Incertidumbre en la estimación de la altura significativa espectral y el período energético en el modelado de propagación de oleaje - caso región de Valparaíso

Uncertainty in the estimation of the spectral significant wave height and energetic wave period from wave propagation models - case of Valparaíso region

Fecha de entrega: 29 de octubre 2015

Fecha de aceptación: 22 de marzo 2016

José Beyá¹, Ariel Gallardo¹, Felipe Lucero^{2,3}, Patricio Catalán^{3, 5, 6} y Andrés Puelma⁴

¹ Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, Av. Brasil 1786, Valparaíso, Chile, jose.beya@uv.cl, ariel.gallardo@uv.cl

² Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, P. Universidad Católica de Chile, Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Chile, felipe.lucero@outlook.com

³ Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Avenida España 1680, Valparaíso, Chile, patricio.catalan@usm.cl

⁴ PRDW Consulting Port and Coastal Engineers, Av. Alonso de Córdova 5900, Las Condes. Chile, apuelma@prdw.com

⁵ Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales, CONICYT/FONDAP/1511007, Santiago, Chile

⁶ Basal Project FB021, Centro Científico Tecnológico de Valparaíso, Valparaíso, Chile

Estetrabajoabordalanecesidaddecuantificarlaincertidumbre existente en las estimaciones de propagaciones de oleaje realizadas frecuentemente para proyectos de ingeniería marítima. Utilizando modelados y mediciones, se logró estimar la magnitud y variabilidad de los errores en las alturas significativas y períodos energéticos espectrales. Las alturas significativas espectrales modeladas presentaron, en general, una sobreestimación y errores absolutos relativos medios entre 8% y 14% respecto de las mediciones, dependiendo del modelo utilizado y de si la condición de borde correspondía a datos de oleaje en aguas profundas medidos u obtenidos de modelados globales de re-análisis. Cuando se utilizaron datos de re-análisis los errores alcanzaron valores medios de hasta 28% en los rangos de altura mayores ($H_{m0} > 3$ m). La confianza de la predicción disminuyó, encontrando valores de hasta 40% para el error relativo absoluto para un nivel de confianza del 95% aproximado. Los períodos energéticos modelados presentaron también una sobrestimación general y un aumento en los errores de hasta un 34% en promedio, al utilizar oleaje en aguas profundas de re-análisis. Los niveles de error encontrados indican la necesidad de que en Chile se cuente con mediciones de oleaje de largo plazo y se cuantifique la precisión en las mediciones y estudios de oleaje para su aplicación en diseño de obras marítimas y en la evaluación del potencial energético undimotriz.

Palabras clave: oleaje, incertidumbre, modelación, altura significativa espectral, período energético

This contribution shows the need to quantify the uncertainty in the wave propagation modelling, a technique frequently used in coastal engineering projects. The magnitude and variability of the errors in estimates of the significant wave height and the energetic wave period was evaluated using modelling and measurements. The modelling of significant wave heights showed mean absolute relative errors between 8% and 14% with respect to measurements depending on which model and deep water wave boundary conditions (buoy measurements or hindcasting) were used. A more detailed analysis indicated that when hindcast data was used, mean errors reached up to 28%, and that for the highest wave heights ($H_{m0} > 3$ m) the confidence decreased finding that the 95% approximate level for the absolute relative error reached up to 40%. Modelled energetic wave periods were generally over estimated and mean errors increased up to 34% when hindcast deep water wave data was used. The level of uncertainty found in this study indicate that in Chile it is necessary to have a long term wave database and a quantification of the accuracy in measurements and wave studies for wave power availability and coastal design assessments.

Keywords: waves, uncertainty, modelling, spectral significant wave, energetic wave period

Introducción

El modelado de la propagación de oleaje es frecuente en proyectos de ingeniería marítima y tiene como objetivo obtener estadísticas de climas de oleaje a nivel costero en uno o varios puntos de interés para el diseño y desarrollo de un proyecto. Por ejemplo, en el caso de proyectos portuarios, la altura del oleaje tiene incidencia directa en la evaluación de solicitaciones estructurales, transporte de sedimentos, cotas y otros aspectos del diseño. Uno de los factores más sensibles que puede incluso condicionar la inversión, es la evaluación de la disponibilidad operacional asociada a las condiciones del oleaje. Esta variable incide en la factibilidad de las maniobras, la eficiencia en la transferencia de carga y los riesgos de daño en elementos de amarre y atraque.

