SIOP
VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria | San Antonio | 2016
Puertos sostenibles: el gran desafío

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

VII SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERIA Y OPERACIÓN PORTUARIA

PROYECCIONES Y TENDENCIAS EN EL CLIMA DE OLEAJE EN LAS COSTAS CHILENAS BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.

Carlos Cofré González[1], José Beyá Marshall[2]

RESUMEN

El oleaje es una condicionante esencial para las actividades costeras y en alta mar, sin embargo, existe poca información sobre el comportamiento de éste, en especial de sus variaciones en respuesta al cambio climático (CC).

Este trabajo contribuye a cuantificar los efectos futuros en el clima de oleaje producto del CC en las costas de Chile. Para ello se analizaron resultados de oleaje derivados de los modelos climáticos globales (MCG) basados en los escenarios de cambio climático definidos en el 5° informe de evaluación del panel intergubernamental de cambio climático (IPCC, 2013).

Se detectó que para Chile, los MCG reproducen una gran variabilidad y diferencias importantes con respecto a los reanálisis de oleaje del proyecto Fondef-IDeA IT13I20006 "Un Atlas de Oleaje para Chile". Debido a esta gran variabilidad, se presenta un amplio rango de resultados con el objeto de representar la incertidumbre asociada a las predicciones. Se presentan extrapolaciones de las tendencias de las bases de datos del Atlas de Oleaje y de ERA-20C, promedios y rangos de los parámetros de oleaje de los MCG, y, promedios y rangos de los MCG previa corrección por sesgo tomando como referencia el Atlas de Oleaje.

Los parámetros de oleaje analizados para distintas ubicaciones a lo largo de Chile son: altura significativa promedio y de período de retorno 50 años, período medio promedio y dirección media promedio. Se espera que esta cuantificación sea de utilidad para ingenieros de costas dedicados al diseño y empresas e instituciones con injerencia en el ámbito marítimo, entre otros.

Palabras claves: cambio climático, hindcast de oleaje, reanálisis de oleaje, modelos climáticos globales.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático tiene un impacto en todos los aspectos de nuestras vidas (ecosistemas, sistemas humanos, urbanos, económicos y sociales) y conocer sus efectos es fundamental para planificar y lograr una adaptación eficiente.

---

[1] Alumno tesista del proyecto "Un Atlas de Oleaje para Chile" , Ingeniería Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso carlos.cofreg@alumnos.usm.cl
[2] Académico, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso – jose.beya@uv.cl

Para contrarrestar estos efectos hay dos vías de acción: 1) La mitigación de los agentes causantes del cambio climático y 2) La adaptación a los inminentes cambios previstos para el futuro (IPCC, 2014). En este último eje de acción aparecen las predicciones de los MCG que simulan el comportamiento del clima y la meteorología bajo diferentes escenarios de agentes causantes del cambio climático.

Los MCG son la herramienta más importante para explorar la posible evolución futura del clima a escala global basándose en diferentes escenarios climáticos. El (IPCC, 2013) utiliza 4 nuevos escenarios que consideran prácticas optimistas, indiferentes y pesimistas con respecto a los niveles de los agentes causantes del cambio climático. Estos escenarios son RCP 2.6, RCP 4.5 RCP 6.2 y RCP 8.5, donde el número indica el forzamiento radiativo en [W/m^2] debido a las concentraciones de emisiones (IPCC, 2013).

Las tendencias observadas en la disminución de las masas glaciares y casquetes polares, el aumento del nivel del mar, el aumento de la temperatura en los océanos y la atmosfera indican que el cambio climático es inequívoco (IPCC, 2013), y que el sistema climático global busca el equilibrio con eventos que pueden poner en mayor riesgo la infraestructura y sistemas humanos.

Estudios de evaluación de tendencias

En Chile y Latinoamérica los estudios más relevantes que cuantifican tendencias futuras y los efectos del cambio climático en el oleaje son escasos y recientes y corresponden a Molina (2011) y CEPAL (2011).

Molina (2011) realiza un estudio no estacionario de clima medio del oleaje en la costa central de Chile. Los resultados encontrados indican la presencia de variaciones en el oleaje relacionadas con las oscilaciones climáticas y el cambio climático global (CC). Las influencias del CC en el oleaje son determinadas a partir de la estimación de la tendencia lineal de las series de tiempo. Estas consisten en incrementos del promedio y de la desviación estándar de la altura significativa en una ventana temporal de 20 años (aumentos del promedio entre 0.003 [m/año] a 0.006 [m/año]) y del periodo pico (aumentos del promedio entre 0.008 [s] a 0.020 [s]), mientras que se producen disminuciones de los mismos estadísticos para las direcciones. En el caso del periodo medio, el promedio presenta incrementos entre las latitudes 37° y 39°, y disminuciones entre las latitudes 31° y 35°, mientras la desviación estándar solo presenta incrementos. En general, las variaciones de los parámetros no se relacionan con la latitud.

CEPAL (2011) estudia los efectos del cambio climático en las costas de Latinoamérica y el Caribe, cuantificando tendencias y la variabilidad climática, incluyendo proyecciones de oleaje y del nivel medio del mar para los horizontes años 2040 y 2070. En relación al oleaje, CEPAL estima que en Chile el periodo de retorno de 50 años de la altura significativa disminuirá. En Concepción y Valparaíso cambiara a 42 años en el horizonte 2040 y a 35 años en el horizonte 2070. En Arica pasará a tener un periodo de retorno de 34 en el 2040 y a 24 en el año 2070, mientras que en la XII Región de Chile aumentará a 52 años en el 2040 y a 55 años en el 2070. En cuanto al clima medio del oleaje en Chile, CEPAL (2011) encuentra tendencias al aumento de las alturas significativas medias mensuales entre 0.1 [m] y 0.3 [m] en el año 2040. Las tendencias hacia el año 2031 en el periodo medio y dirección media son de 0.7 [°] y -22.6 [°] respectivamente.

En Chile, estos cambios parecen llamar la atención en tiempos recientes. En el ámbito marítimo, los fenómenos de marejadas extremas de invierno y verano ocurridos los años 2013 y 2015

(Winckler et al., 2015; Campos et al., 2015; Álvarez y Beyá, 2016) y las varazones de peces y cetáceos, mortandad de salmones y las floraciones de algas nocivas en el sur de Chile del año 2016 (Domínguez, 2016), han demostrado, quizás de manera tenue aun en el país, el potencial destructivo de los cambios en la dinámica de la atmósfera y del océano.

