



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**MODELACIÓN DE OLAJE PARA EL PRONÓSTICO Y LA ALERTA DE
MAREJADAS**

POR

Gabriela Fernanda Camino Cane

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

Profesora Guía
Dra. Maricarmen Guerra Paris

Enero 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Gabriela Fernanda Camino Cane

© 2025 Gabriela Fernanda Camino Cane

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

Dedicatoria

Le dedico este trabajo a mi familia, por su amor incondicional.

A mis amigos, que han sido mi pilar fundamental en la vida universitaria.

A mi pareja, que con su amor me ayudó a salir adelante.

Y a mi papá, Rodrigo Camino, espero convertirme en la mitad de buena profesional que fuiste en vida, este logro es para ti, un beso al cielo.

Agradecimientos

Agradezco enormemente a mi profesora guía, Maricarmen Guerra, por su acompañamiento, por estar siempre disponible para responder dudas y por buscar convertirme en una mejor profesional.

Agradezco también a mi profesor de comisión, Oscar Link, por su buena disposición y consejo, además de hacerme trabajar la confianza en mí.

Agradezco al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) por facilitar las cartas náuticas utilizadas en esta memoria. Este trabajo se enmarca dentro de los proyectos ANID Fondecyt 11220663 y ANID Desafíos Públicos RP22I1005.

RESUMEN

Una marejada es un fenómeno de oleaje que se caracteriza por un incremento en las alturas significativas, periodo, y energía de las olas. Estos eventos afectan el normal funcionamiento costero y pueden representar un riesgo para la vida de las personas. Con el cambio climático se espera que este fenómeno ocurra con mayor frecuencia e intensidad.

La bahía de Coronel es un punto estratégico para el comercio internacional y nacional gracias a su puerto, sin embargo, esta zona no posee un modelo de pronóstico de oleaje gratuito. Frente a un escenario de marejadas el puerto de Coronel se puede ver afectado negativamente, tanto estructuralmente como operacionalmente. Por lo que toma relevancia implementar un sistema de alerta de marejadas específico para la zona, que complemente el sistema actual, evitando así detenciones en su funcionamiento y la pérdida económica que esto representa.

Esta memoria de título tiene como objetivo implementar un modelo de propagación de oleaje de alta resolución de la bahía de Coronel para el pronóstico y alerta de marejadas.

Se realiza una modelación de la bahía de Coronel para entender su comportamiento frente al fenómeno de marejadas. Con este fin se crea una malla anidada a partir de cartas náuticas facilitadas por el SHOA, se implementa el modelo SWAN probando distintas fuentes como condiciones de borde y modificando parámetros físicos para obtener un mejor ajuste.

Se concluye que el modelo implementado genera simulaciones aceptables para la predicción de marejadas. No obstante, presenta una tendencia a amplificar las alturas significativas máximas. En lo relativo a la agitación de la bahía, se concluye que la dirección entrante del oleaje es fundamental en el comportamiento de esta, debido a que se encuentra protegida por la isla Santa María. También se destaca la importancia de implementar herramientas en contextos locales para poder así tomar decisiones acordes a cada contexto.

ABSTRACT

A storm surge is a wave phenomenon characterized by an increase in significant wave heights, periods, and energy. These events affect normal coastal operations and can pose a risk to human life. With climate change, it is expected that this phenomenon will occur with greater frequency and intensity.

The bay of Coronel is a strategic point for both international and national trade due to its port. However, this area lacks a free wave forecasting model. In the event of storm surges, the port of Coronel could be negatively impacted, both structurally and operationally. This highlights the importance of implementing a storm surge alert system specifically designed for the area, which would complement the existing system, preventing operational interruptions and the associated economic losses.

This thesis aims to implement a high-resolution wave propagation model for the bay of Coronel to forecast and provide alerts for storm surges.

A model of the bay of Coronel is developed to understand its behavior in the face of storm surge events. For this purpose, a nested grid is created based on nautical charts provided by SHOA, and the SWAN model is implemented, testing various sources as boundary conditions and adjusting physical parameters to achieve better accuracy.

It is concluded that the implemented model produces acceptable simulations for storm surge prediction. However, it tends to overestimate the maximum significant wave heights. Regarding the bay's agitation, it is concluded that the incoming wave direction is crucial to its behavior, as it is protected by Santa María Island. Additionally, the importance of implementing tools tailored to local contexts is emphasized, enabling decisions that align with the specific characteristics of each area.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	i
ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivo General	2
1.3 Objetivos específicos	3
1.4 Alcances	3
1.5 Plan de trabajo	3
1.6 Principales resultados y conclusiones	4
1.7 Organización de la memoria	5
CAPÍTULO 2 MODELACIÓN Y PREDICCIÓN DEL OLEAJE	6
2.1 Introducción	6
2.2 Teoría Lineal del oleaje	6
2.3 Oleaje irregular	8
2.4 Propagación y deformación del oleaje	9
2.5 Modelación numérica del oleaje	11
2.6 Modelo SWAN: Simulating Waves Nearshore	12
2.7 Pronóstico de oleaje existente en Chile	14
2.8 Categorización de marejada	16
2.9 Conclusión	18
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA	19
3.1 Introducción	19

3.2 Área de estudio geográfica	19
3.3 Recursos disponibles	21
3.4 Modelación	23
3.5 Calibración y Validación	27
3.6 Estudio de agitación	31
3.7 Pronóstico	32
3.8 Conclusión	33
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	34
4.1 Introducción	34
4.2 Calibración y validación del modelo	34
4.3 Agitación de la bahía de Coronel	37
4.4 Pronóstico	44
4.5 Conclusión	45
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES	46
REFERENCIAS	47
ANEXOS	49
ANEXO 1 Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible	49
ANEXO 3.1	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tipos de modelos numéricos de modelación de oleaje.	12
Tabla 3.1 Límites de malla anidada y su resolución.	24
Tabla 3.2 Percentiles de H_{m0} por dirección.....	31
Tabla 4.1 Coeficiente de rompimiento y RMSE asociado.	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Elementos de una onda sinusoidal.	7
Figura 2.2 Espectro de oleaje.	9
Figura 2.3 Cambio en la dirección de la ola por refracción en Lebu, región del Biobio.	10
Figura 2.4 Nodos de aproximación costera.	14
Figura 2.5 Alerta de marejadas por Directemar.	15
Figura 2.6 Categorización de marejadas según Universidad de Valparaíso.....	17
Figura 3.1 Ubicación de la bahía de Coronel.	20
Figura 3.2 Ubicación de la bahía de Coronel en relación al golfo de Arauco.....	20
Figura 3.3 Registro batimétrico del golfo de Arauco y bahía de Coronel.....	22
Figura 3.4 Ubicación de boyas.	23
Figura 3.5 Malla del Golfo de Arauco creada para el modelo SWAN. En verde se muestra el dominio de la malla anidada para la Bahía de Coronel.	25
Figura 3.6 Batimetría malla anidada.....	26
Figura 3.7 Condición de borde escenario de validación 1.....	28
Figura 3.8 Condición de borde escenario de validación 2.....	30
Figura 4.1 Proceso de calibración del escenario 1. (a) escenario 1 original, (b) escenario 1 con parámetro de fricción modificado y (c) escenario 1 con parámetro de rompimiento modificado.....	35
Figura 4.2 Proceso de calibración del escenario 2. (a) escenario 2 original, (b) escenario 2 con parámetro de rompimiento modificado.....	36
Figura 4.3 Escenarios de agitación, dirección WNW: (a) y (b) $H_s=6.94$ m., (c) y (d) $H_s=6.20$ m.	38
Figura 4.4 Escenarios de agitación, dirección NW: (a) y (b) $H_s=7.67$ m., (c) y (d) $H_s=5.84$ m.	39
Figura 4.5 Escenarios de agitación, dirección SSW: (a) y (b) $H_s=4.48$ m., (c) y (d) $H_s=3.99$ m.	40
Figura 4.6 Escenarios de agitación, dirección SW: (a) y (b) $H_s=5.14$ m., (c) y (d) $H_s=4.39$ m.	41
Figura 4.7 Escenarios de agitación, dirección WSW: (a) y (b) $H_s=6.40$ m., (c) y (d) $H_s=4.97$ m.	42

Figura 4.8 Escenarios de set-up. (a) Dirección NW y $H_s=7.67$ m. (b) Dirección NW y $H_s=5.84$ m.	43
Figura 4.9 Comparación de alturas significativas, modo pronostico.	44

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Chile es un país con 6435 kilómetros de costa (Gobierno de Chile, s.f.) por lo que el mar está fuertemente ligado a sus habitantes y a la actividad económica, como son la pesca, transporte marítimo y construcción naval. El aumento en cantidad e intensidad de marejadas por el cambio climático (Ministerio del Medio Ambiente, 2019) es un fenómeno que alterará el normal funcionamiento de estas actividades por lo que toma relevancia una modelación predictiva que permita tomar las medidas pertinentes ante dichos eventos.

El concepto de marejada fue definido por ONEMI (2017) como: “Es un oleaje que se manifiesta en las zonas costeras, por efecto del viento local o generado en otro lugar del océano. Las olas pueden viajar cientos o miles de kilómetros, afectando durante varios días a las distintas actividades marítimas: transferencia de carga, navegación costera, pesca, buceo, deportes y recreación. Se califican como “anormales”, cuando el fenómeno tiene características diferentes a los valores promedio de oleaje (altura, dirección, período), por lo que pueden ingresar a las bahías y puertos, generando severos daños a la infraestructura costera, además de inundaciones por sobrepasos, reducción de playas, cortes de tránsito y suspensión de otras actividades.”

En los últimos años se ha observado una tendencia al alza en la ocurrencia de estos sucesos. En el siglo XX había una media de cinco marejadas al año, mientras que en el siglo XXI se tiene una media de 20 al año; también en las costas de Chile se ha registrado un giro de la dirección de oleaje en aguas profundas y un aumento de las alturas significativas máximas mensuales en el mismo período de análisis (Winckler, 2020). Los avisos de marejadas presentan una tendencia al alza, siendo alrededor de 20 avisos en 2008 y aumentando a 59 en 2018 (CAMPORT 2021). Este aumento en la cantidad e intensidad de eventos extremos debe venir acompañado de un avance en la predicción y el estudio de las marejadas y sus medidas mitigatorias.

Actualmente Chile cuenta con modelos predictivos de oleaje para 22 boyas virtuales proporcionado por el sistema de pronóstico de MarejadasUV de la universidad de Valparaíso. La única boya virtual de pronóstico gratuito en aguas profundas en la región del Biobío se encuentra cercano a la ciudad de Talcahuano. El sistema también entrega pronóstico para la Bahía de San Vicente y para la bahía de Concepción. Al presente no existe un modelo operacional de oleaje de alta resolución para la bahía de Coronel a pesar de su importancia comercial en la región del Biobio. En esta bahía existe infraestructura costera relevante como el Puerto de Coronel el que se puede ver afectado negativamente ante una marejada, tanto estructuralmente como en detenciones de su funcionamiento. Luego, es relevante implementar un sistema de alerta de marejadas específico a su zona complementando el sistema de alerta que utilizan actualmente, evitando así detenciones innecesarias en su funcionamiento. Como antecedente se tiene que 30 días de paralización significó para el puerto de Coronel una pérdida de 75 millones de dólares el año 2024, además de interrupción de importaciones y exportaciones con Argentina (Radio Biobío Chile, 2024), reflejando la importancia de que el puerto se mantenga en funcionamiento constante. También se tiene registro que el costo por cierre de puertos para todo el sistema portuario chileno, entre Agosto de 2020 y Agosto 2021, fue de 345.4 millones de dólares (CAMPORT, 2021).

Los sistemas de alerta generalmente utilizan modelos numéricos de predicción de oleaje basados en pronósticos globales de baja resolución espacial, por lo que es necesario generar un modelo de predicción de oleaje de mayor resolución que permita resolver la propagación de oleaje hacia el Puerto de Coronel.

1.2 Objetivo General

Implementar un modelo de propagación de oleaje de alta resolución de la bahía de Coronel para el pronóstico y alerta de marejadas.

1.3 Objetivos específicos

- Implementar modelo SWAN para el golfo de Arauco y la bahía de Coronel.
- Validar el modelo durante un periodo de marejadas con datos de terreno.
- Evaluar la agitación en la bahía de Coronel para diferentes condiciones de oleaje extremo.
- Pronosticar oleaje a 7 días en la bahía de Coronel.

1.4 Alcances

Se acota el análisis solo a la bahía de Coronel, sin embargo el dominio utilizado en la presente memoria incluye el golfo de Arauco, enfocando el estudio en condiciones de marejadas.

1.5 Plan de trabajo

En primera instancia se realizó una revisión bibliográfica de dos ejes principales, marejadas y modelación numérica de oleaje.

Luego, para implementar el modelo espectral de oleaje SWAN (SWAN Team, 2016) se trabajaron los datos de batimetría solicitados al SHOA, creando así la topo-batimetría de la zona de estudio y la malla computacional a utilizar en las simulaciones numérica. El modelo se forzó con datos de oleaje medidos por la boyas Watchkeeper operada por el SHOA ubicada frente a Caleta Tumbes en las coordenadas -36.56°S y -73.34°W a 125 m de profundidad.

Posteriormente, se simularon dos periodos de marejadas con el objetivo de calibrar y validar el modelo de oleaje para la Bahía de Coronel, comparando los resultados obtenidos con datos extraídos de una boyas de oleaje instalada en las cercanías del Puerto de Coronel (-37.05°S , -73.17°W) durante 2024.

Para evaluar la agitación de la bahía se realizaron simulaciones estacionarias utilizando distintos escenarios extremos de oleaje como condición de borde basados en información disponible en el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016).

Finalmente, para pronosticar el oleaje a siete días se corrió una simulación utilizando como condiciones de borde pronósticos de aguas profundas proporcionados por la Dirección de Obras Portuarias, el modelo regional de oleaje WAVEWATCH III implementado por Ferrer (2023) y se compararon los resultados obtenidos con datos extraídos de la boya de Coronel.

