

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

**OLAS DEL FUTURO: UNA BASE DE DATOS DE OLEAJE PARA EL SIGLO XXI**

**SEBASTIÁN CORREA A.<sup>1</sup>**  
**JAVIERA MORA G.<sup>2</sup>**  
**PATRICIO WINCKLER G.<sup>3</sup>**  
**PATRICIO A. CATALÁN<sup>4</sup>**

**RESUMEN**

El proyecto Olas del Futuro (IDeA I+D 2025) tiene como objetivo fortalecer la gestión del riesgo costero en Chile frente al cambio climático mediante el desarrollo de una plataforma pública y metodologías que integran proyecciones climáticas, metodologías de diseño de infraestructura adaptativa y metodologías de cálculo de amenazas por marejadas a utilizar en el marco de la ley 21364 SENAPRED. Específicamente, se presenta una base de datos de proyecciones de oleaje para 20 nodos en aguas profundas frente a la costa chilena y 103 nodos costeros ubicados en áreas con actividad portuaria y asentamientos costeros. Las simulaciones se realizaron utilizando el modelo espectral WAVEWATCH III v6.07 forzado por campos de viento provenientes de modelos climáticos globales (GCM) pertenecientes a los conjuntos CMIP5 y CMIP6, considerando tres horizontes temporales: histórico (1985–2004), mediano plazo (2026–2045) y fines de siglo (2081–2100). A partir de espectros bidimensionales de energía, se derivaron parámetros estadísticos como la altura significativa, el período peak y la dirección peak, aplicando una corrección por sesgo basada en el reanálisis CFSR para mejorar la exactitud de la estadística. Se analizan tanto el clima medio como los eventos extremos, presentando variaciones proyectadas en los parámetros estadísticos y en la energía espectral en aguas profundas. Como ejemplo del potencial impacto costero, se incluye una estimación del runup en la bahía de Valparaíso, a partir de la cual se concluye que el efecto del aumento del nivel medio del mar juega un rol más relevante que el oleaje en explicar la futura inundación de sectores bajos.

---

<sup>1</sup> Encargado del Sistema de Alerta de Marejadas, Escuela de Ingeniería Oceánica, Universidad de Valparaíso, email: sebastian.correa@uv.cl

<sup>2</sup> Investigadora CIGIDEN - email: javiera.mora@cigiden.cl

<sup>3</sup> Profesor Titular, Escuela de Ingeniería Oceánica, Universidad de Valparaíso, Investigador CIGIDEN y COSTAR - email: patricio.winckler@uv.cl

<sup>4</sup> Profesor Titular, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Investigador Principal CIGIDEN – email: patricio.catalan@usm.cl

# 1 INTRODUCCIÓN

El proyecto Olas del Futuro busca implementar una plataforma y metodologías que sean habilitantes para que, en el mediano plazo, Chile cuente con un sistema de soporte de decisiones de riesgo costero que permita gestionar la resiliencia y funcionalidad de ciudades e infraestructura ante inundaciones costeras en un contexto de cambio climático. Específicamente, se plantea como objetivos 1) crear una plataforma de acceso público que compile información histórica y proyecciones climáticas de variables oceanográficas relevantes en el diseño de infraestructura costera y gestión costera, 2) desarrollar una metodología de diseño de infraestructura costera en el contexto del cambio climático a ser implementada por la Dirección de Obras Portuarias y 3) definir una metodología de estimación de amenaza por marejadas que tributará a la elaboración de mapas por SERVIMET, según exige la ley 21364 (SENAPRED).

En el marco del objetivo 1, este trabajo describe la metodología de construcción de una base de datos de oleaje para el siglo XXI, incorporando múltiples escenarios (RCP8.5, SSP2-4.5, SSP5-8.5) y modelos climáticos globales (GCM), con miras a estimar los cambios que caracterizan tanto el clima medio como los eventos extremos asociados a esta variable. La metodología considera la generación de modelos de oleaje en un dominio que cubre el Océano Pacífico, la extracción de data en 20 nodos oceánicos ubicados cada 2° de latitud (Figura 1a) y en 103 nodos costeros ubicados en zonas donde existe infraestructura, portuaria e industrial. A modo de ejemplo, se incluyen resultados de runup en la bahía de Valparaíso (Figura 1b), parámetro crítico para evaluar riesgos de inundación, erosión (Winckler et al., 2023) y daños a infraestructuras (Winckler et al., 2022).

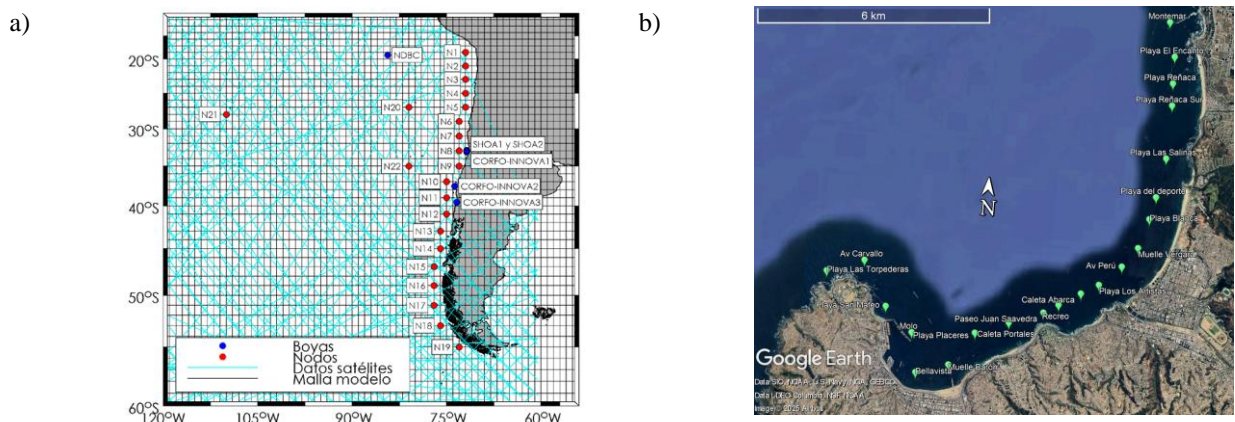


Figura 1. a) Detalle de la malla numérica (cuadrícula gris), track satelitales usados en la validación del modelo WWIII, boyas (azul) y nodos oceánicos (rojo) (Beyá et al., 2017). b) Ejemplo de nodos costeros en la bahía de Valparaíso.

# 2 METODOLOGÍA

Los modelos se generan mediante el modelo numérico espectral de oleaje de tercera generación WWIII v 6.07 (The Wavewatch III Development Group, 2019), cuyo dominio abarca todo el Océano Pacífico, utilizando como forzante los campos de viento a 10 m de altura cada 3 horas y hielo marino diarios de los GCM (Tabla 1), pertenecientes *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) y *Phase 6* (CMIP6). Este modelo ha sido calibrado y validado utilizando datos de altimetría satelital (Beyá et al., 2017; Correa et al., 2025). Las salidas corresponden a espectros bidimensionales, cada 3 horas, para tres horizontes temporales: histórico (1985-2004), medio siglo

(2026-2045) y fines de siglo (2081-2100). A partir de estos espectros se extraen series de tiempo cada 3 horas de los parámetros de resumen de altura significativa ( $H_{m0}$ ), periodo medio y peak ( $T_m$  y  $T_p$ ) y dirección media y peak ( $D_m$  y  $D_p$ ) para los tres horizontes y para los nodos expuestos en la Tabla 2. A los datos históricos de altura significativa de los GCM se les aplica corrección por sesgo (Lemos et al., 2020) utilizando como referencia un hindcast de oleaje forzado a partir de vientos y concentraciones de hielo marino del reanálisis CFSR (Saha et al., 2006) con resolución horaria<sup>5</sup> durante el periodo histórico (Figura 2).

