



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ESPECTRAL DE OLEAJE PARA LA
REGION DEL BIOBÍO**

POR

Camilo Andrés Ferrer Ramírez

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Dra. Maricarmen Guerra Paris

Comisión Evaluadora
Dra. Alejandra Stehr Gesche
Dr. Raúl Flores Audibert

Agosto 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Camilo Andrés Ferrer Ramírez

© 2023 Camilo Andrés Ferrer Ramírez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

La tendencia de los eventos de marejadas en nuestro país va en aumento. Esto trae consigo inconvenientes tanto para la sociedad como para la actividad económica ligada a nuestras costas. El fallecimiento de personas, cierre de playas, el cese del funcionamiento de puertos y actividad pesquera son solo algunos de los problemas provocados. Se estima que del año 2008 al 2018 las horas en que cesó el funcionamiento de los principales puertos de nuestro país pasaron de 17 a 3022 solo por eventos de marejadas, lo que se traduce en pérdidas millonarias. En nuestro país la alerta de marejadas es emitida por el Servicio Meteorológico de la Armada a través del Pronóstico General Marítimo, el cual es de carácter cualitativo y con un horizonte temporal de predicción de 12 horas. Existen predicciones de oleaje de carácter cuantitativo disponibles, algunas de carácter privado y otras públicas pero que no incluyen predicciones para todas las bahías de la región del Biobío.

En el presente trabajo se implementó el modelo espectral de oleaje WAVEWATCH III para la costa de la región del Biobío con el fin de generar un pronóstico de oleaje para la predicción y preparación frente a marejadas. Los resultados de modelo implementado, como altura significativa, periodo peak, y dirección media y peak del oleaje fueron comparados con mediciones realizadas por el SHOA costa afuera de la región del Biobío.

Luego de implementar el modelo, se logró reproducir de buena forma un evento de marejada de junio del año 2021. Se representando correctamente la duración, extensión y parámetros del oleaje de este evento extremo. Para el periodo de validación comprendido entre enero y julio de 2021 se obtuvo que los datos de altura significativa y periodo peak se ajustan de buena forma a los observados, representando correctamente la ocurrencia y desarrollo de eventos extremos de oleaje y las alturas máximas observadas. Finalmente, se logra realizar de buena forma un pronóstico de oleaje para los días 26 y 27 de junio del año 2023 obteniendo también valores de indicadores de calidad aceptables.

ABSTRACT

The occurrence of large wave events in our country is increasing, negatively affecting both coastal communities and coastal economic activities. The death of people, the closure of beaches, the cessation of the operation of ports and fishing activity are just some of the problems caused by repetitive large wave events. It is estimated that from 2008 to 2018 the hours in which Chilean ports ceased their operations due to large wave events increased from 17 to 3022, which translates into millions in losses. In our country, the large waves event alert is issued by the Navy Meteorological Service through the General Maritime Forecast. This 12 hour forecast is mostly qualitative . There are quantitative wave forecasts available, some private and others public, but they do not include forecasts for all the bays in the Biobío region.

In this work, the WAVEWATCH III spectral wave model is implemented for the coast of the Biobío region to generate a wave forecast for the prediction and preparation against large wave events. The results of the implemented model, such as significant wave height, peak period, and mean and peak direction of the waves are compared with measurements made by the Chilean Navy offshore the Biobío region.

Using the implemented model, it was possible to correctly reproduce a large wave event that occurred in June 2021. The duration, extension, and wave parameters of this extreme event were correctly represented. For the validation period between January and July 2021, it was obtained that modelled wave parameters, such as significant wave height and peak period fit well with the observations, correctly representing the occurrence and development of extreme wave events and the maximum wave heights observed. Finally, a wave forecast was produced for June 26 and 27 2023, and predicted wave statistics agree well with data collected through the forecast period.

DEDICATORIA

A mi madre, que es el pilar fundamental de mi vida, gracias por siempre estar.

A mi padre, que con su esfuerzo siempre me dio lo mejor junto a mi madre.

A mi familia de Santiago, que demostraron que la distancia nunca es un impedimento.

A mi abuela, estoy seguro de que estas muy feliz.

A mi novia, por todo su amor y apoyo incondicional siempre.

A Dios, que me dio una familia y amigos maravillosos.

Son luz.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer enormemente a mi profesora guía Maricarmen Guerra, la cual me apoyo inmensamente en el proceso de elaboración del presente trabajo, siempre resolvió todas mis dudas con buena disposición y también me corrigió de manera asertiva. Sin duda una excelente profesora, la cual se nota que disfruta siempre lo que realiza.

Agradezco también a la profesora Alejandra Stehr por poner su tiempo a nuestra disposición para agendar las reuniones, por hacer excelentes sugerencias que fueron tomadas en cuenta para realizar el trabajo y siempre estar con la mejor actitud. Al profesor Raúl Flores de la Universidad Santa María por participar de mi comisión.

También a todos los docentes que he tenido en la Universidad de Concepción, los cuales son todos excelentes profesionales y sin duda aportaron un granito de arena en mi desarrollo como estudiante.

Finalmente agradezco el financiamiento del presente trabajo a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo ANID a través del proyecto FONDECYT de Iniciación 11220663.

Contenido

CAPITULO 1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivo general	2
1.3	Objetivos específicos	2
1.4	Metodología de trabajo.....	2
1.5	Principales resultados y conclusiones.....	3
1.6	Organización de documento	4
CAPÍTULO 2	MODELACIÓN Y PREDICCIÓN DE OLEAJE	5
2.1	Introducción.....	5
2.2	Oleaje.....	5
2.2.1	Teoría lineal del oleaje	6
2.2.2	Variaciones de la superficie libre	8
2.2.3	Análisis del oleaje mediante su espectro energético	8
2.3	Modelos de propagación de oleaje	10
2.3.1	Modelos que promedian la fase.....	10
2.3.2	Modelos que resuelven la fase	10
2.3.3	Dinámica de fluidos computacional (CFD)	11
2.4	Modelo espectral WAVEWATCH III.....	11
2.5	Calibración y validación del modelo WAVEWATCH III en las costas de Chile.....	12
2.6	Atlas de oleaje de Chile	13
2.7	Modelación numérica para la evaluación de energía undimotriz en Chile	16
CAPITULO 3	MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1	Introducción.....	18
3.2	Área de estudio	18
3.3	Batimetría	19

3.4	Malla computacional	20
3.5	Condición de borde: Espectros de oleaje	21
3.5.1	Predicción de espectros de oleaje	22
3.5.2	Observaciones de oleaje	22
3.6	Indicadores de calidad del modelo	22
3.6.1	Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)	22
3.6.2	Percent Bias (PBIAS).....	23
3.6.3	Raiz del error cuadrático medio (RMSE).....	24
3.7	Conclusión.....	24
CAPITULO 4 RESULTADOS.....		25
4.1	Introducción.....	25
4.2	Resultados obtenidos del modelo implementado	25
4.3	Validación modelo.....	27
4.3.4	Indicadores de calidad para el ajuste del año 2021	33
4.4	Predicción de estados de mar.....	35
4.5	Conclusión.....	37
CAPITULO 5 CONCLUSIONES.....		38
REFERENCIAS		40

Índice de tablas

Tabla 2.1: Parámetros resumen para el nodo de Talcahuano. <i>Fuente: Atlas del oleaje de Chile</i>	15
Tabla 2.2: Estadísticos de incertidumbre para el nodo del Talcahuano.....	15
Tabla 3.1: Características de la malla computacional.....	21
Tabla 4.1: Tabla de indicadores de calidad para el ajuste de altura significativa.....	34
Tabla 4.2: Tabla de indicadores de calidad para el ajuste de periodo peak (enero-julio).....	34
Tabla 4.3: Tabla de indicadores de calidad para el ajuste de dirección peak (enero-julio).....	34
Tabla 4.4: Tabla de indicadores del ajuste para todo el periodo de comparación.....	35
Tabla 4.5: Tabla de indicadores del ajuste para el pronóstico realizado.....	37

Índice de figuras

Figura 2.1: Clasificación del oleaje según su periodo. Redibujado de la Figura 1 en (Munk, 1950)...	6
Figura 2.2: Representación teoría lineal. Adaptado de (Kundu, 2012).....	7
Figura 2.3: Ubicación de las boyas, nodos, datos satelitales utilizados y malla del modelo utilizado para la elaboración del Atlas de oleaje. Fuente: <i>Atlas del oleaje de Chile</i>	14
Figura 2.4: Zonas de interés, F, B, N y A denotan puntos con datos simulados, boyas, ADCPs y nodos analizados, respectivamente.....	16
Figura 2.5: Mapa de energía undimotriz a lo largo de la costa centro-sur de Chile, tomado de Lucero et al., 2016.....	17
Figura 3.1: Zona de estudio.....	19
Figura 3.2: Batimetría de la zona de estudio.....	20
Figura 4.1: Evolución temporal de la marejada simulada.....	25
Figura 4.2: Grafico comparativo de alturas significativas simuladas y observadas para todo el periodo de simulación (año 2021)	27
Figura 4.3: Grafico comparativo de alturas significativas simuladas y observadas para el mes de enero del 2021.....	28
Figura 4.4: Grafico comparativo de periodos peak simulados y observados entre enero y julio del año 2021.....	29
Figura 4.5: Grafico comparativo de periodos peak simulados y observados para el mes de abril del 2021.....	29
Figura 4.6: Grafico comparativo de direcciones peak simuladas y observadas entre enero y julio del año 2021.....	30
Figura 4.7: Grafico comparativo de direcciones peak simuladas y observadas en abril del 2021.....	31
Figura 4.8: Grafico de dispersión de altura significativa para el año 2021.....	32
Figura 4.9: Grafico de dispersión de periodo peak para el periodo entre enero y julio del año 2021.....	32
Figura 4.10: Grafico de dispersión de dirección peak para el periodo entre enero y julio del año 2021.....	33
Figura 4.11: Grafico comparativo de altura significativa pronosticada y observada.....	36
Figura 4.12: Grafico comparativo de periodo peak pronosticado y observado.....	36
Figura 4.13: Grafico comparativo de dirección media pronosticada y observado.....	37

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En los últimos años hay una clara tendencia al aumento de los eventos extraordinarios meteorológicos y oceanográficos en nuestro país, como lo son las marejadas (Campos, 2016). Estas son olas de altura mayor a lo común formadas por fuertes vientos en el área oceánica o localmente y que se propagan hacia las costas de nuestro país (Paskoff, 2010). Estos eventos provocan el cese de funcionamiento de puertos y actividades pesqueras, daño a infraestructura marítima, entre otros. Desde el año 2016 al 2021 el Servicio de Búsqueda y Salvamiento Marítimo (MRCC) cuantificó en 186 personas las personas rescatadas por eventos relacionados a marejadas y en 8 las víctimas fatales.

Actualmente el Pronóstico General Marítimo es emitido por el Servicio Meteorológico de la Armada de Chile para ocho grandes zonas del país y utiliza datos satelitales combinados con resultados de modelos globales de oleaje y datos de boyas. Por otro lado, este pronóstico entregado por la Armada cuenta con alertas cualitativas, es decir, predice la existencia de grandes olas en un horizonte temporal de 12 horas, pero no cuantifica su altura ni a qué hora exactamente ocurrirá el evento.

En nuestro país existen sistemas de predicción de oleaje. La mayoría son de carácter privado y de alto costo para quien los requiera (Parra, 2017). Algunos ejemplos de estos son los sistemas SIPROL® (Hidalgo, 2017) y AWFOS de PRDW (Puelma, 2015). El sistema SIPROL® es una herramienta con distintos módulos que permiten generar *forecasting*, *hindcasting*, estudios de ingeniería, apoyar investigación científica, entre otros. Por otro lado, PDRW es una consultora compuesta por ingenieros civiles, costeros, hidráulicos, estructurales y geotécnicos, los cuales generaron su propio sistema de predicción de oleaje para las costas chilenas. El sistema AWFOS es utilizado por ejemplo por la empresa portuaria de Arica. Por último, se cuenta con el pronóstico realizado por el Sistema de Alerta de marejadas y el Servicio Meteorológico de la Armada de Chile, el cual es de carácter público y se encuentra publicado en la página web *marejadas.uv.cl*. En este sitio web no se entrega información sobre la forma en que se llevó a cabo la validación del pronóstico y no hay pronóstico disponible para todas las bahías de la región del Biobío.

1.2 Objetivo general

Implementar un modelo espectral de oleaje para la predicción de marejadas en la región del Biobío

1.3 Objetivos específicos

- 1) Implementar el modelo WAVEWATCH III para la región del Biobío.
- 2) Evaluar el desempeño de modelo propuesto mediante la comparación con observaciones de oleaje disponibles.
- 3) Proponer un sistema de predicción de oleaje para la zona de estudio.