1.6 Principales resultados y conclusiones

Se implementó el modelo SWAN para simular marejadas en la bahía de Coronel, sin embargo, el modelo no es lo suficientemente preciso pues amplifica las alturas significativas máximas y presenta descensos abruptos en estas, esto se puede deber a deficiencias en las condiciones de borde.

Sobre la agitación en la bahía de Coronel se concluye que las mayores alturas significativas se producen cuando el oleaje entrante proviene del NW y WNW, no obstante, la probabilidad de que el oleaje venga de esa dirección es de alrededor del 3%.

Para realizar las simulaciones es recomendable emplear como condiciones de borde los datos de la boya Watchkeeper operada por el SHOA ubicada costa afuera de Caleta Tumbes, y utilizar el parámetro físico de rompimiento con una relación entre la altura de ola y su profundidad al momento de romper de 0.29.

Se consigue un pronóstico en la bahía de Coronel aceptable, pero que sobreestima las alturas significativas máximas.

1.7 Organización de la memoria

Esta memoria de título está compuesta por seis capítulos. El capítulo 2 presenta el marco teórico consistente en la revisión bibliográfica de oleaje y modelación numérica. El capítulo 3 explica más la metodología utilizada para cumplir con los objetivos de esta memoria de título y se enfoca en la implementación y validación del modelo numérico de oleaje utilizado. El capítulo 4 expone los resultados obtenidos incluyendo la validación del modelo bajo distintos escenarios y los resultados de la agitación dentro de la bahía de Coronel. El capítulo 5 presenta las conclusiones del trabajo, además de posibles mejoras del modelo realizado y recomendaciones de trabajo futuro.

CAPÍTULO 2 MODELACIÓN Y PREDICCIÓN DEL OLEAJE

2.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es presentar el marco teórico que permita entender el oleaje irregular con sus parámetros estadísticos, categorizaciones de marejadas, además de presentar el modelo de oleaje que se utilizará para simular la propagación del oleaje para la predicción de marejadas en la bahía de Coronel.

2.2 Teoría Lineal del oleaje

Una ola es una onda superficial que se propaga generando variaciones en el nivel del agua. El oleaje es producido por una fuerza externa por ejemplo el viento, un sismo, un derrumbe entre otros (Kamphuis, 2000).

En su forma más sencilla y según la teoría lineal del oleaje, desarrollada por Airy en 1845, a una ola se puede representar como una onda sinusoidal, donde su altura H es la diferencia vertical entre el punto más alto (cresta de la onda) y el punto más bajo (valle de la onda), la longitud de la onda L es la distancia horizontal por la cual se repite el patrón de la onda y, por último, la profundidad d es la distancia vertical entre el eje de la ola y el fondo marino. La ola se propaga a una velocidad $C = \frac{L}{T}$, el período T es el tiempo que requiere una ola en pasar por un punto específico, mientras que la frecuencia f es el inverso multiplicativo del periodo de la ola. Esta teoría aplica para olas de pendiente pequeña $\left(\frac{a}{L} \ll 1\right)$ y amplitud pequeña $\left(\frac{a}{d} \ll 1\right)$, siendo a la amplitud de la ola definida como: $a = \frac{H}{2}$. Se puede observar una onda sinusoidal según la teoría lineal del oleaje en la Figura 2.1.

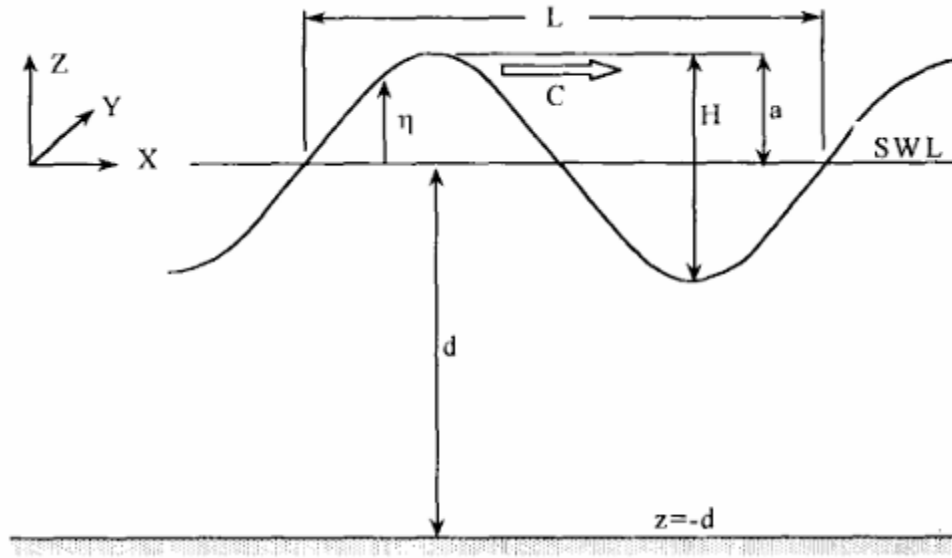


Figura 2.1 Elementos de una onda sinusoidal.

Fuente: Introduction to coastal engineering and management (p.22), J. William Kamphuis, 2000.

Otros parámetros importantes para esta teoría son la frecuencia angular ($\omega = \frac{2\pi}{T}$) y el número de onda ($k = \frac{2\pi}{L}$). Bajo la teoría lineal se define la elevación de la superficie libre como:

$$\eta(x, t) = a * \cos(k * x - \omega * t) \quad (2.1)$$

De la teoría lineal se desprende la relación de dispersión, que se puede expresar como:

$$\omega^2 = k * g * \tanh(k * d) \quad (2.2)$$

Donde se relaciona el periodo ($\omega = \frac{2\pi}{T}$), profundidad y longitud de la onda ($k = \frac{2\pi}{L}$),

El oleaje producido por viento es el más común y por ende el que representa una mayor cantidad de energía dentro del océano. Si el oleaje se origina por tormentas lejanas al área de estudio y las olas deben viajar largas distancias para romper finalmente en la costa se les denomina mar de fondo o *swell* y presenta periodos mayores a 10 segundos. Por otro lado, cuando el oleaje es producido por tormentas locales se le denomina *wind sea* y presenta periodos típicamente menores a 10 segundos.

2.3 Oleaje irregular

El oleaje que se observa típicamente en las costas corresponde un oleaje irregular. Este oleaje se describe como una sumatoria de ondas sinusoidales con distintas amplitudes, periodos, longitudes de onda y dirección de propagación. Para caracterizar el oleaje irregular típicamente observado en el océano se realiza un análisis estadístico de series de tiempo de variaciones de nivel del mar asociadas al oleaje. La distribución de energía disponible en un registro de oleaje según su periodo (o frecuencia) y dirección se representa mediante un espectro de oleaje. La Figura 2.2 muestra dos ejemplos de espectro de oleaje chileno. A partir de registros de oleaje y de los espectros de frecuencia y dirección del oleaje se definen los siguientes parámetros resumen del oleaje que describen un estado de mar:

- Altura media: altura promedio del registro de oleaje.
- Altura media cuadrática: se calcula como la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de las olas de un registro.
- Altura significativa: es la altura promedio del tercio superior de un registro de oleaje, se considera representativa de las olas percibidas por un observador.
- Periodo medio: periodo promedio de todas las olas de un registro de oleaje.
- Periodo *peak*: es el periodo donde se concentra la mayor energía del espectro de oleaje.
- Dirección media: dirección promedio de propagación de un registro de oleaje.
- Dirección *peak*: dirección predominante de las olas más energéticas. Es la dirección asociada al periodo *peak* del espectro.

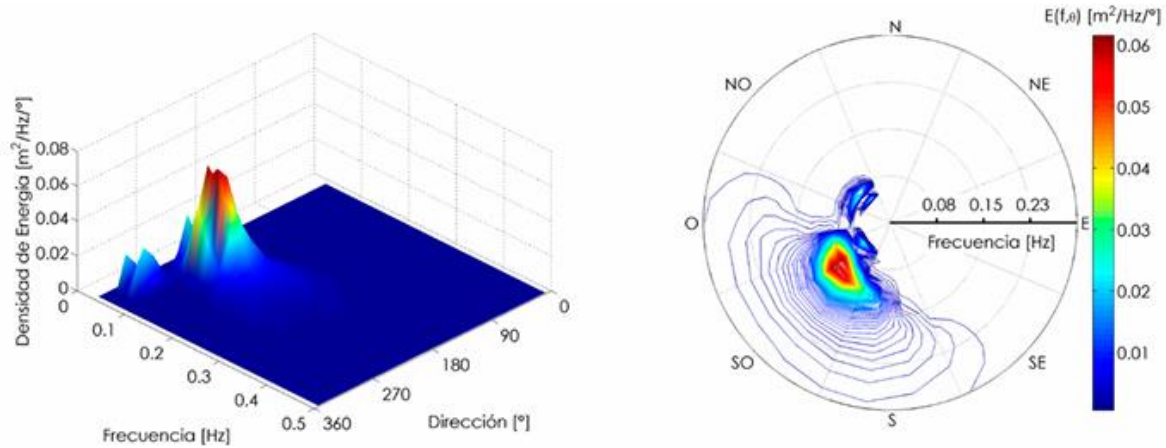


Figura 2.2 Espectro de oleaje.

Fuente: Beyá et al. (2016).

De estos espectros de oleaje chilenos se desprende que el oleaje predominante presenta una dirección *peak* de SW y una frecuencia *peak* de 0.1 aproximadamente, también en el espectro se muestra un pequeño cumulo de energía correspondiente a *swell* desde el NW por su frecuencia pequeña.

2.4 Propagación y deformación del oleaje

Al acercarse a la costa, el oleaje sufre cambios en su longitud y altura, mientras que se supone que el periodo se mantiene constante. Dentro de los principales procesos físicos que afectan al oleaje se encuentran: asomeramiento, refracción, difracción, rompimiento (Bosboom & Stive, 2023).

El proceso de asomeramiento ocurre a medida que las olas se propagan de aguas profundas a aguas más someras, asumiendo que el flujo de energía se mantiene constante, sin rompimiento. Las olas pierden velocidad pues la profundidad ya no es suficiente para permitir la propagación sin interferencia del fondo. La disminución en la velocidad de propagación provoca que la longitud de onda disminuya y la altura de la ola aumente.

El proceso de refracción ocurre cuando las olas se aproximan a la costa de forma oblicua o no perpendicular a la costa. La parte de la ola que se encuentra en agua más profunda viaja más rápido que la que se encuentra en agua más somera, provocando que la cresta de la ola gire hacia la costa, como se puede observar en la punta ubicada en el sur de la imagen satelital mostrada en la Figura 2.3. En esta figura se observa como el oleaje proviene desde el SW y se refracta para llegar perpendicular a la playa de Lebu.

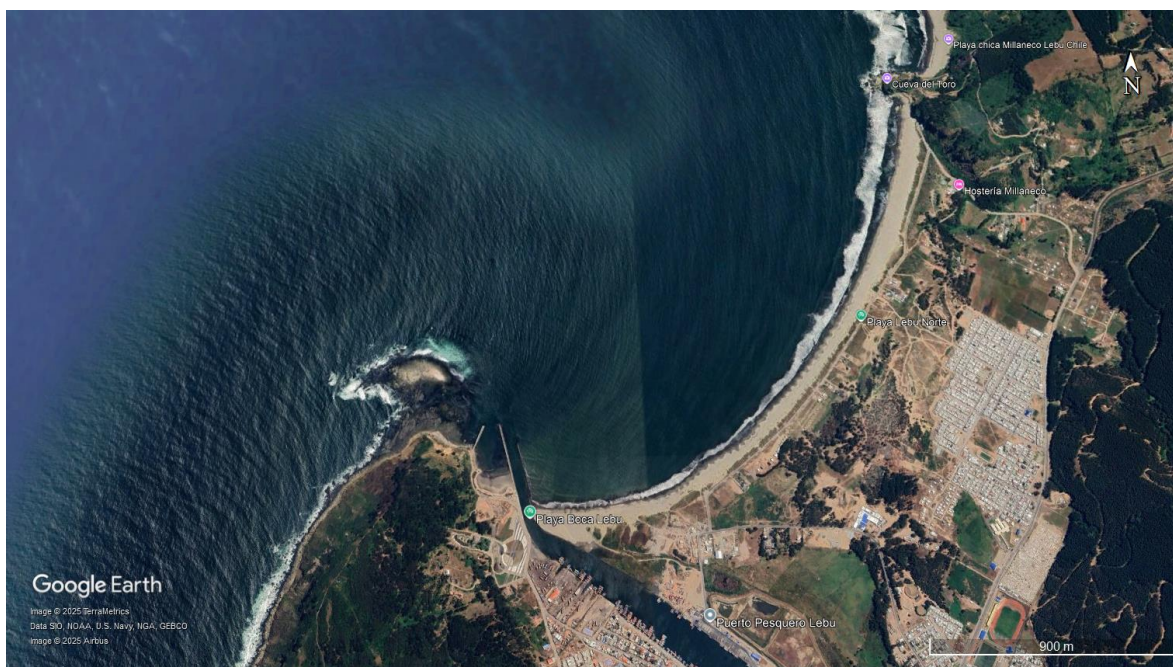


Figura 2.3 Cambio en la dirección de la ola por refracción en Lebu, región del Biobío.

Fuente: Google Earth.

El proceso de difracción ocurre cuando la ola encuentra un obstáculo o pasa por una abertura, provocando que la energía se distribuya lateralmente, perpendicular a la dirección del oleaje. La difracción no cambia la longitud ni la frecuencia de la ola, el traspaso de energía ocurre desde zonas más energéticas de la ola a zonas menos energéticas, como cambios en la altura de ola.