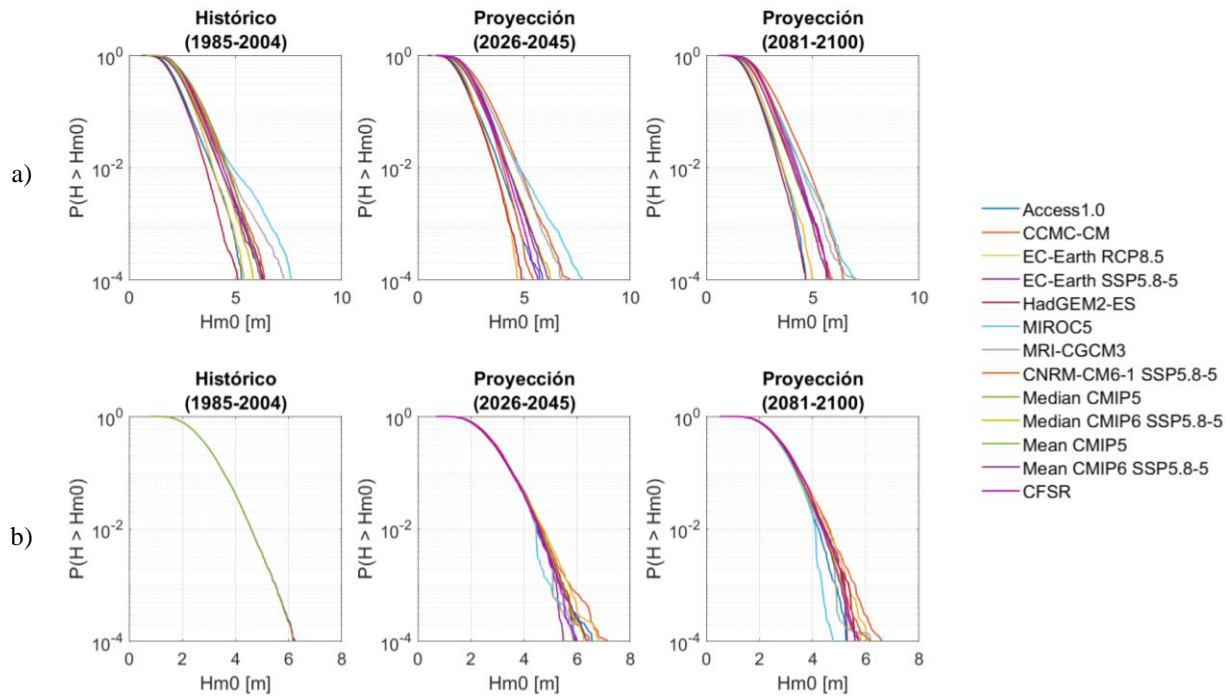


Figura 2. Corrección por sesgos de altura significativa de oleaje. Se muestran las curvas de excedencia de 8 GCM a) sesgados y corregidos b) para el período histórico y proyecciones a medio y fin de siglo en el nodo costa afuera de Valparaíso. Se incluyen la mediana y la media para los GCM del CMIP5 (RCP8.5) y CMIP6 (SSP5-8.5) y la referencia CFSR sobre la cual todos los GCM colapsan en el período histórico producto de la corrección (panel izquierdo, en b). La corrección en el período histórico se aplica entonces a las proyecciones a (paneles central y derecho, en b).

Tabla 1: Modelos de oleaje CMIP5 y CMIP6.

CMIP	Escenario	Modelo	Centro de modelado	Resolución °lat x °lon
CMIP5	RCP8.5	MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute, Japón	1.12148 x 1.125
CMIP5	RCP8.5	ACCESS 1.0	CSIRO-BOM , Australia	1.25 x 1.875
CMIP5	RCP8.5	EC-EARTH	EC-EARTH, Europa	1.1215 x 1.25
CMIP5	RCP8.5	CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti	0.75 x 0.75
CMIP5	RCP8.5	MIROC5	JAMSTEC, Japón	1.4 x 1.4
CMIP5	RCP8.5	HadGEM2-ES	MOHC, Reino Unido	1.25 x 1.875
CMIP6	SSP5-8.5 SSP2-4.5	EC-Earth3	World Climate Research Programme	0.7 x 0.7
CMIP6	SSP5-8.5 SSP2-4.5	CNRM-CM6-1	CNRM/CERFACS	1 x 1

<sup>5</sup> Los GCM no buscan replicar una serie de tiempo histórica que sí se buscan mediante un *hindcast*.

Tabla 2: Nodos oleaje CMIP5 y CMIP6.

Nodo	Lat. °S	Lon. °W	Localidad	Nodo	Lat. °S	Lon. °W	Localidad
1	19.0	71.0	Arica	11	39.0	74.5	Puerto Saavedra
2	21.0	71.0	Iquique	12	41.0	75.0	Bahía Mansa
3	23.0	72.0	Mejillones	13	43.0	76.0	Chiloé
4	25.0	71.5	Taltal	14	45.0	77.0	Archipiélago de los Chonos
5	27.0	72.0	Bahía Inglesa	15	47.0	77.5	Golfo de Penas
6	29.0	72.5	Huasco	16	49.0	77.5	Isla Esmeralda
7	31.0	73.5	Tongoy	17	51.0	77.0	Isla Diego de Almagro
8	33.0	73.0	Valparaíso	18	53.0	76.0	Isla Contreras
9	35.0	74.0	Constitución	19	55.0	74.0	Isla London
10	37.0	75.0	Talcahuano	20	27.0	110.0	Isla de Pascua

La propagación desde aguas profundas a cada nodo costero se realiza mediante la metodología de Domínguez (2011), considerando 348 espectros unitarios producto de la combinación de 29 frecuencias y 12 direcciones. Para cada propagación unitaria se utiliza el modelo espectral SWAN versión 41.51 (Ris et al., 1994), configurado con una resolución espectral de 25 direcciones ( $7.5^\circ$  a  $352.5^\circ$ ) y 30 períodos (2.04 a 29.07 s). La grilla estructurada de cómputo se construye utilizando la herramienta Oceanmesh2d (Roberts et al., 2019) para Matlab con resoluciones de 200x200 m en aguas profundas, 50x50 m a nivel de bahía y 10x10 m cerca de los nodos costeros. La batimetría se obtiene de las cartas náuticas del SHOA y de un levantamiento realizado proporcionado por la Dirección de Obras Portuarias (PRDW, 2018). Cada espectro de oleaje de aguas profundas se multiplica por cada matriz de transferencias, con lo que se obtienen espectros del oleaje y parámetros espectrales ( $H_{m0}$ ,  $T_m$ ,  $T_p$ ,  $D_m$  y  $D_p$ ) en los nodos costeros.

