



Implementación Operacional de un Sistema de Pronóstico de Oleajes en las Bahías de Miraflores y Callao en Lima Perú

Carmela Ramos *¹ y Emanuel Guzmán²

¹*Dirección de Hidrografía y Navegación*

²*Universidad Nacional Mayor de San Marcos*

Recibido 15 diciembre 2017 – Aceptado 25 enero 2018

El personal de la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN), de la Marina de Guerra del Perú, ha implementado un sistema de pronóstico de olas a nivel costero en las principales bahías del litoral peruano, con la finalidad de proveer alertas tempranas ante la ocurrencia de eventos extremos de oleaje, que permita el cierre oportuno de puertos para la seguridad de los pescadores y embarcaciones navales. En el presente artículo, se muestran los resultados obtenidos del sistema de pronóstico de oleaje para las bahías del Callao y Miraflores en Lima Perú. El modelo empleado fue el Delft3D-WAVE el cual fue empleado de forma estacionaria y corrido diariamente de forma operacional. Para corroborar los resultados obtenidos, fue validado con información medida en campo durante aproximadamente 1 año, obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.62 en la altura de ola y 0.55 en dirección de olas, entre lo medido y modelado. Los resultados se encuentran disponibles en la página web de la DHN.

Palabras claves: Pronóstico, oleaje, modelo, Delft3D, Callao..

Operational Implementation of a Surge Forecast System in the Miraflores and Callao Bays in Lima Peru

The Directorate of Hydrography and Navigation (DHN) from Peruvian Navy has implemented a coastal wave forecasting system at the principal bays from Peruvian coast for the purpose to provide early warnings due the extreme wave conditions, that allows to DHN order the close of the main ports for the safety of fishermen and ships. The model used was Delft3D-WAVE, which was used on a stationary basis and run daily in an operational manner. To corroborate the results obtained, it was validated with in situ measurements for approximately 1 year, obtaining a correlation coefficient of 0.62 in the wave height and 0.55 in the wave direction, between the measured and modeled. The results are available on the DHN website.

Keywords: wave forecast, wave model, Delft3D, Callao..

1. Introducción

Las actividades económicas y/o deportivas que se desarrollan en las zonas costeras o marítimas requieren cada vez más de información de oleaje [1]. En la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN) de la Marina de Guerra del Perú, el conocimiento de la dinámica marina tanto a nivel regional como costero es de mucha importancia, porque permite la vigilancia de las condiciones dinámicas del oleaje, y tomar medidas de prevención ante eventos extremos. La DHN ha implementado un sistema de pronóstico de olas a nivel costero que permite conocer las condiciones del oleaje con 5 días de anticipación en los principales puertos del Perú. Los resultados del sistema de pronóstico son de dominio público y se encuentra dispo-

nible en la web institucional de la DHN (DHN, 2017). En la actualidad se ha implementado el modelo para nueve bahías del litoral peruano, Bayovar, Salaverry, Chimbote, Chancay, Ancón, Miraflores-Callao, Pisco, Mollendo e Ilo. En el presente artículo vamos a describir los resultados de la implementación del sistema de pronóstico a corto plazo del oleaje incidente en las bahías de Callao y Miraflores. Sistemas similares de pronóstico se ha implementado en diversas localidades del mundo con resultados aceptables [2], [3], [4], [5]. Incluso algunos sistemas operacionales incluyen la asimilación de datos.

El área de interés fueron las bahías de Callao y Miraflores ubicadas en la parte central del litoral peruano

