

Research Article

Incertidumbre en los valores extremos del oleaje en Chile

Ariel Gallardo¹, Javier Valdivia² & José Beyá¹

¹Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile

²Ingeniería Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

Corresponding author: José Beyá (jose.beya@uv.cl)

RESUMEN. La falta de mediciones de oleaje es una realidad presente a la hora de realizar diseños de ingeniería marítima en Chile. Eventos como las marejadas del 3 julio 2013 y 8 agosto 2015 que dejaron cuantiosos daños estructurales, evidenciaron la falta de una red continua y de largo plazo de monitoreo de oleaje a la hora de estimar la frecuencia de ocurrencia de estos eventos. Esto implica que, en la actualidad, se debe confiar en bases de datos de oleaje de modelos de re-análisis globales, cuya calidad es desconocida para este propósito. En esta contribución se caracteriza la incertidumbre en la estimación de la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos de oleaje. Para esto se analizan valores extremos de distintas bases de datos de oleaje disponibles. La comparación entre los valores de retorno encontrados es significativa, alcanzándose diferencias del orden de cientos de años en la estimación del período de retorno de un determinado evento. La calidad de la información de estas bases de datos para valores extremos se evaluó comparando el 10% de los valores más altos de la estadística de la altura significativa espectral con mediciones satelitales en ocho zonas a lo largo de Chile. La incertidumbre en la altura significativa espectral de período de retorno de 50 años tiende a aumentar de norte a sur, con diferencias entre bases de datos de 2,3 a 6,7 m. Los estadígrafos utilizados en la comparación con mediciones satelitales, muestran en general, mejores ajustes en el norte que en el sur a excepción de R^2 . Las correlaciones encontradas son muy bajas, con valores de R^2 cercanos a 0 para puntos en la zona norte y donde la mejor correlación la alcanza la base de datos IFREMER frente al Golfo Coronados con un $R^2 = 0,66$. Los sesgos son en general negativos, indicando subestimaciones cercanas a 1 m para las alturas significativas mayores.

Palabras clave: oleaje, oleaje extremo, periodo de retorno, re-análisis, incertidumbre, altimetría satelital.

Uncertainty of wave extreme values in Chile

ABSTRACT. The lack of wave measurements is a reality when making marine engineering designs in Chile. Recent extreme wave events such as 3 July 2013 and 8 August 2015, left considerable structural damage and put into evidence the need for a continuous and long-term wave monitoring programme in order to adequately estimate the frequency of occurrence of these events. Presently, the frequency analysis relies on global wave reanalysis databases of unknown quality for this purpose. This contribution attempts to quantify the uncertainty in the extreme waves frequency analysis. An extreme wave frequency analysis was carried out for different available wave databases. There are differences of the order of hundred years in the significant wave height return values for recent events. The quality of the information of these databases was evaluated by comparing them with the 10% highest values of the significant wave height measured by satellite in 8 areas along Chile. The uncertainty in the 50 year return period spectral significant wave heights tends to increase from north to south, with differences between databases ranging from 2.3 to 6.7 m. The parameters used in the comparison with satellite measurements show, in general, better model skills in the north than in the south except for the R^2 parameter. Correlations are very low with values of R^2 near 0 for points in the north. The best correlation is found for IFREMER database in front of Golfo Coronados with $R^2 = 0.66$. Biases are generally negative indicating underestimates near 1 m for the highest significant wave heights.

Keywords: waves, extreme waves, return period, re-analysis, uncertainty, satellite altimetry.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo fue parte del proyecto FONDEF-IDeA IT13I20006 "Un Atlas de Oleaje para Chile" cuyo resultado principal es la elaboración de un Atlas de Oleaje que describe cuantitativa y cualitativamente el oleaje en Chile (Beyá *et al.*, 2016; www.oleaje.uv.cl). Antes de la publicación del Atlas la información de oleaje era escasa y de calidad desconocida. No existía un documento oficial y público que describiese cuantitativamente y en detalle el clima de oleaje frente a la costa de Chile. Estudios anteriores mencionaban algunos aspectos generales (*e.g.*, Scott *et al.*, 2002; Monárdez *et al.*, 2008) y otros contaban con descripciones globales (*e.g.*, Cruz *et al.*, 2009; Molina, 2011).

La normativa vigente en Chile, (SHOA, 2005), establece que los estudios de oleaje deben ser realizados a partir de una base de datos de oleaje espectral de largo plazo para caracterizar el clima de olas de un sector. La base de datos espectral puede ser obtenida a partir de mediciones directas o modelos de re-análisis.

En Chile, las mediciones de oleaje directas en aguas profundas son, en su mayoría, elaboradas y administradas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), que tiene registros de mediciones de oleaje con boyas de corta duración y localizadas mayoritariamente frente a la costa de Valparaíso, disponibles para uso público. Existen otras mediciones localizadas y de corta duración realizadas por puertos, universidades y otras instituciones que corresponden a monitoreos puntuales, realizados para proyectos específicos (Ossandón, 2014; Gallardo, 2015; Lucero, 2015). Esta información de aguas intermedias y de calidad desconocida es, por lo general, de difícil acceso.

Dada la inexistencia de una base de datos completa de mediciones de oleaje, es que en la práctica se utilizan bases de datos de oleaje espectral obtenidas a partir de modelos de re-análisis de oleaje. Los modelos actualmente utilizados son de tercera generación y resuelven la física del proceso de generación de oleaje por viento a partir de la ecuación de balance de acción de la densidad espectral del oleaje (Gelci *et al.*, 1957), incluyendo las interacciones no lineales ola-ola (Chawla *et al.*, 2011).