Con los parámetros de resumen se calcula el runup asociado al 2% de excedencia del agua sobre el nivel de agua en reposo ( $R_2$ ), siguiendo la ecuación propuesta por Stockdon (2006) y la pendiente del fondo ( $\beta_f$ ) a nivel local (Figura 1).

$$R_2 = 1.1 \left( 0.35\beta_f\sqrt{H_0L_0} + \sqrt{H_0L_0(0.563\beta_f^2 + 0.004/2)} \right) \quad (1)$$

Donde,  $H_0$  es la altura significativa y  $L_0$  la longitud de onda en aguas profundas. Para obtener  $H_0$  a partir de  $H_{m0}$  en el sitio se eliminan los efectos en planta que se generan al propagar el oleaje hacia la costa (Goda, 2010). Los valores de runup se comparan con y sin las proyecciones de aumento del nivel medio del mar (SLR) respecto al período histórico 1986-2005 (Tabla 3).

Tabla 3: Proyecciones de aumento del nivel medio del mar (SLR) CMIP5 y CMIP6 relativo al período 1986-2005.

Horizonte	CMIP	Escenario	SLR (m)
2026-2045	CMIP5	RCP8.5	+0.1336
2026-2045	CMIP6	SSP245	+0.1237
2026-2045	CMIP6	SSP585	+0.1263
2081-2100	CMIP5	RCP8.5	+0.5563
2081-2100	CMIP6	SSP245	+0.5220
2081-2100	CMIP6	SSP585	+0.6740

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Análisis de clima medio en aguas profundas

Este análisis se presenta a través de diversas representaciones gráficas y estadísticas como tablas de variación y variación porcentual de los parámetros espectrales, calculadas para los seis GCM de CMIP5 y los dos GCM de CMIP6 respecto del periodo histórico (Tabla 4 a 6).

Tabla 4: Variación y variación porcentual de la altura significativa del oleaje CMIP5, nodo 8 Valparaíso.

GCM	Escenario	Histórico [m]	Variación [m]		Variación porcentual	
		1985-2004	2026-2045	2081-2100	2026-2045	2081-2100
Access1.0	RCP8.5	2,53	-0,01	-0,08	-0,44 %	-2,55 %
CMCC-CM	RCP8.5	2,51	0,04	0,02	1,57 %	-0,81 %
EC-Earth	RCP8.5	2,61	0,01	0,01	0,46 %	-0,24 %
HadGEM2-ES	RCP8.5	2,56	-0,03	-0,05	-1,16 %	-0,6 %
MIROC5	RCP8.5	2,52	0,00	-0,09	0,11 %	-3,4 %
MRI-CGCM3	RCP8.5	2,54	0,01	-0,07	0,19 %	-2,81 %
CNRM-CM6-1	SSP5-8.5	2,61	0,02	0,01	0,76 %	0,32 %
EC-Earth	SSP5-8.5	2,61	-0,01	-0,02	-0,29 %	-0,96 %
CNRM-CM6-1	SSP2-4.5	2,61	0,01	0,01	0,40 %	0,46 %
EC-Earth	SSP2-4.5	2,61	0,00	-0,01	-0,19 %	-0,39 %

Tabla 5: Variación y variación porcentual del periodo peak del oleaje CMIP5, nodo 8 Valparaíso.

GCM	Escenario	Histórico [s]	Variación [s]		Variación porcentual	
		1985-2004	2026-2045	2081-2100	2026-2045	2081-2100
Access1.0	RCP8.5	14,06	0,07	0,21	0,48 %	1,01 %
CMCC-CM	RCP8.5	14,58	0,15	0,41	1,05 %	1,92 %
EC-Earth	RCP8.5	14,31	0,16	0,45	1,18 %	2,06 %
HadGEM2-ES	RCP8.5	14,20	0,13	0,34	0,93 %	1,52 %
MIROC5	RCP8.5	14,36	0,23	0,5	1,68 %	1,91 %
MRI-CGCM3	RCP8.5	14,11	0,22	0,26	1,58 %	0,27 %
CNRM-CM6-1	SSP5-8.5	13,85	0,15	0,49	1,09 %	3,51 %
EC-Earth	SSP5-8.5	13,86	0,18	0,34	1,31 %	2,44 %
CNRM-CM6-1	SSP2-4.5	13,85	0,20	0,23	1,46 %	1,64 %
EC-Earth	SSP2-4.5	13,86	0,09	0,22	0,66 %	1,62 %

Tabla 6: Variación y variación porcentual de la dirección peak del oleaje CMIP5, nodo 8 Valparaíso.

GCM	Escenario	Histórico [°]	Variación [°]		Variación porcentual	
		1985-2004	2026-2045	2081-2100	2026-2045	2081-2100
Access1.0	RCP8.5	228,74	-1,32	-3,46	-0,57 %	-0,93 %
CMCC-CM	RCP8.5	224,77	-0,81	-3,94	-0,35 %	-1,34 %
EC-Earth	RCP8.5	228,97	0,12	0,35	0,05 %	0,10 %
HadGEM2-ES	RCP8.5	227,62	-0,34	-1,87	-0,15 %	-0,67 %
MIROC5	RCP8.5	228,74	-1,12	-2,08	-0,49 %	-0,42 %
MRI-CGCM3	RCP8.5	233,72	0,57	0,37	0,24 %	-0,09 %
CNRM-CM6-1	SSP5-8.5	232,85	-0,68	-4,58	-0,29 %	-1,97 %
EC-Earth	SSP5-8.5	234,08	-0,68	-4,94	-0,29 %	-2,11 %
CNRM-CM6-1	SSP2-4.5	232,85	-1,82	-1,55	-0,78 %	-0,67 %
EC-Earth	SSP2-4.5	234,08	-1,88	-0,92	-0,80 %	-0,39 %

La variación por componente direcciones del ensemble de los seis GCM de CMIP5 y los dos GCM de CMIP6 se presenta como mapas de calor en las Figuras 3 y 4, respectivamente, las que fueron calculadas como la mediana de las diferencias (proyecciones menos periodo histórico) de todos los GCM analizados. De ellas se observa un incremento (reducción) de las alturas significativas para las direcciones SSW y SW (WSW, W y WNW) lo que sugiere un giro al sur del oleaje. También se observa un incremento de altura del NW, particularmente en períodos altos, lo que pudiere estar asociado a una mayor energía proveniente del hemisferio norte, en formas de swell. Se observa también que los patrones de cambio son similares para los escenarios RCP8.5 y SSP5-8.5, lo que se debe a que ambos convergen hacia un forzamiento radiativo de  $\sim 8.5 \text{ W/m}^2$  para el año 2100.