Por estas razones es importante validar y conocer el nivel de incertidumbre de los estudios de oleaje. Estudios de validación del modelo de propagación de oleaje STWAVE (*STeady State spectral WAVE*, <http://chl.erdc.usace.army.mil/software>) realizados por US Army Corps of Engineers, indican errores medios de la altura significativa del orden de 10% (USACE, 1998). Kabiling y Odronec (2010) utilizan el modelo MIKE 21 SW y obtienen errores del orden de 30% en la altura significativa para alturas de olas cercanas a los 2 m en un punto ubicado a 5 m de profundidad en Jupiter Inlet, Palm Beach, Florida. En el documento de mercadeo del mismo modelo (DHI, 2016) se muestran errores del orden del 5 al 10% en altura significativa y en los periodos medios, y del 10 al 15% en las direcciones medias.

Una cuantificación de los impactos que puede producir la incertidumbre en el clima de oleaje es presentada en estudios recientes sobre variaciones futuras debidas al cambio climático global, donde se revela que los impactos en la infraestructura costera pueden ser significativos. Mase *et al.* (2013) indican aumentos entre un 10% y 60% en los anchos de los diques verticales de la bahía de Osaka en Japón, para satisfacer los criterios de estabilidad ante el deslizamiento, considerando aumentos en las alturas de olas de aguas profundas del orden del 20%. Suh *et al.* (2012) identificaron un incremento de un 5% en el ancho de un dique vertical en el puerto de Hitachinaka en Japón producto de un aumento de 20% en la altura de oleaje de diseño.

En general, los modelos de propagación se utilizan para estimar el oleaje en profundidades intermedias a partir de información del oleaje en aguas profundas, pudiendo ser ajustados o calibrados mediante el manejo de variables como la resolución y tamaño de las mallas computacionales, fricción de fondo y esquemas de disipación de energía. Sin embargo, la batimetría y el oleaje en aguas profundas es la información de entrada más importante para lograr buenos resultados de estos modelos.

En este último punto y dada la escasez de mediciones frente a las costas de Chile, los estudios de oleaje normalmente utilizan estadísticas de clima de oleaje en aguas profundas que provienen de modelos globales de re-análisis, por ejemplo: NOAA/NCEP¹, ECMWF/Era-Interim², FUGRO-Oceanor³ y Olas del Pacífico⁴ (SHOA, 2005).

Para el presente trabajo se analizan algunos de los resultados obtenidos en el proyecto CORFO-INNOVA (2009), en adelante proyecto undimotriz. En dicho proyecto se realizaron batimetrías de detalle, mediciones de oleaje en aguas profundas e intermedias y se adquirieron bases de datos de oleaje espectral de re-análisis de largo plazo. Esta información se utilizó para calibrar y validar tres modelos numéricos distintos aplicados en las mismas zonas que permitieron generar mapas de potencia del oleaje y evaluar las diferencias entre los resultados de los modelos. Esta metodología contrasta con la mayoría de las aplicaciones donde los estudios de oleaje que se realizan se caracterizan por contar con una sola fuente de información de oleaje en aguas profundas, datos de batimetría que no siempre son de alta resolución, y excepcionalmente, consideran más de un modelo de propagación calibrado. Bajo dichas consideraciones, la información generada por el proyecto undimotriz es de la mejor calidad posible según las posibilidades tecnológicas actuales.

El presente trabajo se centra específicamente en la cuantificación de la incertidumbre asociada a la obtención del clima de oleaje a nivel costero a partir de un análisis de los errores en la propagación del oleaje. El estudio se acota a cuantificar el error en la estimación de la altura

¹ National Centers for Environmental Prediction, NOAA, USA.

² European Centre for Medium-Range Weather Forecast. ERA-Interim: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily>

³ http://www.oceanor.no/Services/Worldwaves/WW_database

⁴ <http://www.olasdelapacifico.com/>

significativa y el período energético para un solo punto, quedando para futuras investigaciones una extensión de este trabajo a otras zonas y a otros parámetros representativos de los estados de mar.