1.4 Metodología de trabajo

En primera instancia se realizó una revisión bibliográfica de los principales textos y manuales relacionados al modelo WAVEWATCH III proporcionados por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) y el Instituto Nacional de Investigación Marina Integrada de Francia (IFREMER). Posterior a esto, siguiendo los manuales proporcionados, se realizó la compilación del modelo en un computador con sistema operativo LINUX (Ubuntu). Siguiendo con las recomendaciones, se realizaron todos los ejemplos proporcionados en el repositorio del modelo, para así comprender de mejor manera el funcionamiento de éste. Luego, se implementó un modelo para el caso de la región del Biobío. Se definió el área de estudio y su batimetría. Se utilizaron como condición de borde del modelo local espectros de energía de oleaje previamente definidos por un modelo global de oleaje. Se simularon condiciones de oleaje del tipo *Hindcast* para el año 2021 y se compararon los resultados con mediciones de oleaje realizadas por el SHOA. Finalmente se estableció una metodología para la predicción de oleaje en el sitio de estudio a partir de predicciones globales de oleaje con un horizonte de 6 días cada 12 horas.

1.5 Principales resultados y conclusiones

Se logró implementar el modelo WAVEWATCH III para las costas de la región del Biobío. Con el modelo se pudo representar de buena forma un evento de marejada emitido para las fechas entre el 3 y 7 de julio del año 2021 presentando una evolución temporal de la altura significativa y dirección peak en mapas.

Los resultados del periodo de la validación fueron analizados mediante indicadores de calidad y se apreciaron según los criterios propuestos por Moriasi et al. (2007). En cuanto a estos, se muestra que para las alturas significativas se da el mejor ajuste, con los elementos utilizados para el año 2021, obteniéndose un NSE de 0.38, un PBIAS de 18% y un RMSE de 0.62 m. Seguido se encuentra el periodo peak, donde el ajuste de estos obtuvo un NSE de 0.026, PBIAS de 9% y un RMSE de 2.66 s. Finalmente, el peor desempeño lo obtuvo el ajuste de dirección peak resultando en una NSE de -0.37, un PBIAS de -3.76% y un RMSE de 22.32° pudiendo este ser mejorable.

El caso del pronóstico de oleaje realizado para el día 27 y 28 de junio del 2023 no dista de los resultados anteriores, también obteniéndose el mejor ajuste para la altura significativa con una NSE de 0.25, PBIAS de -3.53 y un RMSE de 0.273 m, seguido del periodo peak con un NSE de 0.276, PBIAS de -0.195 y un RMSE de 0.668 s y finalmente la dirección media con un NSE de -0.87, PBIAS de 1.86 y un RMSE de 6.71°.

En cuanto a las gráficas mostradas más adelante se puede inferir que los datos simulados siguen la tendencia de los datos observados, pero no representan las pequeñas variaciones debido a la falta de viento local como forzante en el modelo. Por otro lado, al obtenerse un PBIAS positivo en casi todos los ajustes demuestra que los datos simulados tienen una tendencia promedio a ser mayores que los medidos, lo que puede significar que el modelo carece de disipación de energía.

1.6 Organización de documento

El texto consta de cinco capítulos. En el primero se explica la relevancia del trabajo y sus principales objetivos. En el segundo se aborda la base teórica del modelo y trabajos previos en los cuales se llevó a cabo la calibración y validación del mismo modelo en aguas profundas para generar el Atlas de Oleaje de Chile. El tercer capítulo presenta la metodología con la que se llevó a cabo el trabajo, incluyendo la generación de la malla computacional, las condiciones de borde, las mediciones utilizadas para validar el modelo, y los indicadores de calidad utilizados para evaluarlo, y los parámetros utilizados para la predicción de oleaje. En el cuarto capítulo se presentan los resultados. Se evalúa la calidad del modelo comparando parámetros resumen del oleaje (altura significativa, periodo peak, y dirección peak). Finalmente, en el quinto capítulo se entregan las conclusiones de la investigación y una breve discusión.

CAPÍTULO 2 MODELACIÓN Y PREDICCIÓN DE OLEAJE

2.1 Introducción

El oleaje está fuertemente ligado a la sociedad y actividad económica en Chile debido a que el país cuenta con aproximadamente 6.435 km de costa. Eventos extraordinarios cada vez más frecuentes, como las marejadas, traen consigo una serie de problemas además de pérdidas millonarias para los puertos del país, por ende, surge la necesidad de tener un pronóstico cuantitativo de estos eventos que funcione de manera operacional con un horizonte temporal de días.

En este capítulo se describe el oleaje irregular y los parámetros estadísticos utilizados para describirlo. Además, se describen distintos tipos de modelos numéricos de propagación de oleaje y el modelo utilizado en el presente trabajo: WAVEWATCH III.

2.2 Oleaje

Debido a que el sol calienta la atmósfera es que se generan zonas de distintas temperaturas las cuales son las causantes del viento. El viento transfiere parte de su energía a la superficie marina generando ondulaciones conocidas como olas de viento.

Las olas de viento pueden ser generadas por tormentas lejanas a la zona de estudio y viajar largas distancias hasta que finalmente rompen en las costas, esto se conoce como mar de fondo o *swell*. El oleaje también puede ser generado por vientos locales (*wind sea*). El oleaje puede tener distintos periodos las cuales fueron clasificadas según este criterio por Munk, 1950. El oleaje tipo *swell* tiene periodos mayores a 10 s, mientras que el oleaje tipo *wind sea* tiene periodos inferiores a 10 s.

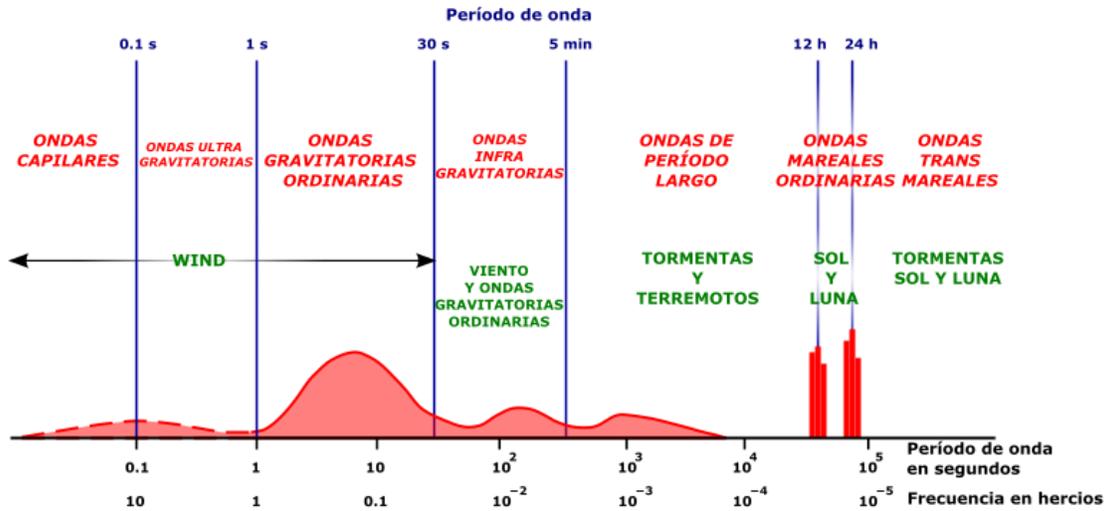


Figura 2.1: Clasificación del oleaje según su periodo. Redibujado de la Figura 1 en (Munk, 1950).

2.2.1 Teoría lineal del oleaje

Teoría desarrollada por Airy en el año 1845, la cual es relativamente simple de aplicar y da una aproximación razonable de las características del oleaje para un amplio rango de los parámetros de éste (López y Tinoco, 2014). Esta teoría plantea que el oleaje puede ser representado como una onda sinusoidal, la cual tiene una amplitud a , una longitud de onda L y un periodo T y se propaga a una sobre una profundidad H a una celeridad o velocidad de onda c . La teoría lineal aplica para ondas de pendiente pequeña ($a/L \ll 1$) y amplitud pequeña ($a/H \ll 1$). La Figura 2.2 ilustra una onda sinusoidal de acuerdo con la teoría lineal del oleaje.

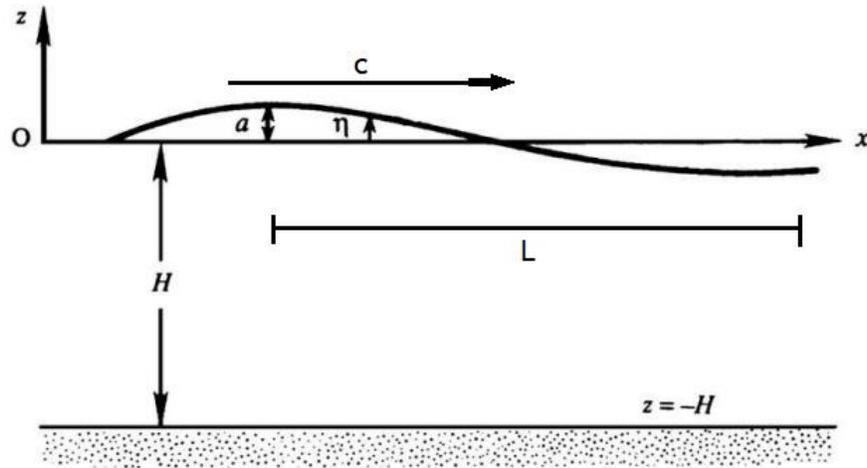


Figura 2.2: Representación teoría lineal. Adaptado de (Kundu, 2012).

El termino η corresponde a la elevación de la superficie libre y se define por la siguiente ecuación:

$$\eta(x, t) = a \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

Donde ω representa a la frecuencia angular ($2\pi/T$). A partir de la teoría lineal se desprende la relación de dispersión:

$$\omega^2 = kg \tanh(kH) \quad (2)$$

La cual relaciona el periodo (frecuencia angular) con la longitud de la onda (número de onda k).

Donde $k=2\pi/L$, H la profundidad del medio y g la aceleración de gravedad.

En la realidad el oleaje no se observa como una onda sinusoidal simple, sino que se observa como una superposición de múltiples ondas de distinta altura, periodo, longitud, y dirección que generan un estado de mar. El estado de mar debe ser analizado estadísticamente. El análisis estadístico más utilizado es la estimación del espectro energético del oleaje (espectro de frecuencia de oleaje) a través del cual se pueden obtener distintos parámetros resumen del oleaje que describen el estado de mar en un instante dado.

2.2.2 Variaciones de la superficie libre

Debido a que el oleaje se puede considerar como un proceso aleatorio es que se puede pensar en el como una superposición de ondas simples con distintas direcciones, amplitudes y frecuencias, describiéndose matemáticamente como sigue:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^n a_i \left[\frac{f_i^2}{g} (x \cos \theta_i + y \sin \theta_i - \sigma_i t + \varepsilon_i) \right] \quad (4)$$

Donde a_i es la amplitud de la onda, f_i es la frecuencia angular, θ_i es el ángulo de incidencia con respecto al eje X, ε_i la fase de la onda, x e y la posición espacial de la onda y t el tiempo.

Esta superposición de ondas se denomina estado de mar. Pero evaluar la superficie libre del oleaje en cada punto del espacio y el tiempo tiene un alto grado de complejidad y un alto costo computacional.

2.2.3 Analisis del oleaje mediante su espectro energetico

El espectro energético de oleaje o simplemente espectro de oleaje $E(f, \theta)$ es utilizado para representar la distribución de energía en las distintas componentes de frecuencias (periodo) y direcciones de un registro de oleaje. El espectro de energía de oleaje se utiliza generalmente para describir un estado de mar en un punto del espacio (x, y) y en el tiempo (t) .

La ecuación de balance de energía espectral describe la variación de energía espectral en el tiempo y en el espacio debido a fuentes y sumideros de energía de oleaje, y se define como:

$$\frac{DE(f, \theta, x, y, t)}{Dt} = S_t(f, \theta, x, y, t) \quad (5)$$

Donde el término de la izquierda corresponde a la variación del espectro de oleaje en el tiempo y espacio, y el de la derecha corresponde a los términos fuentes o sumideros, los cuales representan el aporte, disipación y transferencia de energía en el espectro de oleaje y son descritos más adelante.

La principal fuente de energía del oleaje es el viento. Por otro lado, el rompimiento y la interacción del oleaje con el fondo marino representan términos que disipan energía.

Realizando el desglose de la ecuación (3) y normalizando por la frecuencia espectral resulta:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N(f, \theta, x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial C_{g,x} N(f, \theta, x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial C_{g,y} N(f, \theta, x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial C_{\theta} N(f, \theta, x, y, t)}{\partial \theta} \\ & + \frac{\partial C_f N(f, \theta, x, y, t)}{\partial f} = \frac{S_t(f, \theta, x, y, t)}{f} \end{aligned} \quad (6)$$

Donde N es igual a E/f y se define como la densidad de acción de oleaje.