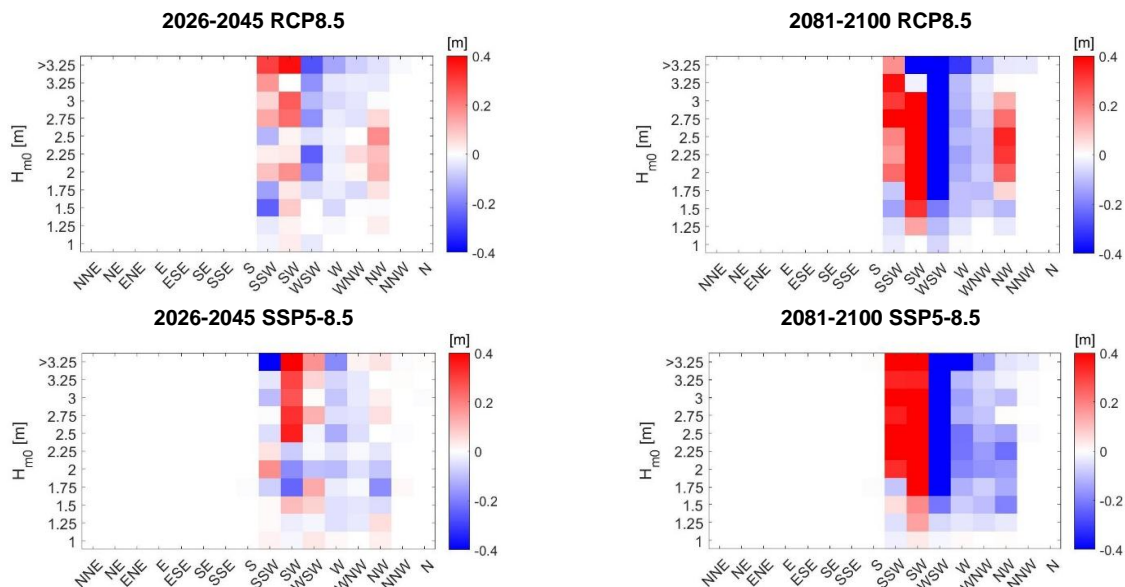


Figura 3. Mapa de calor direccional de la variación del ensemble median de la altura significativa del oleaje para los escenarios RCP8.5 (CMIP5) y SSP5-8.5 (CMIP6). Percentil 50. Nodo 8 Valparaíso.

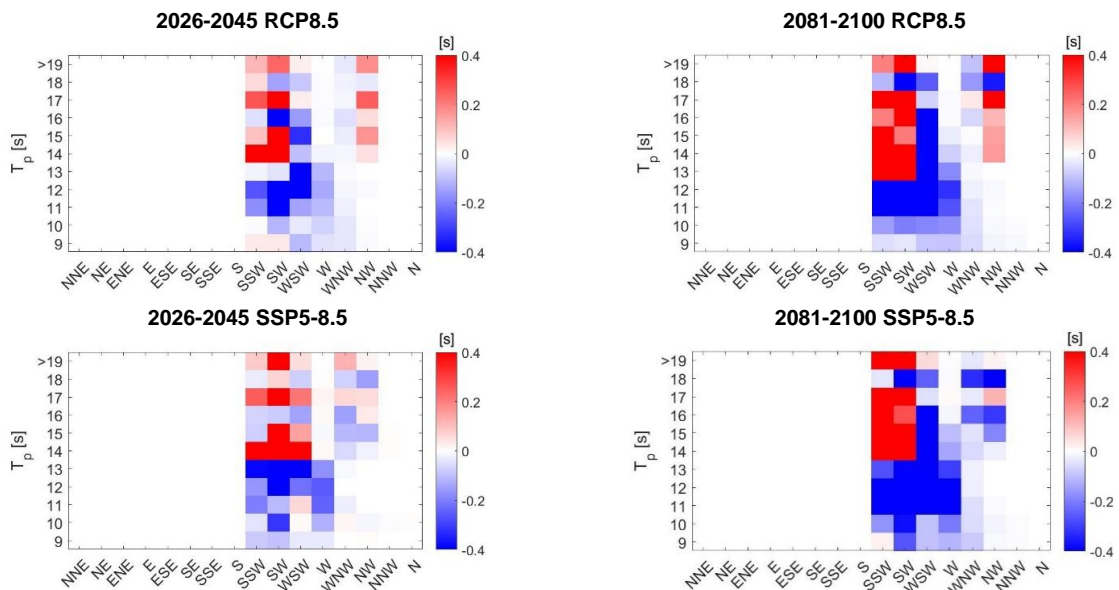


Figura 4. Mapa de calor direccional de la variación del ensemble median del periodo peak del oleaje CMIP6, para los escenarios RCP8.5 (CMIP5) y SSP5-8.5 (CMIP6). Percentil 50. Nodo 8 Valparaíso.

El giro al sur del oleaje frente a Valparaíso se ilustra claramente en los espectros direccionales y las diferencias entre las proyecciones a mediados y fines de siglo respecto del periodo histórico del percentil 50% para los escenarios RCP8.5 y SSP5-8.5 (Figura 5). Se observa también que los patrones de cambio son similares para los escenarios RCP8.5 y SSP5-8.5.

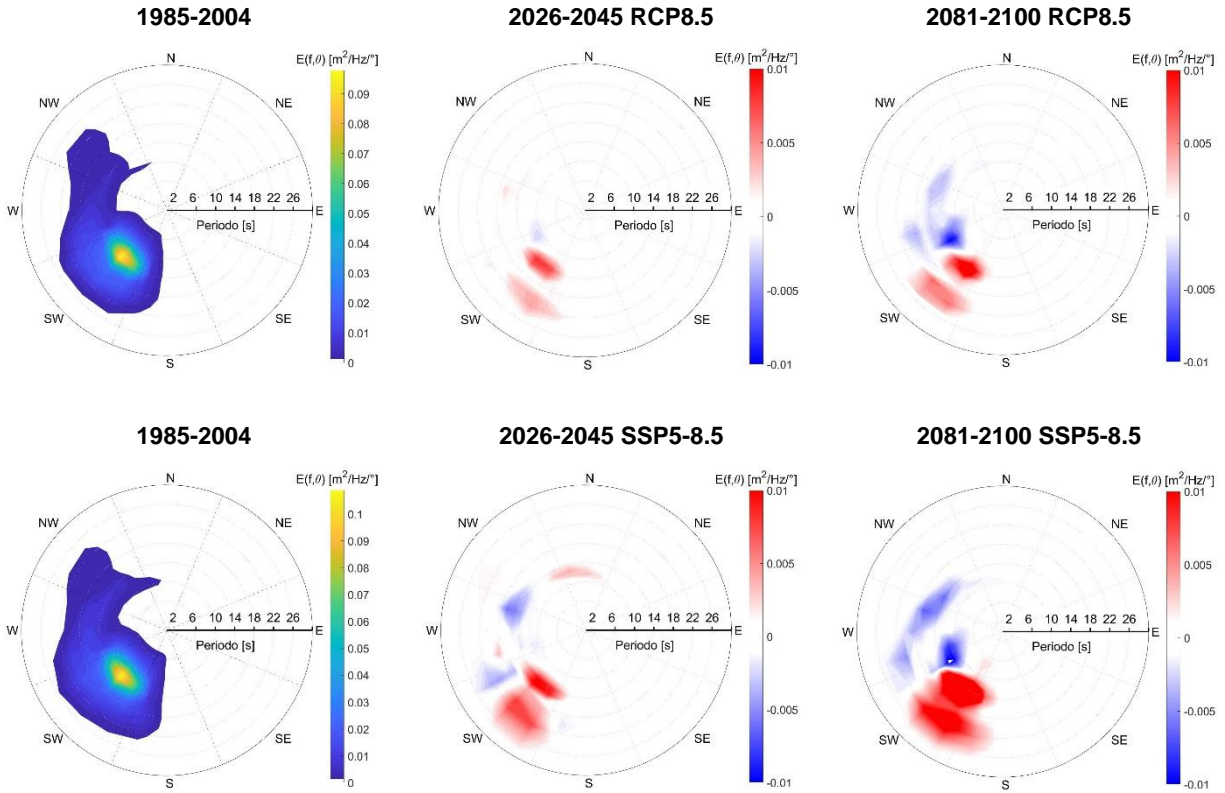


Figura 5. Espectros (izquierda) y variación de la energía del oleaje para los escenarios RCP8.5 (CMIP5) y SSP5-8.5 (CMIP6). Percentil 50. Nodo 8 Valparaíso.

