://www.hrwallingford.com/news/hr-755%20wallingford-to-undertake-studies-for-san-antonio-port-expansion-project>. Posted on January 11th, 2018.
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 151. Geneva, Switzerland.
- Lemos, G., Menendez, M., Semedo, A., Camus, P., Hemer, M., Dobrynin, M., & Miranda, P. M. (2020). On the need of bias correction methods for wave climate projections. *Global and Planetary Change*, 186, 103109.

Marítimo Portuario (2017). Análisis de la Capacidad Operativa Portuaria Nacional y Requerimientos para Maniobras de Atraque y Desatraque. Informe final. Preparado para el Sistema Empresas Públicas (SEP).

Massey, T., Anderson, M., Smith, J., Gomez, J., Jones, R. (2011). STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model User's Manual for STWAVE, Version 6.0.

MMA (2019) Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile, Documento preparado por: Winckler, P. et al. Santiago, Chile. Disponible en <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/publicaciones-destacadas/> y en un SIG disponible en <https://ide.mma.gob.cl/> bajo la pestaña Cambio Climático.

MMA (2020). ARClím: Atlas de Riesgos Climáticos para Chile. Disponible en <https://arclim.mma.gob.cl/>

Morales, E. Y Winckler, P. Y Herrera, M. (2020). Costas de Chile. Medio natural, gestión costera, ingeniería oceánica y cambio climático. SHOA, CONA y UV. ISBN: 978-956-235-031-0. [www.cona.cl/pub/libros/Costas\\_de\\_Chile.pdf](http://www.cona.cl/pub/libros/Costas_de_Chile.pdf)

PPEE (1999). ROM 3.1-99. Recommendations for the Design of the Maritime Configuration of Ports, Approach Channels and Harbour Basins. English version, 2007. Puertos de Estado.

Portal Portuario (23 Junio, 2021). Cierres de puerto aumentan 160% en los últimos 12 meses en San Antonio.

Ryckaczewski, R. R., Dunne, J. P., Sydeman, W. J., García-Reyes, M., Black, B. A., & Bograd, S. J. (2015). Poleward displacement of coastal 831 upwelling-favorable winds in the ocean's eastern boundary currents through the 21st century. *Geophysical Research Letters*, 42(15), 6424-832 6431.

Taylor, K.E., R.J. Stouffer, G.A. Meehl. (2012). An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2012, 93, 485-498.

Tolman, H., Abdolali, A., Accensi, M. et al (2019). User manual and system documentation of WAVEWATCH III (R) version 6.07.

USACE (2006). Coastal Engineering Manual, Chapter 5, Fundamentals of Design. EM 1110-2-1100 (Part VI).

Winckler, P.; Contreras-López, M.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Agredano, R. Martínez, C. & Torres, I., (2020a). Informe Proyecto ARClím: Zonas Costeras. UV, PUCV, PUC, coordinado por (CR)<sup>2</sup> y CCG-UC para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Valparaíso. Disponible en: <https://arclim.mma.gob.cl/>

Winckler, P., Aguirre, C.; Farías, L., Contreras-López, M. & Masotti, I. (2020b). Evidence of climate-driven changes on atmospheric, hydrological and oceanographic variables along the Chilean continental coastal zone 163(2), 633-652. *Climatic Change*.

Winckler, P., Esparza, C., Mora, J., Melo, O., Bambach, N., Contreras-López, M., Sactic, M.I. (en elaboración). Climate-driven impacts in ports on a tectonically active coast under mid- and end-of-century RCP 8.5 scenario. Article submitted to *Scientific Reports*.