Modelos de reanálisis disponibles

En lo que respecta al clima de oleaje del pasado reciente, en Chile, no existe una base de datos de oleaje observados completa que permita describir el clima histórico. Así, para poder comparar el período histórico de los MCG, se debe recurrir a modelos de reanálisis de oleaje entre los que destacan ERA 20C (Poli et al., 2013), ERA-Interim (Dee et al., 2011), CFSR (Saha et al., 2011) y el Atlas de Oleaje de Chile (AOC1 y AOC2).

La base de datos ERA-20C del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas (ECMWF) corresponde a un reanálisis de modelos oceanográficos y meteorológicos globales. Esta base de datos entrega estadísticas de altura significativa espectral (H_{m0}), período medio (T_m) y dirección media (D_m) modeladas con el modelo WAM (WAMDI, 1988; Komen et al., 1994), que se extiende por todo el siglo XX en todo el globo con una resolución espacial de 1 [°].

Las bases de datos AOC1 y AOC2 fueron generadas por el proyecto FONDEF-IDeA IT3I20006 "Un Atlas de Oleaje para Chile"[3], proyecto en el cual se enmarca el presente trabajo. Esta base de datos se generó con el modelo numérico Wavewatch III v4.18 que fue calibrado con mediciones de boyas y satelitales. La base de datos AOC1 fue generada utilizando los vientos reanalizados ERA-Interim según las recomendaciones de Ardhuin et al. (2011). La base fue corregida por errores sistemáticos y corresponde a la mejor estimación del oleaje para las costas de Chile según los resultados del proyecto. La extensión temporal de esta base de datos es del año 1980 al 2015.

La base de datos AOC2 corresponde a una base de datos generada a partir de los vientos reanalizados CFSR. Esta base de datos presentó mejores ajustes a los máximos de oleaje medidos por boyas permitiendo un desfase temporal en la estimación de cada máximo. El objeto de generar esta base de datos en el proyecto, fue mostrar la variabilidad en la estimación de los valores extremos del oleaje. La extensión de esta base de datos es del año 1990 al 2009.

Modelos climáticos globales

Con respecto a las bases de datos generadas a partir de los MCG, debido al gran esfuerzo computacional que significa modelar el clima en el largo plazo, la comunidad científica internacional ha enfocado sus esfuerzos en simulaciones que, por lo general, abarcan tres períodos temporales: 1) histórico (1979-2005) que corresponde a una ventana temporal de validación que permite contrastar los resultados de los MCG con mediciones o modelos de reanálisis; 2) medio siglo (2026-2045) que corresponde a una ventana temporal de mediados de siglo XXI y 3) fin de siglo (2081-2100) que corresponde a una ventana temporal de fines del siglo XXI.

En cuanto a la generación de oleaje, los MCG no modelan directamente oleaje, sólo entregan en resoluciones espaciales variables dependiendo de cada MCG, los campos de vientos

[3] Revisar documentación del proyecto en (www.oleaje.uv.cl)

globales y de hielo marino que son las forzantes de los modelos de oleaje. La modelación de oleaje a partir de los MCG sólo ha sido realizada para algunos de los 62 MCG de la quinta fase del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5).

Hemer et al. (2015a) generaron información de oleaje a partir de campos de viento globales de resolución temporal de 3 horas y del área de cobertura de hielo obtenida de 8 MCG. Esto lo realizaron utilizando el modelo Wavewatch III v3.14 (Tolman, 2009), con resolución espacial de 1° x 1° entre las latitudes 80°S-80°N, para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Hemer et al. (2015b) evaluaron las habilidades de los 8 modelos para reproducir el oleaje, comparándolos con los modelos de reanálisis ERA-Interim, ERA40 (Sterl et al., 2005) y CFSR en la ventana de validación 1980-2005. Sus resultados sostienen que en el océano sur, la altura significativa tiene un sesgo negativo (-0.5 m) respecto a CFSR. Indican que esto es atribuible a la poca capacidad de los MCG de representar las tormentas características de esa región.

Hemer et al. (2015b) también indican que la inconsistencia entre los reanálisis alcanza el 80% de la desviación absoluta media de las simulaciones de los modelos climáticos. Esto es atribuible a las fuentes termo-físicas, los datos asimilados y la resolución de las variables. Wang et al. (2014), Hemer et al. (2013a) y Hemer et al. (2013b), sugieren que estos aspectos se pueden mejorar refinando la resolución espacial de los MCG, mientras que una parte no trivial de los sesgos globales, los atribuyen a la incertidumbre del modelo de oleaje y los modelos climáticos. Hemer et al. (2015b) mediante la división de los océanos del mundo en los 13 subdominios definidos en Alves (2006), muestran que los MCG tienen habilidad de pronóstico variable en función de la región, evidenciando otra fuente de variabilidad de los MCG.

Wang et al. (2014) utilizaron 20 MCG del CMIP5 (que incluyen los 8 utilizados por Hemer et al., 2015b), e indicaron que la media anual y máxima anual de la altura significativa, presentarán aumentos de 47% y 54.7% en los océanos del mundo, con un rango de incremento entre 0.05 [m] y 0.31 [m], y 0.02 [m] y 0.10 [m] respectivamente. Estos resultados se obtuvieron de la comparación de dos periodos (1980-1999) y (2080-2099) para el escenario RCP8.5. Bajo el mismo escenario, sostienen que la frecuencia de eventos extremos aumentará, y, que en el periodo 2070-2099, las olas actuales con periodo de retorno de 10 años tendrán un periodo de retorno entre 1 y 4 años en las costas de Chile. Sin embargo, los 20 MCG utilizados presentan gran variabilidad entre modelos y escenarios en un mismo punto en el espacio, la cual aumenta a medida que aumenta la varianza de los parámetros proyectados, tanto para el escenario RCP8.5 como en RCP4.5.

Wang et al. (2015) estudian la variación temporal e incertezas de los 20 modelos utilizados por Wang et al. (2014). Ellos muestran que para el período 2006-2099 la incertidumbre en la altura significativa es importante a nivel mundial, y que es aproximadamente 10 veces mayor que la variabilidad entre los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

Alcances de este estudio

La presente contribución realiza un análisis estadístico comparativo de bases de datos de reanálisis de oleaje y de modelos de oleaje forzados con vientos y campos de hielo de MCG, en sectores de aguas profundas cercanos a la costa de Chile. Se espera que esta información sea

de utilidad para diseñadores, planificadores y tomadores de decisiones en el ámbito marítimo costero y para evaluar la variabilidad de los MCG.