En esta ecuación el primer término corresponde a la variación del espectro en el tiempo, el segundo y tercer termino a la variación del espectro en el espacio, el cuarto a la transferencia de energía en las direcciones y el quinto en las frecuencias.

Como se nombró anteriormente si se integra el espectro $E(f, \theta)$ se pueden obtener, principalmente, los siguientes parametros resumen del oleaje:

- Momentos espectrales:

$$m_i = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} E(f, \theta) f^i d\theta df \quad (7)$$

- Frecuencia peak corresponde al maximo valor del espectro de frecuencias $E(f)$:

$$Fp = \max(E(f)) = \max \left(\int_0^{\infty} E(f, \theta) d\theta \right) \quad (8)$$

- Dirección peak corresponde al maximo valor del espectro de direcciones $E(\theta)$:

$$Dp = \max(E(\theta)) = \max \left(\int_0^{\infty} E(f, \theta) df \right) \quad (9)$$

- Altura significativa espectral:

$$Hm_0 = 4\sqrt{m_0} \quad (10)$$

Como se puede apreciar, la altura significativa espectral corresponde a 4 veces la raíz del área bajo de curva del espectro de oleaje.

2.3 Modelos de propagación de oleaje

Para estudiar la propagación de ondas gravitacionales en cuerpos de agua abiertos existen tres teorías o metodologías: las que promedian la fase (*Phase-averaged models*), las que resuelven la fase (*Phase-resolving models*) y las técnicas CFD que resuelven las ecuaciones 3D de Navier-Stokes (Winkler, 2018).

2.3.1 Modelos que promedian la fase

También conocidos como modelos espectrales, estos se basan en la ecuación de balance de energía espectral $E(f, \theta, x, y, t)$ y determinan la evolución de la energía del oleaje en el tiempo y espacio. Permiten representar de buena forma fenómenos como el asomeramiento, refracción, disipación, difracción, entre otros, pero no determinan de buena forma la difracción y omiten la reflexión. Estos calculan los parámetros resumen de un estado de mar mediante la integración del espectro de energía del oleaje. Al no resolver la fase no permiten calcular la evolución de la superficie libre del oleaje y por ende se utilizan con resoluciones de tiempo y espacio mayores que en los otros dos casos que si resuelven la fase de la ola. Algunos ejemplos de estos modelos son el modelo SWAN (Booij et al., 1996) y WAVEWATCH III (Tolman, 1991).

2.3.2 Modelos que resuelven la fase

Se basan en las ecuaciones de conservación de la masa y de cantidad de movimiento. Estos modelos caracterizan la superficie libre de las ondas en el espacio y tiempo. Pueden representar de buena forma los fenómenos de disipación, reflexión, difracción, refracción y asomeramiento. El uso de estos modelos se limita a zonas de estudios pequeñas, debido a que la resolución de las ecuaciones de conservación requiere de alta resolución espacial y temporal, aumentando considerablemente su costo computacional. Estos modelos resuelven el oleaje en dos dimensiones (2D) y las principales incógnitas son la desnivelación instantánea con respecto del nivel de equilibrio y velocidad media en la profundidad. (Winkler, 2018).

2.3.3 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

Estos modelos calculan la velocidad y presión en 3D utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes en tres dimensiones. Utilizan principalmente las ecuaciones RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes equations*) y las técnicas de modelado LES (*Large Eddy Simulation*) y DNS (*Direct Numerical Simulation*). Estos modelos se utilizan principalmente en investigación debido a que requieren una alta capacidad computacional y por ende no resulta práctico implementarlos para grandes escalas de tiempo y espacio, ni para modelos operacionales. Estos modelos resuelven en tres dimensiones (3D) y las principales incógnitas son la presión y la velocidad puntual (Winkler, 2018).

2.4 Modelo espectral WAVEWATCH III

Modelo de base física de tercera generación desarrollado por el National Center for Environmental Prediction (NOAA/NCEP) utilizando de base el modelo WAM (WAMDI group, 1988). Este modelo es de código abierto e incluye los últimos avances correspondientes al modelado de la interacción entre el viento y el oleaje. Una de sus principales características es que resuelve la ecuación de balance de energía espectral de oleaje completamente, incluyendo términos no lineales.

Los términos fuente de la ecuación (6) en aguas profundas corresponden a la interacción atmosfera-ola (S_{in}), interacciones de olas no lineales (S_{nl}) y la interacción ola-océano que está principalmente controlada por el rompimiento del oleaje (S_{ds}). Para representar de manera más realista el crecimiento inicial del oleaje, un término no lineal puede ser añadido al modelo (S_{ln}). Para aguas poco profundas se debe considerar la interacción fondo-ola (S_{bot}) (Shemdin et al., 1978). Para aguas extremadamente poco profundas se debe considerar un término extra de rompimiento (S_{db}) solamente si este proceso no se representa de manera correcta con S_{ds} (Filipot and Ardhuin, 2012a). También se pueden incluir los términos fuente que representan la dispersión del oleaje debido a la forma del fondo marino (S_{sc}), la interacción hielo-ola (S_{ice}), la reflexión fuera de la costa o la inclusión de objetos que pudiesen representar fuentes de energía de ondas de infragravedad (S_{ref}). Finalmente, se pueden añadir términos definidos por el usuario (S_{user}). El término fuente general del modelo WAVEWATCH III:

$$S = S_{ln} + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} + S_{sc} + S_{ice} + S_{ref} + S_{user} \quad (11)$$

Las parametrizaciones de los términos, fuentes y procesos físicos pueden ser seleccionados en la instalación del modelo y vienen definidas en “switches” de compilación. Los procesos físicos que tienen mayor importancia en aguas oceánicas corresponden al crecimiento y disipación debido al viento junto con la interacción no lineal entre cuádrupletas (Holthuijsen, 2007).

WAVEWATCH III ha sido utilizado para crear un modelo global de oleaje con las parametrizaciones propuestas por Alday et al., (2021) el cual tiene como forzantes los vientos ERA5, las corrientes CMEMS-GLOBCURRENT, la máscara de hielo SSMI y finalmente la máscara de icebergs ALTIBERG. El modelo global tiene una cobertura temporal desde 1993 hasta 2021. En Chile se ha calibrado y validado, variando los switches y evaluando el desempeño del modelo, con el fin de generar el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá, et al., 2016).

2.5 Calibración y validación del modelo WAVEWATCH III en las costas de Chile

El trabajo de Hidalgo (2015) abordó la calibración y validación del modelo WAVEWATCH III V. 4.18, para su aplicación en la generación de un reanálisis de oleaje en las costas de Chile en 3 etapas. La calibración consistió en determinar la malla computacional y batimétrica óptima, priorizando la consistencia de los datos medidos en terreno y un tiempo de cálculo relativamente bajo. En la validación se determinaron las parametrizaciones óptimas de los procesos físicos involucrados en la resolución de las ecuaciones para representar de la mejor manera las condiciones de generación y propagación de oleaje hacia las costas de nuestro país. Por último, se variaron algunos parámetros adimensionales de los procesos que rigen el crecimiento y disipación de la energía debido al viento en aguas profundas.

Para comparar los datos observados y los simulados, se utilizaron 8 boyas distribuidas en las costas del país ubicadas en Arica, Valparaíso, V región, Constitución, VII región y XIV región y datos de seis distintos satélites. Se generó un indicador de bondad del modelo único llamado “Índice de desempeño unitario”

Finalmente, posterior a la calibración, el mejor ajuste se obtuvo para una boya colocada en el norte de Chile, consiguiéndose un coeficiente de determinación R^2 de 0.86 para las alturas significativas. El peor rendimiento se obtuvo en una boya ubicada frente a Valparaíso, donde se consiguieron errores RMSE de 0.43 metros y un coeficiente de determinación R^2 de 0.73. En este trabajo se determinó el switch de compilación que mejor representa las condiciones de oleaje en Chile: IFREMER1.

2.6 Atlas de oleaje de Chile

Este trabajo fue generado gracias a la calibración y validación del modelo WAVEWATCH III en las costas de nuestro país (Hidalgo, et al., 2015). El texto fue generado por Beyá, et al., (2016) y tiene como motivo resumir cualitativa y cuantitativamente el clima de oleaje en nuestro país de manera no operacional, es decir, que entrega estadística de ciertos parámetros promedio en ciertos puntos frente a las costas (llamados nodos). Los parámetros promedio entregados son altura significativa espectral (H_{m0}), periodos de cruces por cero (T_z), periodo energético del oleaje (T_e), periodo medio (T_m), periodo pico (T_p), dirección media del oleaje (D_m), dirección peak (D_p), ancho espectral (ϵ), ancho de banda espectral (ν), agudeza de pico del espectro (Q_p), parámetro de acentuación del máximo espectral (γ) y parámetro de dispersión direccional del oleaje (s). Los nodos analizados se ubican en las costas de Arica, Iquique, Mejillones, Taltal, Bahía Inglesa, Huasco, Tongoy, Valparaíso, Constitución, Talcahuano, Puerto Saavedra, Bahía Mansa, Chiloe, Archipiélago de los Chonos, Golfo de Penas, Isla Esmeralda, Isla Diego de Almagro, Isla Contreras, Isla London, Islas Desaventuradas, Isla de Pascua y el Archipiélago de Juan Fernández.

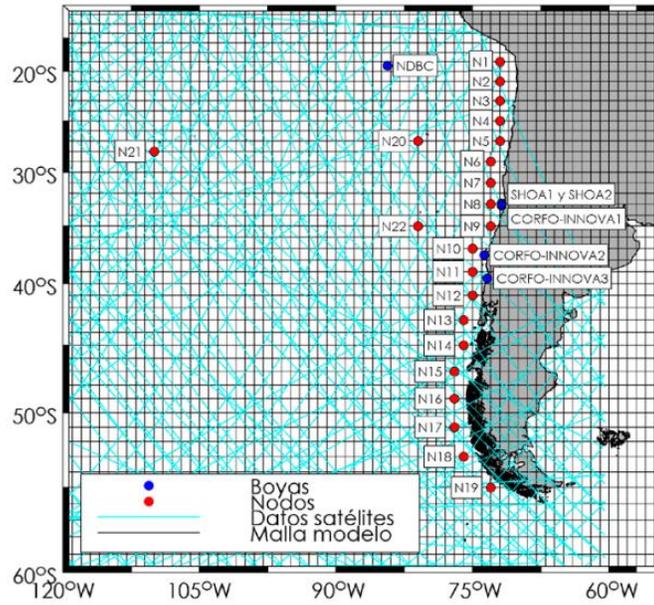


Figura 2.3: Ubicación de las boyas, nodos, datos satelitales utilizados y malla del modelo utilizado para la elaboración del Atlas de oleaje. *Fuente: Atlas del oleaje de Chile.*

Para generar el oleaje sintético y la estadística histórica de datos se utilizó el modelo WAVEWATCH III v.4.18 calibrado con los parámetros y utilizando la malla batimétrica del trabajo publicado “*Calibración y validación del modelo WAVEWATCH III V. 4.18, para su aplicación en la generación de un reanálisis de oleaje en las costas de Chile*”, obteniéndose 35 años de datos de oleaje espectral con resolución horaria en los nodos anteriormente nombrados.

A continuación, se mostrarán parámetros promedio y estadísticos de incertidumbre para el nodo ubicado costa afuera de Talcahuano de coordenadas 37°S y 75°O.

Parámetros promedio	
H_{m0} [m]	2.42
T_z [s]	7.9
T_e [s]	10.5
T_m [s]	8.9
T_p [s]	13
D_m [°]	231
D_p [°]	229
ε	0.81
ν	0.52
Q_p	2.02
γ	1.44
s	17.7

Tabla 2.1: Parámetros resumen para el nodo de Talcahuano. *Fuente: Atlas del oleaje de Chile.*

Estadísticos de incertidumbre	
Promedio H_{m0} satélite [m]	2.47
Promedio H_{m0} modelo [m]	2.46
Desviación estándar H_{m0} satélite [m]	0.67
Desviación estándar H_{m0} modelo [m]	0.79
Error absoluto medio (MAE) [m]	0.26
Raíz del error cuadrático medio (RMSE) [m]	0.33
Sesgo (BIAS) [m]	-0.01
Habilidad de pronóstico (SS)	0.87
Índice de dispersión (SI)	0.13
Intercepto mejor regresión lineal [m]	-0.21
Pendiente mejor regresión lineal	1.08
R^2 mejor regresión lineal	0.83
Mínimo error relativo ($RE_{mín}$)	-52%
Máximo error relativo ($RE_{máx}$)	62%
Error relativo medio (RE_{mean})	-1%
Mínimo error relativo absoluto ($ARE_{mín}$)	0.01%
Máximo error relativo absoluto ($ARE_{máx}$)	62%
Error relativo absoluto medio (AARE)	11%

Tabla 2.2: Estadísticos de incertidumbre para el nodo del Talcahuano. *Fuente: Atlas del oleaje de Chile.*

2.7 Modelación numérica para la evaluación de energía undimotriz en Chile

El trabajo de Lucero et al., (2017) evaluó la energía undimotriz disponible a lo largo de la costa centro-sur del país entre las latitudes 32.5°S y 42.5°s mediante una combinación de datos obtenidos in situ de boyas y ADCPs, y datos modelados mediante el modelo WAM para aguas profundas y SWAN para aguas poco profundas. Los datos medidos in situ han sido utilizados para evaluar la calidad del modelo.