Por último, el proceso de rompimiento ocurre cuando la altura de la ola supera un límite en relación con la profundidad, al momento de pasar esto, la velocidad de la cresta de la ola supera la velocidad de propagación de esta. El rompimiento conlleva una disipación de

energía. Cuando las olas rompen provocan un cambio en el estrés de radiación, el estrés de radiación es la componente del tensor de momento de las olas que representa las fuerzas horizontales ejercidas por las olas sobre el agua a medida que se propaga. Este cambio genera una variación en la elevación media del mar. Entre el punto de rompimiento y la playa el estrés de radiación disminuye y se produce un aumento en el nivel medio del mar, a este aumento se le llama *set-up*. (Longuet-Higgins y Stewart, 1964)

2.5 Modelación numérica del oleaje

Los modelos numéricos de generación de oleaje se utilizan para simular y predecir el comportamiento de las olas, incluyendo la generación, propagación y evolución de estas, considerando factores como el viento, corrientes y características del fondo marino.

Según las ecuaciones que resuelve se diferencian tres tipos de modelos: los que promedian la fase, los que resuelven la fase y dinámica de fluidos computacional (CFD).

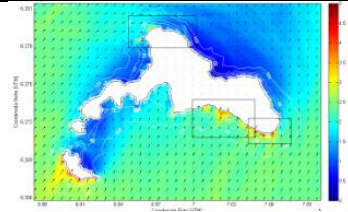
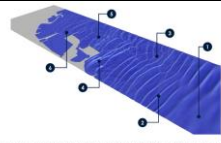
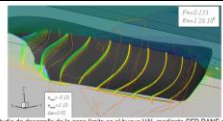
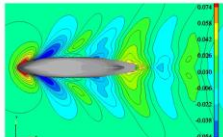
Los modelos que promedian la fase resuelven la ecuación de balance de energía espectral. Si bien estos modelos no permiten calcular las variaciones de la superficie libre asociadas al oleaje, si se puede obtener de ellos parámetros descriptivos del oleaje, como son la altura significativa, periodo *peak* y dirección media. Es posible aplicar estos modelos a dominios grandes ya que no representan un alto costo computacional.

Los modelos que resuelven la fase de la ola son capaces de simular las variaciones de la superficie libre producidas por las olas individuales. Estos modelos resuelven la ecuación de conservación de la masa y momentum, lo que permite analizar olas individualmente a diferencia del modelo anterior que permite obtener parámetros resumen o estadísticos del oleaje. Este tipo de modelo se aplica a dominios más pequeños ya que representa un mayor costo computacional que los modelos que promedian la fase.

Por último, los modelos CFD resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes en tres dimensiones, lo que permite conocer la presión y la velocidad del fluido en cada punto, pero tiene asociado un mayor costo computacional que los modelos anteriores

En la Tabla 2.1 se puede ver los aspectos más relevantes de cada tipo de modelo. (Winckler, P., 2020)

Tabla 2.1 Tipos de modelos numéricos de modelación de oleaje.

	Modelos que promedian la fase	Modelos que resuelven la fase	Dinámica de fluidos computacional
Dimensiones	2D	2D	3D
Incógnitas	Espectro energético.	Superficie libre y velocidad media.	Presión y velocidad puntual.
Ilustración		 Figura 9.4. Ejemplo de un modelo que resuelve la fase donde se ilustran procesos coherentes desde la condición de aguas profundas a la costa. Fuente: Adaptado del Danish Hydraulic Institute, desarrollado de Høbe 20...	 Fig. 10 Estudio de desarrollo de la capa límite en el buque VAI, mediante CFD RANS por INSEAN.  Fig. 11 Estudio de generación de vórtices en el buque LA mediante CFD RANS por VTT.
Aplicaciones	Estudios de oleaje donde los efectos de refracción y asomaramiento dominan.	Estudios de agitación de puertos. Dominios pequeños.	Estudio de interacción fluido estructura o fluido sedimento.

2.6 Modelo SWAN: Simulating Waves Nearshore

SWAN es un modelo numérico de simulación de oleaje que promedia la fase, por lo que resuelve la ecuación de balance de energía espectral. En su forma más sencilla la ecuación se expresa como:

$$\frac{dE}{dt} = S \quad (2.3)$$

Donde $E(x, t, \sigma, \theta)$ es el espectro de energía de un estado de mar, en cada punto del espacio x , del tiempo t , distribuida en un rango de frecuencias σ y direcciones θ , además S representa los distintos mecanismos de ganancia y pérdida de energía.

Frente a una corriente U (uniforme en relación con la profundidad) la densidad de acción del oleaje $N(x, t, \sigma, \theta)$ se mantiene constante a diferencia del espectro de energía (Whitman, 1974), es por esto que usualmente los modelos numéricos de simulación de oleaje determinan el balance de acción. En coordenadas cartesianas el balance de acción se describe según la ecuación de Holthuijsen (2007):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (2.4)$$

Donde c_x y c_y son las velocidades de propagación del oleaje en el espacio geográfico bidireccional y c_σ y c_θ son las velocidades de propagación en el espacio espectral de frecuencia y dirección.

SWAN permite incorporar distintos procesos físicos al modelo, de tal forma que la propagación del oleaje se asemeje de mejor forma a la realidad. Dentro de estos procesos físicos destacamos el de fricción, que se utiliza para simular la disipación de energía producto del roce con el fondo, el de rompimiento, que se utiliza para simular la disipación de energía induciendo ruptura de olas producto de la profundidad y el de set-up, que activa el cálculo del aumento (o disminución) del nivel medio del mar producido por la ruptura de olas.

El modelo SWAN resuelve las ecuaciones gobernantes utilizando una discretización del dominio que puede ser estructuradas o no estructurada. En el caso de mallas estructuradas, el modelo permite realizar anidamiento, para así poder representar con mayor resolución las zonas que requieran mayor detalle o que sean más complejas.

El uso del modelo SWAN se recomienda para ser utilizado en zonas costeras y en zonas de transición de escala oceánica a escala costera. SWAN no se recomienda para simular oleaje a escala oceánica, ya que hay programas más eficientes en este ámbito como son el modelo WAM y WAVEWATCH III.

2.7 Pronóstico de oleaje existente en Chile

La Universidad de Valparaíso posee un modelo de predicción con 61 nodos de aguas profundas distribuidos a lo largo de la costa chilena, más 22 nodos de aproximación costera cuyas ubicaciones se pueden observar en la Figura 2.4.

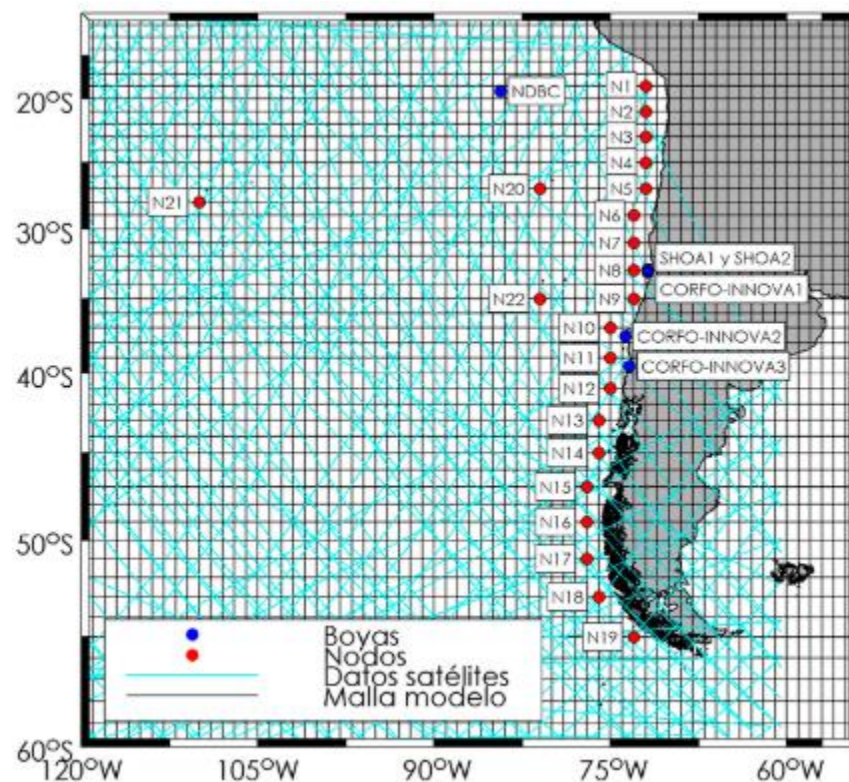


Figura 2.4 Nodos de aproximación costera.

Fuente: Escuela de Ingeniería Civil Oceánica. (s.f.)

La página web www.marejadasUV.cl entrega de manera gratuita un pronóstico según la orientación en la que se encuentra la costa. Este pronóstico contempla un pronóstico a 7 días de la altura significativa espectral, periodos y direcciones *peak* y medias, marea y categorización de acuerdo con lo mostrado en la Figura 2.6. También en la página web de marejadas.uv.cl se puede encontrar el pronóstico para nueve puertos estatales. (Parra y Beyá, 2017)

Por otro lado, Directemar divide a Chile en tres grandes zonas a las cuales le realiza alertas de marejadas, en caso de detectarse una se informa: el área costera afectada, la dirección del oleaje, el inicio y termino de marejadas, el horario de mayor intensidad y recomendaciones. En la Figura 2.5 se puede observar una alerta de marejada dada por Directemar el mes de septiembre del año 2024.

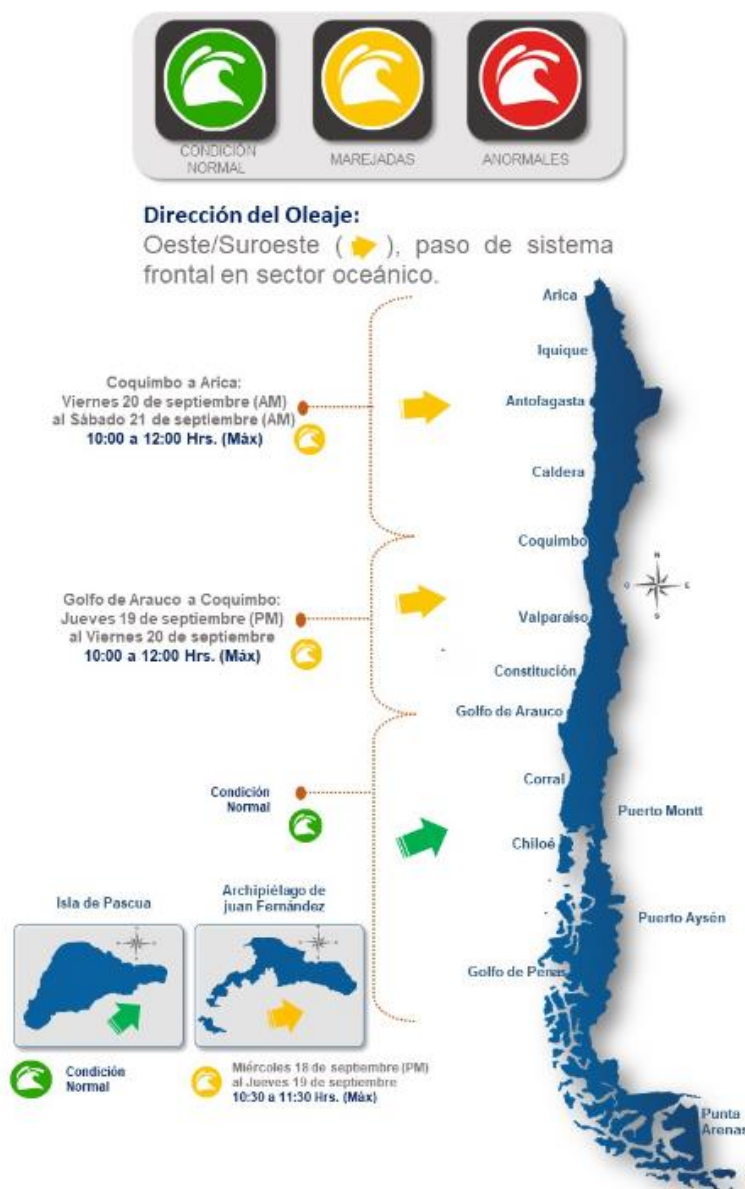


Figura 2.5 Alerta de marejadas por Directemar.

Fuente: Directemar, 2024.

2.8 Categorización de marejada

Hay distintas formas de categorizar un oleaje como marejada, una de estas es fijar el valor umbral de altura significativa como dos desviaciones estándar por sobre la media (Martinez et al. 2018). Por otro lado, la Universidad de Valparaíso hace su clasificación de marejada basada en los impactos del oleaje, es decir, daño a infraestructura costera, reducción de playas, inundaciones por sobrepaso, cortes de tránsito, entre otros. Esta categorización de marejadas se puede observar en la Figura 2.6.



Figura 2.6 Categorización de marejadas según Universidad de Valparaíso.

Fuente: Escuela de Ingeniería Civil Oceánica. (s.f.)

2.9 Conclusión

En este capítulo se expusieron conceptos relevantes para comprender lo realizado en la memoria, tales como oleaje irregular y los parámetros que se utilizan para describirlo. También se mencionan los distintos tipos de modelos numéricos para simular oleaje y sus principales características, de aquí se concluye que un modelo que promedia la fase satisface lo que se busca en esta memoria, que es predecir como se comportará el oleaje en la bahía de Coronel ante distintos forzantes. También se concluye que el modelo SWAN es eficiente para esta tarea. Finalmente se concluye que es necesario un modelo que prediga oleaje de mayor resolución en la bahía de Coronel ya que no hay un modelo que sea específico para esta zona.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Introducción

En este capítulo se explica el procedimiento seguido para implementar el modelo SWAN y posteriormente cumplir con los siguientes objetivos específicos de esta memoria: validar el modelo, evaluar la agitación de la bahía de Coronel y pronosticar oleaje.