Metodología

La información utilizada para los análisis de este trabajo proviene de mediciones realizadas en la costa de la Región de Valparaíso, las que consisten en un levantamiento batimétrico de detalle y mediciones de oleaje (en aguas profundas y someras). El proyecto undimotriz cuenta con una cláusula de confidencialidad de la información por lo que algunos detalles sobre la ubicación de las mediciones no serán entregados. La información batimétrica corresponde a una combinación de datos de cartas náuticas SHOA, un levantamiento realizado especialmente para el proyecto hasta el veril 100 m (resolución 200 m x 200 m aproximadamente) y datos batimétricos globales (ETOPO, GEBCO resolución 1' x 1' y 0.5' x 0.5' respectivamente). Estos datos fueron sometidos a un detallado análisis de calidad que permitió corregir y elegir los datos más adecuados para cada zona de interés, para asegurar transiciones suaves entre las distintas mallas de cálculo (Gallardo, 2015).

El oleaje de aguas profundas (~ 150 m) se midió utilizando una boya direccional Triaxys y el oleaje de aguas intermedias (~ 20 m), con un ADCP Workhorse RDI-Teledyne también direccional. Las mediciones de ADCP se realizaron durante intervalos de 20 min cada 1 hr y las de boya durante 35 min cada 1 hr. La información de oleaje espectral de larga data en aguas profundas fue adquirida de FUGRO-Oceanor (desde aquí en adelante FUGRO), quienes detectan y corrigen, con mediciones satelitales, los errores sistemáticos de las salidas del modelo de re-análisis WAM que corre ECMWF. Los datos FUGRO son entregados cada 3 hr, y para este estudio solo se utiliza la información correspondiente al mismo período de las mediciones.

Los modelos numéricos, STWAVE v5.6, MIKE 21 SW v2014 y SWAN⁵ v.40.91ABC se calibraron definiendo un subconjunto de casos representativos de la totalidad de las mediciones en aguas profundas utilizando la metodología de *clustering* (agrupamiento) (Lucero *et al.*, 2013). Con

este subconjunto de datos se realizaron iteraciones en cada modelo para seleccionar los parámetros, configuraciones de batimetrías, mallas computacionales, metodologías de propagación, entre otros. Así, la calibración permitió representar el oleaje propagado con un menor error y con costos computacionales razonables.

Los modelos SWAN y STWAVE se corrieron finalmente utilizando un anidado de 3 mallas cuadradas con resolución de 500, 100 y 25 m. El modelo MIKE 21 SW se corrió utilizando una malla no estructurada cuya resolución varió entre 11 km y 100 m. Con el modelo STWAVE se corrieron 11 simulaciones de calibración para las cuales se varió la resolución de mallas, distintos escenarios de fricción de fondo, nivel del mar, fuentes de datos batimétricos y métodos de propagación de oleaje. Con SWAN se corrieron 6 simulaciones de calibración variando la opción de *whitecapping* y fricción de fondo. Con MIKE 21 se corrieron 9 simulaciones de calibración variando la resolución de la malla, método de interpolación de la batimetría y fricción de fondo.

En las simulaciones de calibración, los errores relativos absolutos de la altura significativa para los casos de calibración variaron entre 74% y < 0.1% para el modelo STWAVE, 23% y < 0.1% para el modelo MIKE 21 SW, y 70% y 14% para el modelo SWAN. Los errores relativos absolutos del período energético variaron entre 43% y 1% para el modelo STWAVE, 20% y 2% para el modelo MIKE 21, y 32% y < 0.1% para el modelo SWAN. Cabe destacar que dado que los casos seleccionados tienen una incidencia variable en el período de mediciones (entre 1.96% para el caso con menos incidencia y 43.5% para el caso de mayor incidencia), los errores más significativos e importantes de minimizar fueron los de los casos con mayor incidencia.

La validación de los modelos calibrados se realizó comparando los resultados de las simulaciones que utilizaron como dato de entrada el oleaje en aguas profundas medido por la boya Triaxys, con mediciones de oleaje en aguas intermedias, cuyas fechas de medición fueran comunes con las de la boya. Esto resultó en aproximadamente 170 días de coincidencia de fechas (4032 casos). Las mediciones de oleaje y las salidas de las simulaciones corresponden a espectros direccionales (bidimensionales) cada 1 hr, contando con 24 mediciones de los estados de mar por cada día de medición.

