

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

CALIBRACIÓN DEL MODELO WAVEWATCH III PARA LAS COSTAS DE CHILE

HÉCTOR HIDALGO LUARTE¹
ARIEL GALLARDO YAÑEZ²
JOSÉ BEYÁ MARSHALL³
CESAR ESPARZA ACUÑA⁴

RESUMEN

El presente trabajo se enmarca en el proyecto FONDEF IDeA IT3I20006 “Un Atlas de Oleaje para Chile” y se centra en la calibración del modelo WAVEWATCH III v.4.18 mediante la selección y modificación de las parametrizaciones de los procesos físicos que cuantifican los términos fuente de la ecuación de balance de acción de densidad espectral de oleaje. La calibración se realizó comparando los resultados de las modelaciones con mediciones de boyas escalares y direccionales ubicadas a lo largo de Chile. Los resultados indican que la comparación entre alturas significativas espectrales H_{m0} modeladas y medidas presentan coeficientes de determinación (R^2) entre 0.78 y el 0.87, con errores medios cuadráticos ($RMSE$) entre los 0.25m y 0.37m dependiendo del sector. Las parametrizaciones físicas del modelo que generan resultados más cercanos a las observaciones corresponden a la combinación: ST4, SEED, DIA, PR3, UQ propuesta en Ardhuin et al. (2011). Se concluyó que es conveniente calibrar el modelo para distintos periodos de tiempo.

¹ Alumno de Pregrado, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, UV – hector.hidalgol@alumnos.uv.cl

² Ingeniero de Proyectos, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, UV – ariel.gallardo@uv.cl

³ Profesor Auxiliar, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, UV – jose.beya@uv.cl

⁴ Ingeniero de Proyectos, APuerto Ingeniería Limitada – cesparza@apuerto.cl

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la información de oleaje en Chile es escasa y de calidad desconocida. No existe un documento oficial y público que describa cuantitativamente y en detalle el clima de oleaje frente a las costas de Chile. Existen estudios puntuales que mencionan algunos aspectos generales (Monárdez et al., 2008 ; Scott et al., 2002) y otros que lo describen de manera global (Cruz et al., 2009 ; Molina, 2011 ; CEPAL, 2012).

La normativa vigente en Chile (SHOA, 2005) establece que todo estudio de oleaje requiere de una base de datos de largo plazo de información espectral que permita conocer de forma completa y detallada el clima de olas en una región. Esta información puede ser obtenida a partir de dispositivos de medición directa (boyas, ADCP⁵, entre otros) y de medición indirecta (altimetría satelital).

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), quienes tienen disponibles para uso público registros de mediciones de oleaje con boyas de corta duración y localizadas mayoritariamente frente a las costas de Valparaíso. Existen otras mediciones localizadas y de corta duración llevadas a cabo por puertos, universidades y otras instituciones que corresponden a monitoreos puntuales realizados para proyectos específicos (Ossandón, 2014 ; Gallardo, 2015 ; Lucero, 2015).

Dada la inexistencia de una base de datos de oleaje completa de mediciones, es que en la práctica se aplican modelos matemáticos de tercera generación para poder caracterizar el clima de oleaje. Estos modelos resuelven la física del proceso de generación de oleaje por viento mediante una ecuación en derivadas parciales de advección conocida como “ecuación de balance de acción de densidad espectral de oleaje” (Gelci et al., 1957).

Centros de investigación internacionales (NOAA⁶, ECMFW⁷, Ifremer⁸, IH-Cantabria, entre otros) y empresas privadas (Baird and Associates, Fugro-Oceanor) han puesto sus esfuerzos en generar bases de datos de oleaje de amplia extensión temporal y espacial. Los organismos privados a diferencia de los centros de investigación proveen de bases de datos espectrales de uso restringido y a un alto costo. Los centros de investigación, por otra parte, ponen a libre disposición las bases de datos, aunque solamente la información de algunos parámetros estadísticos de oleaje y no los espectros completos

⁵Acoustic Doppler Current Profiler

⁶National Oceanic and Atmospheric Administration - <http://www.noaa.gov/>

⁷European Center for Medium-Range Weather Forecast - <http://www.ecmwf.int/>

⁸Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar - <http://wwwz.ifremer.fr/>

El presente trabajo se enmarca en el proyecto Fondef-IDeA IT13I20006 “Un Atlas de Oleaje para Chile”, que pondrá a libre disposición información cuantitativa sobre el clima de oleaje en Chile. Para esto, se generará una base de datos de oleaje espectral con el modelo WAVEWATCH III v.4.18. En este artículo se aborda los detalles del proceso de calibración de dicho modelo.