Centros de investigación internacionales, tales como National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), L'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IH-Cantabria), entre otros, y empresas privadas (Baird and Associates, FUGRO-OCEANOR)

han generado bases de datos de oleaje de amplia extensión temporal y espacial. Las empresas, a diferencia de los centros de investigación, proveen de bases de datos espectrales de uso restringido, validación limitada y de alto costo. Los centros de investigación, por otra parte, ponen a libre disposición las bases de datos, aunque solamente algunos parámetros estadísticos del oleaje y no los espectros completos.

En general, los modelos de re-análisis son calibrados y validados con mediciones de oleaje satelital y de boyas donde la presencia de valores extremos es baja. En otras palabras, los modelos son calibrados y validados para condiciones de oleaje donde predominan los estados de mar de mayor frecuencia de ocurrencia, por lo que la calidad de los ajustes con las mediciones de estados de mar menos frecuentes, no es necesariamente similar a los ajustes que utilizan todas las mediciones disponibles (Saha *et al.*, 2010; Ardhuin *et al.*, 2011; Chawla *et al.*, 2011).

La calidad de los ajustes de los modelos de re-análisis más utilizados a nivel mundial fue evaluada por Stopa & Cheung (2013). Estos autores cuantifican los ajustes de las bases de datos globales de oleaje ERA-Interim y NOAA-CFSR, para las que indican valores de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 0,33 y 0,62, y permiten estimar valores del coeficiente de determinación (R^2) del orden de 0,8 respectivamente, cuando son comparadas con mediciones de boyas en el Océano Pacífico sur. Indican también que el desempeño de estas bases de datos es mejor en otros lugares del mundo. Rascle & Ardhuin (2013) evalúan una base de datos de elaboración propia donde muestran valores de sesgo (BIAS) del orden de 10 cm para la costa de Chile.

Es importante considerar que las mediciones también tienen incertidumbre. Krogstad & Barstow (1999), Barstow *et al.* (2009) y Shanas *et al.* (2014) muestran comparaciones entre mediciones satelitales y de boyas donde observan diferencias entre 5 y 40%.

El presente trabajo intenta cuantificar la incertidumbre en las estimaciones del clima extremo en la actualidad, utilizando como base información de modelos de re-análisis globales de oleaje.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este estudio se recopiló información sobre las bases de datos de oleaje de re-análisis de libre disposición: ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011), NOAA-WWIII (NOAA, 2015), NOAA-CFSR (Saha *et al.*, 2010; Chawla *et al.*, 2011), IFREMER (Rascle & Ardhuin, 2013), y Explorador de Energías Marinas, (Departamento de Geofísica, Universidad de Chile DGF, 2013). También se cuenta con la

información de oleaje utilizada en proyectos de obras marítimas de la Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas (DOP, 2015). Además, se incluyó la base de datos FUGRO-OCEANOR, adquirida para el proyecto CORFO-INNOVA 09CN14-5718 “Catastro del recurso energético asociado a oleaje, para el apoyo a la evaluación de proyectos de generación de energía undimotriz”. La Tabla 1 indica la información de los modelos numéricos de re-análisis, donde H_{m0} es la altura significativa espectral, T_p y T_m son los períodos pico y medio espectrales y D_p y D_m las direcciones pico y media espectrales (Goda, 2000).

Para evaluar la calidad de las bases de datos de oleaje se recopiló toda la información disponible de mediciones de altura de ola de las misiones satelitales, ERS-1, ERS-2, ENVISAT administrados por European Space Agency (ESA), Jason-1 y 2 de Centre National d'Études Spatiales (CNES), GFO de NOAA y, Topex y Poseidon de NASA/CNES. De las bases de datos de re-análisis se extrajeron series de tiempo de altura significativa en puntos ubicados en aguas profundas frente a ocho localidades a lo largo de Chile continental. Para la extracción de la información satelital se definió una tolerancia espacial de 50 km para comparar los datos satelitales con cada punto extraído de la base de datos. Se revisó que los puntos no estuviesen influenciados por efectos de borde que pudieran afectar los resultados.

Para evaluar la calidad del ajuste de las bases de datos se calcularon los estadígrafos coeficiente de determinación (R^2) [1], sesgo (BIAS) [2], error cuadrático medio (RMSE) [3] y error medio absoluto (MAE) [4], para las alturas significativas espectrales sobre el percentil 90% en cada punto. Además, se calculó el valor de retorno de 50 años para cada base de datos y en cada localidad, eligiéndose este valor de retorno como representativo de los valores de diseño de obras marítimas en Chile (DOP, 2013). La Tabla 2 presenta los indicadores estadísticos que fueron utilizados para la cuantificación del desempeño de los modelos.

El análisis extremo se realizó mediante el método de máximos sobre un umbral (POT-Peak Over Threshold; Goda, 2000), que consiste en la selección de un valor umbral por sobre el que se seleccionan los valores extremos que serán utilizados en el análisis de valores extremos. El umbral se definió para seleccionar un máximo de 20 eventos por sitio con una independencia de 4 días de diferencia entre ellos. Luego, se probaron las distribuciones de probabilidades para valores extremos Weibull, Gumbel, Frechet y Log-Normal, escogiendo la de mejor ajuste según la comparación del coeficiente de determinación (R^2).