### 3.2 Análisis de clima extremo en aguas profundas

El análisis de clima extremo se efectúa a partir de una muestra seleccionada mediante método de máximos sobre un umbral (POT, *Peak Over Threshold*), considerando una altura significativa umbral correspondiente el percentil 99.5%, asegurando estados de mar independientes con una separación de al menos tres días. Para el cálculo de los periodos de retorno  $T_r$ , se utiliza la Distribución de Pareto Generalizada (GPD), que se usa en combinación con el POT. Los parámetros de forma y escala de la distribución se definen mediante el método de máxima verosimilitud (MLE, *Maximum Likelihood Estimation*), utilizando para ello la función en Matlab *gpfitt*, la cual viene incluida en el *Statistics and Machine Learning Toolbox*.

La Tabla 6 y Tabla 7 ilustra las variaciones porcentuales de la altura significativa para diferentes periodos de retorno para los escenarios RCP8.5 y SSP5-8.5 para medio siglo (2026-2045) y fin de siglo (2081-2100) para cada GCM. Salvo por el MIROC5 (cuyos cambios parecen excesivos), los GCM presentan cambios moderados y de signo negativo o positivo, lo que no permite establecer una tendencia robusta de la altura significativa.

Tabla 7: Altura significativa histórica  $Hm0^{HIST}$  (1985-2004) y variación porcentual respecto para diferentes periodos de retorno para los escenarios RCP8.5 y SSP5-8.5 para medio siglo (2026-2045). Percentil 50. Nudo 8 Valparaíso.

Tr (años)	$Hm0^{HIST}$ (m)	RCP8.5						$Hm0^{HIST}$ (m)	SSP5-8.5		SSP2-4.5	
		Access1.0	CMCC-CM	EC-Earth	HadGEM2-ES	MIROC5	MRI-CGCM3		CNRM-CM6-1	EC-Earth	CNRM-CM6-1	EC-Earth
1	5.4	-3 %	0 %	2 %	-1 %	-13 %	-3 %	5.3	-7 %	-2 %	0 %	-5 %
2	5.6	-3 %	2 %	2 %	-1 %	-14 %	-4 %	5.6	-9 %	-1 %	0 %	-5 %
5	6.0	-1 %	6 %	5 %	-2 %	-2 %	-5 %	5.9	-11 %	1 %	0 %	-3 %
10	6.1	1 %	11 %	8 %	-3 %	24 %	-5 %	6.1	-12 %	3 %	0 %	-2 %
20	6.3	4 %	17 %	13 %	-4 %	84 %	-4 %	6.3	-14 %	5 %	1 %	0 %
50	6.4	8 %	26 %	20 %	-5 %	294 %	-3 %	6.5	-15 %	9 %	3 %	3 %
100	6.5	11 %	35 %	26 %	-6 %	689 %	-2 %	6.6	-16 %	12 %	4 %	5 %

Tabla 8: Altura significativa histórica  $Hm0^{HIST}$  (1985-2004) y variación porcentual respecto para diferentes periodos de retorno para los escenarios RCP8.5 y SSP5-8.5 para fin de siglo (2081-2100). Percentil 50. Nudo 8 Valparaíso.

Tr (años)	$Hm0^{HIST}$ (m)	RCP8.5						$Hm0^{HIST}$ (m)	SSP5-8.5		SSP2-4.5	
		Access1.0	CMCC-CM	EC-Earth	HadGEM2-ES	MIROC5	MRI-CGCM3		CNRM-CM6-1	EC-Earth	CNRM-CM6-1	EC-Earth
1	5.4	-9 %	0 %	-2 %	-3 %	-21 %	-9 %	5.3	-1 %	0 %	-4 %	-5 %
2	5.6	-11 %	1 %	-3 %	-4 %	-23 %	-10 %	5.6	-1 %	-1 %	-4 %	-6 %
5	6.0	-13 %	4 %	-3 %	-6 %	-21 %	-10 %	5.9	-2 %	-3 %	-4 %	-8 %
10	6.1	-14 %	6 %	-2 %	-8 %	-15 %	-9 %	6.1	-3 %	-4 %	-3 %	-10 %
20	6.3	-15 %	8 %	-2 %	-10 %	-4 %	-8 %	6.3	-4 %	-6 %	-3 %	-11 %
50	6.4	-16 %	11 %	-1 %	-12 %	26 %	-5 %	6.5	-5 %	-7 %	-2 %	-12 %
100	6.5	-17 %	12 %	0 %	-13 %	67 %	-3 %	6.6	-6 %	-8 %	-1 %	-13 %