2. REVISIÓN TEÓRICA

El modelo WAVEWATCH III v.418 (WW3) es un modelo de base física de generación y propagación de oleaje de tercera generación, distribuido bajo licencia GNU por la MMAB⁹ de la NCEP¹⁰ de Estados Unidos. Toda información relacionada con la oscilación de la superficie del mar, se encuentra en el espectro de varianza energética $E(\sigma, \theta)$ el cual distribuye la energía en el dominio de la frecuencia σ y la dirección θ . El modelo WW3 estima la densidad de acción de oleaje $N = E/\sigma$ sobre la base de la ecuación de balance de acción de densidad espectral de oleaje (1), aplicada a un espectro definido en el espacio $X = (x, y)$, el tiempo t , el vector número de onda $k = (k_x, k_y)$ y la dirección. (Gelci et al., 1957).

$$\frac{\partial N(k, \theta, X, t)}{\partial t} + \nabla_x (C_g + U)N(k, \theta, X, t) + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k}N(k, \theta, X, t) + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}N(k, \theta, X, t) = \frac{S_t(k, \theta, X, t)}{\sigma} \quad (1)$$

Donde, C_g es la velocidad de grupo, U es la velocidad de la corriente promediada en la vertical y en el tiempo, las variables \dot{k} y $\dot{\theta}$ (2)(2) muestran las tasas de variación de densidad de acción de oleaje al interior del espectro en los dominios de la frecuencia (implícitamente escrito como número de ondas $k = 2\pi/L$, siendo L la longitud de onda) y la dirección, inducidos por efectos batimétricos e interacción ola-corriente:

$$\dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - k \frac{\partial U}{\partial s} \quad \dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + k \frac{\partial U}{\partial m} \right] \quad (2)$$

En la ecuación (1), los términos de la izquierda conforman la parte cinemática de la ecuación y constituyen los procesos involucrados en la propagación del oleaje en escalas oceánicas, mientras que los términos de la derecha, conocidos como “términos fuente”, involucran los procesos físicos que aportan, transfieren y disipan energía a cada componente del espectro. En la ecuación (3) se exponen todos los procesos físicos que en la actualidad se encuentran disponibles en WW3 (Tolman H. L., 2014).

$$S_t = S_{ln} + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} + S_{tr} + S_{sc} + S_{ice} + S_{ref} + S_{xx} \quad (3)$$

⁹ Marine Modeling and Analysis Branch

¹⁰ National Center for Environmental Prediction

Donde, S_{ln} : Crecimiento lineal, S_{in} : Crecimiento exponencial, S_{nl} : Interacción no lineal entre cuádrupletas ola-ola, S_{ds} : Disipación por rotura en aguas profundas y viento-swell, S_{bot} : Interacción del oleaje con el fondo marino, S_{db} : Disipación por rotura del oleaje inducida por fondo, S_{tr} : Interacción no lineal entre triadas Ola-Ola, S_{sc} : Disipación por dispersión inducida por fondo, S_{ice} : Interacción ola-hielo, S_{ref} : Reflexión por línea de costa y obstáculos, S_{xx} : Término fuente definido por el usuario.

El modelo permite seleccionar la parametrización de algunos de los procesos físicos que intervienen en la evolución del oleaje. Estas parametrizaciones se denominan “switches” de compilación y son seleccionados durante la instalación del modelo. Según Battjes (1994) los procesos físicos de mayor importancia en aguas oceánicas corresponden al crecimiento y disipación debido al viento junto con la interacción no lineal entre cuádrupletas (Holthuijsen, 2007).

La mayor dificultad que presenta la calibración de modelos matemáticos basados en la ecuación de balance de acción de densidad espectral de oleaje, es el control del crecimiento, la disipación y la transferencia de energía del espectro de olas, es decir, el balance de términos fuentes. Las parametrizaciones utilizadas en el balance de términos fuente puede variar dependiendo de la región, como se evidencia en los resultados de Janssen (1991) y Tolman & Chalikov (1996), donde en distintas regiones de estudio se presentan diferencias entre las forzantes generadoras de hasta tres veces en orden de magnitud. Utilizando distintas parametrizaciones mostraron resultados aceptables. Otra dificultad está en los errores que presentan los vientos forzantes que provienen de la aplicación de modelos matemáticos atmosféricos. Los vientos del reanálisis ERA-Interim (ECMWF, 2014) y el reanálisis del Climate Forecast System Reanalysis (Saha et al., 2010) presentan diferentes valores, por lo tanto, la calibración del balance de términos fuentes para una fuente de información de vientos no necesariamente es válida si se aplica a otra. La idea básica del proceso de calibración es detectar errores y encontrar correcciones y modificar las parametrizaciones físicas del modelo de olas. Para ello es importante contar mediciones de campo de amplia cobertura espacial y temporal (Ardhuin, 2014).

La Tabla 1 presenta las parametrizaciones físicas y sus respectivos switch disponibles en WW3 de algunos de los procesos que intervienen en la evolución del oleaje en aguas oceánicas (Tolman H. L., 2014).