*cramos@dhn.mil.pe

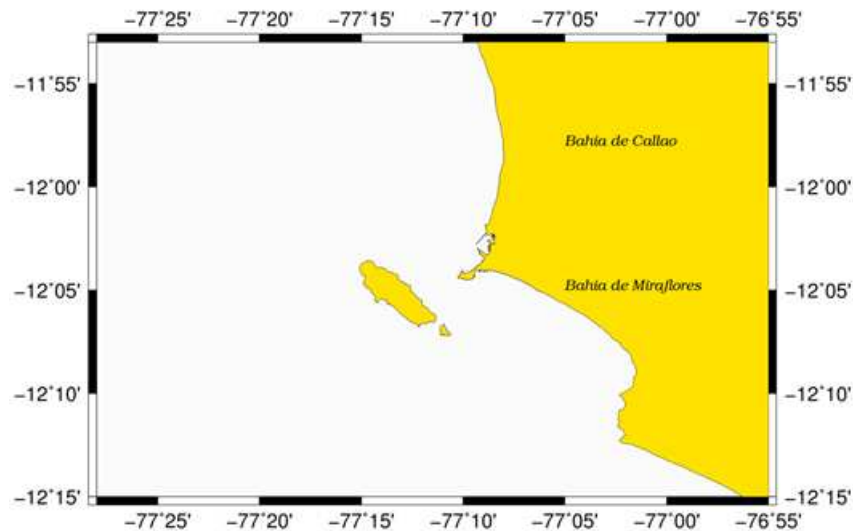


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

(Figura 1), en la región de Lima y Callao. En la bahía de Callao se encuentra el Terminal Portuario del Callao, considerado como el primer puerto del país y representa la salida de productos de los valles del Rímac, Chillón y Lurín [6]. La bahía de Miraflores se caracteriza por tener como atractivo turístico sus playas, visitadas por turistas a bañistas y aficionados a los deportes acuáticos como el surf. Al sur de esta bahía se encuentra el terminal pesquero de Chorrillos, el cual alberga a varias embarcaciones pesqueras, entre otros.

Frente a estas dos bahías se encuentra la isla San Lorenzo, que se caracteriza por brindar una cierta protección contra la acción del oleaje a una parte del área de estudio, principalmente en la bahía del Callao, debido a los procesos de difracción de las olas que esta genera.

2. Métodos

2.1. Datos

La propagación de olas, desde aguas profundas a someras se ha realizado tomando en consideración la información en aguas profundas provenientes del pronóstico operacional realizado por National Centers for Environmental Prediction (NCEP), de donde se dispone información de oleaje (altura significativa, dirección y periodo pico) a una resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ con un intervalo temporal de 3 horas. Esta información de oleaje en el punto 79.5° Oeste y 12.5° Sur, es ingresada al modelo por sus fronteras norte, oeste y sur (Figura 2) en formato

de serie de tiempo para las horas de interés. El sitio web de descarga de información es (NCEP, 2017): <ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/wave>

Con la finalidad de calibrar y validar el modelo en aguas poco profundas, se realizaron mediciones de la altura de olas en aguas costeras mediante la instalación de un instrumento oceanográfico tipo Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) a una profundidad de 15 m en las coordenadas $77^\circ 05' 38.70''$ Oeste y $12^\circ 08' 1.00''$ Sur durante el periodo del 03 al 27 de Marzo del 2016 (Figura 3). Durante este periodo se registró información de altura significativa, dirección pico, dirección media y periodo de olas.

2.2. Modelación numérica

La modelación numérica se ha realizado empleando el módulo WAVE del software Delft3D (Deltares, 2014), el cual se encuentra basado en la física del modelo de olas SWAN, el cual es un modelo espectral de propagación de olas de tercera generación desarrollado por Delft University of Technology [7]. El modelo ha sido configurado para usar dos grillas anidadas (Figura 4), donde la primera de ellas es denominada "coarse-grid" y tiene como principal función propagar las olas desde aguas profundas hasta aguas intermedias y cuenta con un espaciamiento de celda de 2 km. Esta grilla toma como condición de frontera los resultados obtenidos de NCEP para el oleaje en aguas profundas. La segunda grilla es denominada "fine-grid", con un espaciamiento de celda de 250 m y se usa para representar el oleaje en la zona costera. Esta grilla toma como condición de frontera los resultados de la propaga-