METODOLOGÍA

Selección de los sitios de análisis

Se seleccionaron 8 puntos a lo largo de Chile para la obtención de estadísticas de oleaje de aguas profundas. Para estos puntos, se recopiló información de oleaje de las 8 bases de datos generadas por Hemer et al. (2015a) con modelos de oleaje forzados con vientos y campos de hielo de 8 MCG (*Tabla 1*). La información recopilada corresponde a las proyecciones hasta final del siglo XXI bajo los escenarios actualizados de emisiones de gases de efecto invernadero: RCP 4.5 y RCP 8.5 (IPCC, 2013).

Las bases de datos de Hemer et al. (2015a) proporcionan un intervalo de tiempo útil para validación (1980-2005, de aquí en adelante período HIST) y dos intervalos futuros, uno de medio siglo (2026-2045, de aquí en adelante período MS) y otro de final de siglo (2081-2100, de aquí en adelante período FS). Estos últimos permiten evaluar los potenciales cambios que podrían ocurrir en el clima de oleaje en nuestro país. Los parámetros de oleaje de estas bases de datos corresponden a altura significativa (H_S), período medio (T_m) y dirección media (D_m).

De cada base de datos se obtuvo series temporales de H_S, T_m y D_m en puntos ubicados en aguas profundas a lo largo de Chile continental. La selección de los puntos de extracción fue definida en función de la ubicación de los nodos de aguas profundas de AOC1 y de un criterio de representatividad espacial. Los nodos fueron ubicados desde el extremo norte hasta el extremo sur de Chile, distanciados cada 4 grados aproximadamente, prefiriendo ubicaciones cercanas a puertos importantes.

Evaluación de calidad de los modelos climáticos globales

Para evaluar la calidad de las bases de datos de Hemer et al. (2015a, En adelante también referidas como MCG), se compararon los deciles de H_S de éstas con AOC1 para el período histórico. AOC1 fue utilizada como referencia, ya que se considera la información más confiable disponible en la actualidad en Chile. En las comparaciones se observaron diferencias que mostraron importantes sesgos positivos y negativos de los MCG para los distintos deciles.

Análisis del clima medio

Se analizó el clima medio del oleaje a través del cálculo de los promedios anuales de H_S ($\overline{H_S^{año}}$) y de los promedios interanuales de H_S, T_m y D_m ($\overline{H_S}$, $\overline{T_m}$, $\overline{D_m}$). Para los promedios interanuales de los MCG, se calculó también el rango (mínimo y máximo) y el promedio de conjunto ($\langle\overline{H_S}\rangle_{MCG}$, $\langle\overline{T_m}\rangle_{MCG}$, $\langle\overline{D_m}\rangle_{MCG}$).

Se calcularon los promedios interanuales para el intervalo de tiempo entre los años 1979 y 2015 de los reanálisis ERA-20C y AOC1. A estos valores se les llamó período "ACTUAL".

Para los promedios anuales se calcularon las tendencias mediante el ajuste de una recta por mínimos cuadrados. Se calcularon proyecciones futuras de las tendencias extrapolando las rectas ajustadas hasta los períodos futuros evaluados.

Las diferencias que presentaron los modelos ERA-20C y los MCG en el período HIST respecto a AOC1, implicaron que fuese necesario realizar una corrección por sesgo. Para esto, se estimó el sesgo en relación a AOC1 para cada MCG en el período HIST. Luego, se restó el sesgo a cada MCG en los períodos MS y FS, generándose los MCG corregidos (MCG^{cs}). Para los parámetros de oleaje y las bases de datos el superíndice cs que indica "corrección de sesgo" (i.e., $\overline{H_S^{cs}}$, $\overline{T_m^{cs}}$, $\langle\overline{D_m^{cs}}\rangle_{MCG}$, $ERA\text{-}20C^{cs}$). Cuando esto no se indica quiere decir que no se realizó corrección de sesgo.

Análisis del clima extremo

Se realizó un análisis de eventos extremos mediante el método POT (Peaks Over Threshold; Goda, 2000), cuyo umbral se definió para seleccionar un total de alturas significativas extremas igual al número de años de la estadística (i.e., 20 años) para cada sitio y con una independencia de por lo menos 4 días de diferencia entre eventos. Luego, se probaron diversas distribuciones de probabilidades de valores extremos (Weibull, Gumbel, Frechet, Log-Normal), escogiendo la de mejor ajuste. Este análisis se realizó para AOC1, AOC2 y los MCG.

El análisis del comportamiento del oleaje extremo se realizó para la altura significativa de periodo de retorno de 50 años (H_{50}), ya que ésta es comúnmente utilizada para diseño de obras marítimas en Chile (DOP, 2013). Para este parámetro se calculó también el promedio de conjunto ($\langle H_{50}\rangle_{MCG}$).

Tabla 1 Modelos climáticos globales utilizados por Hemer et al. (2015) para generar las bases de datos de oleaje.

Centro de modelado	Instituto ID	Nombre del modelo	Resolución espacial [°]
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) and Bureau of Meteorology (BOM), Australia	CSIRO-BOM	ACCESS1.0 (ACCESS)	1.88x1.25
Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	BCC	BCC-CSM1.1 (BCC)	2.8x2.8
Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique	CNRM-CERFACS	CNRM-CM5 (CNRM)	1.4x1.4
NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	NOAA GFDL	GFDL-CM3 (GFDL)	2.5x2.0
Met Office Hadley Centre (additional HadGEM2-ES realizations contributed by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)	MOHC	HadGEM2-ES (HadGEM)	1.88x1.25
Institute for Numerical Mathematics	INM	INM-CM4 (INMCM)	2.0x1.5
Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	MIROC	MIROC5 (MIROC)	1.4x1.4
Meteorological Research Institute	MRI	MRI-CMCG3 (MRI)	1.1x1.1

Tabla 2 Intervalos temporales y resolución temporal de las bases de datos de oleaje analizadas.