3.2 Área de estudio geográfica

El estudio se realiza en la bahía de Coronel, ubicada en la comuna de Coronel, provincia de Concepción, región del Biobío ($37^{\circ}02'54''$ S, $73^{\circ}09'25''$ W), como se puede observar en la Figura 3.1. Sin embargo, para entender el comportamiento en la bahía de Coronel fue necesario considerar dentro del dominio de estudio el golfo de Arauco, cuya ubicación se puede observar en la Figura 3.2. Esto debido a que el mar de fondo primero se ve afectado por la configuración del Golfo de Arauco antes de propagarse a la bahía de Coronel.



Figura 3.1 Ubicación de la bahía de Coronel.

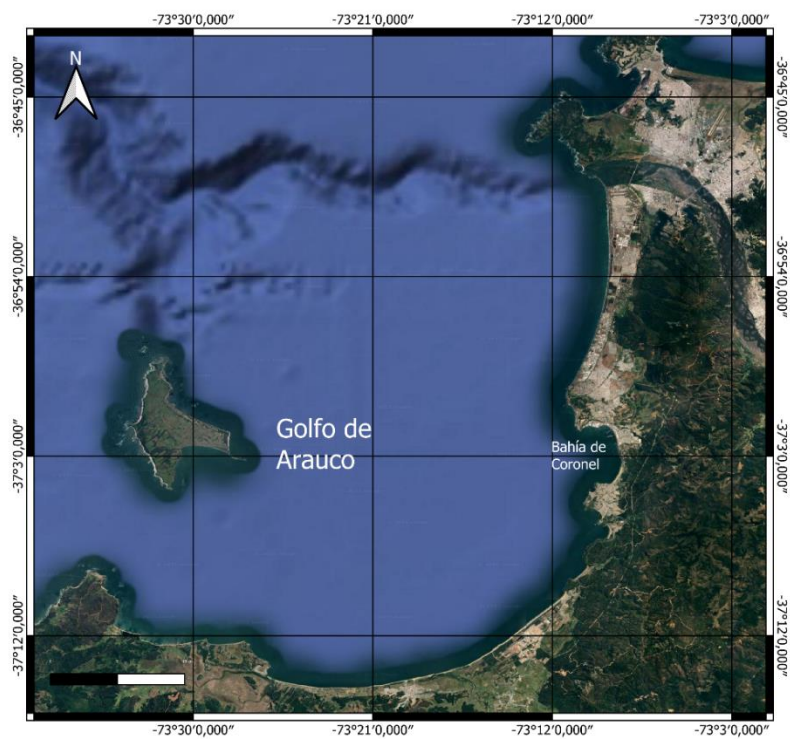


Figura 3.2 Ubicación de la bahía de Coronel en relación al golfo de Arauco.

3.3 Recursos disponibles

Para modelar oleaje utilizando SWAN se requiere contar con una topo-batimetría de la zona de estudio y con condiciones de borde de oleaje proveniente de aguas profundas. Es posible también incorporar viento local que generará oleaje tipo wind-sea en la bahía, pero ese proceso no es considerado en este trabajo.

Se utilizan datos batimétricos facilitados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), específicamente la carta náutica 6120, correspondiente al golfo de Arauco, y la carta náutica 6121, correspondiente a la bahía de Coronel, ambas entregadas en formato digital.

Para definir la malla computacional se utilizó la información disponible en las cartas náuticas solicitadas. Se recibió un archivo en formato Excel que contenía las coordenadas con el siguiente datum: SIRGAS (WGS84). Se convirtió este archivo en un archivo “.csv” para crear una capa de puntos en el sistema de información geográfica Q-GIS. Luego se proyectó la capa de puntos a un sistema de referencia de coordenadas WGS 84/UTM 18S, obteniendo así la batimetría a utilizar, se rellenó con puntos de una altura uniforme de 10 m para representar la línea de costa. La nube de puntos creada se puede observar en la Figura 3.3.

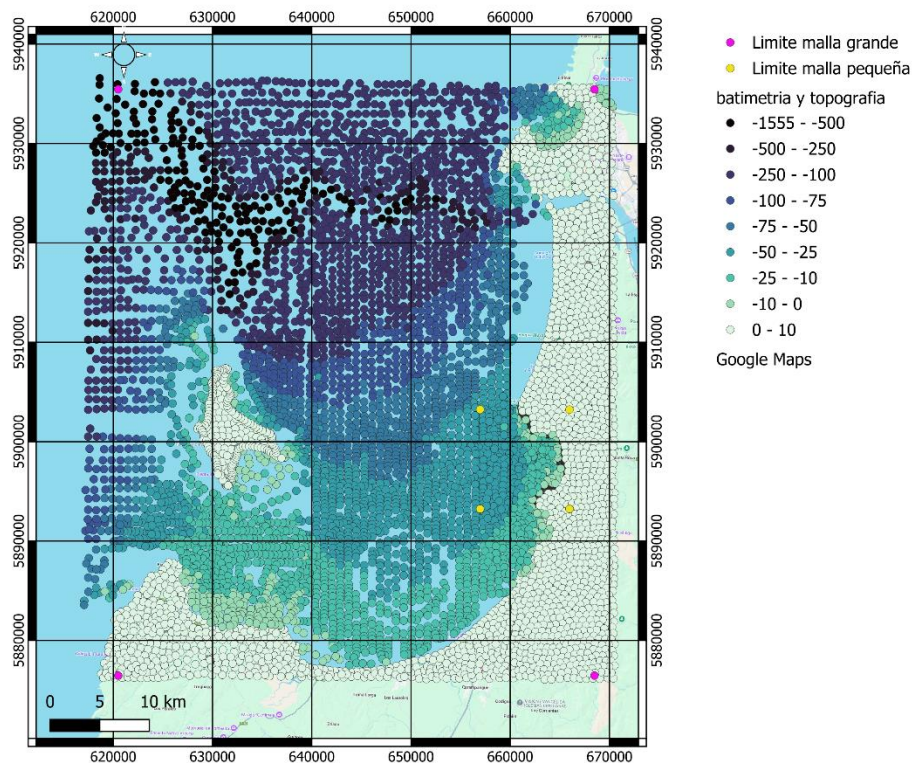


Figura 3.3 Registro batimétrico del golfo de Arauco y bahía de Coronel.

También se obtuvieron parámetros resumen de oleaje de la boya Watchkeeper del SHOA, ubicada en costa afuera de Caleta Tumbes en las coordenadas -36.56°S y -73.34°W a 125 metros de profundidad. Se cuenta con parámetros estadísticos de oleaje como altura significativa del oleaje, periodo *peak* y dirección media cada 3 horas, entre el 01-01-2020 y 08-11-2024.

Finalmente, se cuenta con mediciones de oleaje dentro de la Bahía de Coronel desde enero de 2024 a septiembre de 2024, Las mediciones se obtuvieron de una boya SOFAR modelo Spotter ubicada en las coordenadas -37.05°S , -73.17°W a 20 m de profundidad. Los datos incluyen series de tiempo de altura significativa, periodo *peak*, dirección media y *peak* y

dispersión de dirección cada 1 hora. La ubicación de ambas boyas de muestra en la Figura 3.4

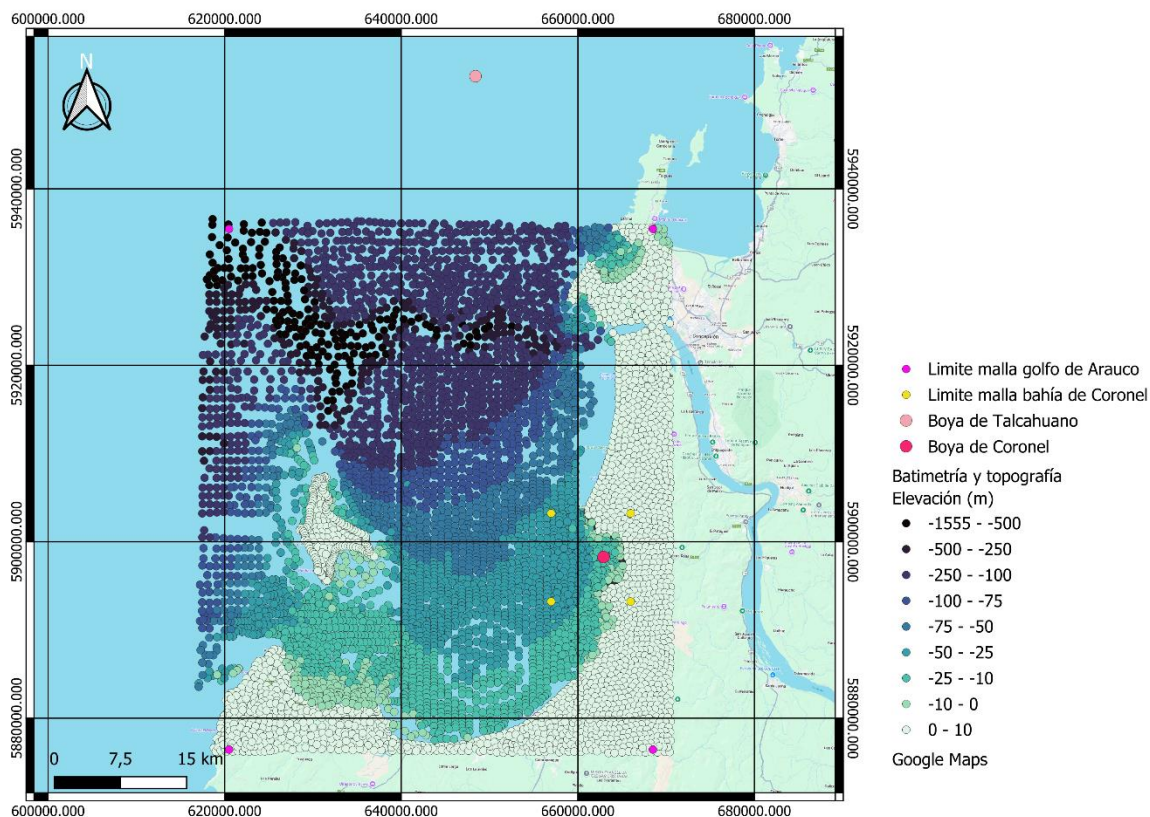


Figura 3.4 Ubicación de boyas.

3.4 Modelación

Para realizar esta memoria se escogió utilizar el modelo SWAN, debido a su facilidad de uso y bajos requerimientos computacionales. El modelo se configuró para resolver las ecuaciones de propagación de la energía del oleaje sobre dos mallas estructuradas. Se definió un dominio de mayor tamaño que cubre el Golfo de Arauco, incluyendo la Isla Santa María y el cañón del río Biobio. Luego se definió una malla de mayor resolución que cubre la bahía de Coronel.

Los datos de batimetría se procesaron en QGIS y luego en Matlab para crear una malla anidada regular, cuyas coordenadas límites y resolución se observan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Límites de malla anidada y su resolución.

	Malla Golfo de Arauco	Malla Bahía Coronel
Coordenada límite 1	(73°39'03", 36°43'20")	(73°14'09", 37°00'15")
Coordenada límite 2	(73°06'01", 36°43'20")	(73°07'57", 37°00'15")
Coordenada límite 3	(73°06'01", 37°14'36")	(73°07'57", 37°05'33")
Coordenada límite 4	(73°39'03", 37°14'36")	(73°14'09", 37°05'33")
Resolución	1000 m	200 m

Para crear la malla primero se utilizó la función *meshgrid* que definió un espacio de coordenadas regular donde se interpolará la información batimétrica, los límites de este espacio están dados por las coordenadas límite mostradas en la Tabla 3.1 y se utilizó un espaciamiento del tamaño de la resolución. Luego se utilizó la función *scatteredInterpolant* que realiza una interpolación a datos dispersos, en este caso las coordenadas batimétricas, finalmente se extraen los valores batimétricos interpolados a los puntos de la malla creada.

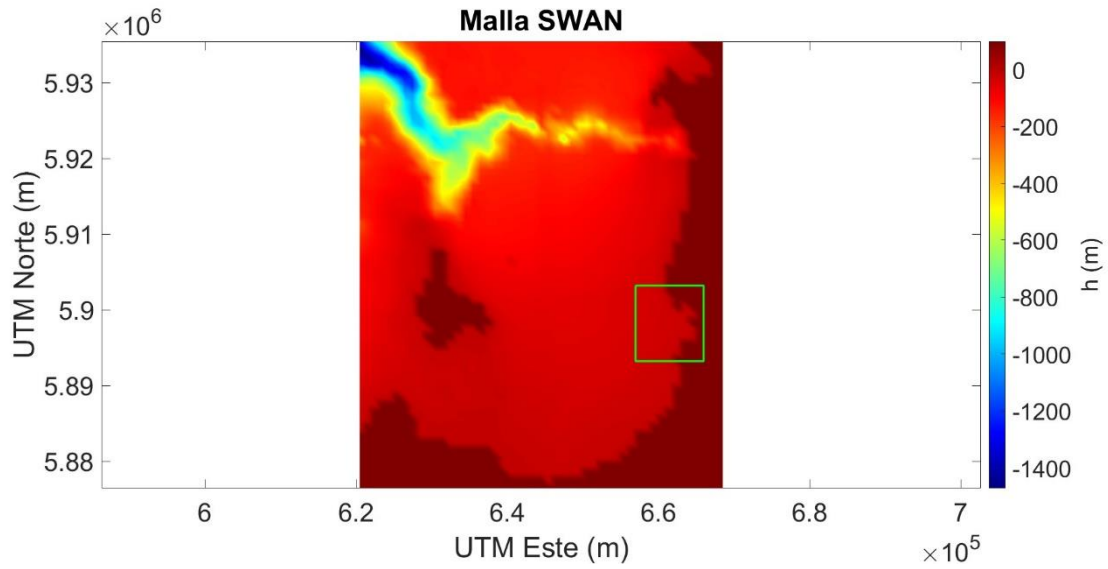


Figura 3.5 Malla del Golfo de Arauco creada para el modelo SWAN. En verde se muestra el dominio de la malla anidada para la Bahía de Coronel.

En la Figura 3.5 se puede observar la malla creada y los límites de la malla anidada delimitada por un rectángulo verde. La batimetría de la malla anidada se puede observar en la Figura 3.6.