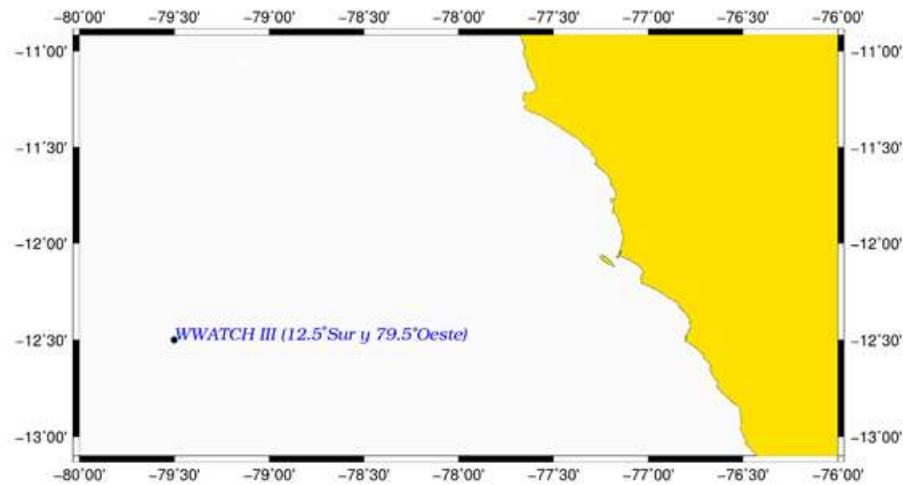


Figura 2: Ubicación del punto de extracción en aguas profundas.

ción del oleaje de la grilla coarse-grid.

El coarse-grid presenta 64×55 puntos de grillas, con un ángulo de orientación de 0° , mientras que la fine-grid presenta 64×73 puntos de grilla con un ángulo de orientación de -55° respecto al eje X. La información batimétrica fue interpolada de forma lineal entre los puntos de cada una de las grillas con la finalidad de representar de manera realista la configuración del fondo del mar.

El modelo ha sido configurado en su modo estacionario, tomando en cuenta los efectos de la refracción y la rompiente de olas, así como la parametrización de la difracción. Para estas simulaciones no se han considerado los efectos del viento y marea en la propagación de oleaje debido a que la bahía de Miraflores se encuentra muy lejos de la zona de generación de olas (fetch), y la marea es una onda con periodos muy grandes, por lo que estas no alterarán en gran medida la modelación, adicionalmente no se consideraron el "setup" de olas. Para comparar los resultados del modelo con las mediciones en campo, se ha definido un punto de control, cuya ubicación corresponde a un punto de grilla del modelo (Figura 3).

El sistema de pronóstico, para todas las bahías, ha sido implementado en un servidor de cálculo bajo el sistema operativo Linux, y se ejecuta operacionalmente de forma diaria a las 04:00 hrs UTC. El tiempo total de cómputo, desde el proceso de descarga, generación de condiciones de frontera, ejecución del modelo y publicación de resultados en la página web de la DHN, es de aproximadamente 30 minutos por bahía. El esquema de funcionamiento del sistema de pronóstico se muestra en la Figura 5.

3. Resultados

3.1. Propagación de olas

Los resultados de las simulaciones en el área de estudio, muestran como ejemplo, la propagación del oleaje hacia las zonas costeras para el 04 y 06 de marzo de 2016 (Figura 6), de donde se ha logrado representar el oleaje que proviene de dos direcciones, del noroeste (Figura 6a) y suroeste (Figura 6b), observándose de manera general que las condiciones de oleaje en la bahía del Callao presenta alturas de olas por debajo de 1m en la zona del puerto del Callao, esto se debe principalmente al efecto de protección natural de la Isla San Lorenzo ante la acción del oleaje. Por otro lado, se observa que, en la bahía de Miraflores, el oleaje presenta características variables, ya que se presentaron olas promedio entre 1.0 a 2.0m llegando a presentarse sobre todo en la zona central de la bahía, alturas de olas en el rango de 2 a 2.5m.

Los resultados de la simulación del oleaje fueron comparados con los registros de las mediciones (ADCP), observándose que existe una buena aproximación entre las tendencias de lo modelado y lo medido (Figura 7), con porcentajes de error entre 6 a 11% (Tabla 1). En cuanto a la dirección se observa que el modelo representa de manera adecuada la distribución de direcciones del Sur-Suroeste y Suroeste, mientras que existe una componente Oeste-Suroeste del modelo que no ha sido observada por el ADCP (Figura 9).