### 3.3 Cálculo del runup 2% en la bahía de Valparaíso

La

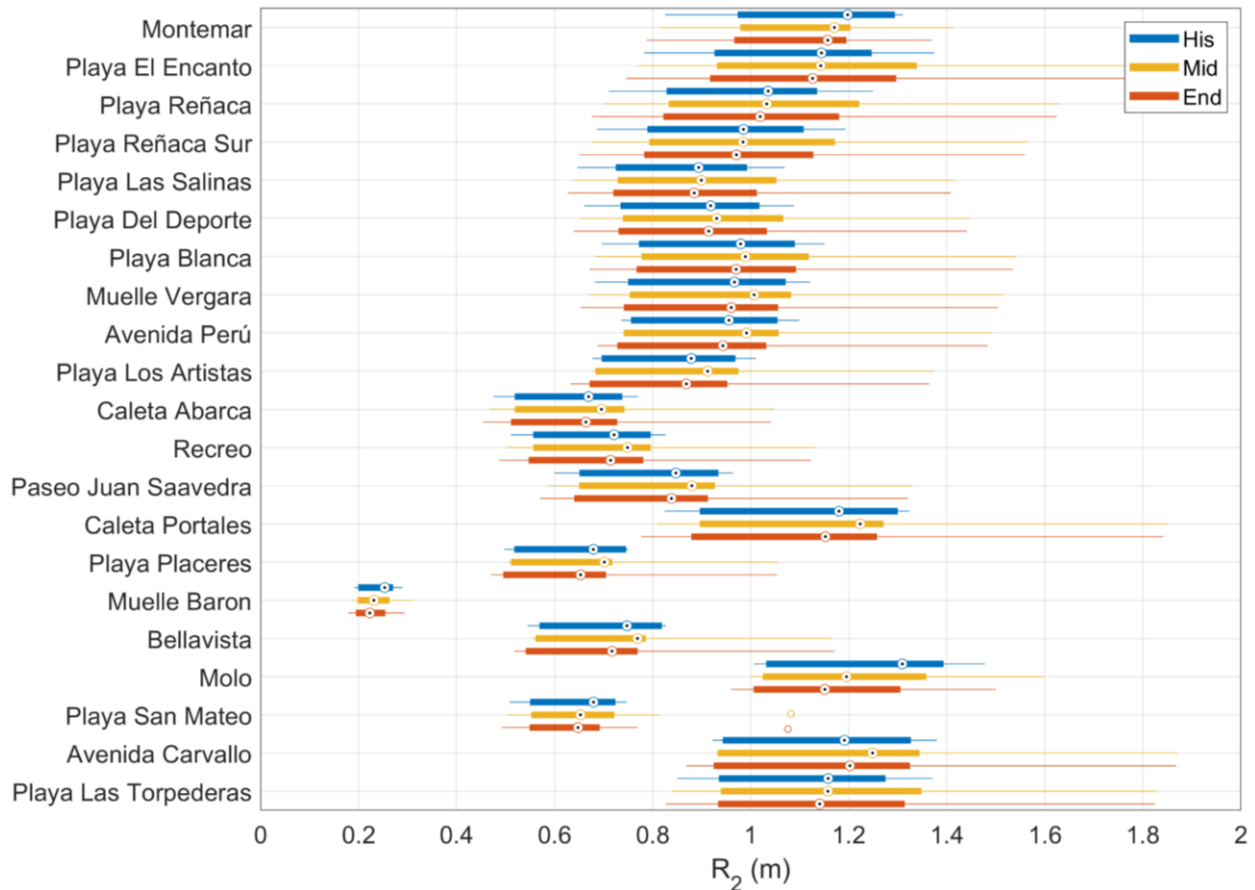


Figura 6 representa la distribución de runup  $R_2$  obtenida a partir de los todos los GCM para el período histórico 1985-2004 (His), medio siglo (Mid) y fin de siglo (End). Se observan cambios significativos a lo largo de la bahía debido a la diferencia del abrigo relativo entre nodos. Por otra parte, los cambios entre el período histórico y las proyecciones son poco significativos, sin embargo, existe más variabilidad para las proyecciones.

La Figura 7a ilustra el ensemble con todos los GCM (RCP8.5, SSP2-4.5 y SSP5-8.5) para los nodos costeros en Valparaíso, y las diferencias porcentuales entre el periodo histórico y la proyección a mediados (His-Mid) y a fines de siglo (His-End). Se observa una disminución relativamente uniforme de ~1% a mediados de siglo y ~5% a finales de siglo para RCP8.5 en toda la bahía. El escenario SSP2-4.5 presenta un aumento de 12% a 17%, con un aumento levemente mayor a mediados siglo que a finales de siglo. El escenario SSP5-8.5 muestra un aumento (disminución) a mediados de siglo a excepción de los nodos al sur (norte) de la bahía, patrón que se modifica a fines de siglo, donde el centro de la bahía presente un aumento menor y los extremos norte y sur una disminución del runup.

Independiente del escenario, no se nota una tendencia clara de los cambios en la bahía, lo que se atribuye a los cambios moderados del oleaje producto del cambio climático. La Figura 7b replica los cálculos de la Figura 7a, incluyendo el aumento del nivel medio del mar (SLR, por sus siglas en inglés) de la Tabla 3. Se observa una contribución significativa del SLR, con aumentos de entre 10% y 30% medio siglo y de entre 40% y 100% para fines

de siglo, con un máximo de 250% en el muelle Barón. Finalmente, la

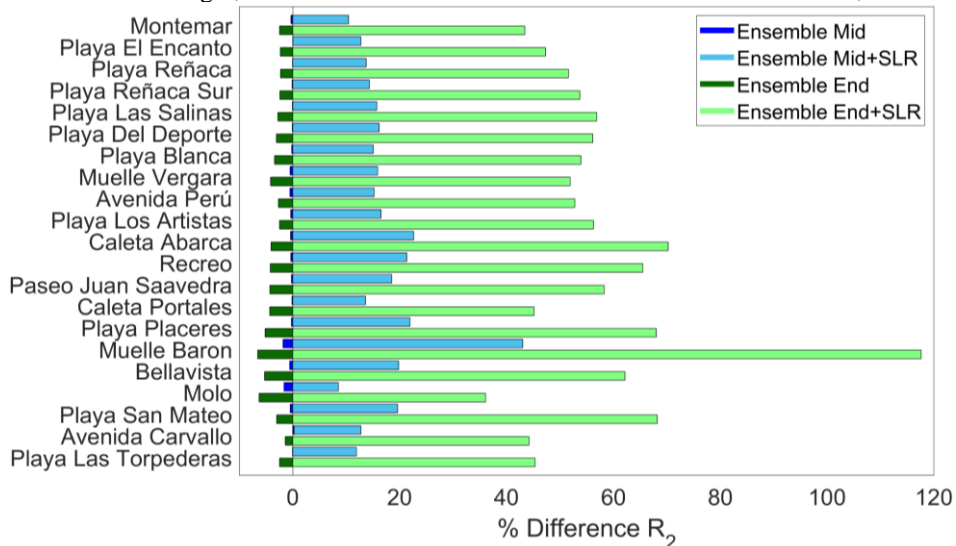


Figura 8 sintetiza los resultados, enfatizando el rol de aumento del nivel medio del mar en el runup.