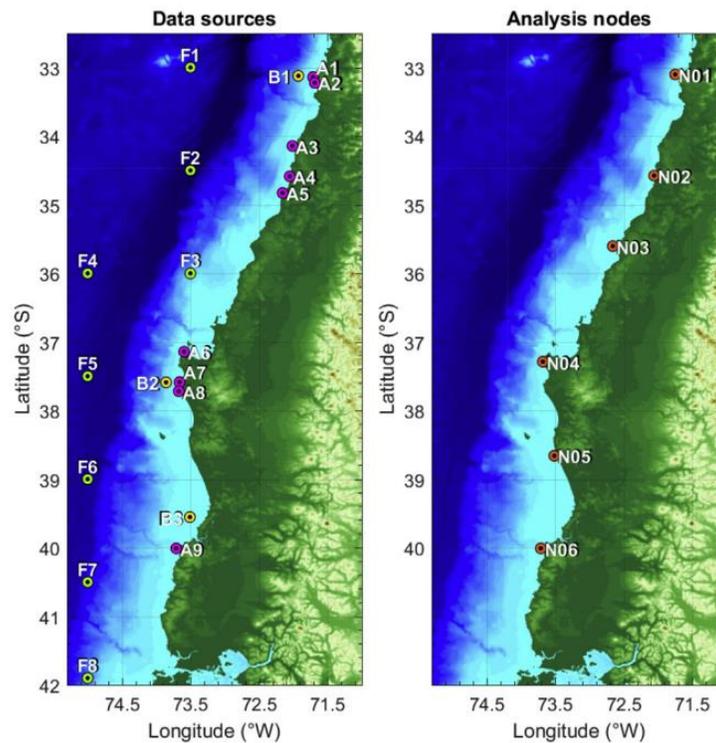


Figura 2.4: Zonas de interés, F, B, N y A denotan puntos con datos simulados, boyas, ADCPs y nodos analizados, respectivamente.

Los resultados muestran que el modelo se comporta de buena forma, teniendo en promedio un error de un 10% con respecto a los datos medidos y sobreestima la cantidad de energía disponible. Por otro lado, se estimó que la energía undimotriz está en relación directa con respecto a la latitud en nuestro país. Estos resultados son consistentes con estudios previos de la zona, aunque anteriormente se ha sobreestimado en un 20% la cantidad de energía undimotriz con respecto al presente trabajo, atribuyéndose a que previamente no se contaba con elementos para calibrar ni validar los modelos en la zona.

En la Figura 2.5 se ilustra la cantidad de energía undimotriz en la costa centro-sur del país para distintos percentiles (probabilidad de excedencia).

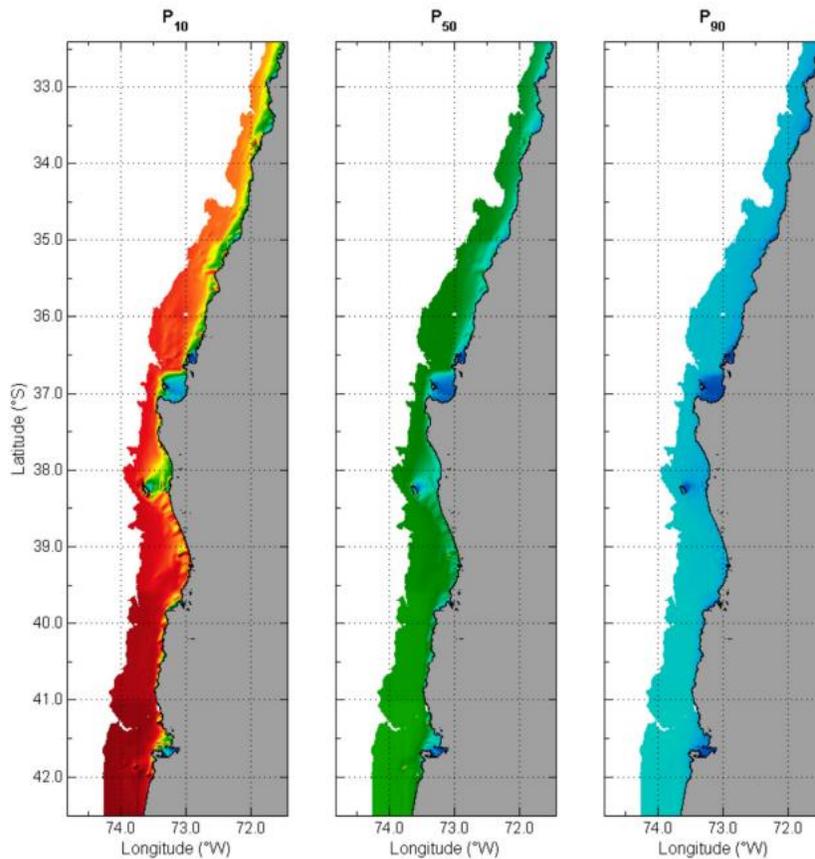


Figura 2.5: Mapa de energía undimotriz a lo largo de la costa centro-sur de Chile, tomado de Lucero et al., (2016).

2.8 Conclusión

En este capítulo se presentó la teoría que permite describir el oleaje. Por otro lado, se presentaron los modelos de propagación de oleaje y, más en detalle, el que ha sido utilizado para la realización del presente trabajo: WAVEWATCH III. Finalmente, se describen trabajos realizados previamente que permiten elegir de manera adecuada las parametrizaciones utilizadas en el modelo, caracterizar el oleaje reinante de la bahía analizada y visualizar otros usos que tiene la modelación numérica con respecto al oleaje y la energía relacionada con este.

CAPITULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta la descripción de la zona de estudio y la batimetría utilizada para esta. Además del procedimiento de confección de la malla computacional y la obtención de los espectros y datos observados del oleaje. Finalmente se presentan los indicadores de calidad con los que se evaluará el desempeño del modelo.

3.2 Área de estudio

Corresponde a la zona costera centro-sur de Chile, ubicada entre las latitudes 35°S y 39°S y longitudes 75°W y 72°W. La selección de las latitudes se basó en la influencia del golfo de Arauco, en la evolución del oleaje proveniente principalmente desde el suroeste.

El área de estudio fue definida para cubrir en su totalidad el Golfo de Arauco y las principales bahías de la región del Biobío. La extensión norte-sur fue seleccionada para evitar los efectos del borde en la zona de interés. Por el oeste el dominio se extiende desde aguas profundas (2220 m) para coincidir con el dominio del modelo global de oleaje del cual se obtienen las condiciones de borde de este modelo local (Accensi, 2020).

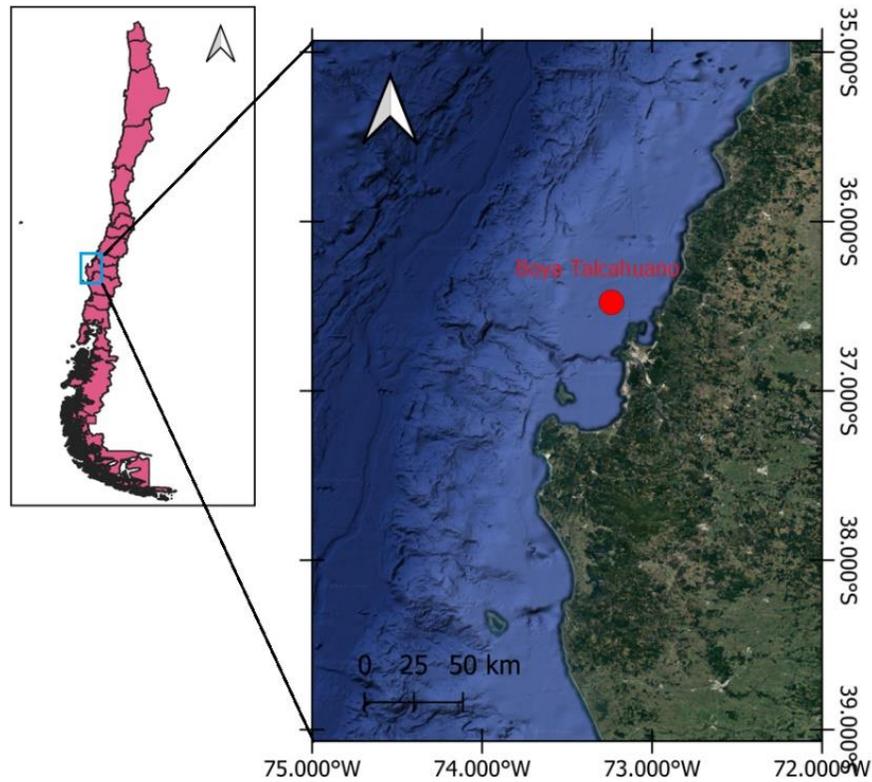


Figura 3.1: Zona de estudio. Imagen a la izquierda: Ubicación en Chile. Imagen a la izquierda: Costa de la región del Biobío. Se destaca la boya de Talcahuano en rojo. Coordenadas WGS84.

3.3 Batimetría

La batimetría utilizada en la ejecución de la modelación corresponde a la General Bathymetric Chart of the Ocean (GEBCO) en su versión del año 2014, la cual es de carácter global y entrega información sobre la elevación del fondo marino y tierra en metros en una grilla con intervalos de 30 segundos de arco (resolución de 900 m aproximadamente). Se alimenta de información obtenida mediante sonares, satélites y modelos. La Figura 3.2 muestra la batimetría utilizada para la zona de estudio.

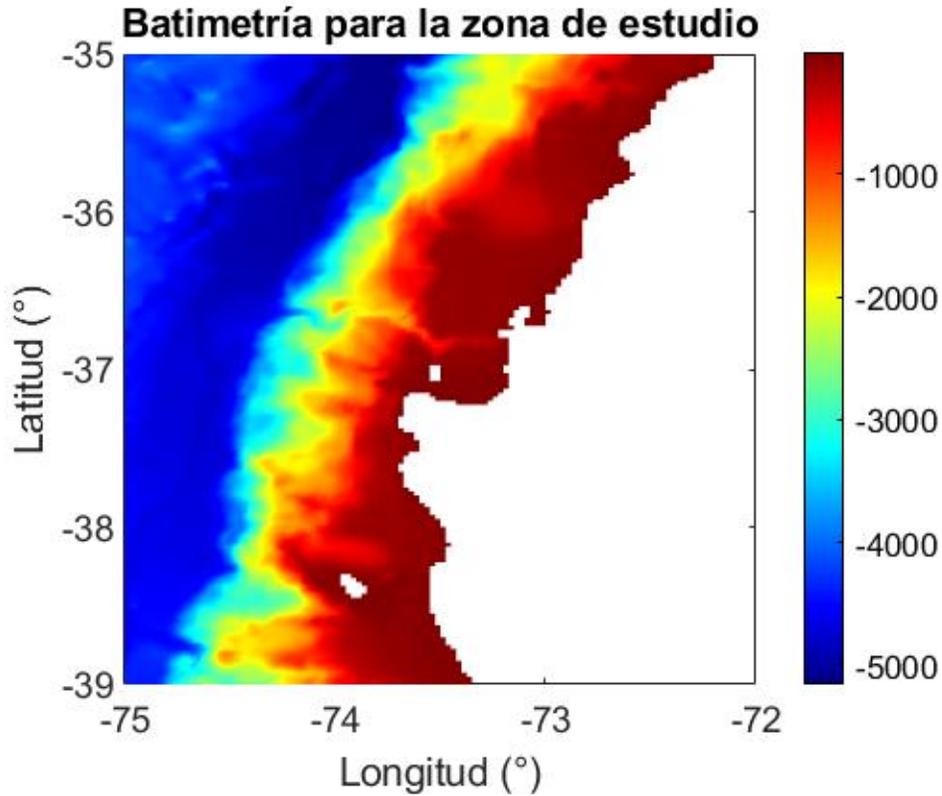


Figura 3.2: Batimetría para la zona de estudio. Valores en la barra de colores en metros.

3.4 Malla computacional

La malla computacional fue generada mediante el código de MATLAB “ww3_gridgen” incluido en el modelo WAVEWATCH III. El distanciamiento entre nodos fue elegido tomando en consideración, principalmente, la buena representación de las costas de la región. La resolución de la malla será de 0.025×0.025 (°) lo cual equivale aproximadamente a 2.8×2.8 km². Las características de la malla utilizada se muestran en la Tabla 3.1.