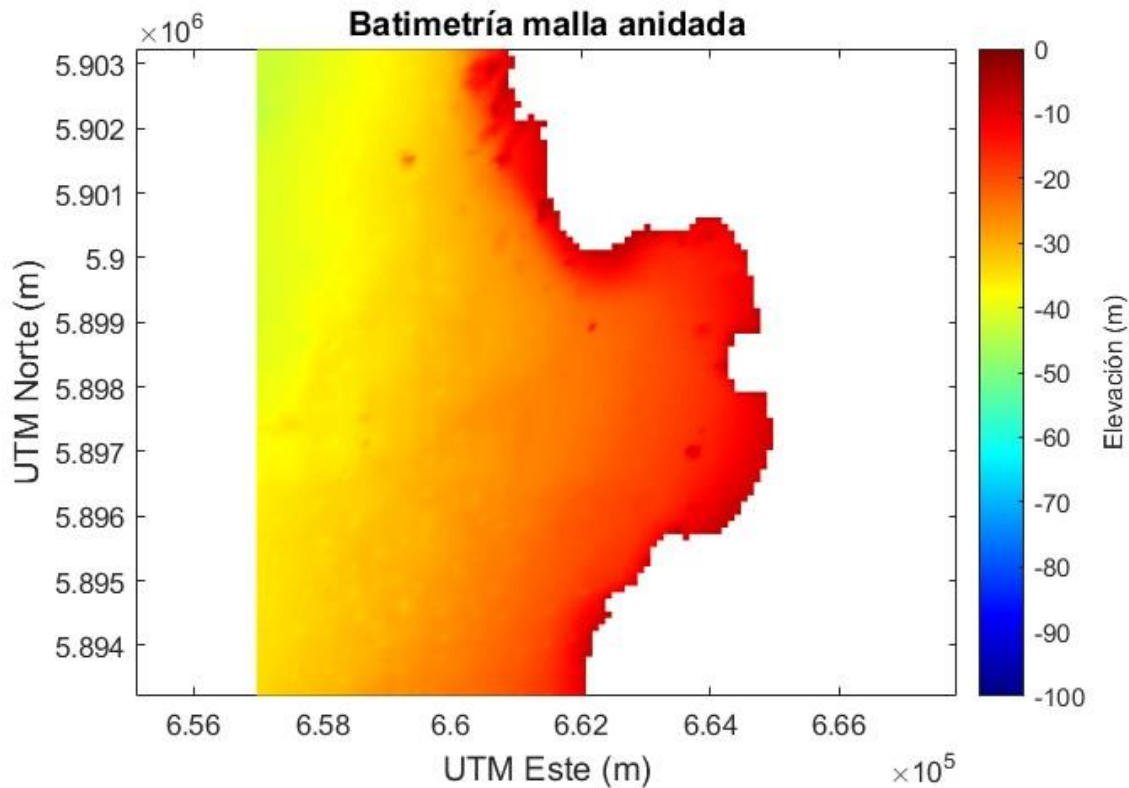


Figura 3.6 Batimetría malla anidada.

Para un mejor manejo en SWAN se llevó la malla de datos al origen, esto se consiguió restando a las coordenadas x e y el mínimo valor utilizado de dicho eje.

Una vez listo el archivo de batimetría de la malla grande, se crea el archivo .swn, pudiéndose observar en el Anexo 3.1 y explicándose las partes más relevantes de este a continuación.

En las entradas (Inputs del Modelo) CGRID define la malla computacional donde [xlenc] [ylenc] son el tamaño de la malla en metros del eje x e y respectivamente y [mx] [my] son el número de celdas en el eje x e y, definiendo así la resolución de la malla. INPGRID BOTTOM define la malla para la batimetría donde [dxinp] [dyinp] son la resolución de la malla en el eje x e y. READINP BOTTOM lee el archivo de batimetría.

En las condiciones de borde BOU SHAPE especifica el espectro de oleaje en las fronteras, en el caso de esta memoria se escogió el espectro del tipo JONSWAP. Luego con BOUN

SIDE se indica la condición de borde con [k] indicador cardinal del borde fronterizo, [FILE] en esta memoria se utilizó archivos TPAR que contienen los parámetros del oleaje como altura significativa, dirección, periodo, dispersión direccional y hora de ocurrencia y [fname] nombre del archivo.

En relación con los procesos físicos utilizados y desactivados se tiene: OFF WINDGROWTH desactiva el crecimiento de las olas por influencia del viento, OFF QUAD desactiva la interacción cuádruple entre olas, BREAKING activa la disipación por rompimiento de las olas inducida por el fondo, FRICTION activa la disipación de energía por fricción del fondo y SETUP activa el cálculo de set up inducido por el oleaje.

En las salidas del modelo o outputs del modelo tenemos dos tipos, el primero crea una submalla con el comando NGRID y extrae una condición de borde para dicha malla anidada con el comando NESTOUT, mientras que el segundo tipo extrae parámetros como son la altura significativa, periodo *peak* y dirección para todo el dominio con el comando BLOCK.

La condición de borde se creó a partir de datos de la boya del SHOA de Talcahuano para crear los archivos TPAR, que luego se corrieron en los escenarios de validación.

3.5 Calibración y Validación

En el primer escenario de validación se realiza una simulación no estacionaria de 8 días de duración, entre el 31/03/2024 y el 07/04/2024, ingresando los datos extraídos de la boya del SHOA ubicada frente a caleta Tumbes, cuya serie de tiempo de alturas significativas se puede observar en la Figura 3.7.

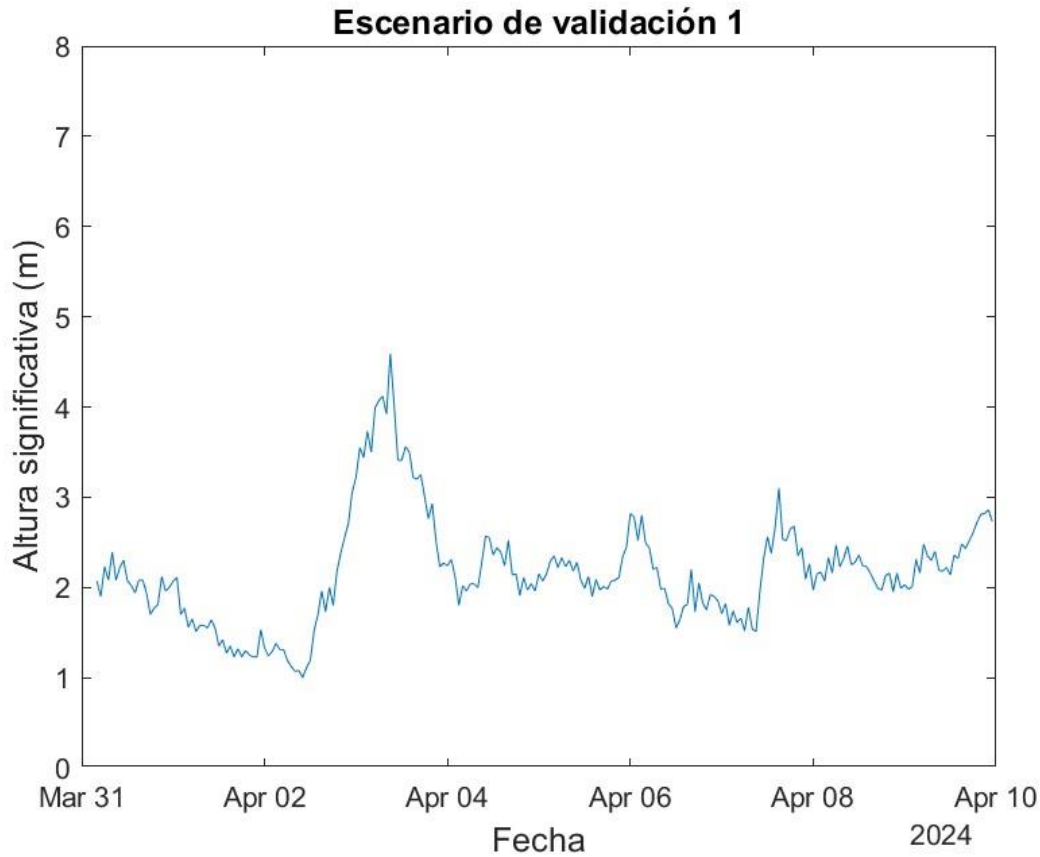


Figura 3.7 Condición de borde escenario de validación 1.

Luego se comparan las alturas significativas obtenidas en el punto donde se ubica la boya en Coronel con la información entregada por dicha boya. Se grafican los datos observados con los modelados utilizando el programa Matlab y se calculan parámetros de bondad de ajuste como son el R^2 y la raíz del error cuadrático medio. Para calcular el R^2 primero fue necesario interpolar los resultados de la simulación obteniendo así pares de datos coincidentes en fecha y hora con los extraídos de la boya, luego se calculó la suma de los residuos al cuadrado de las alturas significativas (SS_{res}), posteriormente la suma total de cuadrados de las alturas significativas (SS_{tot}), para finalmente calcular el parámetro R^2 . Las ecuaciones utilizadas se pueden observar a continuación, donde $y_{real,i}$ corresponde a la altura significativa i extraída de la boya de Coronel, $y_{predicho,i}$ corresponde a la altura significativa i modelada y por ultimo $\bar{y}_{real}$ es el promedio de las alturas significativas extraídas de la boya de Coronel.

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (y_{real,i} - y_{predicho,i})^2 \quad (3.1)$$

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_{real,i} - \bar{y}_{real})^2 \quad (3.2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (3.3)$$

Por otro lado, la raíz del error cuadrático medio se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{real,i} - y_{predicho,i})^2} \quad (3.4)$$

Se realiza un segundo escenario de validación que consiste en una simulación no estacionaria de 7 días de duración, entre el 28/07/2024 y el 04/08/2024, ingresando los datos extraídos de la boya del SHOA ubicada frente a caleta Tumbes, cuya serie de tiempo de alturas significativas se puede observar en la Figura 3.8.

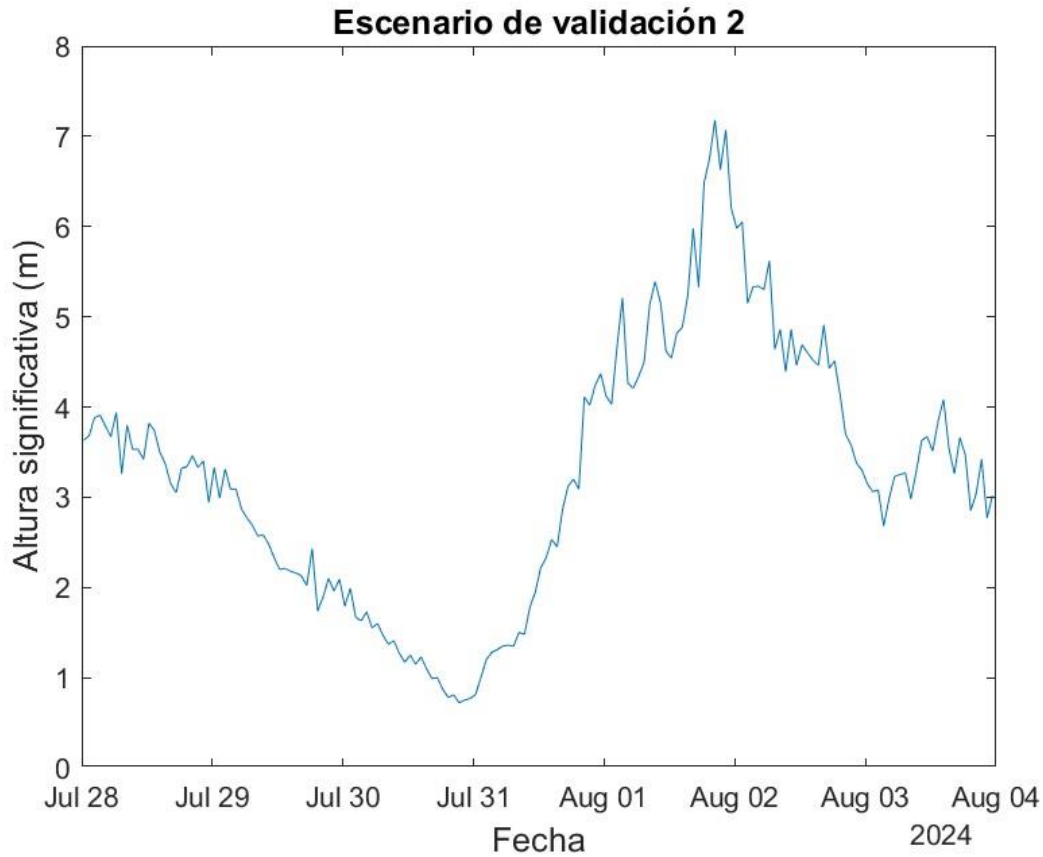


Figura 3.8 Condición de borde escenario de validación 2.

Luego de repetir el proceso de comparación de resultados se decide cambiar parámetros del proceso físico de fricción y de rompimiento, con el objetivo de buscar un mejor comportamiento de las simulaciones. Estos cambios se realizan en la sección de procesos físicos al lado del nombre de cada proceso. En el caso de la fricción su estructura es la siguiente:

FRICTION [JON] [CON] [cf jon]

JON indica el comportamiento del tipo JONSWAP, CON señala que las características de la fricción se mantienen constantes a lo largo del dominio y por último cf jon es el coeficiente de fricción cuyo valor por defecto es $0.038 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$, este coeficiente se modificó en múltiples ocasiones para observar el comportamiento de la simulación.

El rompimiento, por otro lado, tiene la siguiente estructuración:

BREAKING [CON] [alpha] [gamma]

CON señala que las características del rompimiento se mantienen constantes a lo largo del dominio, alpha es el coeficiente de proporcionalidad de la tasa de disipación cuyo valor por defecto es 1 y por último gamma es el índice de rompiente, es decir la relación entre la altura de cada ola individual y la profundidad, el valor por default de gamma es de 0.73, este coeficiente se modificó en múltiples ocasiones para observar el comportamiento de la simulación.