La correlación que se obtuvo para la altura y dirección de olas fueron de 0.62 y 0.55 (Figura 8 y Tabla 2) y aunque estos valores pueden ser relativamente bajos, el

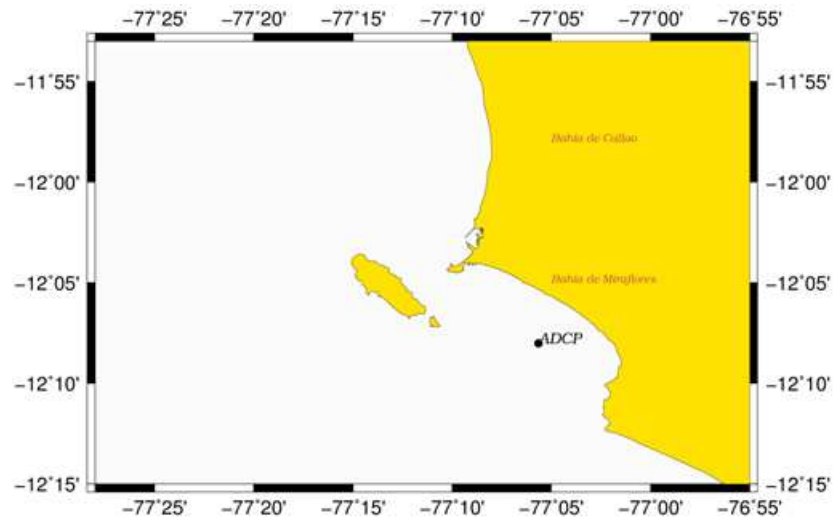


Figura 3: Ubicación de la posición del punto de medición de olas.

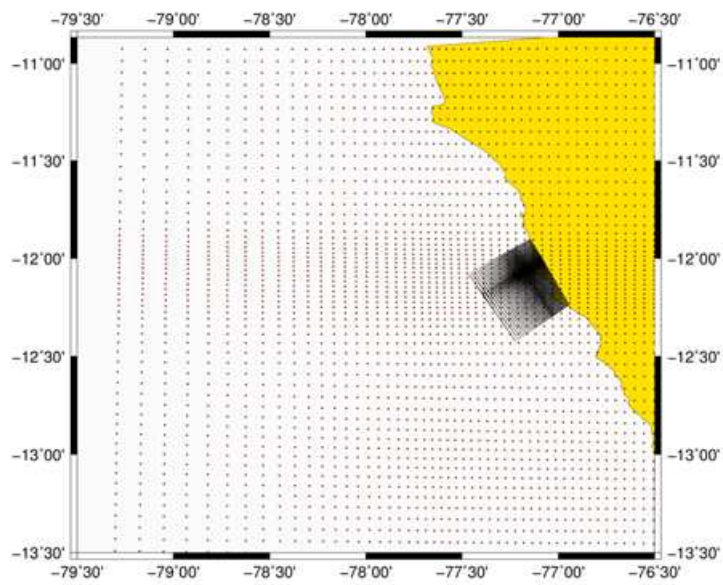


Figura 4: Un Detalle de la grillas de cálculo empleadas en la simulación. coarse_grid (rojo), fine_grid (negro).



Figura 5: Esquema de funcionamiento del sistema de pronóstico.