Tabla 1. Parametrizaciones físicas disponibles en WW3

Paquetes de Crecimiento y Disipación por Viento (S_{ln}, S_{in}, S_{ds})	Switch
Calavari & Malonatte-Rizzoli (1981)	LN1
Spectral seeding WW3	SEED
WAM cycle 3 (Snyder et al., 1981 & Komen et al., 1984)	ST1
Tolman & Chalikov (1996)	ST2 ; STAB2
WAM cycle 4 (Bidlot et al., 2005)	ST3 ; STAB3
Ardhuin et al.(2010)	ST4
BYDRZ	ST6

Interacciones no Lineales (S_{nl})	Switch
DIA (Aproximación por interacciones discretas) (Hasselmann et al., 1985)	NL1
Generalized Multiple DIA (GMD) (Aproximación por interacciones discretas generalizada)	NL3
Esquemas de Propagación y Técnicas de Alivio del Efecto Garden Sprinkler (GSE)	Switch
Esquema de tercer orden y corrección de dispersión (Booij & Holthuijsen, 1987)	UQ ; PR2
Esquema de tercer orden y promediación de Tolman (Tolman, 2002)	UQ ; PR3

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó el modelo espectral de olas oceánicas de tercera generación WAVEWATCH III v. 4.18 (Tolman H. L., 2014), compilado bajo un protocolo de memoria distribuida utilizando bibliotecas MPI¹¹. Para su implementación se adquirieron dos servidores Dell R815, los cuales se incorporaron al clúster de servidores del CIMFAV¹². Los servidores adquiridos cuentan con 4 procesadores AMD Opteron 6348 de 2.4Ghz con 12 núcleos cada uno. De esta forma y utilizando 48 núcleos, se lograron tiempos de cálculo cercanos a 2.5h por año de simulación.

El modelo consta de una malla de cálculo de 1° x 1° de resolución, acotada entre las longitudes 110° Este y 60° Oeste y las latitudes 65° Norte y 65° Sur (Figura 1). Los resultados del modelo corresponden a estados de mar representados por espectros direccionales (o bidimensionales) cada tres horas con una resolución de 29 frecuencias por 24 direcciones.

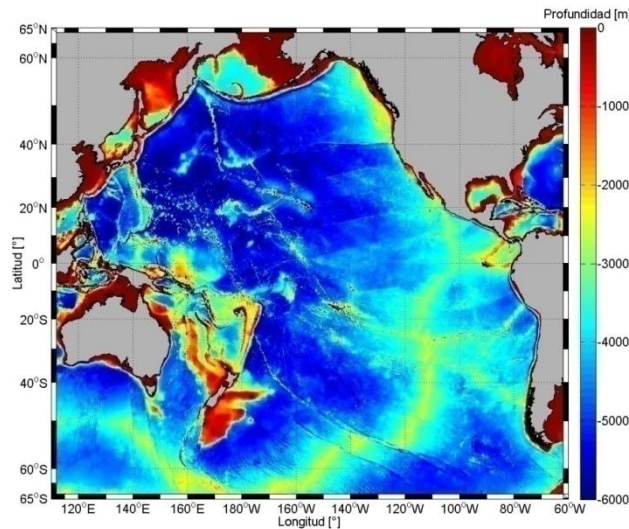


Figura 1. Malla Batimétrica utilizada, extraída de la base de datos ETOPOv2

Se utilizó una malla batimétrica de 1° x 1° de resolución que fue obtenida del conjunto de datos ETOPOv2 (NGDC, 2006), siguiendo la recomendación de Gallardo (2015) sobre la calidad de datos batimétricos globales disponibles (Figura 1). ETOPOv2 es una base de datos batimétricos de libre acceso de 2' x 2' de resolución. La línea de costa junto con detalles como islas y

¹¹Message Passing Interface

¹²Centro de Investigación y Modelación de Fenómenos Aleatorios, Valparaíso

formaciones rocosas significativas y más pequeñas que una celda de la malla, fueron obtenidas de la base de datos GSHHS¹³ (Wessel & Smith, 1996). Esta base de datos cuenta con distintas resoluciones que van desde 40m a 25km. Para este estudio se utilizó el conjunto de datos con 40m de resolución.

Las forzantes utilizadas en las simulaciones corresponden a campos de vientos a 10m de altura y porcentajes de cobertura de mar de hielo, obtenidas del reanálisis atmosférico ERA-Interim (ECMWF, 2014) desarrollado por ECMWF. Esta base de datos de libre acceso, presenta una resolución espacial de 1/3° x 1/3° y temporal de 6hrs, contiene información completa entre los años 1979 y 2015 y cuenta con actualizaciones mensuales.