⁵ SWAN – Simulating WAves Nearshore (<http://swanmodel.sourceforge.net/>)

El proceso de calibración y validación permitió identificar la conveniencia de correr los modelos con sus parámetros de configuración por defecto, utilizando metodologías simplificadas de propagación espectral (matrices de cambio de dirección y de coeficientes de agitación) y datos batimétricos combinados entre sondeos realizados para el proyecto, cartas náuticas SHOA y datos globales GEBCO y ETOPO, utilizados en ese mismo orden jerárquico de acuerdo a su confiabilidad. Es conveniente indicar que el modelo SWAN se utilizó activando las opciones de *whitecapping* y fricción de fondo, aunque estas no presentaron diferencias significativas con respecto a los resultados modelados sin ellas.

Posteriormente, con los modelos calibrados, se realizaron simulaciones utilizando como datos de entrada el re-análisis FUGRO, en una ubicación geográfica cercana a la de la boya Triaxys y durante el mismo período de las mediciones, aunque, dada la menor resolución temporal de los datos solo se simularon 1349 casos. De esta manera, la comparación de los resultados de las simulaciones descritas permitieron obtener los errores respecto de las mediciones de aguas intermedias para 2 escenarios: 1) con datos de entrada de oleaje en aguas profundas medidos con la boya Triaxys y 2) con datos de entrada de oleaje en aguas profundas de la estadística de re-análisis FUGRO-Oceanor. Adicionalmente se cuantificaron los errores de los datos FUGRO al compararlos con la información de boya.

En este trabajo se presentan los resultados correspondientes a los errores encontrados para los parámetros H_{m0} , estimador espectral de la altura significativa y $T_{-1,0}$, período energético espectral (USACE, 2006; Cruz, 2008; p.105). El análisis estadístico del error se realiza en base al error relativo (1) y al valor absoluto de este error (2):

$$e\%_X(t) = \frac{X^{medición}(t) - X^{modelo}(t)}{X^{medición}(t)} \quad (1)$$

$$|e\%_X(t)| = \left| \frac{X^{medición}(t) - X^{modelo}(t)}{X^{medición}(t)} \right| \quad (2)$$

donde $e\%_X(t)$ indica el error relativo del parámetro X (H_{m0} o $T_{-1,0}$) en el tiempo t . El superíndice *medición* es indicativo de mediciones que pueden ser en aguas intermedias (ADCP), caso en el cual el superíndice *modelo* corresponde

a resultados de propagaciones realizadas con STWAVE, MIKE 21 y SWAN, o puede ser indicativo de mediciones en aguas profundas (boya Triaxys), donde *modelo* corresponde a los datos de re-análisis FUGRO. El análisis estadístico realizado corresponde a curvas de excedencia, promedios, medianas y percentiles.

Resultados

La Figura 1 muestra estadígrafos de los errores relativos y relativos absolutos para los parámetros H_{m0} y $T_{-1,0}$ modelados en aguas someras y del modelo de re-análisis (ver también Tablas 1 y 2 más adelante).

Figura 1: Errores relativos para distintos modelos y fuente de oleaje de aguas profundas, a) H_{m0} y b) $T_{-1,0}$ (cuadrados indican medianas para los modelados de aguas intermedias, círculos indican medianas para el modelo de re-análisis FUGRO, barras de error indican percentiles 95% y 5% y líneas indican máximos y mínimos).

En la Figura 2 se muestra una comparación entre las curvas

de porcentaje de excedencia del error relativo para los casos simulados con distintos datos de entrada de oleaje en aguas profundas y distintos modelos. Se observa que los modelos STWAVE y SWAN con los datos de boya (líneas continuas roja y azul) presentan un sesgo hacia los valores negativos indicando que, en promedio, las simulaciones sobrestiman la altura del oleaje. Este sesgo es menor en todos los otros casos (ver también, mediana $e\%_{Hm0}$ en Tabla 1).

Figura 2: Comparación de curvas de porcentaje de excedencia del error relativo $e\%_{Hm0}$ obtenido para la altura significativa.