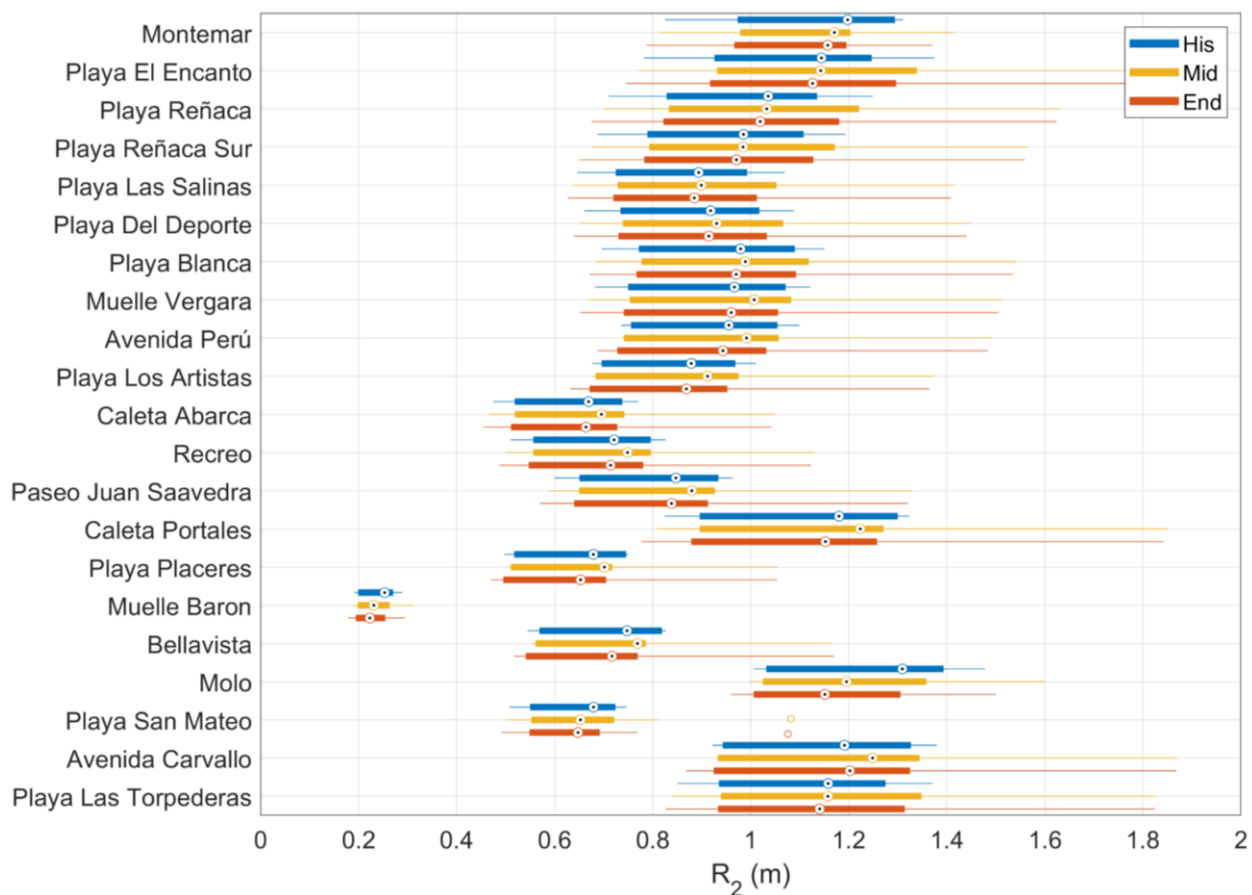
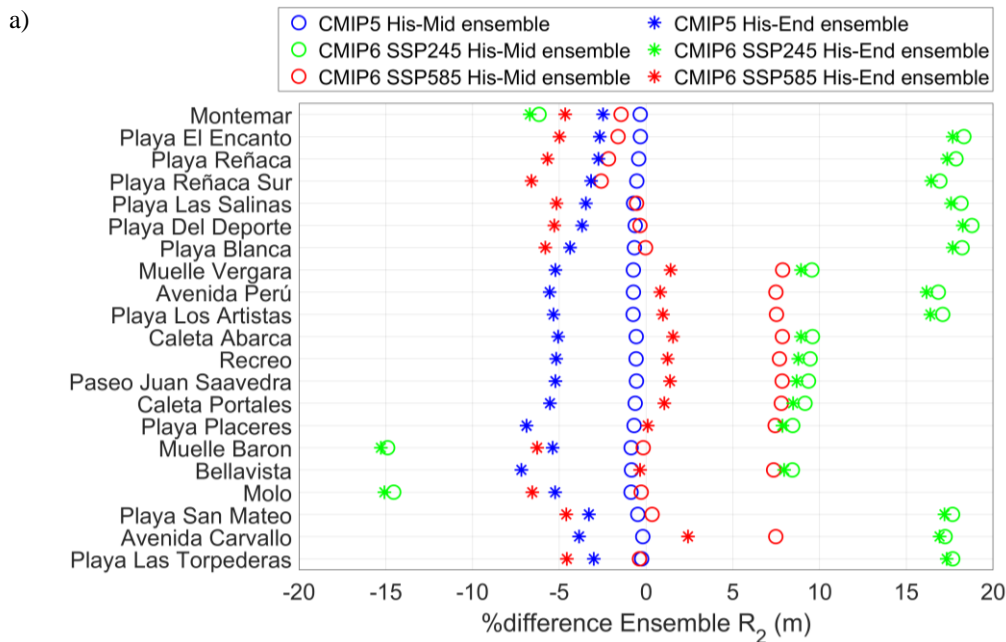


Figura 6: Boxplot del  $R_2$  de todos los GCM (10) del RCP8.5, SSP2-4.5 y SSP5-8.5 históricos (azul), medio siglo (naranja) y fin de siglo (amarillo). El círculo en cada caja representa la mediana de  $R_2$ , los extremos de las cajas el percentil 25 y 75, los extremos finos el mínimo y el máximo.

## 4 DISCUSIÓN

Una de las principales limitaciones del presente estudio radica en la disparidad en el número de modelos incluidos en los conjuntos CMIP5 y CMIP6 analizaos. En particular, el conjunto CMIP5 incorpora seis GCM, mientras que CMIP6 está representado únicamente por dos. Esta diferencia tiene implicancias relevantes la representatividad y robustez estadística de los resultados. La escasa cantidad de modelos en el conjunto CMIP6 limita la capacidad del conjunto para capturar la diversidad de trayectorias climáticas posibles. Asimismo, la diferencia en el tamaño de los conjuntos introduce una asimetría metodológica que afecta la comparación entre ambos experimentos. Así, la mayor cantidad de modelos en CMIP5 permite una caracterización más robusta de las tendencias climáticas proyectadas, así como de su variabilidad, lo que confiere mayor solidez estadística a sus resultados. En contraste, la base reducida de modelos en CMIP6 restringe la confiabilidad de los análisis comparativos, dificultando una interpretación rigurosa de las diferencias entre ambos conjuntos. Se prevé que esta limitación se mitigue progresivamente a medida que se incorporen nuevos GCM al conjunto CMIP6, lo que fortalecerá la validez de los análisis intergeneracionales entre CMIP5 y CMIP6.



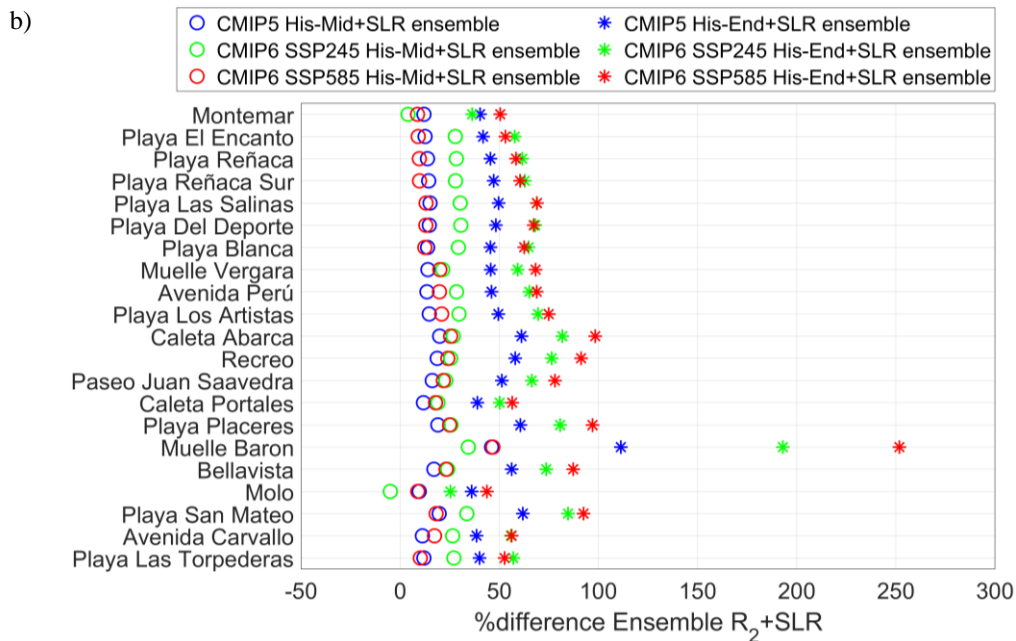


Figura 7: Diferencias entre los ensemble de CMIP5 y CMIP6 con periodos histórico/medio siglo e histórico/fin de siglo. considerando a) sólo la contribución del oleaje y b) la contribución del oleaje y en el nivel medio del mar.