La Tabla 2 presenta los indicadores estadísticos que fueron utilizados para la cuantificación del desempeño del modelo en la etapa de selección de los esquemas físicos y posterior calibración.

Tabla 2. Indicadores estadísticos utilizados. P_i y O_i corresponden a los datos modelados y observados en el instante i respectivamente, mientras que N es la cantidad de datos coincidentes y comparables en ambas series.

Indicador Estadístico	Ecuación
El error absoluto medio (MAE)	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i - O_i $
Error cuadrático medio (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$
Error medio (Sesgo)	$Sesgo = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i - O_i$
El índice de Skill, habilidad de pronóstico (Skill)	$Skill = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i^2}$
Coefficiente 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.
Coefficiente de determinación forzando el cruce por cero ($R^2_{cruce\ por\ cero}$)	$R^2_{cruce\ por\ cero} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \beta O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}$ Donde $\beta = \frac{\sum_{i=1}^n P_i O_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2}$ y \bar{P} el promedio de P .

La calibración del modelo se abordó en dos etapas, la primera se focalizó en la selección de las parametrizaciones físicas del modelo (switches) que permitan simular de manera adecuada la física de la generación de oleaje en el Océano Pacífico y la propagación de este hasta las costas de Chile. La segunda etapa se focalizó en la calibración de los parámetros o coeficientes de las

¹³ A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography

parametrizaciones seleccionadas, con la finalidad de ajustar los estados de mar simulados a los observados.

Para la selección de las parametrizaciones físicas se plantearon múltiples escenarios de simulación que se presentan en la Tabla 3. La evaluación del desempeño de estos escenarios estableció que es conveniente utilizar la configuración de parametrizaciones físicas planteada en el Test-11, el cual corresponde a la combinación de los parametrizaciones utilizadas por el Ifremer (Ardhuin et al., 2011).

Tabla 3. Escenarios de simulación planteados para la selección de parametrizaciones físicas en la calibración del modelo WW3

Escenario	Término Inicialización (S_{in})	Paquete de Crecimiento (S_{in})	Interacciones No lineales (S_{nl})	Esquema Propagación y Técnica de Alivio de GSE
Test_08	SEED	ST1	DIA	PR3 / UQ
Test_09	SEED	ST2/STAB2	DIA	PR3 / UQ
Test_10	SEED	ST3/STAB3	DIA	PR3 / UQ
Test_11	SEED	ST4	DIA	PR3 / UQ
Test_12	SEED	ST6	DIA	PR3 / UQ
Test_13	SEED	ST4	GMD	PR3 / UQ
Test_14	SEED	ST4	DIA	PR2 / UQ
Test_15	LN1	ST4	DIA	PR3 / UQ

Una vez definida la combinación de parametrizaciones físicas (Tabla 3, escenario Test-11), se buscó mejorar el desempeño del modelo ajustando algunos parámetros físicos que intervienen en los procesos de generación y disipación de la energía del oleaje. Los coeficientes de las parametrizaciones definidas en el switch ST4, se modificaron para los escenarios de calibración que se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Escenarios de simulación planteados para el ajuste de los coeficientes de la parametrización física seleccionada en la calibración del modelo WW3

Escenario	Parámetros del Crecimiento S_{in}		Parámetros de la Disipación S_{ds}	
	$Betamax$	$Z_{0,max}$	C_{ds}^{sat}	B_r
Test_11	1.520	1.002	-0.000022	0.00090
Test_16	1.150	1.002	-0.000022	0.00090
Test_17	1.330	1.002	-0.000022	0.00090
Test_18	1.425	1.002	-0.000022	0.00090
Test_19	1.520	1.002	-0.000022	0.00080
Test_20	1.425	1.002	-0.000022	0.00085
Test_21	1.400	1.002	-0.000022	0.00085
Test_22	1.520	1.002	-0.00003	0.00090
Test_23	1.520	1.002	-0.000022	0.00090
Test_24	1.520	1.010	-0.000022	0.00090

Para la evaluación del desempeño del modelo en los casos planteados en las Tablas 3 y 4 se utilizaron mediciones de oleaje de 8 boyas ubicadas a lo largo de la costa de Chile (Tabla 5). Sin

embargo en este trabajo solo se expone el detalle de los resultados obtenidos con la comparación de las boyas B1, B5 y B8.

Tabla 5. Boyas disponibles utilizadas en la selección de parametrizaciones físicas y ajuste de coeficientes en la calibración del modelo WW3.