Se realizó un análisis de sensibilidad del número de eventos seleccionados y del método de evaluación del mejor ajuste encontrándose diferencias menores al 5% en los valores de retorno. De esta manera, se estima que los criterios seleccionados para el análisis extremo permiten realizar una comparación válida entre las distintas bases de datos en todos los puntos.

Para las distribuciones encontradas, se calcularon bandas de confianza que se obtuvieron realizando una simulación de Montecarlo de 10.000 casos, a las que se le introdujo un error aleatorio a cada altura de ola seleccionada mediante el método de máximos sobre el umbral (Rubinstein & Kroese, 2007). El error aleatorio se obtuvo de la distribución del error de mejor ajuste para cada base de datos en cada localidad. En la mayoría de los casos esta distribución correspondió a una de tipo logística.

Para cada caso de las simulaciones de Montecarlo se realizó un análisis de valores extremos donde se obtuvieron los valores esperados y las bandas de confianza del 90%. Las bandas de confianza finales se obtuvieron seleccionando los percentiles 95 y 5% de las bandas de confianza de los casos simulados. Esta técnica permitió incluir el error de las bases de datos en la estimación de las bandas de confianza, y no solo la variabilidad producida por la distribución de probabilidad de valores extremos según la metodología de Goda (2000).

La selección de los puntos para el análisis fue definida a partir de la disponibilidad de la información de oleaje proveniente de proyectos marítimos realizados por la DOP en Chile. Debido a las diferencias en las resoluciones de las bases de datos, los puntos extraídos de éstas para cada localidad están a lo más a 0.7071° de distancia con respecto a los de la Tabla 3.

Los períodos de información disponible varían para cada base de datos y abarcan desde 1980 hasta el 2015 (Fig. 1a). Las mediciones satelitales se encuentran disponibles desde 1992 hasta el 1 mayo 2014 (Fig. 1b). Sin embargo, éstas no son mediciones continuas y dependen de la frecuencia de paso del satélite, que de acuerdo a su velocidad orbital y trayectoria, puede variar de 3 a 17 días.

RESULTADOS

Debido a la carencia de mediciones de boyas en Chile, sólo se pudo utilizar mediciones satelitales para evaluar la precisión de las bases de datos en las ocho localidades analizadas (Tabla 3). La Figura 3 muestra el coeficiente de determinación (R^2), el sesgo (BIAS), el error cuadrático medio (RMSE) y error medio absoluto

Tabla 1. Descripción de las bases de datos de oleaje de re-análisis disponibles para este estudio.

Nombre	ERA-Interim	NOAA-WWIII	NOAA-CFSR	Explorador de energías marinas	IFREMER	FUGRO-OCEANOR	DOP
Modelo	Wave prediction Model (WAM, The WAMDI group, 1988)	WaveWatch III (Tolman, 2014)	WaveWatch III	WaveWatch III	WaveWatch III (Tolman, 2014)	Wave prediction Model (WAM)	WaveWatch III
Resolución espacial	0,25°x0,25° hasta 3°x3°	1,25° y 1°	0,5°x0,5°	1 km	0,5°x0,5°	0,5°x0,5°	-
Resolución temporal	cada 6 h	cada 3 h	cada 3 h	cada 1 h	cada 3 h	cada 3 h	cada 3 h
Cobertura espacial	Global	78S-78N	90S-90N	Desde Arica a Tierra del fuego	Global, hasta 80°N	Solo 4 puntos	Donde DOP ha desarrollado proyectos
Forzantes de viento	ECMWF	Viento operacional (NWWIII)	NCEP	Viento operacional (NWWIII)	Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)	ECMW	NCEP
Forzantes de Hielo	ECMWF	Campos de Hielo de la base ETOPO1	NCEP	Campos de Hielo de la base ETOPO1	ECMWF	ECMWF	NCEP
Batimetría	GEBCO	ETOPO2	ETOPO2	ETOPO2 y GEBCO	ETOPO2 y GEBCO	GEBCO	Desconocida
Parámetros de Oleaje	H_{m0} , T_p y D_m	H_{m0} , T_p y D_p	H_{m0} , T_p y D_p	H_{m0} , T_m y D_m	H_{m0} , T_p , D_p y D_m	Espectros bidimensionales	Clima de oleaje extremo y operacional

(MAE) para cada localidad y para las distintas bases de datos.

Se observan valores muy bajos de R^2 para todas las bases de datos en el norte del país, lo que es indicativo de una inadecuada representación del oleaje. Esto mejora hacia la zona austral, aunque los valores siguen siendo bajos, presentando el mayor valor de $R^2 = 0,66$ para el caso de la base de datos IFREMER frente al Golfo Coronados. Para las otras bases de datos se presentan valores de $R^2 < 0,56$ para toda la costa de Chile. El Explorador de Energías Marinas (EEM) muestra resultados muy bajos para todas las localidades. Las bases de datos que no son visibles en la Fig. 2a indican valores de R^2 muy cercanos a cero, excepto por FUGRO-OCEANOR, base para la que solo se cuenta con información en las localidades de Valparaíso, San Vicente y Golfo Coronados.

Los sesgos son casi siempre negativos, lo que es indicativo de una subestimación de los modelos de re-análisis, alcanzando valores máximos cercanos a -1 m y un promedio de -0,3 m. FUGRO-OCEANOR presenta los sesgos más pequeños dado que realizan un proceso de eliminación de errores sistemáticos de la base de datos original (Barstow *et al.*, 2009).