MODELOS	Tipo de base de dato	Período Anterior al presente	Período futuro de Medio Siglo (MS)	Período futuro de Final de Siglo (FS)	Resolución temporal [Horas]	Resolución Espacial [°]
CMIP5	**Modelo Climático Global (MCG)**	1979-2005	2026-2045	2081-2100	3	variable (*Tabla 1*)
ERA-20C	**Reanálisis**	1900-2005	——	——	6	1
AOC1-AOC2	**Reanálisis**	1980-2015	——	——	3	1

RESULTADOS

Comparación modelos climáticos globales con el reanálisis de referencia

La *Tabla 3* muestra las pendientes de las rectas ajustadas a los deciles de los MCG con respecto a los deciles de AOC1. Esto es un indicador de la representatividad y validez de los MCG.

En el norte de Chile, el valor más cercano a 1 lo obtuvo HadGEM2-ES, con una pendiente muy cercana a 1 frente a la localidad de Niebla. Los valores que destacan en negrita indican el modelo de mejor ajuste para el sitio respectivo. Dichos modelos son: MRI-CMCG3 (3 sitios), INM-CM4 (2 sitios), HadGEM2-ES (1 sitio), CNRM (1 sitio) y ACCESS1.0 (1 sitio).

Tabla 3 Pendiente de la recta ajustada a los deciles de los MCG v/s AOC1 para cada sitio.

Sitio/**modelo**	**MRI**	**MIROC**	**INM-CM4**	**HadGEM**	**GFDL-CM**	**CNRM**	**BCC**	**ACCESS**
Arica	0.85	0.92	0.90	**1.01**	1.04	0.86	0.95	0.94
Antofagasta	0.89	0.97	**1.00**	1.15	1.03	0.91	1.02	1.10
Chañaral	0.91	1.16	1.03	1.19	1.27	1.14	1.23	**1.02**
Valparaíso	**0.92**	1.10	1.18	1.37	1.40	1.17	1.28	1.20
Lebu	0.88	1.09	**1.08**	1.24	1.25	1.08	1.18	1.12
Niebla	**1.20**	1.61	1.54	1.72	1.64	1.43	1.49	1.47
Golfo Corcovado	0.93	1.05	1.05	1.21	1.19	**0.98**	1.07	1.02
Pta. Arenas	**0.92**	1.10	1.12	1.31	1.34	1.13	1.24	1.15

Proyecciones para el clima extremo

La *Tabla 4* muestra para $\langle H_{50} \rangle_{MCG}$, los rangos y los errores relativos de $\langle H_{50} \rangle_{MCG}$ para los períodos HIST, MS y FS, en distintas ubicaciones a lo largo de Chile. El rango representa el máximo y el mínimo de los MCG. Además presenta los valores de H_{50} de AOC1 y AOC2.

Los errores relativos entre $\langle H_{50} \rangle_{MCG}$ del período HIST y H_{50} de AOC1 varían entre -6% y 39% para las distintas localidades, con solo un valor negativo. Esto indica que la tendencia general y promedio de los MCG es a sobre estimar H_{50} en relación a AOC1. Esta tendencia no es tan clara para AOC2 donde se presenta una subestimación para la mayoría de las localidades.

Una comparación de $\langle H_{50} \rangle_{MCG}$ en el período HIST con los períodos futuros, indica que la tendencia es, en general, a una disminución de los valores de H_{50}. Las zonas que presentan leves aumentos para MS (inferiores a 0.3 [m]) son Arica, Lebu y Punta Arenas. Para todas las localidades se observa que los cambios proyectados hacia FS son levemente menores que los para MS, lo que indica una estabilización de las tendencias. Para las zonas de Golfo

Corcovado, Valparaíso y Chañaral, se observan disminuciones significativas hacia FS de 0.9 [m], 0.7 [m] y de 0.6 [m] respectivamente.

Tabla 4 Valores de H_{50} en [m] de AOC2 y AOC1. Rangos $[H_{50,min}, H_{50,max}]_{MCG}$ [m], $\langle H_{50}\rangle_{MCG}$ *en [m] y error elativo* (ER_{H50}) *de* $\langle H_{50}\rangle_{MCG}$ *para los períodos histórico* (HIST)*, medio siglo (MS) y final de siglo (FS).*

	H_{50} [m]							
Sitio / **Modelo**	**Arica**	**Antofagasta**	**Chañaral**	**Valparaíso**	**Lebu**	**Niebla**	**Golfo Corcovado**	**Pta. Arenas**
H_{50}^{AOC2}	4.7	5.4	6.5	6.4	10.3	10.9	13.9	14.1
H_{50}^{AOC1}	4.0	4.3	5.4	5.9	7.6	8.2	11.4	14.8
$\langle H_{50}\rangle_{MCG}^{HIST}$	4.4	5.1	5.1	7.5	10.6	10.0	12.6	15.7
Rango	[3.1,5.5]	[3.3,6.5]	[3.0,7.8]	[5.0,13.1]	[6.5,12.8]	[6.9,14.3]	[9.3,16.6]	[11.3,18.7]
ER_{H50}^{HIST}	10%	19%	-6%	28%	39%	21%	10%	6%
$\langle H_{50}\rangle_{MCG}^{MS}$	4.5	4.9	4.7	7.8	10.8	9.9	12	16.7
Rango	[2.9,5.3]	[3.3,5.8]	[3.1,5.9]	[5.0,12]	[6.8,14.5]	[6.4,12.0]	[7.6,13.3]	[10.4,20.4]
ER_{H50}^{MS}	13%	13%	-14%	33%	42%	20%	5%	12%
$\langle H_{50}\rangle_{MCG}^{FS}$	4.4	4.8	4.5	6.8	10.6	9.7	11.7	15.2
Rango	[2.9,5.9]	[3.3,6.6]	[3.1,5.9]	[4.2,9.8]	[6.9,14.9]	[6.7,12.2]	[7.6,12.9]	[12.3,17.9]
ER_{H50}^{FS}	10%	11%	-16%	16%	39%	18%	2%	3%

Proyecciones para el clima medio

La *Figura 1* muestra a modo de ejemplo en la localidad de Arica, las medias anuales de la altura significativa ($\overline{H_S^{año}}$) de las bases de datos AOC1, ERA-20C y los MCG, períodos HIST, MS y FS (sin corrección de sesgo). La *Figura 2* es similar a la *Figura 1* pero muestra $\overline{H_S^{cs,año}}$ para ERA-20C y los MCG (con corrección de sesgo). En estas figuras se observa la gran variabilidad y amplios sesgos de las distintas bases de datos. También se observa la diferencia entre las proyecciones de las tendencias de los reanálisis (ERA-20C y AOC1), los MCG en los períodos HIST y futuros, tanto para los valores con y sin corrección de sesgo. AOC1 indica fuertes tendencias al aumento, mientras que ERA-20C indica una tendencia menos fuerte y los MCG sugieren una menor variación de $\overline{H_S}$ en el tiempo.