Las modelaciones que utilizan datos FUGRO tienden a disminuir el sesgo. Sin embargo, una comparación de estos datos con la boya Triaxys indicó una sobreestimación promedio de un 17% en H_{m0} . Por lo tanto, no es posible explicar que la disminución del sesgo o error medio relativo al utilizar datos FUGRO se deba a una disminución en la altura significativa de estos últimos. Dicha disminución puede entonces deberse a diferencias en las características espectrales con los datos de boya que se traducen finalmente en una pérdida de energía espectral en el proceso de propagación.

En la Figura 3 se presentan los gráficos de dispersión entre los datos medidos y modelados, separados por modelo y por fuente de datos de entrada. Se puede observar que en general, los modelos explican de manera aceptable más del 60% de la varianza observada instrumentalmente. Por su parte, la pendiente de las curvas de ajuste, sin sesgo, es decir, forzadas a cruzar por el origen, indica variaciones máximas del orden de 11% (caso SWAN-boya). En general, las simulaciones con datos FUGRO presentan

mayores errores que las con datos de boya, lo que es esperable debido a que los datos de FUGRO corresponden a datos resultantes de modelos que no necesariamente representan el oleaje de manera exacta. La única excepción a esta tendencia es el modelo SWAN donde el error relativo absoluto medio disminuye al usar datos FUGRO (pendiente de la recta) pero la calidad del ajuste disminuye de un 80% a un 75% de la varianza (coeficiente R^2).

De esta manera, los resultados del modelado con datos de boya corresponden a la mejor configuración de cálculo obtenida, en la cual la mediana del error relativo absoluto $|e\%_{Hm0}|$ alcanzó valores de 10%, 9% y 13% para las simulaciones con los modelos STWAVE, MIKE 21 SW y SWAN, respectivamente. Al utilizar datos FUGRO la mediana de $|e\%_{Hm0}|$ aumenta a 13% y 14% para los dos primeros modelos y disminuye a un 8% para el modelo SWAN. Pese a las diferencias obtenidas, es posible observar que todos los modelos presentan errores del mismo orden de magnitud.

Tabla 1: Parámetros estadísticos de los errores porcentuales y errores porcentuales absolutos en la estimación de la altura significativa espectral H_{m0} , para simulaciones realizadas con distintos modelos (STWAVE, MIKE 21, SWAN) y datos de entrada (Boya Triaxys y FUGRO). La última columna corresponde a datos FUGRO comparados con mediciones de boya.

Parámetro	STWAVE boya	MIKE boya	SWAN boya	STWAVE FUGRO	MIKE FUGRO	SWAN FUGRO	FUGRO boya
$e\%_{Hm0} \text{ max}$	41	46	38	55	47	28	62
$e\%_{Hm0} \text{ min}$	-97	-82	-105	-91	-98	-103	-187
$e\%_{Hm0} \text{ promedio}$	-7	0.1	-11.5	0.9	-1	-5	-17
mediana $e\%_{Hm0}$	-6	1	-11	2	-1	-4	-15
percentil 5% $e\%_{Hm0}$	-31	-23	-39	-36	-36	-32	-47
percentil 95% $e\%_{Hm0}$	15	21	13	31	31	14	8
promedio $e\%_{Hm0}$ $H_{m0} > 3 \text{ m}$	4	7	-5	26	3	0	-10
promedio $ e\%_{Hm0} $	12	10	15	16	16	11	19
mediana $ e\%_{Hm0} $	10	9	13	13	14	8	16
promedio $ e\%_{Hm0} $ $H_{m0} > 3 \text{ m}$	10	12	12	28	15	8	14
percentil 95% $ e\%_{Hm0} $	31	26	39	40	39	32	47

Figura 3: Gráfico de dispersión para mediciones H_{m0} ADCP y H_{m0} modelo: a) STWAVE, b) MIKE 21 SW y c) SWAN. Se incluyen simulaciones con datos de boyas Triaxys (círculos negros) y estadística FUGRO (círculos rojos), líneas y ecuaciones indican ajustes lineales a los datos.

En la Tabla 1 se muestra que para el percentil 95%, $|e\%_{H_{m0}}|$ varía entre 26% y 39% cuando se utilizan mediciones de boyas, y entre 32% y 40% cuando se utilizan datos FUGRO. Esto indica una aproximación del valor del error relativo absoluto correspondiente a un nivel de confianza del 95%.