En general, el Explorador de Energías Marinas presenta sesgos menores a las otras bases de datos de libre acceso. NOAA-CFSR es la única base de datos que presenta sesgos positivos en algunas localidades indicando que tiene una tendencia a sobreestimar los valores más altos de las alturas de ola. En la zona norte, la magnitud de los sesgos tiende a ser menor que en las otras localidades.

Las bases de datos NOAA-CFSR en Coquimbo, IFREMER en Valparaíso y ERA-Interim en Golfo Coronados muestran sistemáticamente los niveles de ajuste más bajos considerando RMSE, MAE y BIAS. El bajo desempeño de estos casos no se evidencia al comparar los valores de R^2 .

Los valores de MAE también muestran una tendencia al aumento a medida que se avanza hacia el sur con valores medios de 0,6 m.

Promediando todas las localidades, FUGRO-OCEANOR presenta los mejores ajustes en comparación con las otras bases de datos. Esto se corrobora al considerar solamente las localidades en las que se cuenta con información de FUGRO-OCEANOR, a excepción del estadígrafo R^2 que muestra un mejor desempeño para IFREMER. Después de FUGRO-OCEANOR, IFREMER es la base de datos que presenta el segundo mejor desempeño general según los estadígrafos MAE, RMSE y R^2 . Según BIAS, EEM presenta el segundo mejor ajuste.

Tabla 2. Indicadores estadísticos utilizados para evaluar el desempeño de los modelos de re-análisis de oleaje. P_i y O_i corresponden a los datos modelados y observados en el instante i respectivamente y N es la cantidad de datos coincidentes y comparables en ambas series.

Indicador estadístico	Ecuación	N°
Coeficiente de determinación (R^2)	$R^2 = \frac{Cov(O, P)^2}{S_o^2 S_p^2}$ donde $Cov(O, P)$ es la covarianza entre O y P y S_o, S_p la desviación típica de O y P respectivamente.	[1]
Error medio ($BIAS$)	$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i - O_i$	[2]
Error cuadrático medio ($RMSE$)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$	[3]
El error absoluto medio (MAE)	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i - O_i $	[4]

Tabla 3. Coordenadas de puntos de comparación y H_{m0} correspondiente al percentil 90% de las mediciones satelitales.

Localidad cercana	Arica	Iquique	Antofagasta	Coquimbo	Valparaíso	Constitución	San Vicente	Golfo Coronados
Latitud [° O]	18,0	20,0	24,0	30,0	33,0	35,0	37,5	42,0
Longitud [° S]	72,5	72,5	72,5	74,0	73,5	74,0	75,0	75,0
H_{m0} p90 Satélite (m)	2,74	2,86	3,12	3,64	3,88	3,99	4,08	4,53

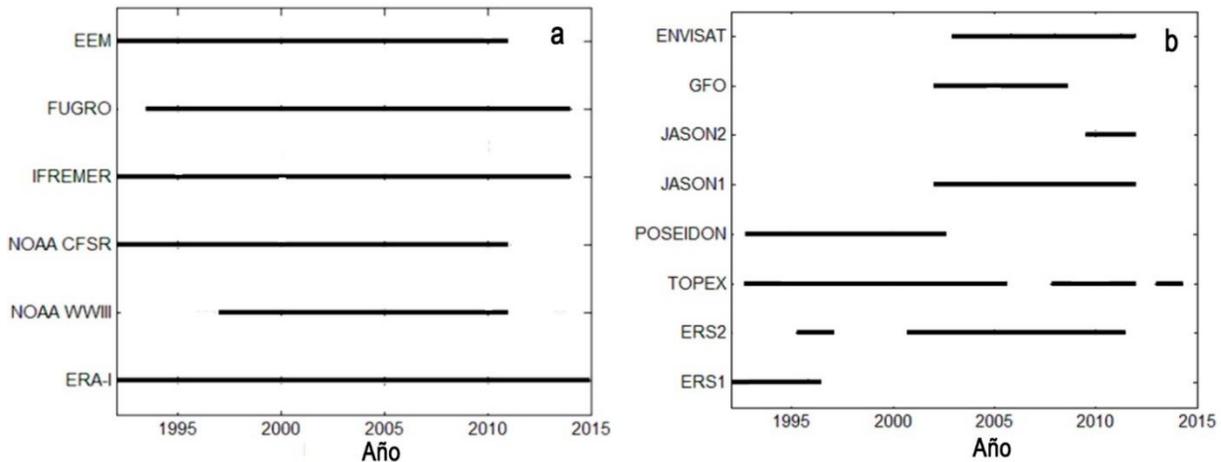


Figura 1. a) Extensión temporal de las bases de datos de oleaje de modelos de re-análisis, b) misiones satelitales que midieron oleaje por altimetría utilizadas en el presente estudio.