Las *Figura 3*, *Figura 4* y *Figura 5* muestran una síntesis de los promedios interanuales de los parámetros de oleaje ($\overline{H_S}$, $\overline{T_m}$, $\overline{D_m}$) de todas las bases por zona geográfica para los períodos

ACTUAL (corresponde a la fecha del reanálisis AOC1, *Tabla 2*), MS y FS. Para indicar la incertidumbre y variabilidad de las estimaciones futuras, se muestran proyecciones de las tendencias de los reanálisis AOC1, ERA-20C y ERA-20C^{cs} (con corrección de sesgo), junto con los rangos y promedios de conjunto de los MCG con y sin corrección de sesgo (MCG y MCG^{cs}). En estas figuras, solo se presenta el escenario RCP 8.5, debido a que es el escenario más conservador, y, a que en un análisis preliminar, no se observaron variaciones significativas con las predicciones del escenario RCP 4.5.

En la *Figura 3*, para todas las localidades excepto los extremos norte y sur, se muestran valores de $\langle \overline{H_S^{cs}} \rangle_{MCG}$ para MS (11.2% de aumento promedio) que son mayores que los de FS (10.2% de aumento promedio). Las variaciones de $\langle \overline{H_S^{cs}} \rangle_{MCG}$ con respecto al período actual están entre 0.24% y 3.5% en MS y en -2.5% y 5.5% en FS. En general, hacia FS, se predicen diferencias con los valores actuales similares a las de MS. Esto indica una tendencia a la estabilización de los valores promedio de H_s en el plazo más largo evaluado. En promedio, los MCG (sin corrección de sesgo) tienden a subpredecir $\overline{H_S}$, aunque los rangos son amplios y muestran que algunos MCG sobrepredicen significativamente $\overline{H_S}$.

Las tendencias de $\overline{H_S}$ identificadas con las bases de datos AOC1 y ERA-20C^{cs}, indican aumentos significativamente mayores a los identificados por los MCG período HIST. Estas tendencias no son tan notorias en ERA-20C (sin corrección de sesgo). Las tendencias de AOC1 son las más pronunciadas y varían entre 2.7 y 9.6 [mm/año], mientras que el modelo ERA-20C presenta tendencias que varían entre los 0.6 y 3.1 [mm/año].

Los MCG^{cs} muestran una disminución en el rango de variabilidad del conjunto y también un acercamiento a los valores actuales de los promedios de conjunto de los MCG, en comparación a los MCG sin corrección de sesgo.

En la *Figura 4* se observa que los MCG sobrepredicen $\overline{T_m}$ y que las proyecciones de las tendencias $\overline{T_m^{año}}$ de ERA-20C no alcanzan los valores de $\langle \overline{T_m} \rangle_{MCG}$. Las proyecciones de las tendencias de AOC1 se encuentran dentro del rango de $\overline{T_m^{cs}}$ de los MCG futuros, aunque en algunas localidades se indican aumentos y en otras disminuciones. Esto se contrasta con el aumento progresivo entre los valores actuales y los períodos futuros de los MCG^{cs} para todas las localidades. El rango de las variaciones futuras de $\langle \overline{T_m^{cs}} \rangle_{MCG}$ se encuentra entre 0.6% y 1.6% en MS y 1.4% y 3.6% para FS.

En la *Figura 5* se puede observar que en general, las tendencias de los reanálisis (AOC1 y ERA-20C) de $\langle \overline{D_m^{cs}} \rangle_{MCG}$, indican variaciones futuras de la dirección media hacia el sur. Los MCG predicen valores de $\overline{D_m}$ superiores a los de la base de datos de referencia, indicando que éstos tienen un sesgo hacia el norte.

Figura 1 Serie temporal de la altura significativa media anual ($\overline{H_S^{año}}$) *para la localidad de Arica de los reanálisis* AOC1, ERA-20C y MCG.

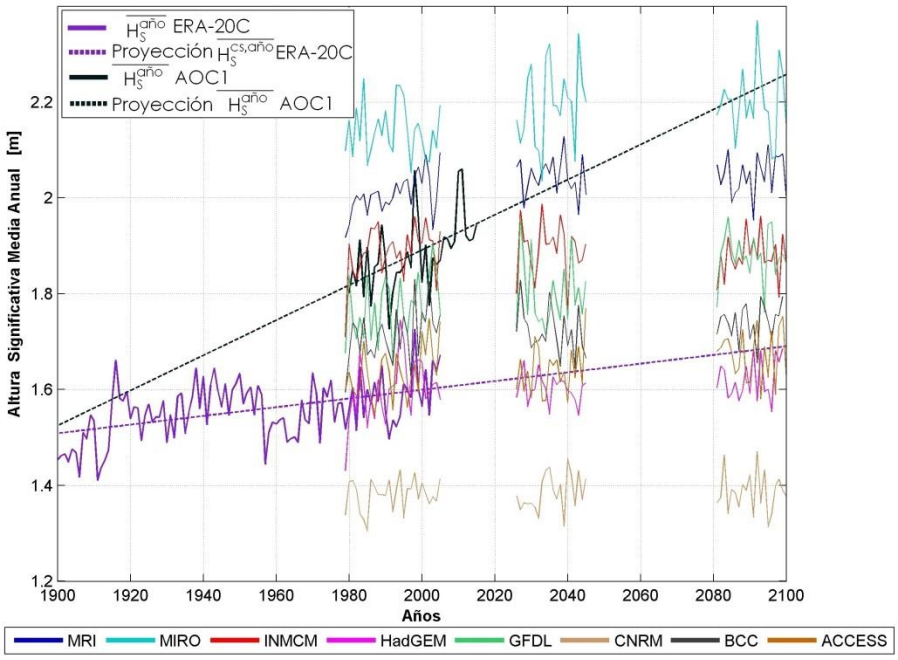
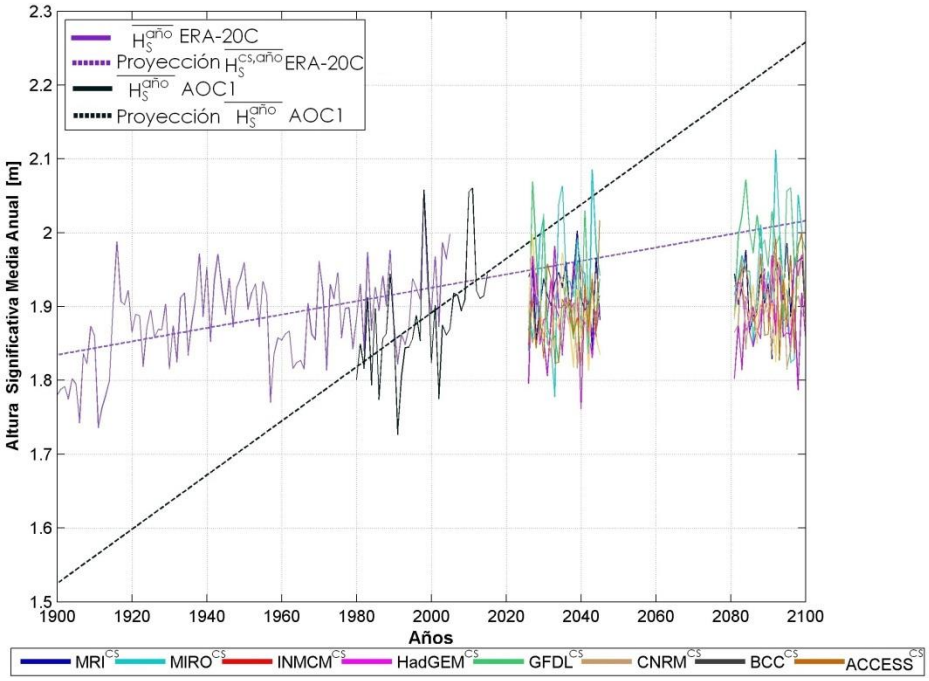