Un resultado que llama la atención es, que para el modelo STWAVE con datos FUGRO, el promedio de $|e\%_{H_{m0}}|$ obtenido para H_{m0} superiores a 3 m es de 28%, en comparación con todos los otros casos que presentan $|e\%_{H_{m0}}|$ promedio inferiores a 15%. Esto indica que al usar el modelo STWAVE con datos FUGRO se presentan errores relativos mayores para los estados de mar más energéticos induciendo en este caso un error cercano a 2 veces el error medio. Esto también se observa en la Figura 3 donde se aprecia que este error además se debe a una subestimación de los modelos para los valores más altos de H_{m0} .

El análisis del error en el período energético $T_{-1,0}$ muestra que en las simulaciones con datos FUGRO, los errores relativos absolutos y los sesgos aumentan (Tabla 2). Un análisis de $|e\%_{H_{m0}}|$ modelado con datos de boyas indica que, en promedio, no varía significativamente al cambiar la dirección de incidencia del oleaje en aguas profundas (Tabla 3). En este análisis debe considerarse que en el 97% de los casos el oleaje proviene de las direcciones SO y SSO y que la tendencia del promedio de $|e\%_{H_{m0}}|$ a disminuir para la dirección O carece de representatividad estadística dado el escaso número de casos registrados para esa dirección. Se incluye el error del modelo de re-análisis (FUGRO) por direcciones donde se observa un mayor número de datos debido a una mayor coincidencia de fechas entre datos FUGRO y boyas que entre datos de boyas y ADCP.

Discusión

El error relativo absoluto en la altura significativa modelada es cercano al 10% en promedio y menor al 40% para un nivel de confianza aproximado del 95%, utilizando datos de aguas profundas medidos para todos los modelos. Esto está en acuerdo con Domínguez *et al.* (2014) y Lucero y Catalán (2014) quienes encontraron valores medios similares para datos medidos frente a las costas de la región de Valparaíso y la región del Bío Bío, respectivamente. Oh *et al.* (2009) encontraron errores relativos absolutos medios entre 3 y 27% para H_{m0} en modelaciones realizadas con MIKE 21

Tabla 2: Parámetros estadísticos de los errores porcentuales absolutos en la estimación del período energético espectral, $T_{-1,0}$ para simulaciones realizadas con distintos modelos (STWAVE, MIKE 21; SWAN) y datos de entrada (Boya Triaxys y FUGRO). La última columna corresponde a datos FUGRO comparados con mediciones de boya.

Parámetro	STWAVE boya	MIKE boya	SWAN boya	STWAVE FUGRO	MIKE FUGRO	SWAN FUGRO	FUGRO vs boya
$e\%_{T-1,0}$ max	22	15	8	14	8	8	33
$e\%_{T-1,0}$ min	-49	-55	-77	-73	-112	-95	-48
$e\%_{T-1,0}$ promedio	-4	-14	-21	-22	-35	-27	3
mediana $e\%_{T-1,0}$	-4	-14	-20	-21	-34	-26	3
percentil 5% $e\%_{T-1,0}$	-17	-29	-39	-38	-68	-48	-10
percentil 95% $e\%_{T-1,0}$	8	-2	-7	-7	-5	-8	15
promedio $e\%_{T-1,0}$ $H_{m0} > 3$ m	-4	-14	-21	-22	-35	-27	3
promedio $ e\%_{T-1,0} $	7	15	21	22	35	27	6
mediana $ e\%_{T-1,0} $	6	14	20	21	34	26	5
promedio $ e\%_{T-1,0} $ $H_{m0} > 3$ m	7	15	21	22	35	27	6
percentil 95% $ e\%_{T-1,0} $	17	29	39	38	68	48	16

Tabla 3: Promedio de $|e\%_{Hm0}|$ y número de casos por dirección y modelo

Dirección	STWAVE boya		MIKE 21 boya		SWAN boya		FUGRO vs boya	
	$ e\%_{Hm0} $	Nº	$ e\%_{Hm0} $	Nº	$ e\%_{Hm0} $	Nº	$ e\%_{Hm0} $	Nº
S*	15	9	12	9	20	9	-	-
SSO	13	2.563	11	2.563	17	2.563	3	29
SO	10	1.292	10	1.292	12	1.292	7	2.689
OSO*	10	104	12	104	10	104	7	1.442
O*	10	42	12	42	15	42	7	214
ONO*	12	9	16	9	16	9	8	48
NO*	16	13	16	13	17	13	12	18
NNO*	15	9	12	9	20	9	9	10