Nombre	Localidad	Ubicación		Profundidad [m]	Periodo de medición		Fuente
		Lat.[°]	Lon.[°]		Inicio	Término	
B1	Arica	-19.37	-84.37	4420	2009-10-29	2013-12-31†	NDBC 32012
B2	Valparaíso	-32.99	-71.82	465	2009-08-30	2010-10-10	SHOA
B3	Valparaíso	-32.93	-71.67	190	2000-08-01	2003-08-01†	SHOA
B4	Valparaíso	-32.98	-71.62	190	1979-06-07	1981-08-10	SHOA
B5	V Región	-XX.XX	-XX.XX*	150	2011-06-16	2013-12-21†	CORFO-INNOVA*
B6	Constitución	-35.3	-73	710	1984-02-18	1985-02-22	SHOA
B7	VII Región	-XX.XX	-XX.XX	150	2011-08-30	2013-07-30†	CORFO-INNOVA*
B8	XIV Región	-XX.XX	-XX.XX	150	2012-11-21	2013-07-20	CORFO-INNOVA*

* La ubicación exacte de los instrumentos no puede ser revelada debido a un acuerdo de confidencialidad con el proyecto CORFO-INNOVA 09CN14-5718.

† Registros no continuos.

4. RESULTADOS

En la Tabla 7 se muestra el resumen de los indicadores estadísticos utilizados para cuantificar el desempeño de los escenarios de simulación planteados en la Tabla 3, en comparación a las boyas B1, B5 y B8.

En general, los escenarios planteados en la Tabla 3 no presentan una tendencia clara entre los distintos indicadores estadísticos analizados. Sin embargo el Test-11 presenta errores medios cuadráticos (*RMSE*) y errores absolutos (*MAE*) más bajos que el resto de los escenarios planteados. Es por tanto, que la combinación de parametrizaciones físicas propuestas en el Test-11, fue seleccionada como escenario base para la etapa de calibración de coeficientes internos.

En la Figura 2 se muestran los diagramas de dispersión para H_{m0} , resultantes de la comparación entre el Test-11 y las boyas B1, B5 y B8. Se observa un buen ajuste de los datos medios entre ambas series en comparación con otros escenarios. Sin embargo se presenta una subestimación por parte del modelo para los eventos más energéticos. Este patrón se repite para todas las boyas utilizadas.

En la Tabla 8 se muestra el resumen de los indicadores estadísticos utilizados para cuantificar el desempeño de los escenarios de simulación planteados en la Tabla 4, respecto a las boyas B1, B5 y B8.

Al igual que en el caso anterior, los escenarios planteados en la Tabla 4 no presentan una tendencia clara entre los distintos indicadores estadísticos utilizados, sin embargo se observa que

el Test-17 presenta errores medios cuadráticos más bajos que el resto de los escenarios planteados.

Finalmente, se realizó un análisis para evaluar el ajuste del modelo en distintos periodos de tiempo donde se utilizaron los indicadores estadísticos expuestos en la Tabla 2 para comparar los resultados de los distintos escenarios con datos de boya y satélites. A partir de este análisis se seleccionaron distintos escenarios de calibración para distintos periodos de tiempo, Tabla 6. Esta metodología de calibración fue empleada por el Ifremer en el desarrollo del proyecto IOWAGA (IOWAGA, 2013).

Tabla 6. Escenarios de calibración del modelo WW3 recomendados para distintos periodos de tiempo

Periodo de Tiempo [años]	1979 a 1990	1991 a 2000	2001 a 2003	2007 a 2008	2009	2010	2011 a 2013
Escenario	Test_16	Test_11	Test_15	Test_11	Test_21	Test_16	Test_17

Tabla 7. Indicadores estadísticos de boyas B1, B5 y B8 v/s escenarios de selección de parametrizaciones físicas del modelo WW3.

Boya B1		Escenario							
		Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14	Test-15
H_{m0}	N° Datos	15792	15792	15792	15792	15792	15792	15792	15792
	MAE [m]	0.410	0.377	0.346	0.212	0.349	0.254	0.224	0.212
	RMSE [m]	0.524	0.441	0.409	0.265	0.440	0.354	0.278	0.266
	SESGO [m]	-0.371	0.335	0.292	0.108	-0.336	-0.159	0.128	0.109
	Skill	0.778	0.813	0.827	0.887	0.813	0.850	0.882	0.887
	R ²	0.655	0.821	0.793	0.858	0.807	0.748	0.853	0.858
	R ² cruce por cero	0.596	0.798	0.679	0.769	0.777	0.700	0.755	0.769
Boya B5		Test-08	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14
H_{m0}	N° Datos	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001
	MAE [m]	0.506	0.323	0.330	0.303	0.366	0.359	0.411	0.303
	RMSE [m]	0.628	0.406	0.424	0.398	0.478	0.471	0.514	0.399
	SESGO [m]	-0.461	0.238	0.125	0.150	-0.295	-0.225	0.357	0.151
	Skill	0.752	0.840	0.833	0.843	0.811	0.814	0.797	0.842
	R ²	0.682	0.817	0.713	0.764	0.761	0.722	0.771	0.763
	R ² cruce por cero	0.663	0.777	0.576	0.690	0.700	0.719	0.693	0.689
Boya B8		Test-08	Test-08	Test-09	Test-10	Test-11	Test-12	Test-13	Test-14
H_{m0}	N° Datos	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685
	MAE [m]	0.591	0.342	0.347	0.283	0.355	0.391	0.338	0.284
	RMSE [m]	0.729	0.431	0.438	0.362	0.476	0.512	0.417	0.363
	SESGO [m]	-0.545	0.205	0.058	0.124	-0.297	-0.206	0.235	0.125
	Skill	0.726	0.837	0.835	0.864	0.821	0.807	0.843	0.863
	R ²	0.756	0.843	0.799	0.868	0.861	0.767	0.865	0.868
	R ² cruce por cero	0.715	0.822	0.636	0.827	0.831	0.766	0.818	0.827