3.6 Estudio de agitación

Para analizar la agitación en la bahía de Coronel se realizan simulaciones estacionarias bajo condiciones extremas de oleaje costa afuera. Se obtuvo información estadística del oleaje del Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016), específicamente del nodo de aguas profundas ubicado costa afuera de Talcahuano (37°S, 75°W), el nodo de aguas profundas más cercano al área de estudio. Desde el Atlas se extrajo la Tabla 3.2 que relaciona percentiles de altura significativa del oleaje con la dirección desde la cual proviene el oleaje.

Tabla 3.2 Percentiles de Hm0 por dirección.

	Prob. Dir.	H _{m0} 50% [m]	H _{m0} 90% [m]	H _{m0} 99% [m]	H _{m0} 12 [m]
E					
ESE					
SE					
SSE	<0.1%	2.74	3.10	3.10	3.10
S	0.3%	2.73	3.46	4.12	4.19
SSW	19.7%	2.51	3.31	3.99	4.48
SW	45.9%	2.3	3.35	4.39	5.14
WSW	23.7%	2.23	3.55	4.97	6.40
W	7.0%	2.42	3.79	5.44	6.66
WNW	2.3%	2.72	4.09	6.20	6.94
NW	0.8%	2.88	4.21	5.84	7.67

NNW	0.2%	2.87	3.88	5.23	6.50
N	<0.1%	2.63	4.30	5.36	5.36
NNE	<0.1%	3.26	3.50	3.50	3.50
NE					
ENE					

Fuente: Beyá et al. (2016).

Este cuadro muestra las alturas significativas para los percentiles 50%, 90% y 99%, además de la altura significativa espectral que se excede por más de 12 horas al año, asociado a las distintas direcciones y la probabilidad de ocurrencia de dirección.

Las direcciones con una mayor altura significativa asociada son WNW y NW, sin embargo, estas direcciones tienen una menor probabilidad de ocurrencia que SSW, SW y WSW que tienen una probabilidad asociada de 19.7%, 45.9% y 23.7% respectivamente. Por esta razón se decide estimar la agitación para la bahía de Coronel considerando oleaje proveniente desde el WNW, NW, SSW, SW y WSW, con unas alturas significativas correspondientes al percentil 99% y a la altura que se excede 12 horas al año.

De acuerdo con la información disponible en el Atlas de Oleaje de Chile, se consideró para todos los casos un periodo *peak* de 13 s y un parámetro de dispersión direccional del oleaje de 17.7°.

3.7 Pronóstico

Para realizar la simulación en modo pronóstico se utilizó como condición de borde datos generados por el programa WAVEWATCH III, el cual, a partir de un modelo de predicción creado por Ferrer (2023), entrega parámetros de oleaje en distintos puntos ubicados al límite de la zona de estudio, específicamente del borde norte y oeste (Ferrer, 2023). Luego esta información se propaga con el modelo de malla anidada creada anteriormente para el programa SWAN.

3.8 Conclusión

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para cumplir con los objetivos planteados en esta memoria de título. Se presentaron los detalles del modelo de oleaje a implementar para el Golfo de Arauco, la zona de estudio, los datos de entrada como batimetría y las condiciones de borde, las observaciones que se utilizarán para validar el modelo y los parámetros de simulación para el estudio de agitación de la Bahía de Coronel. Se incluyeron también los indicadores de calidad utilizados para evaluar el desempeño del modelo.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos, dentro de los cuales destacan gráficos comparativos utilizados para validar el modelo, mapas de altura significativa y dirección media, mapas de periodo *peak* y mapas de set-up para los diferentes escenarios modelados.

4.2 Calibración y validación del modelo

Para validar el modelo se realiza una simulación de estos 7 días, pero utilizando como condición de borde los datos extraídos de la boya del SHOA de Talcahuano, obteniéndose la gráfica comparativa (a) de la Figura 4.1.

Se puede observar que se sigue sobreestimando el máximo de altura. Se calcula los parámetros de bondad de ajuste R^2 y raíz del error cuadrático medio obteniéndose un valor de -0.17 y 0.26 m respectivamente. Tener un R^2 negativo significa que sería una mejor predicción utilizar la altura media de forma constante. Se busca mejorar el modelo, modificándose en primer lugar el proceso físico de la fricción, aumentando el coeficiente relacionado, como se puede ver en la gráfica comparativa (b) de la Figura 4.1. Se puede observar que el comportamiento de lo modelado se mantiene en forma, pero se mueve en su conjunto por el eje vertical, esto no es lo óptimo dado que, si bien se mejoran las alturas máximas, se empeora en el resto del escenario modelado. Por esto, se decide mantener el coeficiente de fricción que venía por defecto y probar con otro proceso físico.

Se modifica el proceso de rompimiento de las olas, disminuyendo el coeficiente que hace referencia a la relación entre la altura de ola y su profundidad al momento de romper, siendo su valor por defecto de 0.73. En el proceso de identificar que coeficiente es el óptimo se

calculó la raíz del error cuadrático medio (RMSE) asociado a cada coeficiente, estos valores se pueden ver reflejados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Coeficiente de rompimiento y RMSE asociado.

Coeficiente	RMSE (m)
0.73	0.2562
0.40	0.2408
0.35	0.2377
0.30	0.2357
0.29	0.2356
0.25	0.2373
0.20	0.2485

De aquí se decidió utilizar como coeficiente 0.29 y se puede observar su aplicación en la gráfica comparativa (c) de la Figura 4.1.

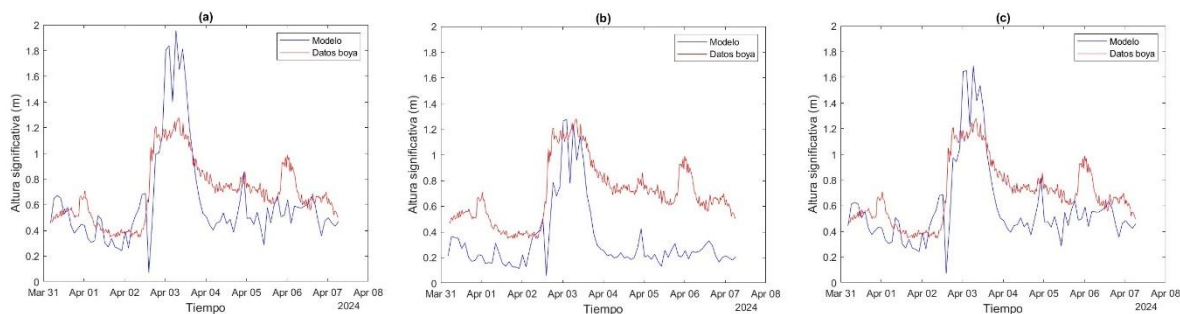


Figura 4.1 Proceso de calibración del escenario 1. (a) escenario 1 original, (b) escenario 1 con parámetro de fricción modificado y (c) escenario 1 con parámetro de rompimiento modificado.

Se puede observar que hay una disminución en las alturas máximas sin afectar el comportamiento del resto del modelo, se calculan los parámetros de bondad de ajuste R^2 y raíz del error cuadrático medio obteniéndose un valor de 0.01 y 0.24 m respectivamente.

Cabe destacar que para este escenario el cambio logró que el indicador de R^2 sea positivo y disminuyó la raíz del error cuadrático medio.

Se decide simular otro escenario utilizando como condición de borde los datos extraídos de la boya del SHOA de Talcahuano, en el siguiente rango de fecha: del 28-07-2024 a 04-08-2024. Se escogió este periodo ya que tiene presente condición de marejada en la zona, pudiéndose estudiar el comportamiento de este modelo.

Luego se compara lo modelado con los datos extraídos de la boya de Coronel, obteniéndose la gráfica de alturas significativas (a) presente en la Figura 4.2.

Se puede observar que el modelo sobreestima la altura en comparación con los datos extraídos de la boya, se calcula los parámetros de bondad de ajuste R^2 y raíz del error cuadrático medio obteniéndose un valor de 0.11 y 0.57 m respectivamente. El parámetro R^2 indica que en este escenario el modelo se comporta de mejor manera a pesar de que la raíz del error cuadrático medio, lo que se debe a que la variación en la altura de olas es mucho mayor que en el caso anterior.

Se simula el escenario 2 utilizando el mismo coeficiente de 0.29, obteniéndose la gráfica (b) en la Figura 4.2.

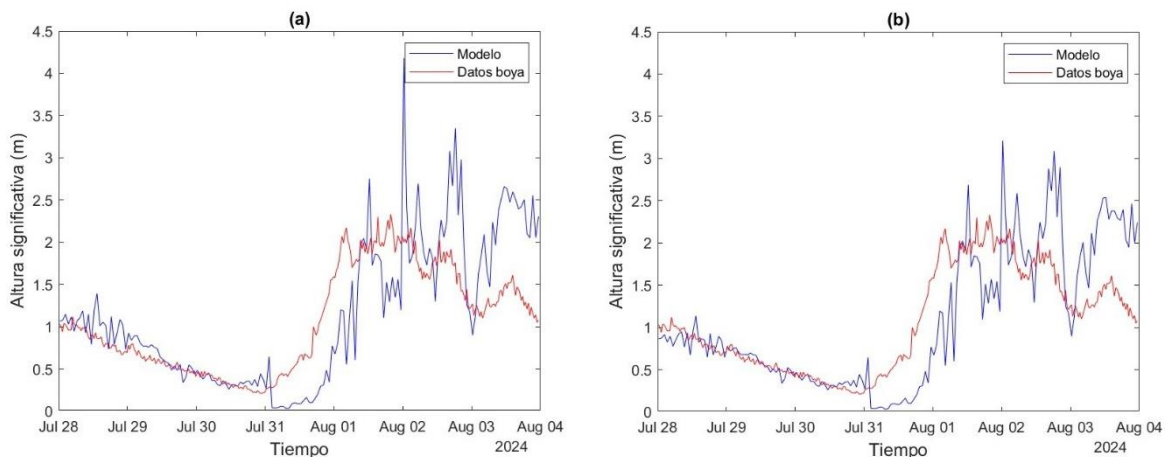


Figura 4.2 Proceso de calibración del escenario 2. (a) escenario 2 original, (b) escenario 2 con parámetro de rompimiento modificado

Se puede observar que hay una disminución de altura en los máximos y un excelente comportamiento los primeros tres días. Se calculan los parámetros de bondad de ajuste R^2 y raíz del error cuadrático medio obteniéndose un valor de 0.25 y 0.52 m respectivamente, mejorando su comportamiento en ambos parámetros.

4.3 Agitación de la bahía de Coronel

Se estimaron estados de mar estacionarios para la bahía de Coronel modelando distintos escenarios con una dirección entrante de WNW, NW, SSW, SW y WSW, con alturas significativas correspondientes al percentil 99% y a la altura que se excede 12 horas al año. Se grafican las alturas significativas en conjunto con la dirección a escala de golfo y de bahía para poder analizar la propagación del oleaje.

Para el oleaje proveniente de WNW se tienen los resultados graficados en la Figura 4.3.

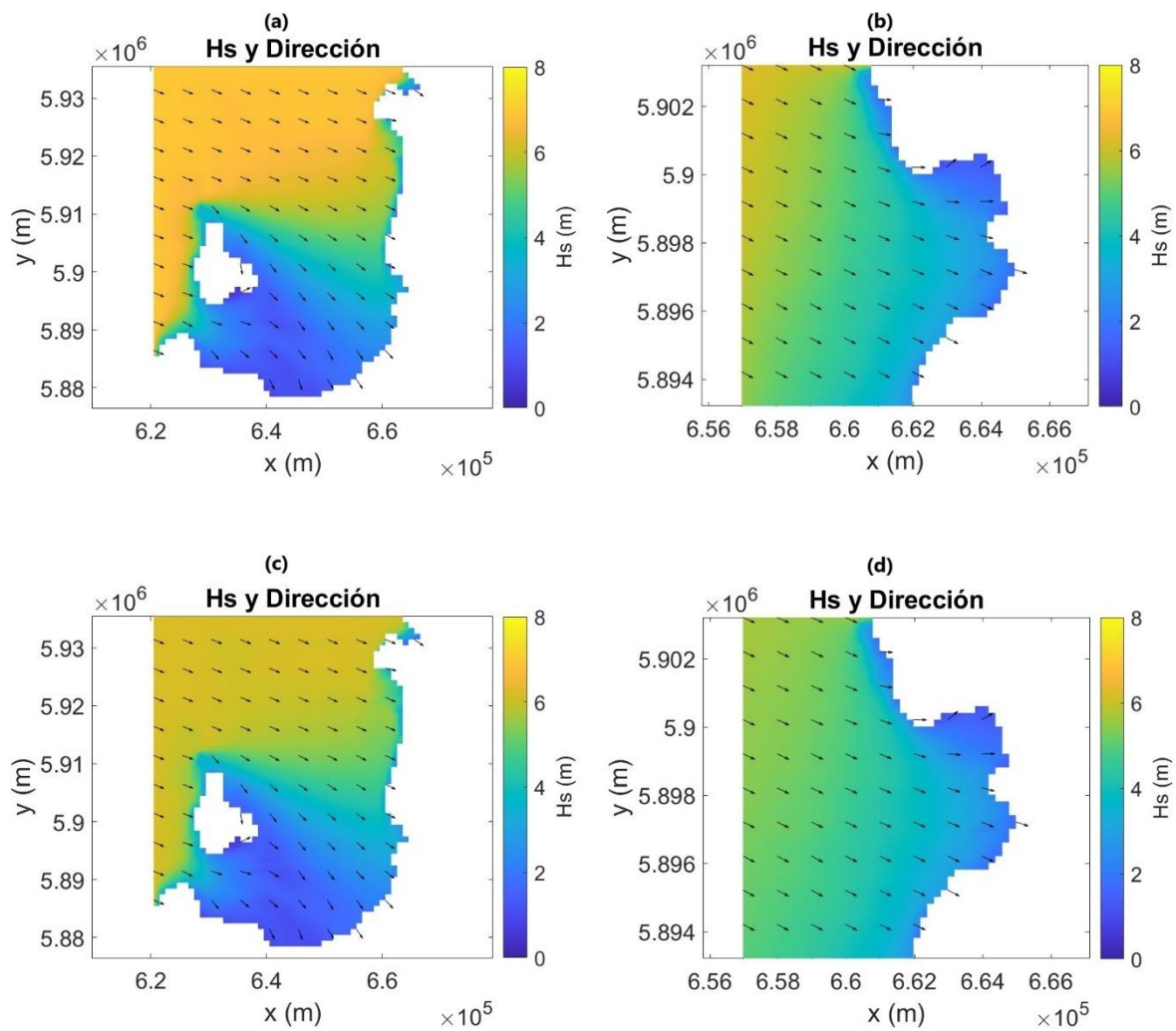


Figura 4.3 Escenarios de agitación, dirección WNW: (a) y (b) $H_s=6.94$ m., (c) y (d) $H_s=6.20$ m.