Grilla computacional	
Numero de nodos eje Y	121
Numero de nodos eje X	161
Número de puntos de la grilla	19481
Número de puntos mojados	12216
Número de puntos secos	7083
Número de puntos con condición de borde	319
Número de puntos excluidos	182
dx (°)	0.025
dy (°)	0.025
Paso de tiempo global máximo (s)	600
Paso de tiempo máximo para CFL X-Y (s)	25
Paso de tiempo máximo para CFL k-th (s)	25
Mínimo paso de tiempo (s)	1

Tabla 3.1: Características de la malla computacional.

3.5 Condición de borde: Espectros de oleaje

Los espectros de energía de oleaje utilizados como condición de borde y propagados por el modelo dentro de la zona de estudio fueron obtenidos desde el Laboratory for Ocean Physics and Satellite remote sensing (LOPS), IFREMER, Francia. Estos espectros están basados en el modelo global WAVEWATCH III utilizando las parametrizaciones descritas por Alday et al., (2021). El modelo global de oleaje está forzado por las corrientes CMEMS-GLUBCURRENT, la máscara de hielo ALTIBERG y los vientos ERA5. Los resultados de este se entregan en una malla global rectilínea de resolución 0.5° , una malla rectilínea de resolución 0.17° para el noroeste y noreste del Atlántico, África y el este del Pacífico y finalmente una malla curvilínea de 0.05° para Nueva Caledonia y el Caribe. Este tiene una cobertura temporal de 28 años desde 1993 hasta 2021 y brinda resultados del modelo cada 3 horas.

3.5.1 Predicción de espectros de oleaje

Se utilizan predicciones de espectros direccional de oleaje obtenidos desde el repositorio web del proyecto Models and data Analysis for Research on Coastal seas (MARC) de la página web FusionForge del laboratorio IFREMER.

Para la zona de estudio se emplean como condición de borde los datos del nodo de coordenadas 36°S 73°W. Se utilizan espectros direccionales de oleaje disponibles cada 3 horas, actualizados cada 12 horas en la página y con un horizonte temporal de pronóstico de 6 días.

3.5.2 Observaciones de oleaje

Para realizar la validación se han utilizado los datos de observaciones de oleaje del año 2021 proporcionados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), los cuales son medidos por una boya WatchKeeper a una profundidad de 125 m y de coordenadas 36.567°S 73.338°W. Estos se encuentran con control de calidad solamente para el periodo entre enero y julio 2021, por ende, se han utilizado solamente estos datos para validar.

3.6 Indicadores de calidad del modelo

A continuación, se describen los indicadores de calidad con los cuales se evaluaron los datos simulados. Cabe destacar que la cantidad de datos simulados difiere de la cantidad de datos observados, por ende, se compararon solamente en instantes de tiempo donde se tuviese información tanto de datos simulados como observados. Para esto se realizó un análisis en MATLAB para poder generar vectores de datos de igual tamaño donde coinciden las fechas de estos.

3.6.1 Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

Indicador de calidad de un modelo principalmente utilizado en la hidrología para poder evaluar la eficiencia de los datos simulados con respecto a los observados. Determina la magnitud relativa de la varianza residual (ruido) en comparación con la varianza de los datos medidos (información) (Nash y Sutcliffe, 1970). Se obtiene de la siguiente forma:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (9)$$

Donde O_i corresponde a los datos observados, S_i a los datos simulados, \bar{O} al promedio de los datos observados. El valor de este indicador puede variar entre menos infinito y 1. Un valor entre 0 y 1 indica un rendimiento del modelo aceptable, mientras que valores menores a 0 indican que el promedio de los datos observados es mejor indicador que los datos simulados, lo que indica un resultado inaceptable.

3.6.2 Percent Bias (PBIAS)

El Percent Bias (sesgo porcentual) es un indicador de calidad de un modelo principalmente utilizado en campos como la meteorología e hidrología. Este mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser mayores o menores que sus homólogos observados (Gupta et al., 1999). Se obtiene de la siguiente manera:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \right] \cdot 100 \quad (10)$$

Valores cercanos a 0 indican un ajuste perfecto de datos simulados con respecto a los observados,

3.6.3 Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

Sirve para evaluar el desempeño de un modelo. Este representa el error promedio absoluto entre los datos simulados y los observados. Se calcula de la siguiente forma:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (11)$$

Un resultado cercano a 0 indica un buen ajuste y los resultados deben ser analizados tomando en cuenta la magnitud de los datos utilizados, es decir que para magnitudes grandes de datos un resultado de RMSE pequeño indica un buen ajuste, en cambio, si la magnitud de los datos es pequeña un resultado pequeño puede indicar un mal ajuste.

3.7 Conclusión

En este capítulo se ha presentado la zona de estudio utilizada para la ejecución del trabajo, además de la malla batimétrica utilizada para la discretización de esta. Por otro lado, también fueron presentados los espectros de energía propagados en los puntos de condición de borde de la malla computacional. Finalmente, se han descrito los indicadores de calidad utilizados para evaluar el desempeño del modelo.

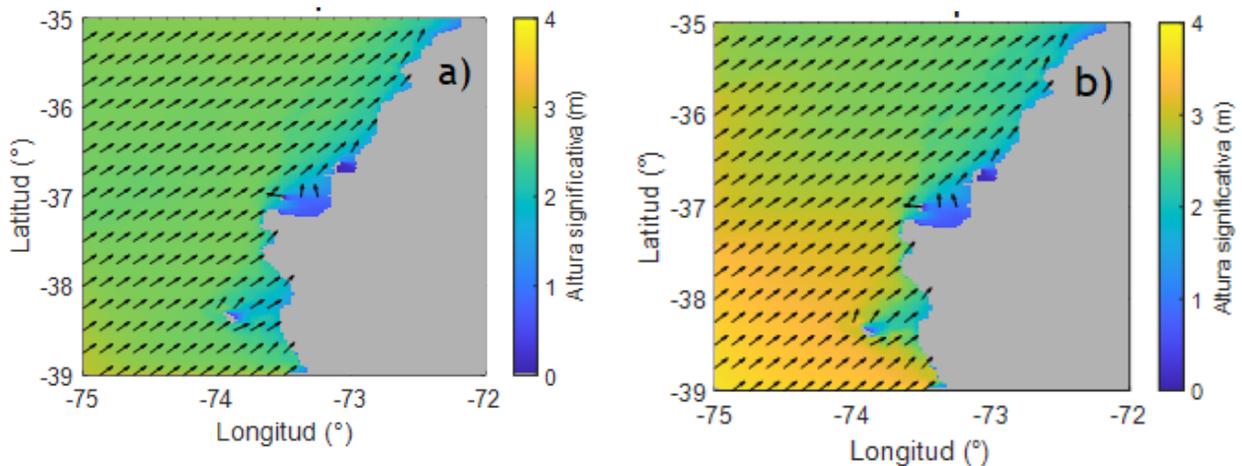
CAPITULO 4 RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos, estos incluyen mapas de altura significativa y dirección peak de una tormenta en el mes de julio, gráficas comparativas para llevar a cabo la validación del modelo, sus indicadores de calidad y gráficos de dispersión. Finalmente, se presentará el pronóstico realizado.

4.2 Resultados obtenidos del modelo implementado

Se logró implementar de manera exitosa el modelo WAVEWATCH III en la región del Biobío, pudiendo obtener mapas de altura significativa, periodo peak y dirección peak en la costa cada 3 horas para los periodos simulados. Posteriormente, se validaron los resultados obtenidos de manera cualitativa utilizando una alerta de marejadas emitida por la Armada de Chile, la cual tuvo una extensión desde Arica hasta el Golfo de penas para las fechas del 3 al 7 de julio del 2021. La Figura 4.1 ilustrará el avance temporal de esta marejada simulada en el modelo considerando tiempos de interés (inicio, desarrollo y fin).



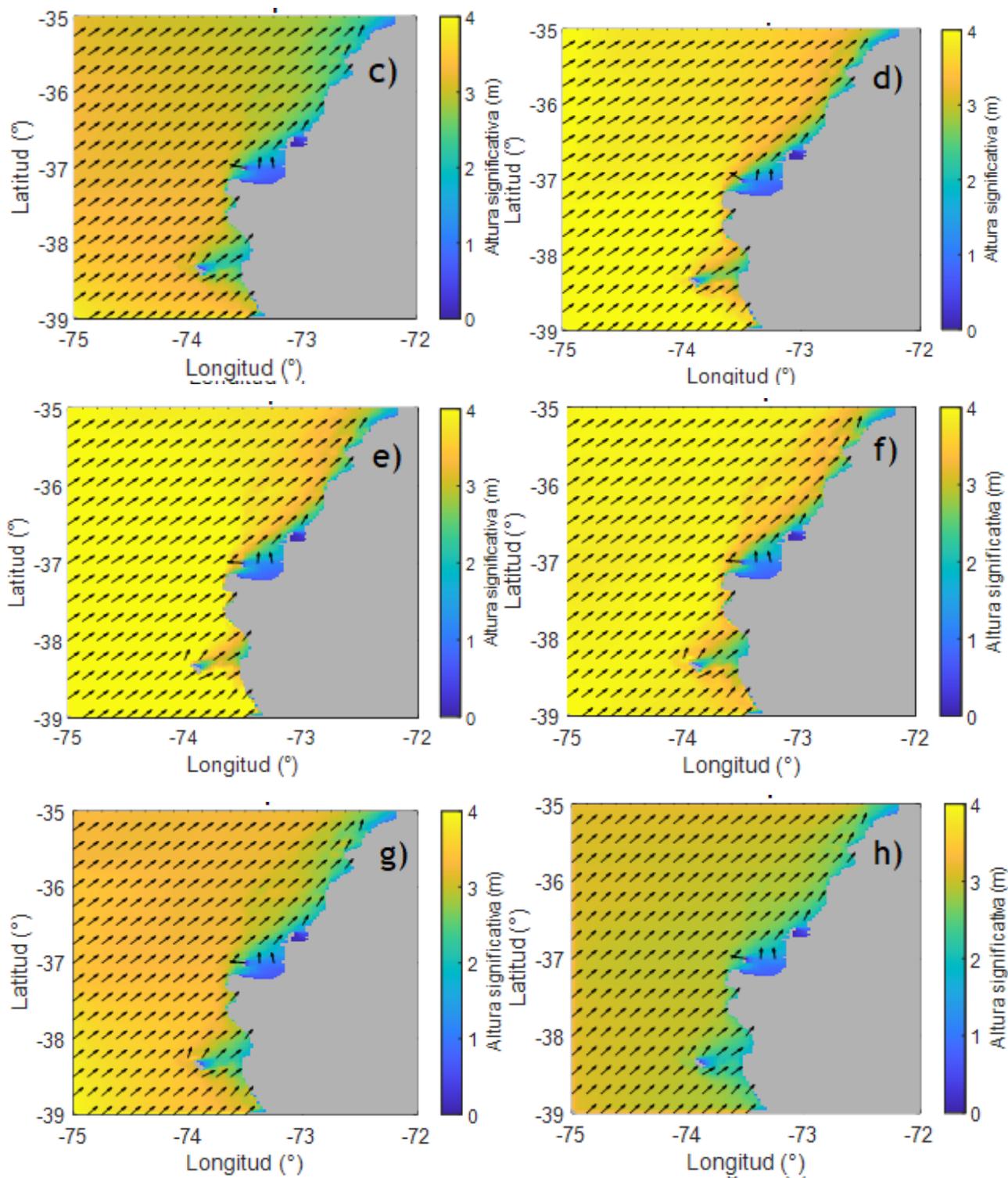


Figura 4.1: Evolución temporal de la marejada simulada. La evolución temporal de las imágenes corresponde a imagen a) 1-julio 12:00:00. Imagen b) 2-julio 00:00:00. Imagen c) 2-julio 12:00:00. Imagen d) 3-julio 12:00:00. Imagen e) 4-julio 12:00:00. Imagen f) 5-julio 12:00:00. Imagen g) 6-julio 00:00:00. Imagen h) 7-julio 00:00:00

4.3 Validación del modelo

La Figura 4.2 presenta la comparación de alturas significativas simuladas y estimadas de las observaciones de oleaje de la boya SHOA. Los datos simulados muestran una buena representación de la realidad, representando de buena forma la evolución de la altura significativa. Se representa bien la tendencia al aumento y disminución de la altura significativa durante tormentas. Sin embargo, pequeñas variaciones no se representan de buena forma. Esto se puede apreciar de mejor forma en la Figura 4.3, la cual muestra la comparación entre la altura significativa modelada y simulada del mes de enero del 2021.