Figura 2 Serie temporal de la altura significativa media anual ($\overline{H_S^{año}}$) *para la localidad de Arica de los reanálisis* AOC1, ERA-20Ccs *y* MCGcs *(con corrección de sesgo).*



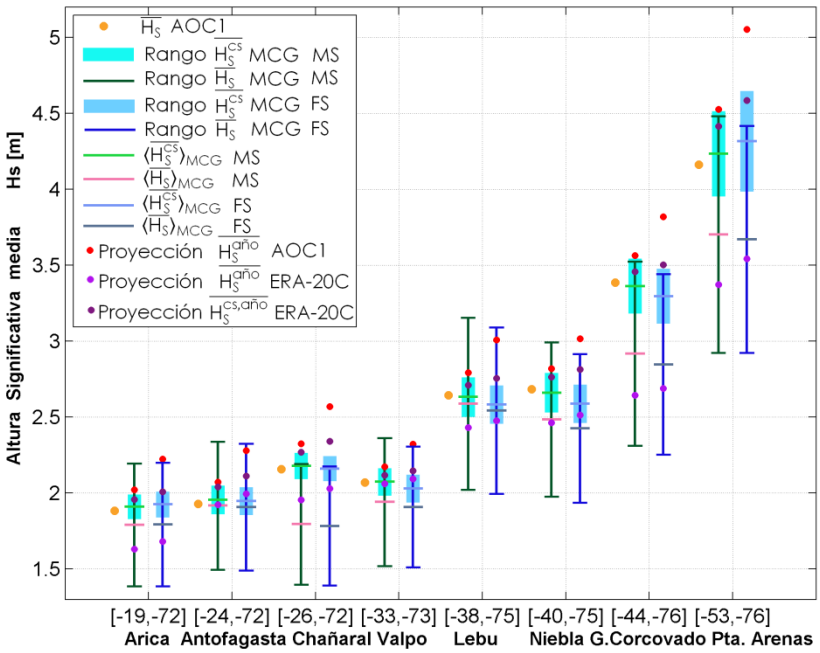


Figura 3 $\overline{H_S}$ *para los períodos* ACTUAL, *medio siglo* (MS) *y fin de siglo* (FS), *ordenados de izquierda a derecha respectivamente para cada localidad. Los valores de los MCG corresponden al escenario RCP 8.5. Se presenta: 1) El valor* ACTUAL *estimado de* AOC1 *(puntos naranja); 2) Proyecciones de las tendencias de* $\overline{H_S^{año}}$ *para AOC1 (puntos rojos),* $\overline{H_S^{año}}$ ERA-20C *(puntos morados claro),* $\overline{H_S^{cs,año}}$ ERA-20C *(puntos morado oscuro); 3)* $\langle\overline{H_S^{cs}}\rangle_{MCG}$ *y* $\langle\overline{H_S}\rangle_{MCG}$ *para MS y FS como líneas horizontales entre el rectángulo coloreado y la barra de error, que indican el rango de los MCG con y sin corrección respectivamente.*