Desde el NW se tiene la Figura 4.4.

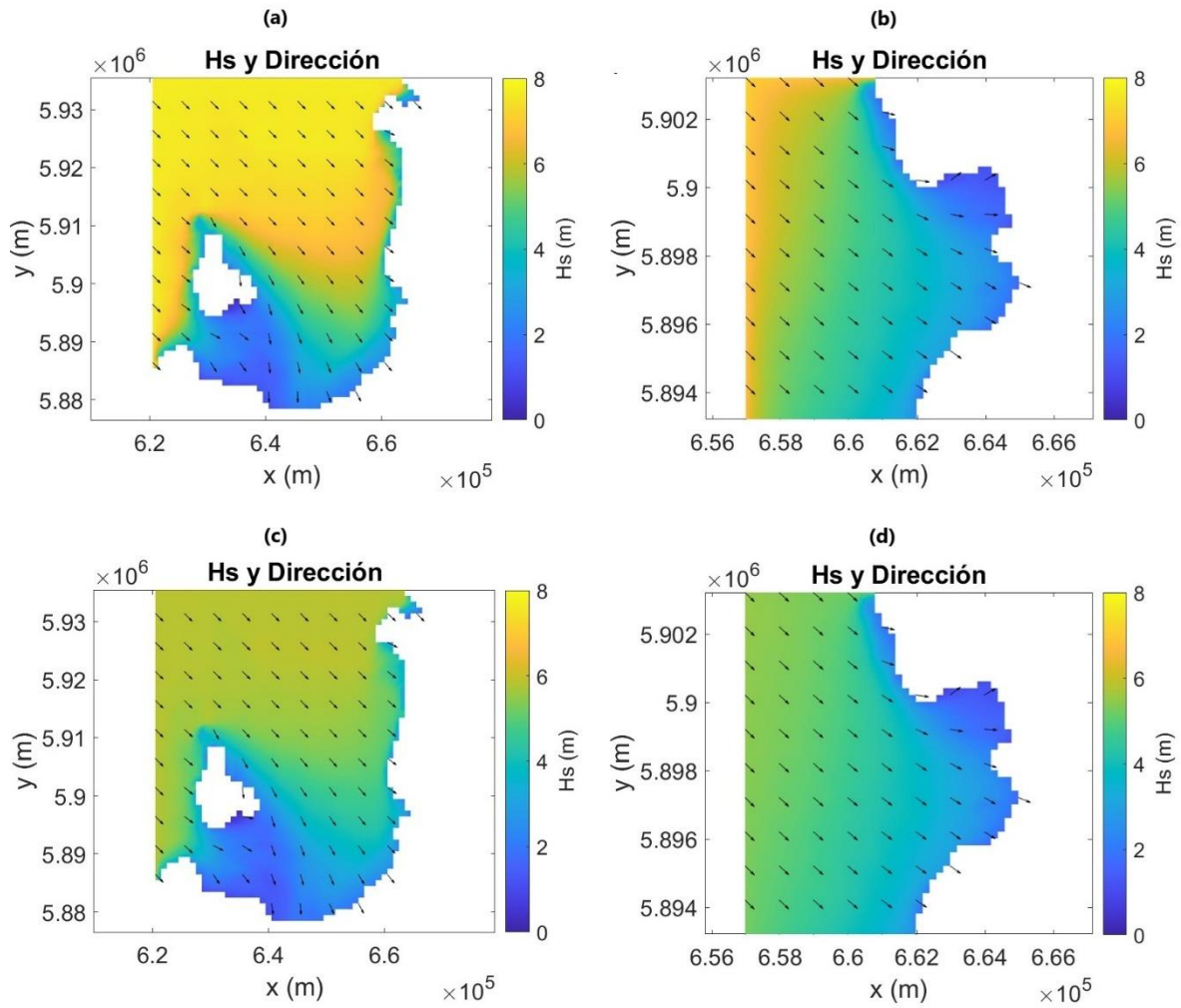


Figura 4.4 Escenarios de agitación, dirección NW: (a) y (b) $H_s=7.67$ m., (c) y (d) $H_s=5.84$ m.

Para el oleaje proveniente de SSW se tienen los resultados graficados en la Figura 4.5.

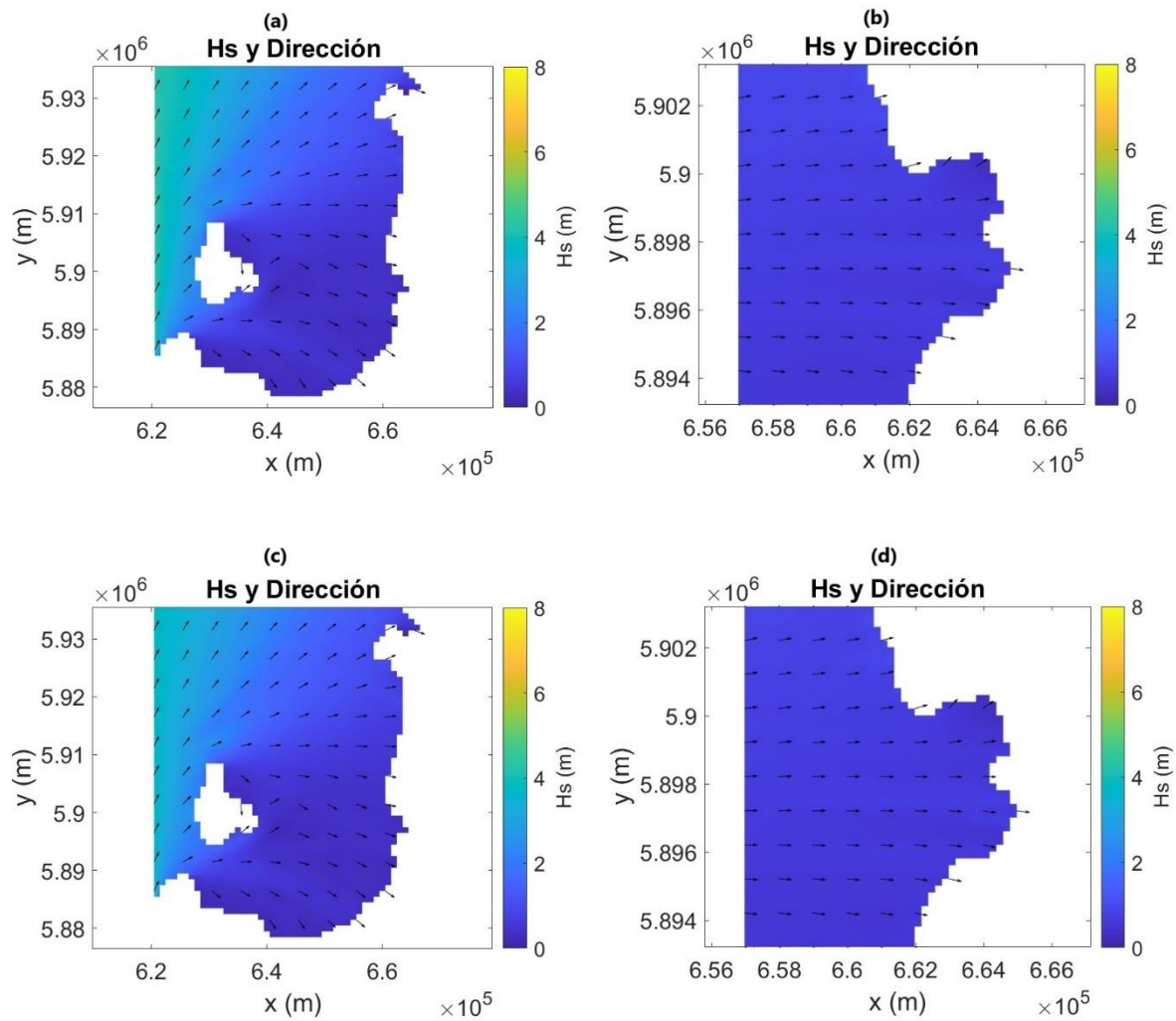


Figura 4.5 Escenarios de agitación, dirección SSW: (a) y (b) Hs=4.48 m., (c) y (d) Hs=3.99 m.

Desde el SW se tiene la Figura 4.6.

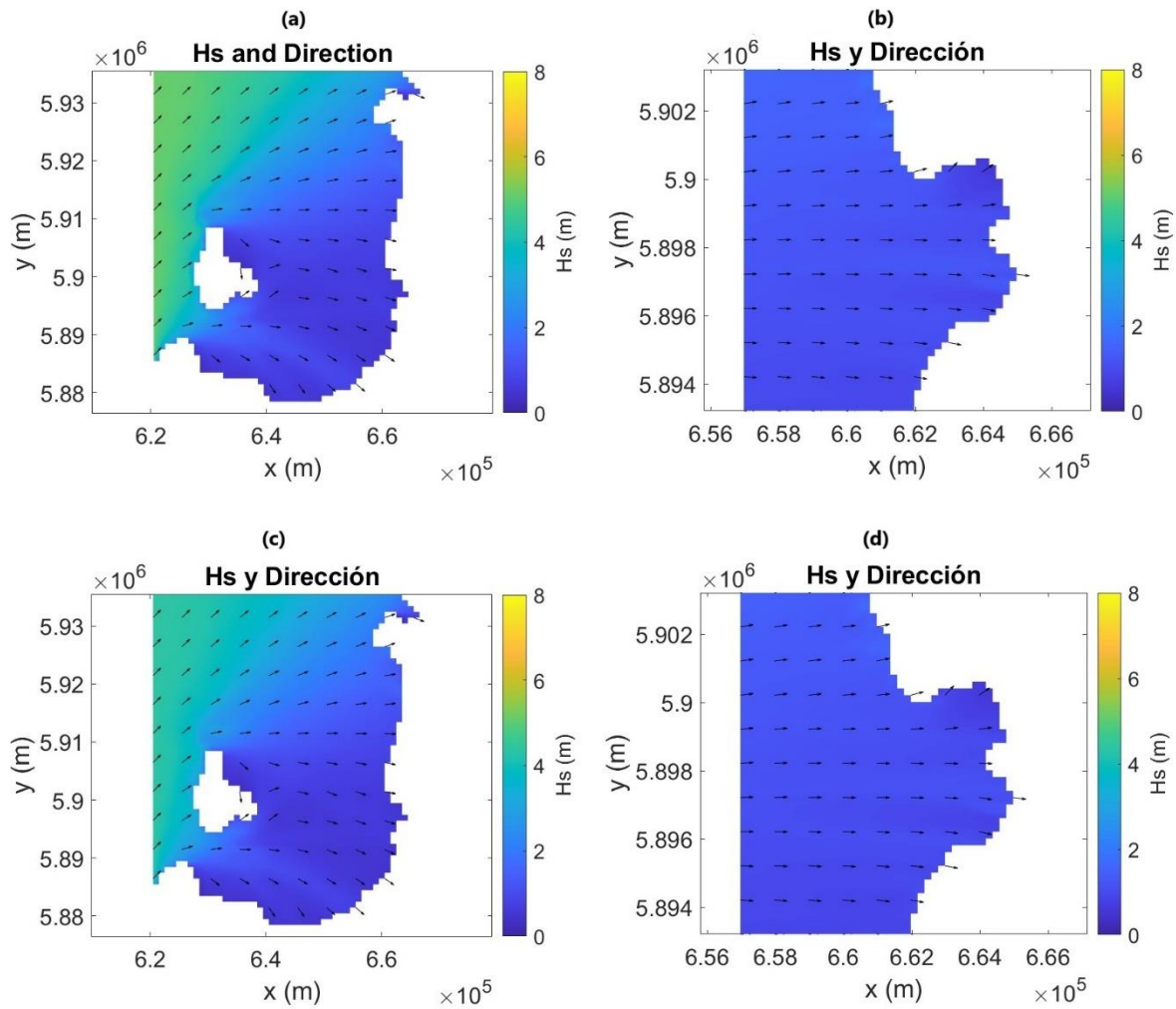


Figura 4.6 Escenarios de agitación, dirección SW: (a) y (b) $H_s=5.14$ m., (c) y (d) $H_s=4.39$ m.

Para el oleaje proveniente de WSW se tienen los resultados graficados en la Figura 4.7.