La Figura 3 muestra las curvas de distribución de altura de oleaje extremo y la dirección media de las tormentas seleccionadas para cada una de las bases de datos en puntos en aguas profundas frente a Arica, Valparaíso y Golfo Coronados. Al respecto, se observa

gran variabilidad en los resultados de los valores extremos del oleaje dependiendo de la base de datos utilizada en el análisis. Se encuentran diferencias superiores a 2,5 m para los valores de retorno de la altura significativa para períodos sobre 20 años. Es

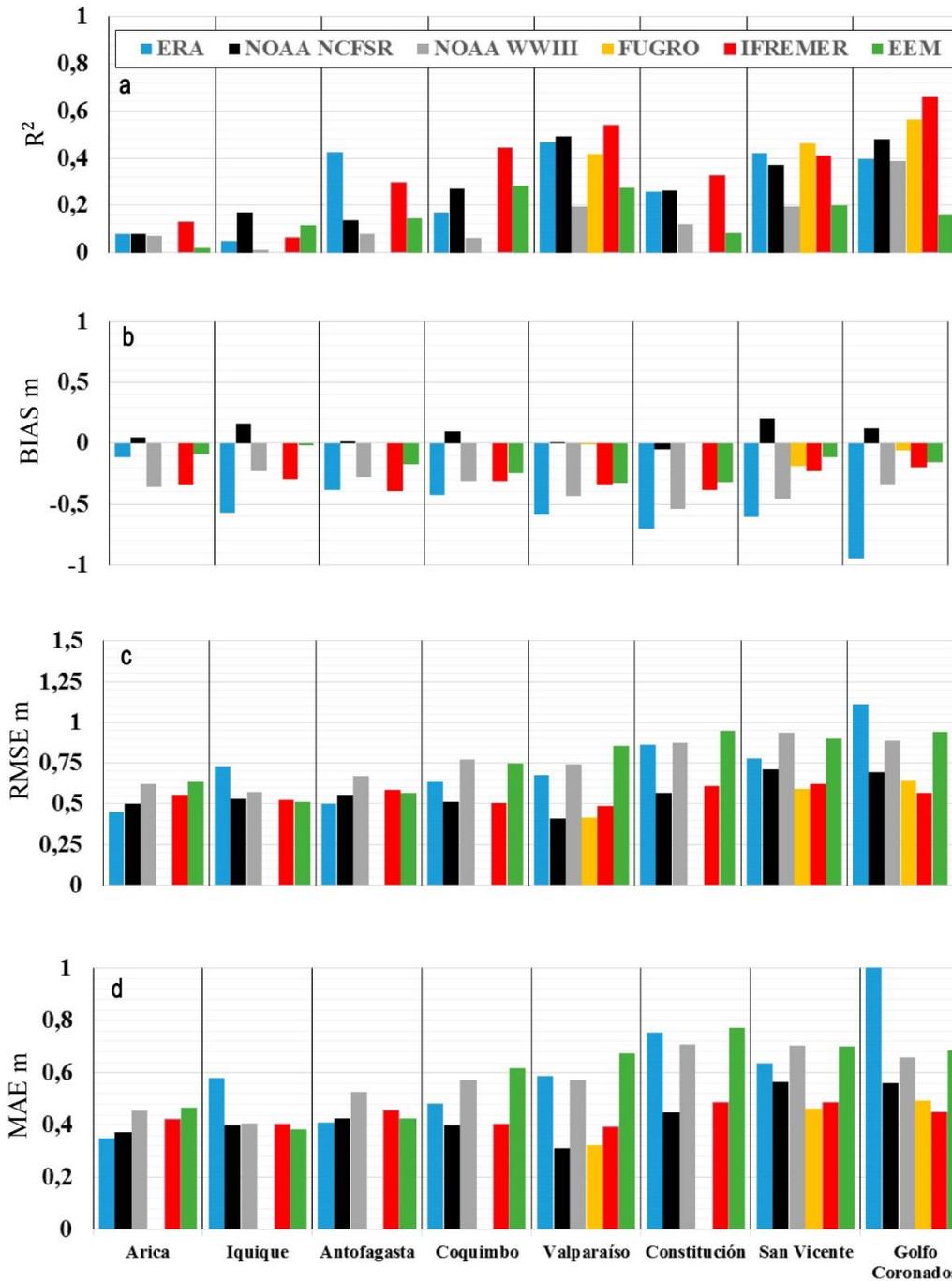


Figura 2. Gráficos de estadígrafos que miden la calidad del ajuste de las bases de datos de re-análisis con las mediciones de altimetría satelital para las alturas sobre el percentil 90%. a) Coeficiente de determinación (R^2), b) sesgo (BIAS), c) error cuadrático medio (RMSE), d) error medio absoluto (MAE).

preocupante que dos bases de datos utilizadas comúnmente para el diseño de obras marítimas (DOP y FUGRO-OCEANOR) presenten diferencias tan importantes para la localidad de Valparaíso, donde DOP entrega valores mucho más conservadores.

Una comparación con mediciones de marejadas recientes e importantes muestra que la esperanza de los

períodos de retorno (T_r) de las marejadas del 3 julio 2013 y del 8 agosto 2015 puede variar entre $T_r > 200$ años (ERA-Interim) y $T_r \sim 1$ año (EEM).