* Direcciones con bajo número de casos por lo que el error estándar del estimador estadístico promedio de $|e\%_{Hm0}|$ es mayor

BW, SWAN y Ref/Dif. Estos valores son del orden de los encontrados en este trabajo. Los modelos utilizados en este estudio, en general, tienden a sobreestimar tanto la

altura significativa como el período energético. Esto se ve reflejado en los valores negativos de las medianas de los errores relativos. Dichos errores pueden deberse a errores en las mediciones de oleaje, batimetría, datos de re-análisis y en los algoritmos de propagación. Aunque se hicieron los mayores esfuerzos por minimizar los errores de medición, no fue posible cuantificar la influencia de éstos en el error total de modelación.

Las calibraciones y desempeño de los modelos numéricos presentan sesgos y errores que varían según la magnitud de la altura significativa espectral. En el caso del modelo STWAVE, si bien entregó un error relativo absoluto medio similar al modelo MIKE 21 SW, para las alturas mayores ($H_{m0} > 3$ m) presentó un aumento considerable del error relativo absoluto con un sesgo positivo, es decir, subestimando las alturas. En general el modelo SWAN entregó los resultados de menor precisión aunque, en el caso de H_{m0} , por la cancelación de errores sistemáticos, los valores medios de los errores absolutos parecen disminuir notablemente al utilizar los datos FUGRO.

Respecto de los datos de entrada, se observó que los errores relativos absolutos medios, en general, al utilizar datos de oleaje en aguas profundas de re-análisis, aumentan sobre 14% para las alturas significativas y sobre 22% para los períodos energéticos modelados, en relación a los resultados modelados con mediciones de boya. El error es significativamente mayor para alturas de ola en el rango más alto de las mediciones, lo que sugiere algunas dificultades para modelar los eventos de mayor altura cuando se utilizan datos de oleaje de re-análisis. Esto es relevante para la caracterización de eventos extremos y estimación de los valores de retorno utilizados en el diseño de estructuras costeras.

Se infiere que la disminución del sesgo al utilizar los datos de re-análisis FUGRO ocurre por cancelación de errores sistemáticos que no dependen de la altura significativa, sino más bien, de la distribución de la energía espectral en frecuencias y direcciones. Esto considerando que las modelaciones de aguas profundas a intermedias tienden a sobreestimar H_{m0} y a que las alturas de ola de FUGRO son, en general, mayores a las medidas. Encontrar errores relativos medios inferiores al utilizar datos de re-análisis de oleaje no era esperable en una primera instancia.

Finalmente, respecto de la metodología utilizada, el error de la medición no fue cuantificado en aguas profundas ni en aguas intermedias. El error medio de las mediciones según Rørbæk y Andersen (2000), puede ser del orden del 5% para H_{m0} y T_{02} , aunque Hoitink y Schroevers (2004) muestran que éste puede ser de hasta un 20% dependiendo de la configuración de los instrumentos.

Conclusiones

En este estudio se entregan valores referenciales sobre los errores asociados al modelado de oleaje que pueden ser usados como una primera aproximación en la estimación del riesgo, incertidumbre y factores de seguridad en las forzantes de diseños de estabilidad y desempeños de diseños operacionales en proyectos de ingeniería de costas. Los modelos, fuentes de datos y metodologías utilizados son habituales en estudios de oleaje de proyectos de ingeniería, donde el oleaje de aguas profundas proviene de datos de re-análisis que se propagan a un punto de aguas intermedias. El error medio en H_{m0} es del orden de 15% y menor a 40% para un nivel de confianza aproximado del 95%. Aunque estos valores son solo referenciales y válidos para el presente estudio, ya que cada sitio y estudio tiene características propias, se considera que pueden indicar el orden de magnitud esperable para los errores de propagación de oleaje en Chile central.