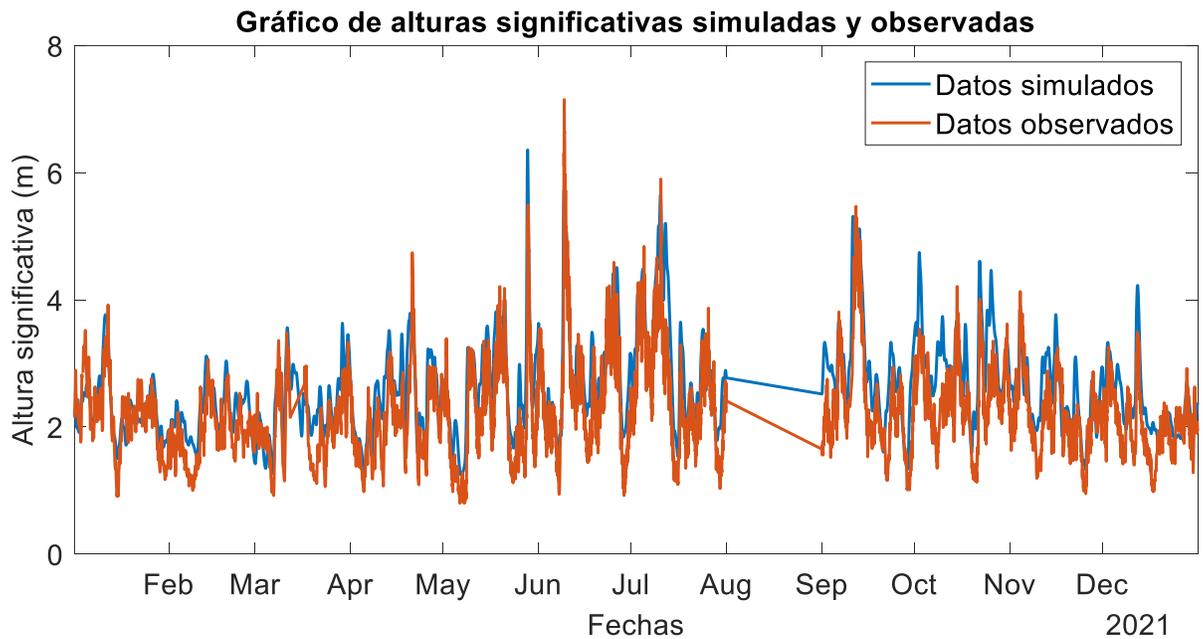


Figura 4.2: Gráfico comparativo de alturas significativas simuladas y observadas para todo el periodo de simulación (año 2021).

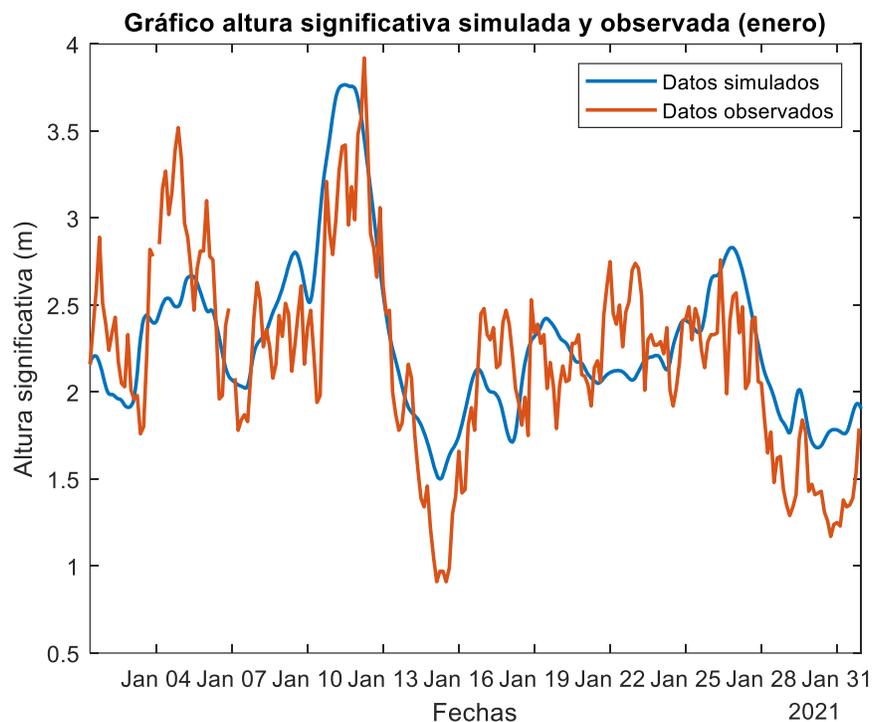


Figura 4.3: Gráfico comparativo de alturas significativas simuladas y observadas para el mes de enero del 2021.

A continuación se presenta la gráfica comparativa de periodo peak del periodo de validación en la Figura 4.4 y del mes de enero en la Figura 4.5. Cabe destacar que los periodos peak son bien representados, pero no se muestran las pequeñas variaciones debido a la falta del periodo peak. Como se puede apreciar en la Figura 4.4 el periodo peak es mayor a 10 segundos en la mayoría del periodo de validación, lo que se condice con que se representa oleaje del tipo swell. Se puede apreciar también que el modelo sobreestima los periodos peak máximos.

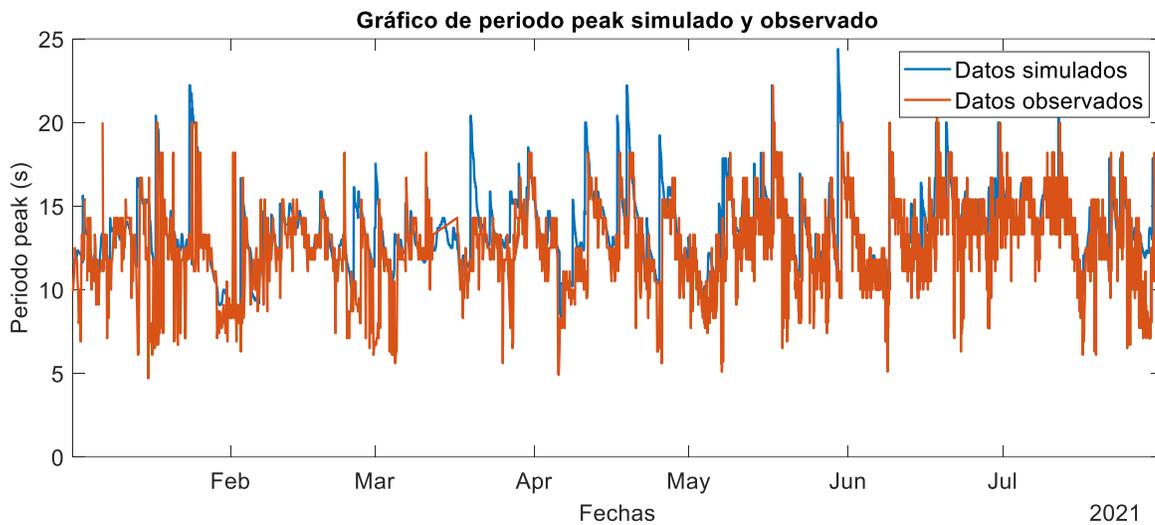


Figura 4.4: Grafico comparativo de periodos peak simulados y observados entre enero y julio del año 2021.

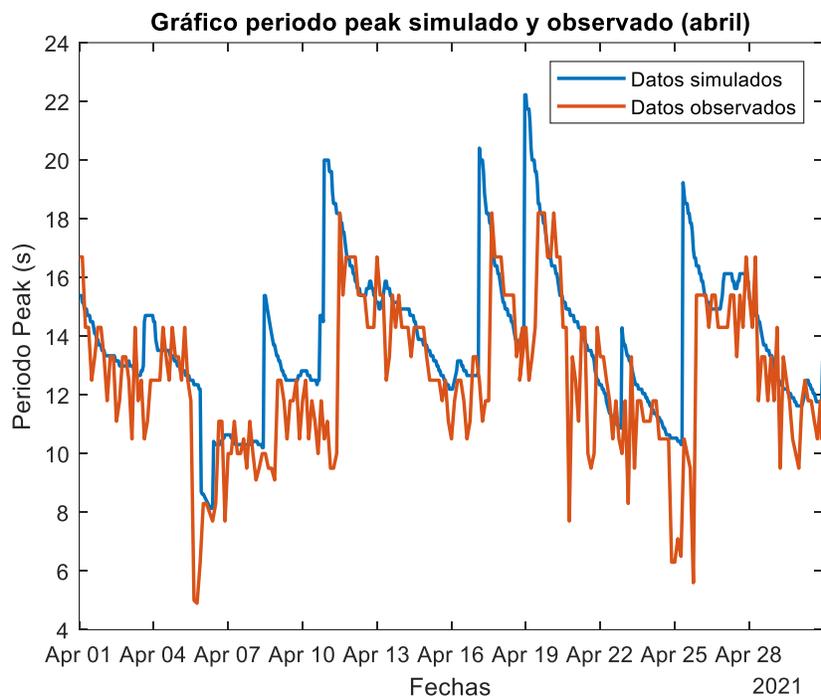


Figura 4.5: Grafico comparativo de periodos peak simulados y observados para el mes de abril del 2021.

Finalmente, se presenta el gráfico comparativo de dirección peak. Se puede apreciar que, si bien los datos simulados se acercan a los observados, no logran representarlos del todo bien. En los meses de enero y febrero se puede observar que los datos simulados sobreestiman a los datos observados. Posterior a esto los datos simulados subestiman a los observados, lo que se puede apreciar desde abril hasta julio y en las direcciones peak máximas de estos meses.

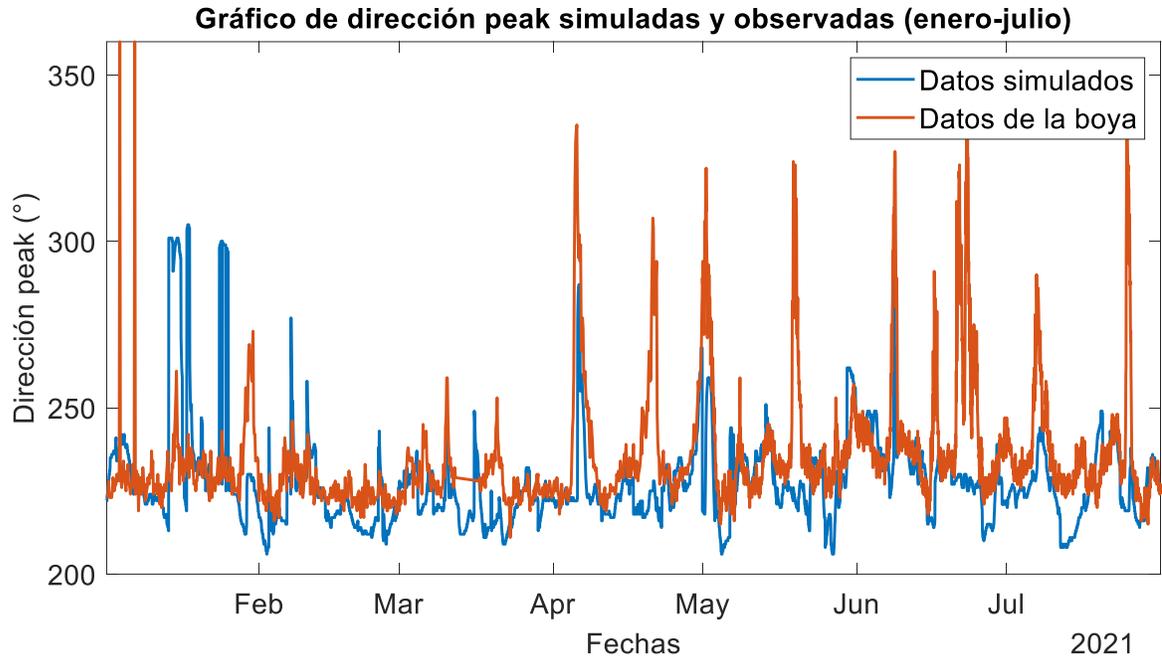


Figura 4.6: Gráfico comparativo de direcciones peak simuladas y observadas entre enero y julio del año 2021.