La Figura 4 muestra el valor de retorno de 50 años de la altura significativa para las distintas localidades. Para cuantificar la incertidumbre de estas estimaciones, incluyendo la calidad de los ajustes de las bases de da-

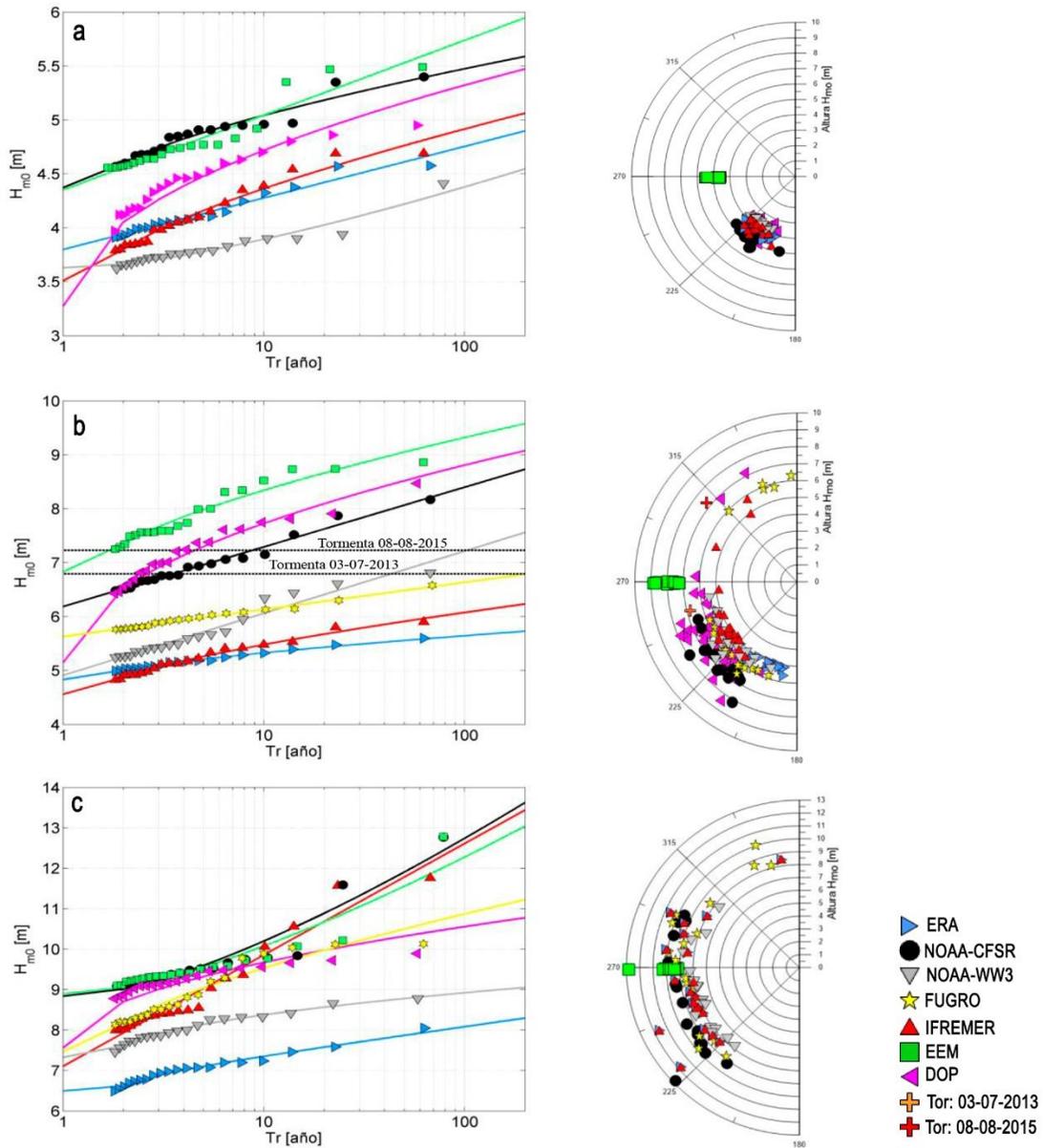


Figura 3. Distribución de eventos extremos *v/s* periodo de retorno para las siete bases de datos disponibles en conjunto a la máxima medición de oleaje medida por una boya en las localidades de: a) Arica, b) Valparaíso y c) Golfo Coronados. Líneas negras punteadas indican altura máxima medida por boya SHOA en las marejadas del 3 julio 2013 y 8 agosto 2015.

tos de re-análisis, se graficaron barras de error que indican la banda de confianza del 90%. Se observan diferencias cercanas al 50% del valor promedio de los valores de retorno de 50 años para cada localidad. Además existe una tendencia al aumento de los valores de retorno y de las bandas de confianza hacia el sur.

DISCUSIÓN

Del análisis presentado en este trabajo se evidencian deficiencias importantes en la calidad y extensión

espacial y temporal de la información de oleaje disponible en Chile. Esto induce una gran incertidumbre en los valores de retorno del oleaje que son comúnmente utilizados, como las solicitudes para diseño de obras marítimas. En general, existe una subestimación de los valores extremos dado que el parámetro BIAS es mayoritariamente negativo.