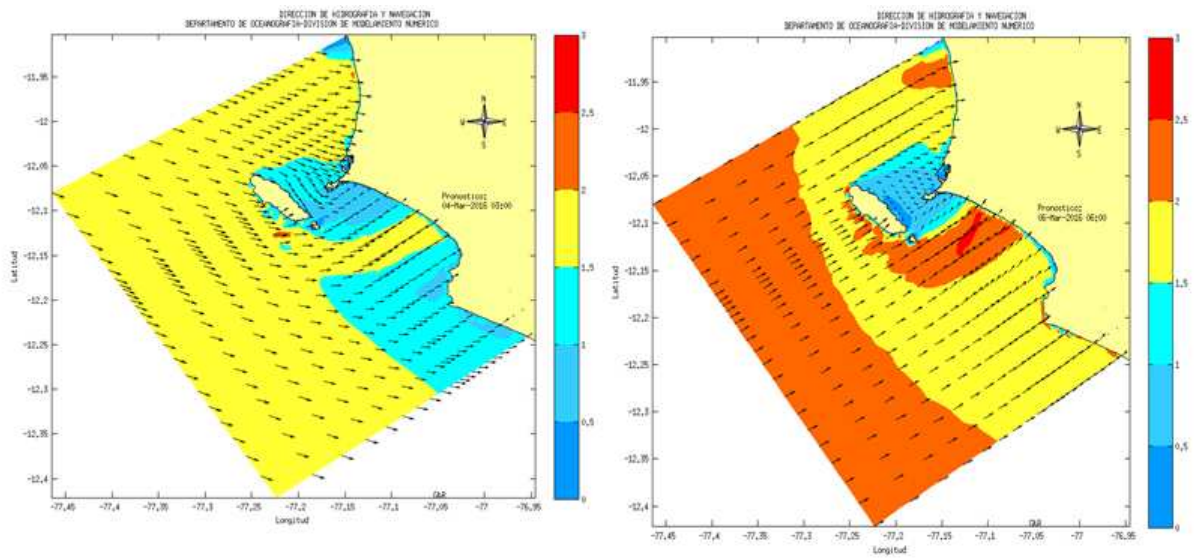


Figura 6: Resultados del pronóstico de oleaje en el área de estudio con modelo Delft3d - Modulo Wave. a) Pronóstico para el 04-03-2016 03: hr, b) Pronóstico para el 06-03-2016 06:00 hr

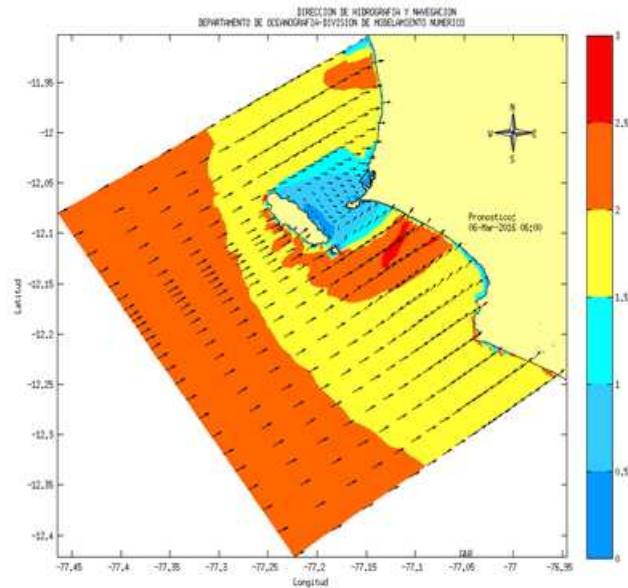


Figura 7: Comparación de resultados de la altura de ola entre lo modelado (D3D) y lo medido (ADCP).

nivel de significancia para el coeficiente de correlación se encontró dentro de la zona de rechazo, es decir la correlación fue significativa para las dos variables. En la Figura 8 se observan los gráficos de dispersión de datos para la altura y dirección de oleaje entre los datos medidos en campo y los calculados, donde se puede corroborar que existe una correlación entre ambas fuentes de información.

En la Figura 9 se observa la rosa de altura y dirección de olas, en la que se observa que la predominante de dirección de olas medido con ADCP presenta dirección Sur-Suroeste con alturas entre 1.5 a 2.0m. En los resultados de la modelación numérica se observa de igual forma que la dirección predominante del modelo es de Sur-suroeste con alturas entre 1.5 a 2.0m predominantemente. Así mismo, se observa una componente de olas de dirección Suroeste para ambas rosas de dirección, por lo que el modelo estaría representando las predominantes adecuadamente.

Asimismo, se han elaborado gráficos de cajas para altura y dirección (Figura 10) con la finalidad de comparar los resultados de la modelación, muestran de manera gráfica lo observado en la Tabla 1, donde se resalta que el modelo sobrestima de manera ligera las condiciones medias de oleaje, mientras que las condiciones de oleaje más intenso el modelo tiende a subestimarlas. Este aspecto debe ser tomado en consideración cuando se realice el análisis para la toma de decisiones respecto a la influencia del oleaje sobre el borde costero, ya sea con fines de

prevenir escenarios de inundación o estudios de dinámica litoral como el transporte de sedimentos.