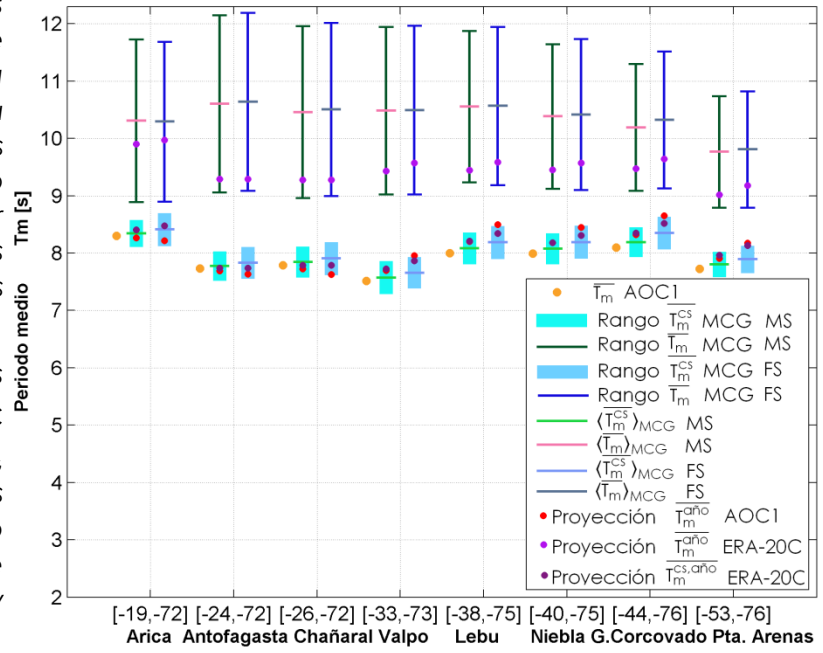


Figura 4 $\overline{T_m}$ *para los períodos ACTUAL, medio siglo* (MS) *y fin de siglo* (FS), *ordenados de izquierda a derecha respectivamente para cada localidad. Los valores de los MCG corresponden al escenario RCP 8.5. Se presenta: 1) El valor ACTUAL estimado de* AOC1 *(puntos naranja); 2) Proyecciones de las tendencias de* $\overline{T_m^{año}}$ *para* AOC1 *(puntos rojos),* $\overline{T_m^{año}}$ ERA-20C *(puntos morado claro),* $\overline{T_m^{cs,año}}$ ERA-20C *(puntos morado oscuro); 3)* $\langle\overline{T_m^{cs}}\rangle_{MCG}$ *y* $\langle\overline{T_m}\rangle_{MCG}$ *para MS y FS como líneas horizontales entre el rectángulo coloreado y la barra de error, que indican el rango de los MCG con y sin corrección respectivamente*

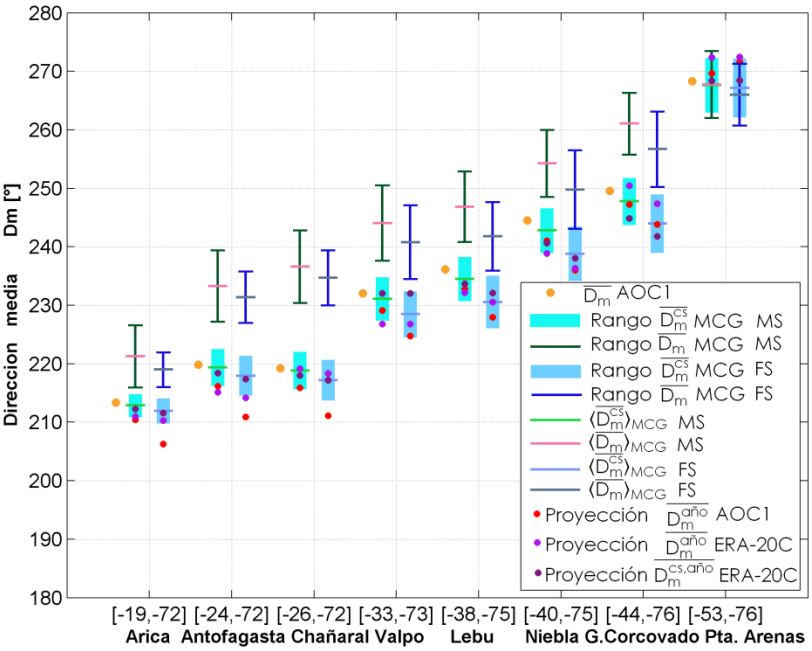


Figura 5 $\overline{D_m}$ para los períodos ACTUAL, medio siglo (MS) y fin de siglo (FS), ordenados de izquierda a derecha respectivamente para cada localidad. Los valores de los MCG corresponden al escenario RCP 8.5. Se presenta: 1) El valor ACTUAL estimado de AOC1 (puntos naranja); 2) Proyecciones de las tendencias de $\overline{D_m^{año}}$ para AOC1 (puntos rojos), $\overline{D_m^{año}}$ ERA-20C (puntos morado claro), $\overline{D_m^{cs,año}}$ ERA-20C (puntos morado oscuro); 3) $\langle\overline{D_m^{cs}}\rangle_{MCG}$ y $\langle\overline{D_m}\rangle_{MCG}$ para MS y FS como líneas horizontales entre el rectángulo coloreado y la barra de error, que indican el rango de los MCG con y sin corrección respectivamente

CONCLUSIONES

Se evaluó el clima de oleaje histórico y futuro de aguas profundas para 8 puntos a lo largo de Chile, generado a partir de 8 modelos climáticos globales (MCG) que fueron seleccionados según Hemer et al. (2015a). Los resultados- permiten contar con una cuantificación de las variaciones de los parámetros principales del oleaje para escenarios futuros hasta fin de siglo. Esta cuantificación entrega una herramienta que permite incorporar, de forma general, en los diseños y planificación costera y marítima, las tendencias, pronósticos e incertidumbres en los valores medios y extremos del oleaje.

El modelo con mejor desempeño general en la representación del clima de oleaje histórico para las costas chilenas es MRI-CMCG3 (Yukimoto et al., 2011) que es el que tiene mayor resolución espacial. Esto es consistente con las conclusiones de Hemer et al. (2015b).

Los MCG seleccionados para este estudio presentan una gran variabilidad inter-modelo en los parámetros de oleaje analizados. Esto se refleja en los rangos de los conjuntos de los MCG con corrección de sesgo como en los sin corregir.

Los MCG en general, indican una disminución de la altura significativa de período de retorno de 50 años (H_{50}), aunque existen localidades en las que se muestran leves aumentos para mediados de siglo y que para fines de siglo se estabilizan. Para este parámetro, no se observan tendencias latitudinales claras. Esto difiere levemente con CEPAL (2011), quién encuentra tendencias positivas para las alturas extremas en una porción significativa de la costa de Chile. Estas diferencias pueden ser atribuibles a: 1) las diferentes bases de datos de oleaje de cada estudio; 2) diferencias de los periodos temporales utilizados para el cálculo de los extremos de

oleaje; 3) los diferentes métodos de cálculo del parámetro H_{50}, ya que CEPAL (2011) lo obtiene por el método de máximos mensuales, mientras que en este trabajo se utilizó el método POT.

En cuanto al clima medio, la tendencia es al aumento de los valores promedio de la altura significativa ($\overline{H_S}$), a un aumento de los valores promedio de los períodos medios ($\overline{T_m}$) y a una desviación hacia el sur de los valores promedio de las direcciones medias ($\overline{D_m}$).