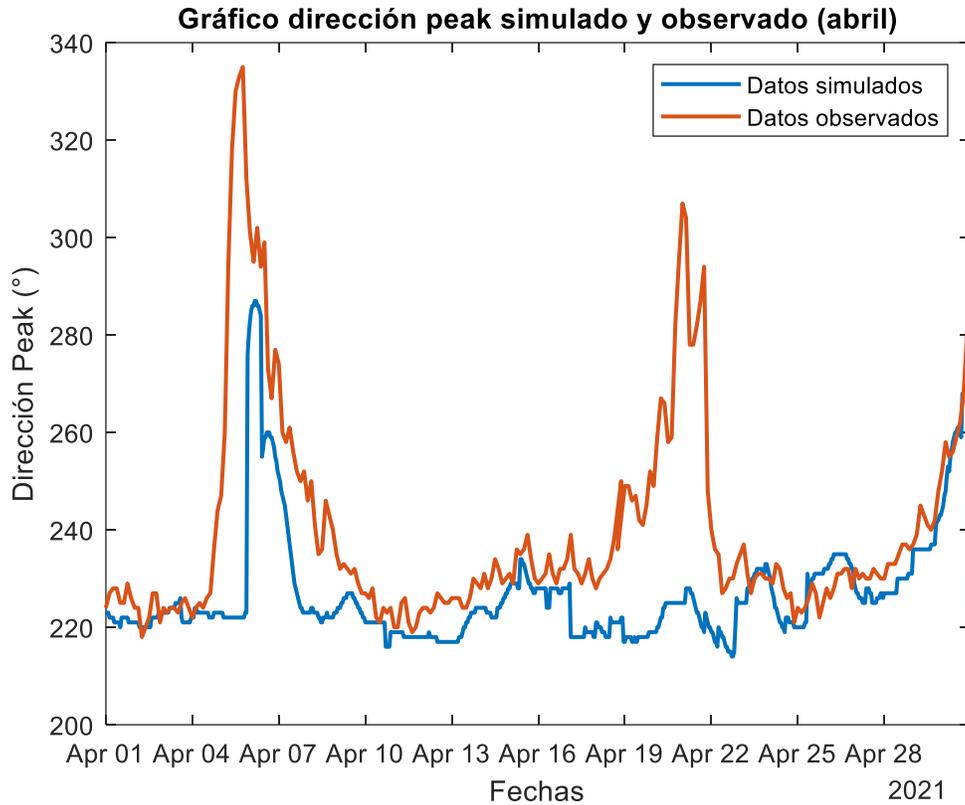


Figura 4.7: Grafico comparativo de direcciones peak simuladas y observadas en abril del 2021.

A continuación, se presentan gráficos de dispersión de los datos, primeramente, de la altura significativa en la Figura 4.8 en el cual se puede observar que los datos tienen una relación lineal positiva lo que muestra que hay una correlación entre los datos. La grafica de dispersión de periodo peak en la Figura 4.9 muestra que estos también tienen una relación lineal positiva. Finalmente, se presenta el grafico de dispersión de dirección peak en la Figura 4.10 en el cual se puede observar que existe una relación lineal positiva hasta los 250°, posterior a esto no existe, posiblemente debido a las tormentas generadas por viento local desde estas direcciones.

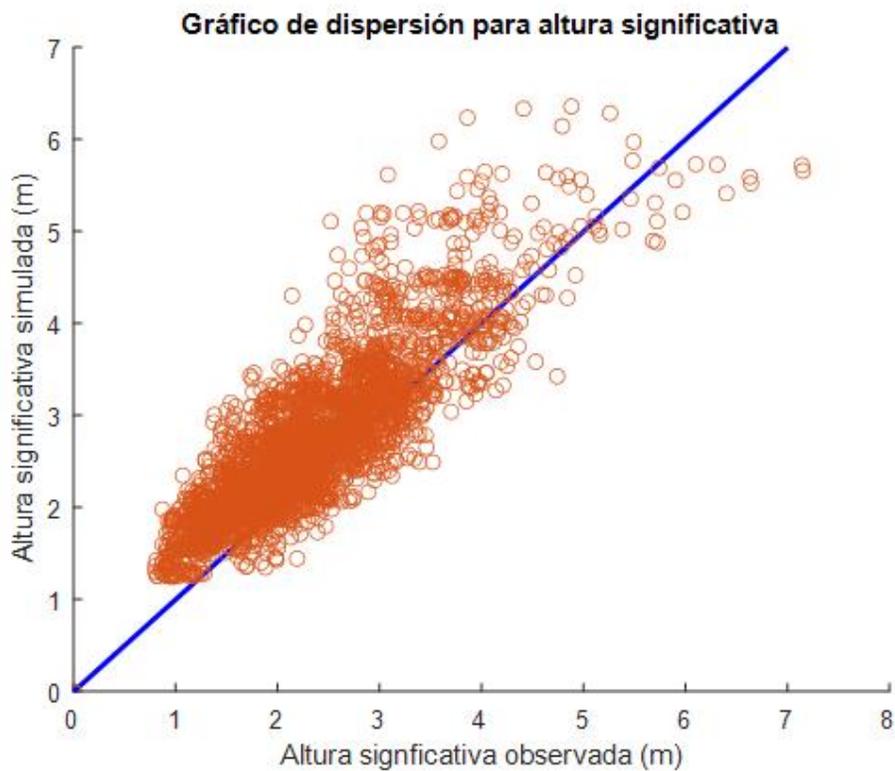


Figura 4.8: Grafico de dispersión de altura significativa para el año 2021.

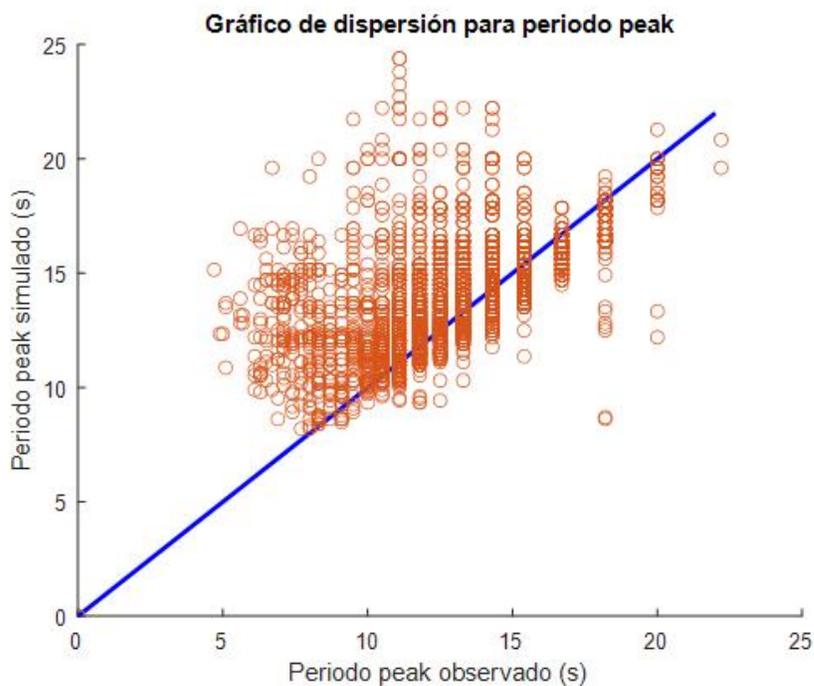


Figura 4.9: Grafico de dispersión de periodo peak para el periodo entre enero y julio del año 2021.

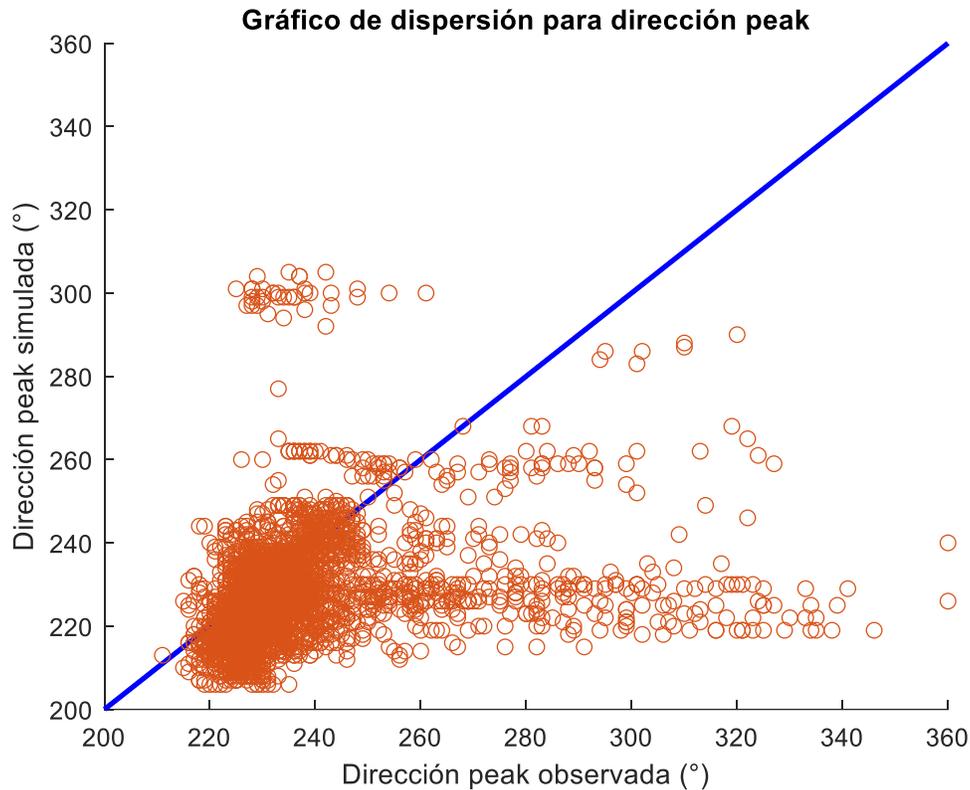


Figura 4.10: Grafico de dispersión de dirección peak para el periodo entre enero y julio del año 2021.

4.3.4 Indicadores de calidad para el ajuste del año 2021

A continuación, se presentan los indicadores de calidad utilizados para evaluar el desempeño del modelo. En la Tabla 4.1 se aprecian los indicadores mensuales para el ajuste de altura significativa para todo el año 2021 con datos disponibles. En la Tabla 4.2 se muestran los indicadores mensuales para el periodo peak desde enero hasta julio, asimismo la Tabla 4.3 muestra los resultados para la dirección peak. Finalmente, en la Tabla 4.4 se muestra la calidad del ajuste considerando los datos disponibles para todo el periodo de validación.

De las Tabla 4.4 según el criterio de Moriasi et al., (2007), se puede concluir que los ajustes de altura significativa y periodo peak son aceptables, tanto para el periodo de validación como para el pronóstico, pero los datos simulados tienen una tendencia promedio a sobreestimar los datos observados. El ajuste de dirección peak es insuficiente, en donde los datos simulados subestiman a los observados.

Indicadores de calidad Hs			
Mes	NSE	PBIAS (%)	RMSE (m)
Enero	0.589	3.660	0.378
Febrero	-0.162	18.538	0.461
Marzo	0.224	15.218	0.503
Abril	0.247	17.531	0.544
Mayo	0.443	21.386	0.640
Junio	0.633	13.147	0.587
Julio	0.294	20.524	0.711
Septiembre	0.391	21.890	0.699
Octubre	-0.671	23.600	0.751
Noviembre	0.163	15.463	0.542
Diciembre	-0.165	16.600	0.502

Tabla 4.1: Tabla de indicadores de calidad para el ajuste de altura significativa.

Indicadores de calidad Tp			
Mes	NSE	PBIAS (%)	RMSE (s)
Enero	-0.314	12.551	3.548
Febrero	-0.183	6.443	2.535
Marzo	-0.393	11.010	2.938
Abril	-0.198	10.840	2.837
Mayo	-0.059	9.471	2.789
Junio	0.171	7.626	2.283
Julio	0.185	8.419	2.414

Tabla 4.2: Tabla de indicadores de calidad para el ajuste de periodo peak (enero-julio).

Indicadores de calidad Dp			
Mes	NSE	PBIAS (%)	RMSE (°)
Enero	-3.270	2.745	30.361
Febrero	-2.411	-1.998	9.483
Marzo	-1.442	-2.874	10.536
Abril	-0.150	-5.519	24.265
Mayo	-0.286	-3.783	21.199
Junio	-0.387	-5.331	26.205
Julio	-0.420	-4.430	20.825

Tabla 4.3: Tabla de indicadores de calidad para el ajuste de dirección peak (enero-julio).

	NSE	PBIAS (%)	RMSE (m, s, °)
Hs	0.388	18.039	0.615
Tp	0.026	9.014	2.662
Dp	-0.386	-3.754	22.321

Tabla 4.4: Tabla de indicadores del ajuste para todo el periodo de comparación.

4.4 Predicción de estados de mar

En las siguientes figuras se presentan los resultados del pronóstico realizado para los días 27 y 28 de julio del año 2023, en los cuales se incluye los gráficos comparativos de los datos pronosticados y observados de altura significativa, periodo peak y dirección media. Finalmente, se presentan los indicadores de calidad relacionados con el pronóstico.

Se observa un buen ajuste entre los datos pronosticados y los datos observados (tomados posteriormente). La altura significativa muestra una mayor diferencia al inicio del pronóstico probablemente relacionado con el periodo de calentamiento del modelo. Luego se observan oscilaciones que no son capturadas por el modelo, probablemente relacionadas con oleaje generado localmente (por vientos locales) que no se han incluido en el modelo. El periodo peak y la dirección media pronosticada se ajustan bien a los datos observados.