Con respecto al desempeño de los modelos, si bien existen diferencias puntuales, no hay diferencias sustanciales que permitan favorecer la elección de un modelo sobre otro. No obstante, el modelo MIKE 21 SW presentó errores y sesgos levemente menores en relación a los otros dos modelos comparados. Los niveles de error encontrados indican la necesidad que en Chile se cuente con mediciones de oleaje de largo plazo y se cuantifique la precisión en las mediciones y estudios de oleaje, para su aplicación en diseño de obras marítimas y en la evaluación del potencial energético undimotriz.

En estudios futuros, es recomendable realizar mediciones en el mismo punto con dos instrumentos similares o diferentes para evaluar las diferencias entre sus mediciones. Otras recomendaciones son: incorporar al análisis otros sitios medidos y modelados en este y otros proyectos; incluir el análisis de otros parámetros (como período máximo, anchos espectrales, espectros, direcciones medias);

analizar los efectos de estados de mar multimodales; contar con mayor información que incluya mayor cantidad de casos que consideren alturas, direcciones y períodos menos frecuentes; e incluir otros sitios.

Agradecimientos

Se agradece 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 y a su equipo desarrollador.

Referencias

- CORFO-INNOVA (2009). Catastro del recurso energético asociado a oleaje para el apoyo a la evaluación de proyectos de generación de energía undimotriz. Proyecto CORFO INNOVA 09CN14-5718 Hydrochile, INH, PUC, PRDW, UV, UTFSM.
- Cruz, J. (2008). *Ocean Wave Energy, Current Status and Future Perspectives*. Springer.
- DHI (2016). MIKE 21 wave modeling – MIKE 21 spectral waves FM short description. <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21> (24/01/2016).
- Domínguez, J.C., Cienfuegos, R., Catalán, P.A., Zamorano, L.R. and Lucero, F. (2014). Assessment of fast spectral wave transfer methodologies from deep to shallow waters in the framework of energy resource quantification and wave forecasting in the Chilean coast. *Coastal Engineering Proceedings* 1(34), 23-33
- Gallardo, A. (2015). *Calibración y validación del modelo STWAVE mediante mediciones y modelación matemática en un sector ubicado en la región de Valparaíso*. Memoria de título, Universidad de Valparaíso
- Hoitink, A. and Schroevers, M. (2004). Validation of ADCP surface wave measurements in a shelf sea. OCEANS '04. MTTs/IEEE TECHNO-OCEAN '04 (Volume:3)
- Kabiling, M.B. and Odroniec, K.M. (2010). Calibration and verification of a MIKE21 model for evaluating shoreline stabilization alternatives. Proceedings of the International MIKE by DHI Conference, Copenhagen 2010 http://www.dhigroup.com/upload/publications/mike21/Kabiling_2010.pdf.
- Lucero, F. y Catalán, P. (2014). Caracterización del potencial energético del oleaje en la costa de Chile central. *XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Santiago, Chile.

Lucero, F., Catalán, P. y Ossandón, A. (2013). Selección de climas de oleaje mediante métodos de agrupamiento. *XXI Congreso Chileno de Hidráulica*, Concepción, Chile.

Mase, H., Tsujio, D., Yasuda, T. and Mori, N. (2013). Stability analysis of composite breakwater with wave-dissipating blocks considering increase in sea levels, surges and waves due to climate change. *Ocean Engineering* **71**, 58 - 65

Oh, S.H., Suh, K.D., Son, S.Y. and Lee, D.Y. (2009). Performance comparison of spectral wave models based on different governing equations including wave breaking. *KSCE Journal of Civil Engineering* **13** (2), 75 - 84

Rørbæk, K. and Andersen, H. (2000). Evaluation of wave measurements with an acoustic doppler current profiler. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition.

SHOA (2005). Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos. Publicación Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile SHOA 3201, Instrucciones Oceanográficas N°1, 3ª edición, Valparaíso

Suh, K.D., Kim, S.W., Mori, N., and Mase, H. (2012). Effect of climate change on performance-based design of caisson breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* **138**(3), 215 - 225

USACE (1998). Willapa Bay, Grays Harbor, Washington and Ponce de Leon Inlet, Florida. STWAVE model validation study. Coastal and Hydraulics Laboratory, Engineer Research and Development Center Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, USA (<http://chl.erdc.usace.army.mil/>)

USACE (2006). Coastal Engineering Manual. US Army Corps of Engineers.