Aunque existen diferencias en las magnitudes, CEPAL (2011) y Molina (2011) coinciden en la tendencia positiva de $\overline{H_S}$ encontrada en este trabajo. Por ejemplo en Valparaíso, el aumento de hasta 0.22 [m] (0.011 [m/año]) para el año 2031 respecto a las condiciones actuales (Molina, 2011), es comparable al 0.009 [m/año] para el año 2045 encontrado en este trabajo para la tendencia de AOC1. Por otra parte, para la misma latitud, CEPAL (2011) estima una tendencia de aumento para H_S (media mensual) entre los años 2010 y 2070 de 0.005 [m/año], lo que es significativamente menor a los valores de Molina (2011) y el presente estudio.

Aunque existen diferencias en las magnitudes, hay una coincidencia en las tendencias positivas de $\overline{H_S}$. CEPAL (2011), para el periodo 2010-2070, encuentra aumentos entre 0.002 [m/año] y 0.010 [m/año]. El presente estudio presenta resultados similares para la tendencia de AOC1 con valores entre 0.003 [m/año] y 0.010 [m/año] para el período 2005-2045. Molina (2011) para el periodo 2011-2031 entre las latitudes 31° y 39°, encuentra aumentos entre 0.003 y 0.006 [m/año].

Se recomienda para futuros estudios: 1) mejorar el detalle espacial; 2) incluir otros parámetros estadísticos del oleaje (i.e., estacionales); 3) realizar modelaciones de oleaje propias con un modelo de oleaje calibrado para Chile de resolución espacial mayor a 1 ° x 1 ° (i.e. Hidalgo et al., 2015) del cual se pueda obtener información espectral del oleaje de aguas profundas, y que posteriormente se pueda propagar a cualquier sitio cerca de la costa en Chile; 4) proveer valores futuros y probabilidades de alcanzar estos valores para los parámetros de oleaje más relevantes; 5) analizar las varianzas y cambios asociados a las oscilaciones climáticas.

REFERENCIAS

Álvarez M., Beyá J. y Gallardo A., 2016. Comparación de análisis extremos uni y bivariado para marejadas recientes en Chile. XXVII congreso latinoamericano de hidráulica Lima, Perú.

Alves, J., 2006. Numerical modeling of ocean swell contributions to the global wind-wave climate. Ocean Modell. 11 (1-2), 98–122.

Ardhuin, F., Hanafin, J., Quilfen, Y., Chapron, B., Queffeulou, P., Obrebski, M., y otros, 2011. Calibration of the "IOWAGA" global Wave Hindcast (1991-2011) Using ECMWF and CFSR Winds. FRANCE.

Campos, R., Beyá, J. y Mena, M. 2015. Cuantificación de los daños históricos a infraestructura costera por marejadas en las costas de Chile. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Santiago, Chile.

Dee, D., Uppala, S., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., y otros, 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 553-597. http://dx.doi.org/10.1002/qj.828.

Dominguez, F., 11 de Mayo de 2016. Desde langostinos en Arica hasta ballenas en Aysén: ¿Cuál es la causa de las masivas varazones en Chile? [www.emol.com]. Recuperado de http://ow.ly/OQ6z303xF0A.

DOP - Dirección de Obras Portuarias 2013. Guía de diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras.

Goda, Y. 2000. Random seas and design of maritime structures (2nd ed.). Singapore; New Jersey: World Scientific.

Hemer, M., Katzfey, J., Trenham, C., 2013a. Global dynamical projections of Surface ocean wave climate for a future high greenhouse gas emission scenario. Ocean Modell. (Special Issue on Surface Ocean Waves) doi: 10.1016/j.ocemod.2012.09.008.

Hemer, M., Fan, Y., Mori, N., Semedo, A., Wang, X., 2013b. Projected future changes in wind-wave climate in a multi-model ensemble. Nat. Clim. Change 3 (5), 471–476. doi: 10.1038/nclimate1791.

Hemer, M., Trenham, C., Durrant, T., Greenslade, D., 2015a: CAWCR Global wind-wave 21st century climate projections. v1. CSIRO. Data Collection. http://doi.org/10.4225/08/55C991CC3F0E8.

Hemer, M., Trenham, C., 2015b. Evaluation of a CMIP5 derived dynamical global wind wave climate model ensemble, Ocean Modelling. http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.10.009.

Hidalgo, H., Gallardo, A., Beyá, J. F., & Esparza, C. 2015. Calibración del modelo Wavewatch III para las costas de Chile. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, (pp. 1-14). Santiago.

IPCC, 2013. Resumen para responsables de políticas en: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático" [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Molina, M., 2011. Estudio no estacionario de clima medio de oleaje en la costa central de Chile. Memoria de titulación Ingeniería Civil Oceánica Universidad de Valparaíso.

Poli, P., Hersbach, H., Tan, D., Dee, D., Thépaut, J., Simmons, A., Peubey, C., Laloyaux, P., Komori, T., Berrisford, P., Dragani, R., Trémolet, Y., Hólm, E., Bonavita, M., Isaksen, L. & Fisher, M., 2013: The data assimilation system and initial performance evaluation of the ECMWFpilot reanalysis of the 20th-century assimilating surface observations only (ERA-20C). ERA Rep. Series 14, 62 pp. [http://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2013/11699-dataassimilation-system-and-initialperformance-evaluation-ecmwfpilot-reanalysis-20th.pdf.]

Saha, S., & al, e., 2010. NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) Selected Hourly Time-Series Products, January 1979 to December 2010. Recuperado el 03 de 2015, de Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory: http://dx.doi.org/10.5065/D6513W89.

Sterl, A., Caires, S., 2005. Climatology, variability and extrema of ocean waves – The web based KNMI /ERA-40 wave atlas. Int. J. Climatol.25, 963997.

Taylor K., Stouffer, R., Meehl, G., 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design Bull. Am. Meteorol. Soc., 93 (2012), pp. 485–498.

Tolman, H., 2009. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version3.14. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276, 194 pp. + Appendices.

Wang, X., Feng, Y., Swail, V., 2014. Changes in global ocean wave heights as projected using multimodel CMIP5 simulations. Geophys. Res. Lett. 41, 1026–1034. doi:10.1002/2013GL058650.

Wang, X., Feng, Y., Swail, V., 2015. Climate change signal and uncertainty in CMIP5- based projections of global ocean surface wave heights. J. Geophys. Res. Oceans 120, 3859–3871. doi:10.1002/2015JC010699.

Winckler, P., Contreras, M., Beyá, J. y Molina, M., 2015. "El temporal del 8 de agosto de 2015 en la bahía de Valparaíso". XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Santiago, Chile.