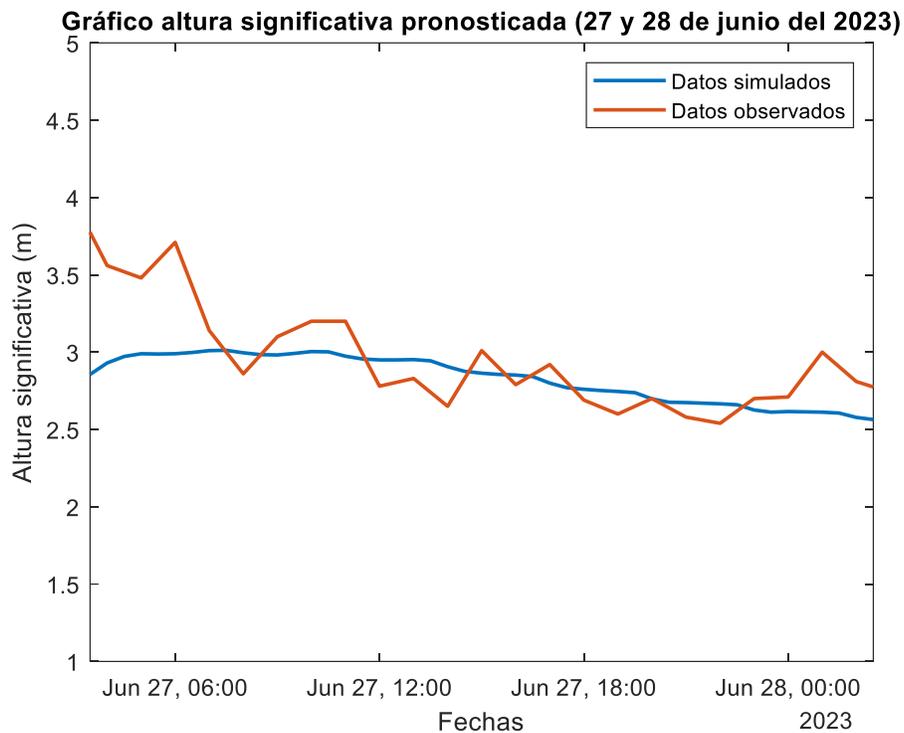


Figura 4.11: Grafico comparativo de altura significativa pronosticada y observada.

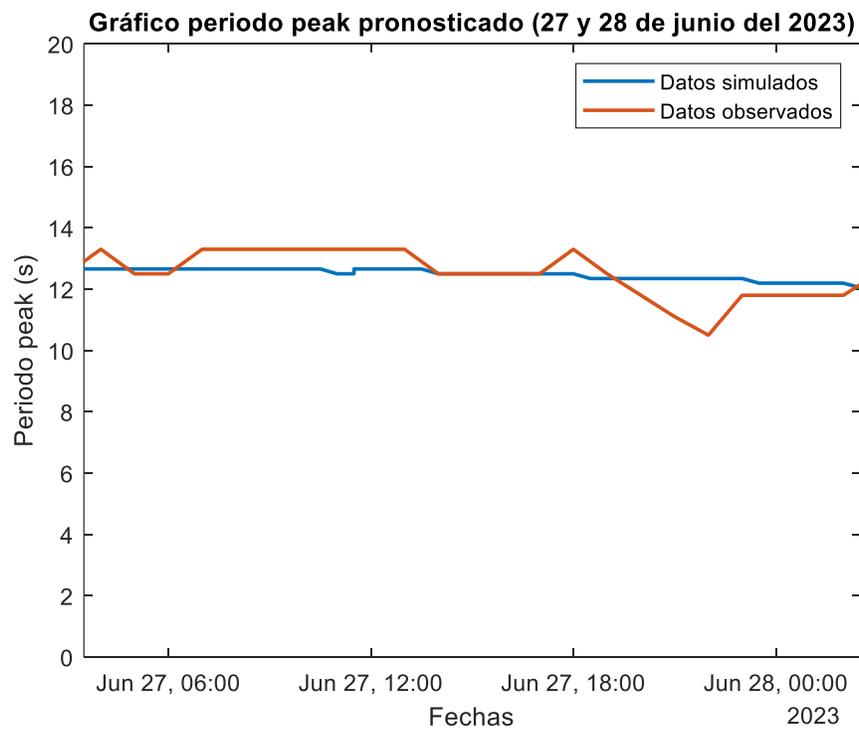


Figura 4.12: Grafico comparativo de periodo peak pronosticado y observado.

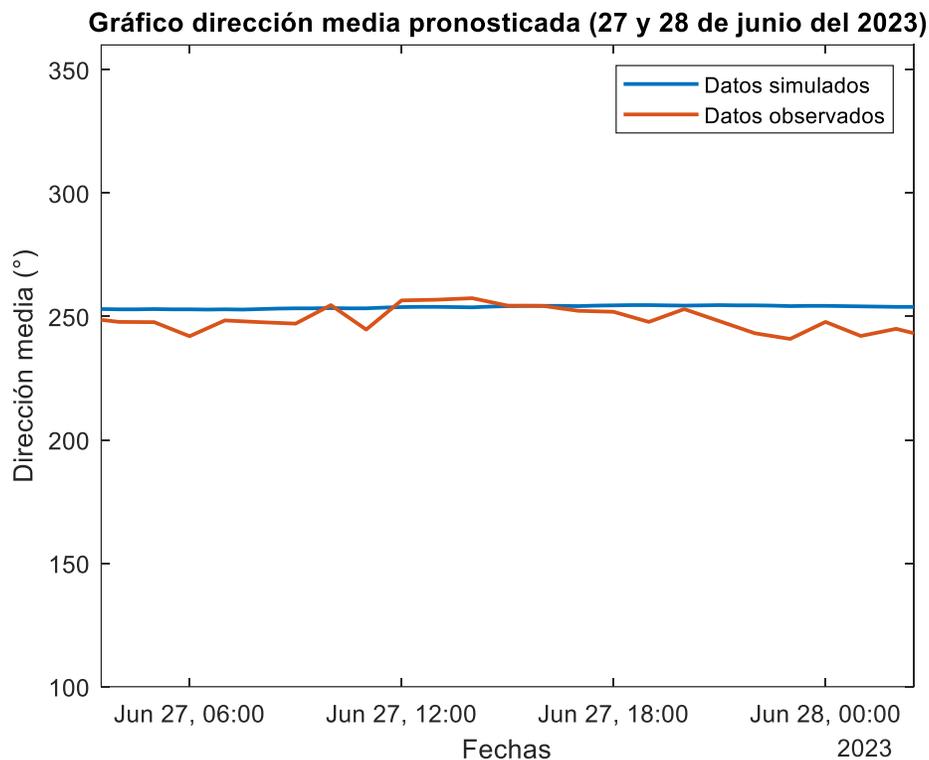


Figura 4.13: Grafico comparativo de dirección media pronosticada y observada.

	NSE	PBIAS (%)	RMSE (m, s y °)
Hs	0.249	-3.529	0.273
Tp	0.276	-0.195	0.668
Dm	-0.871	1.856	6.709

Tabla 4.5: Tabla de indicadores del ajuste para el pronóstico realizado.

4.5 Conclusión

En este capítulo se presentó la validación de un evento de marejadas en el año 2021 con una secuencia de mapas de altura significativa y dirección peak. Posteriormente, se mostraron las gráficas comparativas y de dispersión de los datos observados y simulados y las tablas con los indicadores de calidad calculados. Finalmente, se presentaron los resultados del pronóstico realizado para el día 27 y 28 de julio del 2023.

CAPITULO 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se implementó exitosamente el modelo WAVEWATCH III para la costa de la región del Biobío. Se generaron mapas de altura significativa, periodo, y dirección peak capturando de buena forma la duración y extensión de una marejada.

Los gráficos comparativos entre valores simulados y observados durante el periodo de validación muestran que un buen ajuste, representando en general de forma exitosa la variación de altura significativa y periodo peak. Si bien no se pudieron representar las pequeñas variaciones que tenían los datos observados, esto podría ser mejorado añadiendo viento local como input al modelo.

Siguiendo con los gráficos de dispersión, estos muestran una relación lineal creciente para los datos de altura significativa y periodo peak simulado y observado, lo cual es lo esperado. Por otro lado, el gráfico de dispersión de la dirección peak muestra que hay una relación lineal, pero esta no es creciente.

Las tablas de indicadores de calidad muestran que se realizaron buenos ajustes siendo el de altura significativa el mejor, obteniendo un NSE de 0.388 lo que significa que el modelo es capaz de capturar alrededor del 38% de la variabilidad total presente en los datos observados, por otro lado, obtuvo un PBIAS de 18.04% lo que nos dice que la altura significativa modelada tiene una tendencia promedio a ser un 18.04% más grande que la altura significativa observada. Finalmente obtuvo un RMSE de 0.615 m lo que representa que el error promedio absoluto de los datos observados y medidos es de 0.615 m. El segundo mejor ajuste se da para el periodo peak, siendo este también aceptable, con un NSE de 0.026, un PBIAS de 9.02% y un RMSE de 2.66 s. El ajuste de dirección peak podría ser mejorable según los indicadores de calidad.

Se logró realizar un buen pronóstico de oleaje para los días 27 y 28 de julio del año 2023, pudiendo obtener indicadores de calidad aceptables para el ajuste de altura significativa y periodo peak. También el ajuste de dirección peak pudiese ser mejorable.

Finalmente, como trabajo futuro se recomienda: 1) Actualizar la malla batimétrica a una versión más reciente de GEBCO. 2) Incorporar al modelo el viento local para representar de buena forma las oscilaciones menores y la disipación de energía. 3) Automatizar el procedimiento para generar el pronóstico de oleaje.

REFERENCIAS

- Paskoff, R. (2010). Geología marina de Chile. 9.11, 77.
- Hidalgo, H. (2017). Desempeño de la herramienta tecnológica SIPROL® en el pronóstico de marejadas, años 2015 y 2016 Quinta Región.
- Puelma, A. (2015). Propagación pseudo-espectral del oleaje y sistema automatizado de pronóstico de oleaje local.
- Moriassi, D. J., Arnold, Van Liew, M. Bingner, R. Harmel, R. Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. 886-893.
- Munk, W. (1950). Origin and generation of waves. Coastal Engineering Proceedings, 1, 1.
- Airy, G. (1845). Tides and Waves.
- Kundu, P. K. (2012). Fluid mechanics. Elsevier Inc.
- Winckler, P. Introducción al modelado de procesos costeros. 5, 74-76.
- Booij, N., Holthuijsen, L., Ris, R. (1996). The “SWAN” wave model for shallow. Coastal Engineering. 1.
- Tolman, H. L. (1991). A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents. *J. Phys. Oceanogr.* 21, 782-797
- The WAMDI group. (1998). The WAM Model—A Third Generation Ocean Wave Prediction Model.
- Shemdin, O., Hasselman, K., Hsiao, S.V., Heterich K. (1978). Nonlinear and linear bottom interactions effects in shallow water. Turbulent fluxes through the sea surface, wave dynamics and predictions. 1, 347-365.
- Filipot, J.F., Ardhuin, F. (2012). A unified spectral parameterization for wave breaking: From the deep ocean to the surf zone. *Journal of Geophysical Research.*
- Holthuijsen, L. (2007). Waves in Oceanic and Coastal Waters.
- Beyá J., Álvarez M., Gallardo A., Hidalgo H., Aguirre C., Valdivia J., Parra C., Méndez L., Contreras F., Winckler P., Molina M. (2016). Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso.
- Hidalgo, H. (2015). Calibración y validación del modelo WAVEWATCH III V. 4.18, para su aplicación en la generación de un reanálisis de oleaje en las costas de Chile.
- Lucero, (2017). Evaluación de la energía undimotriz en la costa centro-sur de Chile.
- Accensi, M. (2022). GLOBMULTI_ERA5_GLOBCUR_01. IFREMER

- Alday, M., Accensi, M., Arduin, F., Dodet, G. (2021). A global wave parameter database for geophysical applications. 166.
- Nash, J., E.; Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10 (3): 282–290.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., P. O. Yapo. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrologic Eng.* 4(2): 135-143.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Camilo Andrés Ferrer Ramírez
Título de la memoria : Implementación de un modelo espectral de oleaje para la región del Biobío.
Fecha de la presentación oral :

Profesor(es) Guía : Maricarmen Andrea Josefina Guerra Paris
Profesor(es) Revisor(es) : Alejandra Patricia Stehr Gesche
Concepto :
Calificación :

Resumen

Las marejadas son eventos que van en aumento en nuestro país. Estos traen consigo pérdidas materiales y vidas humanas. En nuestro país la Alerta de Marejadas es emitida a través del Pronóstico General Marítimo el cual es de carácter cualitativo, solamente para algunas bahías y con un horizonte temporal de predicción de solo 12 horas.

En el presente trabajo se implementará el modelo WAVEWATCH III para la costa de la región del Biobío con el objetivo de poder proponer un sistema de alertas de marejadas de carácter cuantitativo y con un horizonte temporal de predicción de máximo 6 días.

Los resultados muestran que el modelo puede representar de buena forma eventos de marejadas en el país plasmando de buena forma la duración, magnitud y extensión de estos. Por otro lado, se pudo generar un pronóstico de oleaje para los días 27 y 28 de junio del año 2023.