Tabla 8. Indicadores estadísticos de boya B1, B5 y B8 v/s escenarios de ajuste de coeficientes de parametrizaciones físicas del modelo WW3.

Boya B1		Escenario									
		Test-11	Test-16	Test-17	Test-18	Test-19	Test-20	Test-21	Test-22	Test-23	Test-24
H_{m0}	N° Datos	15792	15792	15792	15792	15792	15792	15792	15792	15792	15792
	MAE [m]	0.212	0.209	0.186	0.193	0.190	0.186	0.190	0.187	0.212	0.212
	RMSE [m]	0.265	0.291	0.248	0.250	0.259	0.251	0.248	0.248	0.265	0.265
	SESGO [m]	0.108	-0.131	-0.008	0.051	-0.059	-0.026	0.036	-0.001	0.108	0.108
	Skill	0.887	0.876	0.895	0.894	0.890	0.894	0.895	0.895	0.887	0.887
	R ²	0.858	0.855	0.860	0.860	0.860	0.860	0.860	0.860	0.858	0.858
	R ² cruce por cero	0.769	0.768	0.772	0.771	0.769	0.771	0.772	0.769	0.769	0.769

Boya B5		Test-11	Test-11	Test-16	Test-17	Test-18	Test-19	Test-20	Test-21	Test-22	Test-23
H_{m0}	N° Datos	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001
	MAE [m]	0.303	0.271	0.267	0.281	0.267	0.266	0.276	0.270	0.303	0.303
	RMSE [m]	0.398	0.365	0.355	0.371	0.356	0.355	0.366	0.358	0.398	0.398
	SESGO [m]	0.150	-0.115	0.022	0.088	-0.029	0.004	0.071	0.030	0.151	0.150
	Skill	0.843	0.856	0.860	0.853	0.859	0.860	0.855	0.858	0.843	0.843
	R ²	0.764	0.795	0.781	0.772	0.781	0.780	0.774	0.777	0.764	0.764
R ² cruce por cero	0.729	0.711	0.701	0.714	0.711	0.703	0.708	0.689	0.69	0.729	
Boya B8		Test-11	Test-11	Test-16	Test-17	Test-18	Test-19	Test-20	Test-21	Test-22	Test-23
H_{m0}	N° Datos	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685	1685
	MAE [m]	0.283	0.274	0.255	0.265	0.258	0.256	0.261	0.257	0.283	0.283
	RMSE [m]	0.362	0.376	0.339	0.344	0.349	0.341	0.341	0.340	0.362	0.362
	SESGO [m]	0.124	-0.146	-0.007	0.061	-0.061	-0.026	0.043	0.001	0.124	0.124
	Skill	0.864	0.859	0.872	0.871	0.869	0.871	0.872	0.872	0.863	0.864
	R ²	0.868	0.875	0.873	0.871	0.873	0.873	0.871	0.872	0.868	0.868
R ² cruce por cero	0.834	0.831	0.832	0.833	0.832	0.832	0.827	0.827	0.834	0.831	