Las bases de datos comparadas muestran importantes diferencias en la estimación de los valores de retorno y un ajuste bajo con las mediciones satelitales más altas de la estadística. Dicho ajuste es aún más pobre para el

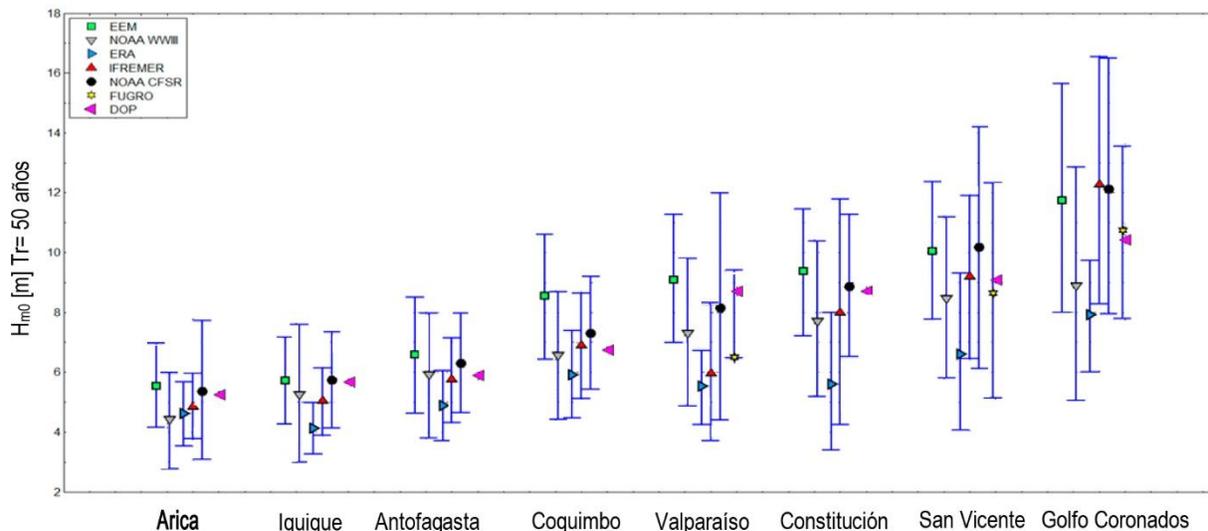


Figura 4. Altura significativa del oleaje calculada para el periodo de retorno de 50 años en ocho localidades de Chile. Barras de error indican intervalos de confianza del 90%.

norte del país, y mejora, aunque se mantiene bajo, para el resto de las zonas. Esto incluye la base de datos FUGRO-OCEANOR que es utilizada frecuentemente en Chile para diseños de ingeniería marítima. La base de datos utilizada por DOP no pudo ser evaluada con este mismo análisis debido a restricciones sobre el uso de esta información.

Las diferencias encontradas entre bases de datos se deberían a los diferentes tipos y versiones de modelos utilizados, diferencias en resolución horizontal y temporal en las mallas de cálculo, diferencias en las fuentes y resolución espacial y temporal del forzamiento atmosférico (vientos), y diferencias en las parametrizaciones físicas utilizadas en los modelos y versiones de las distintas bases de datos (*e.g.*, Saha *et al.*, 2010; Chawla *et al.*, 2011; Dee *et al.*, 2011).

Los resultados muestran que la base de datos FUGRO-OCEANOR presenta los mejores ajustes para los valores de oleaje sobre el percentil 90%. Esto se debería a la corrección de errores sistemáticos que FUGRO-OCEANOR realiza utilizando información de altimetría satelital y de boyas cuando está disponible.

Se logró identificar una amplia variabilidad en la estimación de la frecuencia de ocurrencia de marejadas extremas en una amplia zona de localidades frente a la costa de Chile.

En la actualidad los diseños de obras marítimas utilizan valores de retorno de los parámetros estadísticos del oleaje obtenidos de bases de datos comerciales, sin considerar sus errores e incertidumbres. Es importante que esta incertidumbre detectada se considere en la selección de los parámetros de diseño de las obras marítimas en Chile, en especial la indicación de subestimación en los valores extremos

detectada por el parámetro BIAS. Por esto es recomendable considerar realizar una corrección de errores sistemáticos en las bases de datos para mejorar las estimaciones de los valores de retorno.

Al evaluar distintas bases de datos es importante revisar los diferentes estadígrafos para lograr tener una visión más completa de los desempeños, ya que todos son complementarios y aportan en la identificación del comportamiento del error.

Los modelos de re-análisis presentan, en general, ajustes de menor calidad para el oleaje extremo que para el clima de oleaje operacional, por lo que es imprescindible mejorar la precisión que estos modelos tienen para los eventos más energéticos en Chile.

Existen escasas mediciones que permitan comparar de manera adecuada las bases de datos, en particular el estudio detallado de los eventos de oleaje extremos o marejadas. La extensión temporal de las mediciones de boya es restringida en duración, tiene poca cobertura espacial y se encuentra segmentada. La información satelital utilizada es discontinua y no permite evaluar la evolución del oleaje en el tiempo en un solo punto.

Es urgente contar con mediciones de oleaje de larga data, distribuidas a los largo de la costa de Chile para mejorar la calidad de la información de oleaje y lograr reducir la incertidumbre de las estimaciones de los valores extremos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por el programa Fondef-IDEA de CONICYT mediante el proyecto IT13I20006 “Un Atlas de Oleaje para Chile”

y al equipo del proyecto compuesto por la Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas, Apuerto Ingeniería y La Universidad de Valparaíso a través de la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica y al Centro de Investigación y Modelamiento de Fenómenos Aleatorios de Valparaíso. Se agradece la facilitación de mediciones de oleaje al Servicio Hidrográfico e Oceanográfico de la Armada y al Proyecto CORFO-INNOVA 09CN14-5718 “Catastro del recurso energético asociado a oleaje para el apoyo a la evaluación de proyectos de generación de energía undimotriz”. Se agradece también la colaboración de Felipe Contreras, estudiante en práctica del proyecto.