4. Resultados

Con la información descargada, se realizó una comparación entre los resultados del reanálisis numérico con la información satelital para cada punto definido. Se observa que la información del reanálisis numérico sin calibrar con los datos instrumentales presenta una correlación alta, presentando un coeficiente de correlación que varía entre 0.727 y 0.933 (Tabla 4), asimismo, observamos que los valores del BIAS mantienen rangos entre 0.259 a 0.427 y el RMSE entre 0.337 a 0.532. Cuando se realiza la calibración, se obtienen los coeficientes de calibración "a" y "b" que permiten aproximar la información de reanálisis a un modelo exponencial descrito en la sección anterior. De esta manera se observa que los coeficientes de correlación (r) mantienen valores muy similares; sin embargo, los valores del BIAS y RMSE se ven reducidos considerablemente, lo que nos daría indicios de que el proceso de calibración mejoró la información de reanálisis numérico. Por otro lado, el p-value para el coeficiente de correlación de ambas fuentes de información indica que la correlación es significativa (Tabla 4).

El proceso de calibración de la boya con los datos del modelo, muestran una mejora tanto en la correlación como en los BIAS y RMSE. En la figura 5 y 6 se observa el gráfico de dispersión entre la información de reanálisis

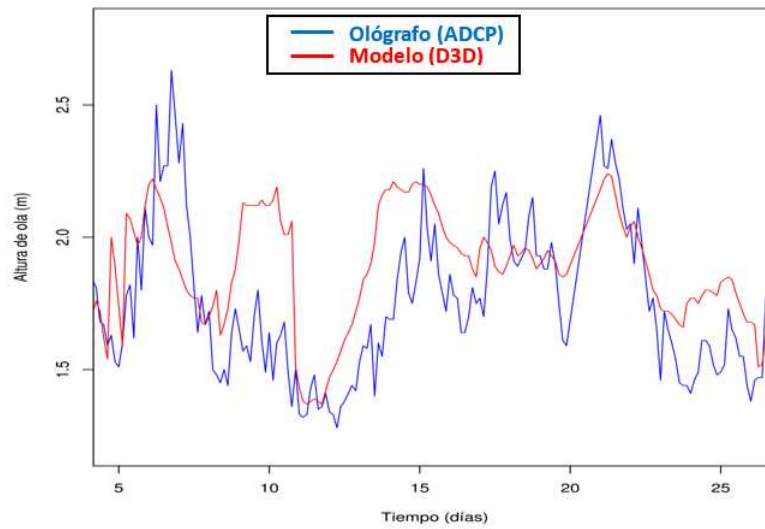


Figura 8: Correlación entre lo modelado y observado para la altura y dirección de olas.

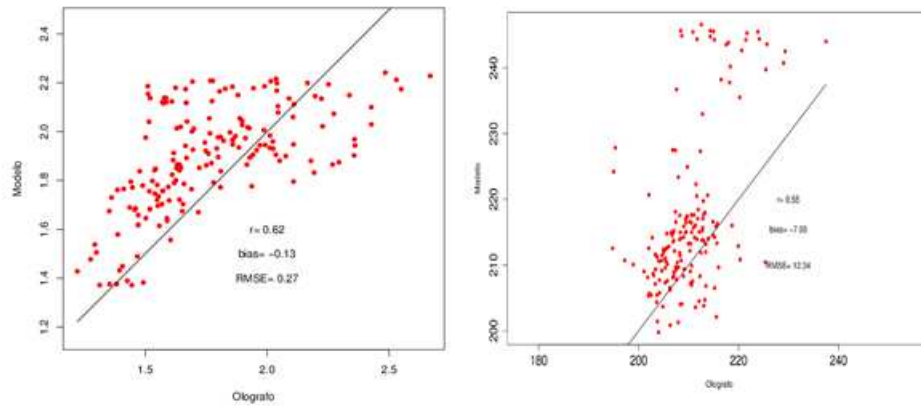


Figura 9: Rosas de oleaje del modelo-D3D (Izquierda) y lo medido-ADCP (derecha).