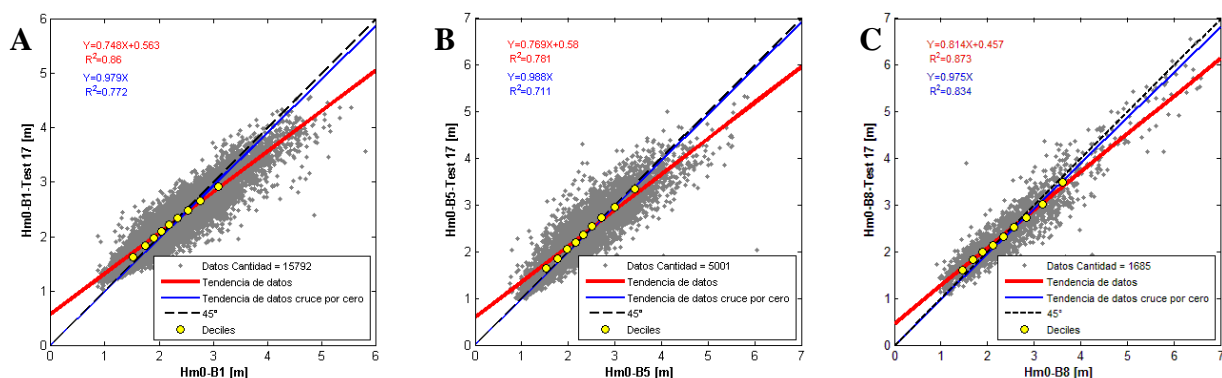


Figura2. Gráficos de dispersión H_{m0} . **A)** boya B1 v/s Test_11, **B)** boya B5 v/s Test_11, **C)** boya B8 v/s Test_11. Se incluyen líneas y ecuaciones que indican ajustes lineales de datos y deciles.

5. CONCLUSIONES

La calibración del modelo Wavewatch III v.4.18 fue lograda de manera exitosa mediante un análisis exhaustivo de la sensibilidad del modelo ante la selección parametrizaciones físicas y la modificación de sus coeficientes internos.

En general, la parametrización física que presenta el mejor resultado en la Tabla 7 en comparación a los escenarios planteados en la Tabla 3 es el Test_11. Esto debido a que este escenario tiene los menores errores en el error absoluto medio (*MAE*), error cuadrático medio (*RMSE*), y error medio (*SESGO*), además tiene el mayor coeficiente de determinación (R^2) y habilidad de pronóstico (*SKILL*).

De acuerdo a lo anterior, la combinación de parametrizaciones físicas propuesta en el Test-11, fue utilizada como base para la calibración de la estadística de oleaje de largo plazo requerida para el proyecto. Esta combinación corresponde a los switches de compilación que utilizó el Ifremer durante el desarrollo del proyecto IOWAGA.

Los resultados obtenidos en la Tabla 8, no presentan una tendencia clara entre los indicadores estadísticos analizados. Sobre esta base y de forma análoga a la metodología de calibración empleada por el proyecto IOWAGA, se identificó que el desempeño del modelo puede mejorar si se utilizan distintos escenarios de calibración en el tiempo.

Aunque no se presenta un análisis, en general, los periodos y direcciones del oleaje no presentan diferencias significativas entre los distintos escenarios planteados en la calibración del modelo. Esto se explica porque se encontró que las parametrizaciones físicas solo alteran la energía del espectro y no su distribución interna.

Finalmente, la calibración realizada con una malla batimétrica de $1^\circ \times 1^\circ$ de resolución obtenida del conjunto de datos ETOPOv2 (NGDC, 2006) y forzantes que corresponden a campos de vientos a 10m de altura y porcentajes de cobertura de mar de hielo, obtenidas del reanálisis atmosférico ERA-Interim (ECMWF, 2014) desarrollado por ECMWF, puede ser utilizada para modelar las base de datos de oleaje que permita realizar los análisis estadísticos de clima medio para el proyecto FONDEF IDeA IT3I20006 “Un Atlas de Oleaje para Chile”. Sin embargo, mayores análisis deben ser realizados con respecto al ajuste de los valores extremos. Esta calibración resultó de la selección de los parametrizaciones físicas ST4, DIA, SEED, PR3 y UQ y a los coeficientes internos de la parametrización físicas ST4 para los periodos de tiempo propuestos en la Tabla 6.

Para futuras investigaciones se recomienda: 1) Validar los resultados de la calibración comparando el desempeño del modelo con casos seleccionados mediante metodologías de clusterización (eg. Lucero et al. (2014)) ; 2) Validar los resultados de la calibración con altímetros satelitales, por medio de la técnica de comparación “along-track” (eg. Dimitrova et al. (2013)) ; 3) Comparar los resultados de la calibración con otras bases de datos disponibles (eg. Ifremer, ERA-Interim, NOAA-CFSR) ; 4) Continuar evaluando formas para mejorar el ajuste del modelo para los estados de mar más energéticos ; 5) Incorporar mayor cantidad de mediciones a medida que aparezcan disponibles ; 6) Incluir campos regionales de datos satelitales para la comparación de resultados del modelo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento entregado 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 - Valparaíso. Se agradece la facilitación

de mediciones de oleaje al Servicio Hidrográfico y 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”.

REFERENCIAS

Ardhuin, F. (12 de 03 de 2014). *ResearchGate*. Recuperado el 01 de 07 de 2015, de Why calibrate a spectral ocean wave model? And how do you do it:

http://www.researchgate.net/post/Why_calibrate_a_spectral_ocean_wave_model_And_how_do_you_do_it

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

Bidlot, J., Abdalla, S., & Janssen, P. (2005). *A revised formulation for ocean wave dissipation in CY25R1*. Tech. Rep Memorandum 509, ECMWF, Reading, U. K.