REFERENCIAS

- Ardhuin, F., J. Hanafin, Y. Quilfen, B. Chapron, P. Queffeuilou & M. Obrebski. 2011. Calibration of the “IOWAGA” global wave hindcast 1991-2011. 12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Kohala Coast, Hawaii, 2011, pp. 6-11.
- Beyá J., M. Álvarez, A. Gallardo, H. Hidalgo, C. Aguirre, J. Valdivia, C. Parra, L. Méndez, F. Contreras, P. Winckler & M. Molina. 2016. Atlas de Oleaje de Chile. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso, Valparaíso, 169 pp.
- Barstow, S., G. Mørk, L. Lønseth & J. Mathisen. 2009. WorldWaves wave energy resource assessments from the deep ocean to the coast. Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, pp. 151-152.
- Chawla, A., D. Spindler & H. Tolman. 2011. WAVEWATCH III® Hindcast with re-analysis winds. Initial report on model setup. Environmental Modeling Center Marine Modeling and Analysis Branch-NOAA Tech. Note 291: 100 pp.
- Cruz, J., M. Thomson & E. Stavroulia. 2009. Preliminary site selection Chilean marine energy resources. Report by Garrad-Hassan & Partners Ltd. for the Inter-American Development Bank, Document number 1005/BR/02 Issue B: 8-14 pp.
- Dee, D.P., S.M. Uppala, A.J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, *et al.* 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137: 553-597.
- Departamento de Geofísica - Universidad de Chile (DGF). 2013. Explorador de energías marinas. Base de datos de oleaje. [http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Marino/info/Documentacion_Explorador_Marino.pdf]. Revisado: 15 agosto 2015.
- Dirección de Obras Portuarias (DOP). 2013. Guía de diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras. ARA Worley Parsons, Santiago (CD-ROM).
- Dirección de Obras Portuarias (DOP). 2015. Climas de oleaje utilizado en proyectos de la Dirección de Obras Portuarias - Chile.1, (Archivo de datos enviado vía email el 27 de Abril 2015). Ministerio de Obras Públicas, MOP, Santiago, [<http://www.dop.cl/seminarios/Paginas/Inicio2.aspx>]. Revisado: 10 Septiembre 2016.
- Gallardo, A. 2015. Calibración y validación del modelo STWAVE mediante mediciones y modelación matemática en un sector ubicado en la región de Valparaíso, Tesis de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, 91 pp.
- Gelci, R., H. Cazalé & J. Vassal. 1957. Prévision de la houle. La méthode des densités spectroangulaires. *Bull. Inform. Comité Océanogr. Etud. Côtes*, 9: 416-435.
- Goda, Y. 2000. Random seas and design of maritime structures. World Scientific, New Jersey, pp. 377-383.
- Krogstad H. & S. Barstow. 1999. Satellite wave measurements for coastal engineering applications. Elsevier Oceanogr. Ser., 37: 1-25.
- Lucero, F. 2015. Caracterización de energía del oleaje utilizando selección de climas de oleaje y métodos de propagación calibrados. Tesis de Maestría, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, pp. 185.
- Monárdez, P., H. Acuña & D. Scott. 2008. Evaluation of the potential of wave energy in Chile. 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, Portugal, pp. 1-8.
- Molina, M. 2011. Estudio no estacionario de clima medio de oleaje en la costa central de Chile. Tesis de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, 147 pp.
- National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA). 2015. NOAA Wavewatch III (NWW3) Global wave forecast model data archive. [<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/download.shtml>]. Revisado: 4 mayo 2015.
- Ossandón, Á. 2014. Caracterización del recurso energético del oleaje en la zona centro-sur de Chile. Tesis de Maestría, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, 151 pp.
- Rasche, N. & F. Ardhuin. 2013. A global wave parameter database for geophysical applications. Model validation with improved source term parameterization. *Ocean Model.*, 70: 174-188.
- Rubinstein, Y. & P. Kroese 2007. Simulation and the Monte Carlo method. Wiley-Interscience, Queensland, pp. 49-58.

- Saha, S., S. Moorthi, H. Pan, *et al.* 2010. NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) selected hourly time-series products, January 1979 to December 2010. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. [<http://dx.doi.org/10.5065/D6513W89>]. Revisado: 10 mayo 2015.
- Scott, D., D. Resio & C. Pantoja. 2002. Swell propagation and nearshore wave climate. [http://chl.erd.usace.army.mil/Media/2/4/7/Scott_Resio_Pantoja.pdf]. Revisado: 1 agosto 2015.
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). 2005. Instrucciones oceanográficas N°1, Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada PUB, 3201: 6 pp.
- Shanas. P.R., V. Kumar & N.K. Hithin. 2014. Comparison of gridded multi-mission and along-track mono-mission satellite altimetry wave heights with in situ near-shore buoy data. Elsevier Oceanogr. Ser., 2: 27-30.
- Stopa, E. & K. Cheung. 2013. Intercomparison of wind and wave data 1 from the ECMWF reanalysis interim and the NCEP climate forecast system reanalysis. Ocean Model., 75: 65-83.
- Tolman, H.L. 2014. User manual and system documentation of WaveWatch III, version 4.18. Environmental Modeling Center Marine Modeling and Analysis Branch, 282 pp.
- The WAMDI Group. 1988. The WAM model -a third generation ocean wave prediction model. J. Phys. Oceanogr., 18: 1-37.

Received: 15 April 2016; Accepted: 10 January 2017