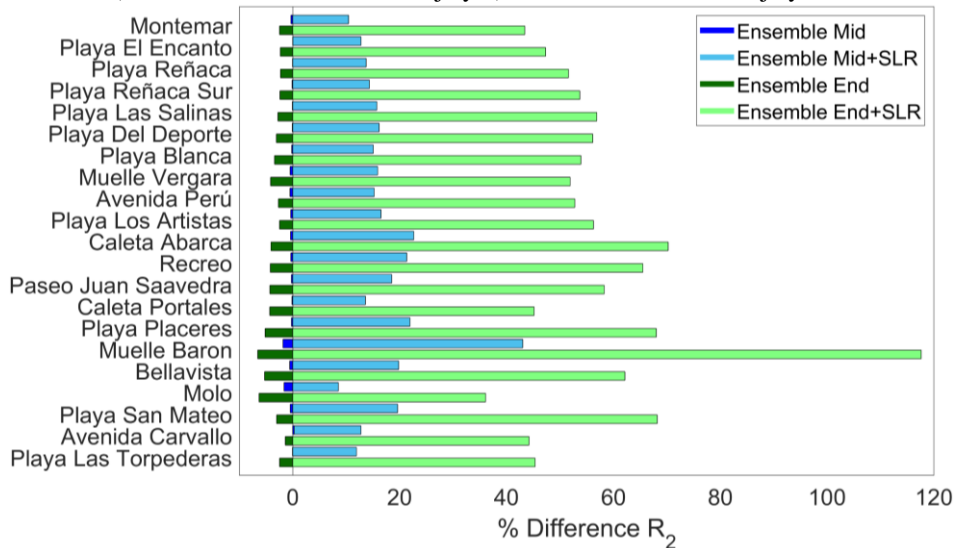


Figura 8: Aportes a la diferencia porcentual juntando CMIP5 y CMIP6 en un solo ensemble comparado con periodos Histórico/Medio Siglo e Histórico/Fin de siglo considerando cambios en el oleaje y en el nivel medio del mar

El cálculo del runup presenta dificultades metodológicas que, si bien pueden influir en los resultados, no debieran generar variaciones significativas en términos porcentuales. Una de las principales limitaciones se relaciona con la resolución relativamente baja de la batimetría utilizada en algunos lugares de la bahía de Valparaíso, que introduce errores en la estimación de la pendiente del fondo marino y en los parámetros del oleaje utilizados en la fórmula de Stockdon et al. (2006). Un caso notable es el nodo correspondiente a Muelle Barón, donde se observa un aumento considerable del runup hacia finales del siglo, especialmente bajo escenarios que incorporan la contribución del aumento del nivel medio del mar. Esta tendencia se explica principalmente

porque, en ese sector costero, la influencia directa del oleaje es relativamente menor, y el aumento de runup se ve dominado por el componente asociado al SLR.

## 5 CONCLUSIÓN

En este estudio se genera una base de datos de proyecciones de oleaje y runup construida a partir de seis GCM del conjunto CMIP5 y dos del conjunto CMIP6, considerando diversos escenarios de emisión y horizontes temporales. Para mejorar la calidad y representatividad de los datos históricos generados por los modelos, se aplica una corrección por sesgo, lo que respalda la validez de las proyecciones obtenidas.

Respecto al comportamiento del oleaje en aguas profundas frente a la costa de Valparaíso, los resultados permiten establecer conclusiones diferenciadas para el clima medio y el clima extremo. En el caso del clima medio, la altura significativa no presenta una tendencia uniforme entre los modelos: algunos GCM proyectan un aumento hacia mediados y finales del siglo XXI, mientras que otros sugieren una disminución. Por el contrario, el período peak muestra un incremento sistemático en todos los GCM, tanto de CMIP5 como de CMIP6, aunque los aumentos no superan 1 segundo. En cuanto a la dirección peak, se observa un giro hacia el sur en ocho de los diez modelos considerados, lo que se ve reforzado por el análisis de los mapas de calor direccional, los cuales evidencian variaciones angulares en la distribución de la energía del oleaje proyectado.

En relación con el clima extremo, el análisis basado en el enfoque de excedencias por umbral (POT) y el ajuste mediante la distribución generalizada de valores extremos (GPD) indica que algunos modelos, como MIROC5, proyectan una intensificación considerable de los eventos extremos de oleaje hacia finales del siglo. Sin embargo, el uso de estadígrafos robustos como la mediana en el procesamiento del ensemble permite mitigar el efecto de valores atípicos generados por modelos que se desvían marcadamente de la tendencia central.

En cuanto al runup, se proyecta un aumento hacia mediados de siglo, seguido por una leve disminución hacia finales del mismo. Además, el aumento del nivel medio del mar ejercerá una influencia más significativa sobre el runup que los cambios proyectados únicamente en el oleaje, particularmente hacia finales del siglo XXI. Este hallazgo subraya que, en términos de riesgo costero, el aumento del nivel del mar constituye un factor dominante en la evolución futura del runup.

## 6 REFERENCIAS

Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., & Winckler, P. (2017). Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database. *Ocean Modelling*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.06.004>

Correa, S., Aguirre, C., Becerra, D., Molina, M., Vilchez, P., & Bahamóndez, S. (2025). Upgrade of the Chilean Wave Atlas database. *Ocean Modelling*, 193, 102456. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2024.102456>

Lemos, G., Menendez, M., Semedo, A., Camus, P., Hemer, M., Dobrynin, M., & Miranda, P. M. A. (2020). On the need of bias correction methods for wave climate projections. *Global and Planetary Change*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103109>

PRDW. (2018). Estudio del Comportamiento de las playas de la Quinta Región.

Ris, R. C., Booij, N., & Holthuijsen, L. H. (1994). Spectral wave model for the coastal zone.

Roberts, K. J., Pringle, W. J., & Westerink, J. J. (2019). OceanMesh2D 1.0: MATLAB-based software for two-dimensional unstructured mesh generation in coastal ocean modeling. *Geoscientific Model Development*, 12(5). <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1847-2019>

Saha, S., Nadiga, S., Thiaw, C., Wang, J., Wang, W., Zhang, Q., Van den Dool, H. M., Pan, H. L., Moorthi, S., Behringer, D., Stokes, D., Peña, M., Lord, S., White, G., Ebisuzaki, W., Peng, P., & Xie, P. (2006). The NCEP Climate Forecast System. *Journal of Climate*, 19(15). <https://doi.org/10.1175/JCLI3812.1>

Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7). <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>

Winckler, P., Esparza, C., Mora, J., Melo, O., Bambach, N., Contreras-López, M., & Sactic, M. I. (2022). 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). <https://doi.org/10.1080/21664250.2022.2088194>

Winckler, P., Martín, R. A., Esparza, C., Melo, O., Sactic, M. I., & Martínez, C. (2023). Projections of Beach Erosion and Associated Costs in Chile. *Sustainability (Switzerland)*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/su15075883>