Booij, N., & Holthuijsen, L. (1987). Propagation of ocean waves in discrete spectral wave models. *Journal of Computational Physics* , 307-326.

Calavari, D., & Malonatte-Rizzoli. (1981). Wind-wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research*, Volume 86.

CEPAL. (2012). *Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe ; Dinámicas, tendencias y variabilidad climática*. CEPAL.

Cruz, J., Thomson, M., & Stavroulia, E. (2009). *Preliminary site selection Chilean marine energy resources*. Report by Garrad-Hassan and partners Ltd. for the Inter-American Development Bank, Document number 1005/BR/02 Issue B.

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., 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.

Dimitrova, M., Kortcheva, A., & Galabov, V. (2013). Validation of operational wave model WAVEWATCH III against altimetry data from JASON-2 satellite. *Bulgarian Journal of Meteorology Hydrology* , 1 -17.

ECMWF. (09 de 2014). *European Centre for Medium-Range Weather Forecast*. Recuperado el 09 de 2014, de ERA-Interim: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily>

Gallardo, A. (2015). *Calibración y validación del modelo STWAVE mediante mediciones y modelación matemática en un sector ubicado en la región de Valparaíso*. Santiago: Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico.

Gelci, R., Cazalé, H., & Vassal, J. (1957). Prévission de la houle. La méthode des densités spectroangulaires. *Bulletin d'information du Comité d'Océanographie et d'Estude des Côtes Vol.9* , 416-435.

Hasselmann, S., & Hasselmann, K. (1985). Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum Part I: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. *Journal of Physical Oceanography* , 1369-1377.

Hauser, R. (2012). *Evaluación del potencial undimotriz de Uruguay*. Tesis de maestría en mecánica de fluidos aplicada.

Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press.

Ifremer. (10 de 07 de 2015). *Ifremer wave hindcasts*. Recuperado el 01 de 08 de 2015, de https://forge.ifremer.fr/plugins/mediawiki/wiki/ww3/index.php/En:ifremer_wave_hindcasts

IOWAGA. (15 de 08 de 2013). Recuperado el 01 de 07 de 2015, de <http://wwz.ifremer.fr/iowaga/Products>

Janssen, P. (1991). Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *Journal of Physical Oceanography, Volume 21* , 1631-1942.

Komen, G., Hasselmann, K., & Hasselmann, K. (1984). On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of Physical Oceanography, Volume 14* , 1271-1285.

Lucero, F. (2015). *Caracterización de energía del oleaje utilizando selección de climas de oleaje y métodos de propagación calibrados*. Universidad Técnica Federico Santa María: Memoria de título y tesis de grado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil y al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil.

Lucero, F., Ossandon, Á., & Catalán, P. (2014). *Selección de climas de oleaje mediante métodos de argupamiento*. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, XXI Congreso Chileno de Hidráulica.

Molina, M. (2011). *Estudio no estacionario de clima medio de oleaje en la costa central de Chile*. Memoria del proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico.

Monárdez, P., Acuña, H., & Scott, D. (2008). Evaluation of the potential of wave energy in Chile. *Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, (págs. 1-9). Portugal.

NGDC. (06 de 2006). *National Centers for Environmental Information*. Recuperado el 01 de 03 de 2015, de 2-Minute Gridded Global Relief Data (ETOPOv2): <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/01mgg04.html>

Ossandón, Á. (2014). *Caracterización del recurso energético del oleaje en la zona centro-sur de Chile*. Universidad Técnica Federico Santa María: Memoria de título y tesis de grado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil y al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil.

Saha, S., et al. (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>

Scott, D., Resio, D., & Pantoja, C. (2002). *Swell propagation and nearshore wave climate*. Recuperado el 01 de 08 de 2015, de Documento de la base de datos del Coastal Hydraulics Laboratory (CHL) USACE: http://chl.erdc.usace.army.mil/Media/2/4/7/Scott_Resio_Pantoja.pdf

SHOA. (2005). *Instrucciones oceanográficas N°1, Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos*. Tercera Edición.

Snyder, R., Dobson, F., Elliott, J., & Long, R. (1981). Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics. Volume 102* , 1-59.

Tolman, H. (2002). Alleviating the garden sprinkler effect in wind wave models. *Ocean Modelling* 4 , 269-289.

Tolman, H. L. (2014). *User Manual and System Documentation of WaveWatch III, version 4.18*. Environmental Modeling Center Marine Modeling and Analysis Branch.

Tolman, H., & Chalikov, D. (1996). Source terms in a third-generation wind wave model. *Journal of Physical Oceanography*, Volume 37 , 2497-2518.

Wessel, P., & Smith, W. (1996). A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 101, NO. B4 , 8741-8743.