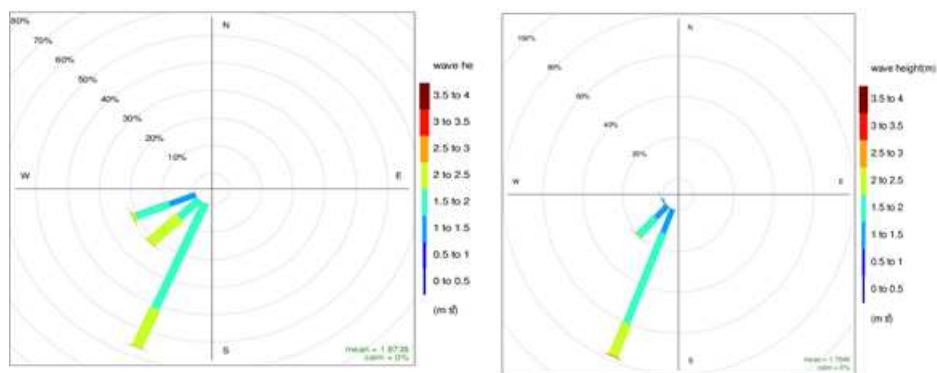


Figura 10: Gráfico de cajas de comparación de altura y dirección de olas entre lo modelado y observado.

	Altura de ola (m)		% Error	Dirección(°)	
	D3D	ADCP		D3D	ADCP
Mínimo	1.36	1.28	6.25	200.3	196.8
1er cuartil	1.72	1.55	11.33	209.3	205.8
Mediana	1.89	1.72	9.88	214.2	209.3
Promedio	1.87	1.76	6.17	219.3	210.3
3er cuartil	2.21	2.28	3.08	244.4	224.6
Máxima	2.42	2.63	7.98	245.7	239.0

Tabla 1: .- Comparación de resultados de la altura y dirección de olas entre el modelo (D3D) y lo medido (ADCP).

Parámetro	Coef. Corr	Bias	RMSE	p-value
Altura	0.62	-0.128	0.265	2.20×10^{-6}
Dirección	0.55	-7.03	12.34	3.14×10^{-15}

Tabla 2: Comparación de resultados entre el modelo (D3D) y lo medido (ADCP).

sin calibrar y calibradas con la información instrumental de satélite y la boya 32012 respectivamente.

5. Conclusiones

El modelo de olas operacional implementado ha logrado representar adecuadamente las condiciones de oleajes registrados en la zona de estudio, obteniéndose buena tendencia para las alturas y direcciones de olas, la cual pueda servir como alerta temprana de los eventos extremos de oleaje. Se debe tener en consideración el modelo sobrestima de manera ligera las condiciones medias del oleaje, mientras que para las condiciones máximas las subestima. En el punto de medición se ha observado que el oleaje presenta dirección predominantemente del sursuroeste y suroeste, tal como ha sido verificado entre lo modelado y observado. Los mayores porcentajes de errores del modelo se encuentran en las alturas mínimas, lo cual permite que el modelo subestime las mínimas alturas de olas.

Referencias

- [1] O. G. Lizano, F. J. Ocampo, L. F. Alvarado, R. Vega and J. M. Puig. Evaluación de modelos numéricos de Tercera Generación para el pronóstico del oleaje en Centroamérica y México. *Top. Meteor. Oceanog.* Vol. 8, pp. 40-49, (2001).
- [2] M. P. Etala, S. Maris Alonso and K. Lopez Cristaldo, *Etapas Pre-Operacional de un Sistema de Pronóstico de Olas para el Atlántico Sudoccidental y Mar Argentino* (2006). Disponible en: www.hidro.gov.ar/Smara/tmao_16.pdf
- [3] A. L. Caicedo, S. Latandret and J. Portilla, Modelización Operacional de oleaje en el Pacífico colombiano, *Bol. Cient. CIOH*, vol 32, pp. 71-84, (2014).
- [4] H. Tolman, J.H. Alves and Y. Chao. Operational Forecasting of Wind-Generated Waves by Hurricane Isabel at NCEP, *Weather and Forecasting*, pp. 544-557, (2004).
- [5] J. H. Alves, H. Tolman and A. Chawla, Operational Wave Prediction System at Environment Canada: Going Global to Improve Regional Forecast Skill, *Weather and Forecasting*, pp. 353-370, (2016).
- [6] R. Valencia, El Puerto del Callao, [Online]. Available: <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/>.
- [7] SWAN, "Swan User Manual," DELFT, (2017).
- [8] DHN, Dirección de Hidrografía y Navegación, (2017). [En línea]. Available: <https://www.dhn.mil.pe/oceanografia>.
- [9] NCEP, National Centers for Environmental Prediction, (2017). [En línea]. Available: <ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/wave>
- [10] Deltares, User Manual Wave, (2014).