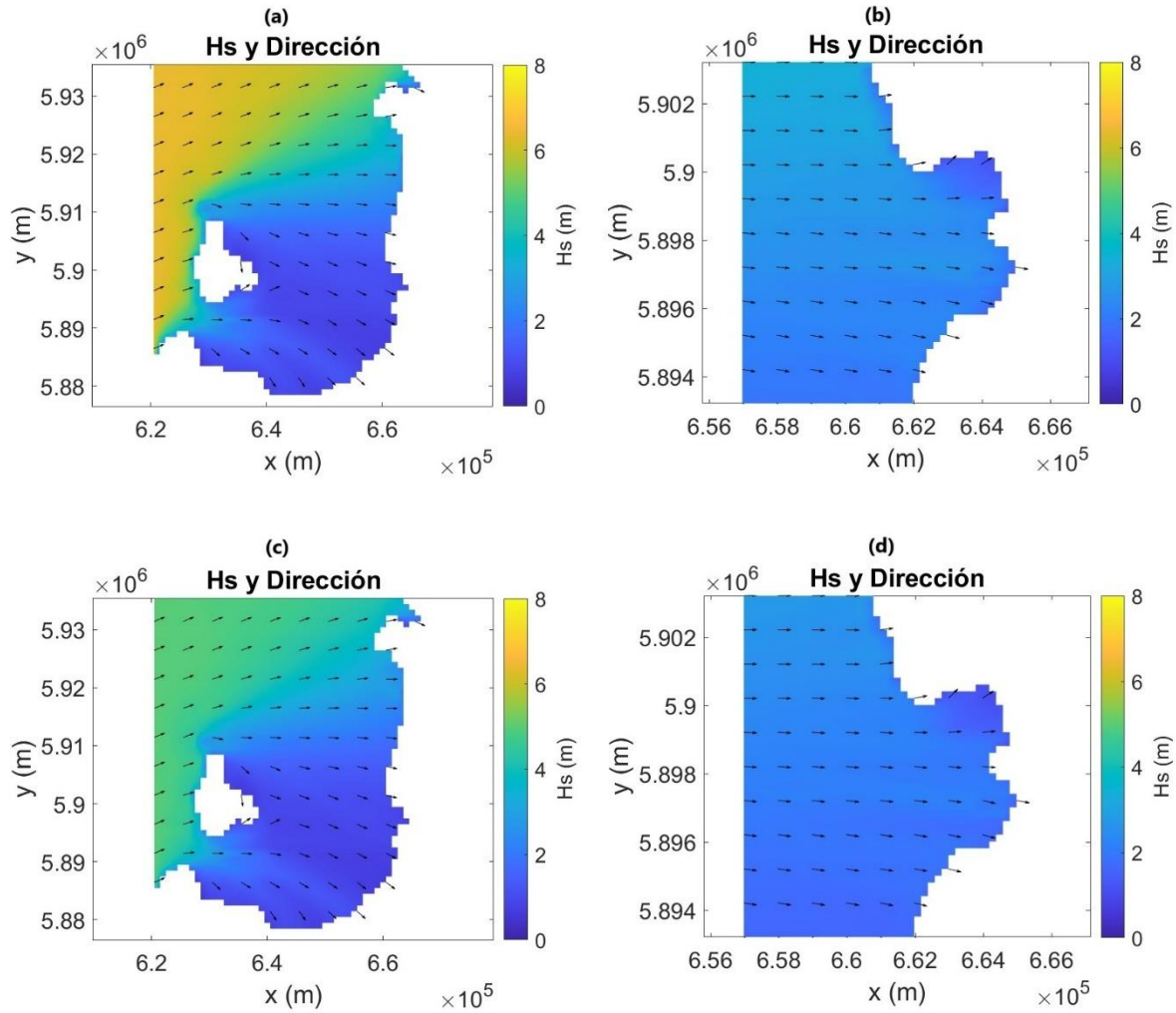


Figura 4.7 Escenarios de agitación, dirección WSW: (a) y (b) $H_s=6.40$ m., (c) y (d) $H_s=4.97$ m.

En relación con la altura significativa se puede observar que las mayores alturas observadas en la bahía son las propagadas desde NW y WNW, mientras que las menores alturas se presentan en el escenario WSW, SSW y SW. Esto se debe principalmente al tamaño de las olas entrantes, sin embargo, en el caso del escenario WSW con una altura entrante de 6.4 metros se puede apreciar que la altura de oleaje en la bahía es mucho menor que escenarios como WNW con altura de ola entrante de 6.2 metros. Considerando que el periodo y las alturas significativas de entrada son similares, se desprende que la diferencia radica en la dirección. Se observa que a nivel de golfo la isla Santa María provoca un bloqueo en el oleaje entrante, el área de sombra varía según la dirección en que viene el oleaje, cuando el oleaje

viene desde WSW, SW, SSW la bahía de Coronel se ve sombreada por la isla por lo que las olas llegan con una altura inferior a cuando el oleaje viene desde el NW y WNW, que en esos casos la dirección del oleaje no se ve modificada por la isla.

Un fenómeno que analizar en la bahía de coronel es el set-up, este se puede ver graficado en la Figura 4.8. Solo se consideraron los escenarios en que el set-up es relevante, en este caso corresponde a los escenarios en que el oleaje viene del NW y WNW, en el resto de los escenarios el set-up es muy cercano a cero. El máximo set-up observado es de 0.13 m. en el escenario en que el oleaje entrante viene del NW con una altura significativa de 7.67 m.

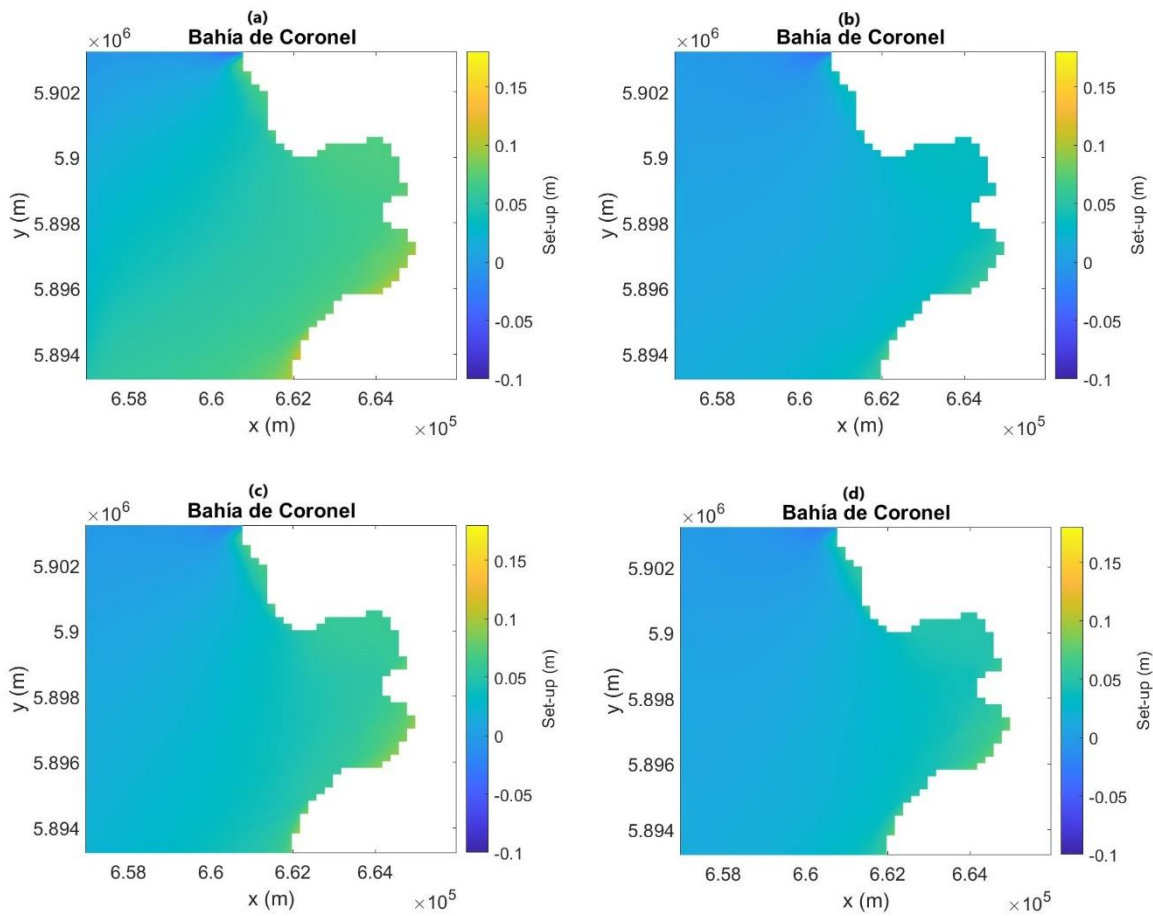


Figura 4.8 Escenarios de set-up. (a) Dirección NW y Hs=7.67 m. (b) Dirección NW y Hs=5.84 m.

(c) Dirección WNW y Hs=6.94 m. (d) Dirección WNW y Hs=5.84 m.

4.4 Pronóstico

Para pronosticar se realizó una simulación con datos extraídos del modelo WAVEWATCH III en modo pronóstico, para el siguiente rango de días: 31-03-2024 a 07-04-2024. Luego se compara con los datos extraídos de la boya de Coronel, obteniéndose gráfica de alturas significativas presente en la Figura 4.9.

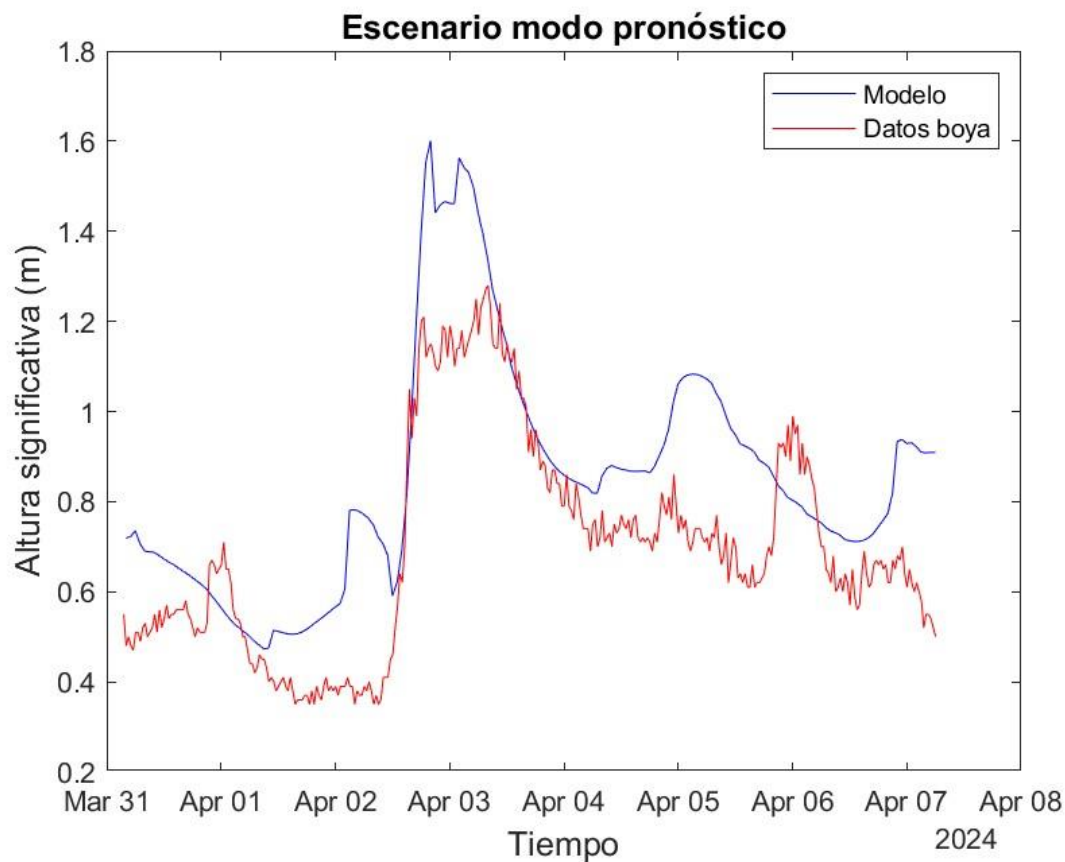


Figura 4.9 Comparación de alturas significativas, modo pronóstico.

Se puede observar que el modelo sobreestima la altura en comparación con los datos extraídos de la boya, se calcula los parámetros de bondad de ajuste R^2 y raíz del error cuadrático medio obteniéndose un valor de 0.24 y 0.21 m respectivamente.

4.5 Conclusión

Se concluye que las simulaciones realizadas posterior al cambio en el parámetro físico de rompimiento, logran reproducir parcialmente el comportamiento de oleaje en la bahía de Coronel considerando que sobreestiman los máximos de altura significativa pero respetan las tendencias de crecidas y disminuciones en las alturas.

Sobre la agitación de la bahía de Coronel se concluye que las mayores alturas significativas se producen cuando el oleaje entrante proviene del NW y WNW sin embargo la probabilidad de que el oleaje venga de esa dirección es de alrededor del 3%. Al considerar el escenario más probable, que el oleaje venga desde SW, se tiene una máxima altura significativa de 2 metros en la bahía.

En relación al pronóstico se concluye que el modelo funciona de manera aceptable al pronosticar.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

En esta memoria se implementó y validó un modelo espectral de oleaje para la bahía de Coronel en la región del Biobío, con el propósito de entender su comportamiento en eventos de marejadas y evitar así cierres de puertos innecesarios.

Se validó el modelo en un periodo de marejadas. En este proceso de validación se buscó disminuir los máximos de alturas significativas, ya que estaban sobredimensionados, de aquí se concluyó que el parámetro físico adecuado para este objetivo es el rompimiento y no la fricción.

Se evaluó la agitación en la bahía de Coronel para diferentes condiciones de oleaje extremo. Sobre la agitación en la bahía se puede concluir que las mayores alturas significativas, con una altura significativa máxima cercana a los 3 m en la bahía de Coronel, se presentan cuando las olas provienen del NW y WNW, sin embargo, la probabilidad de que el oleaje venga de esa dirección es de alrededor del 3%. En el escenario más probable, que es un oleaje proveniente del SW con una probabilidad de ocurrencia de dirección del 45.9%, la máxima altura significativa presente en la bahía de Coronel es de 2 metros aproximadamente.

Se pronosticó en la bahía, obteniéndose resultados preliminares aceptables.

La posibilidad de entender el comportamiento de la bahía de Coronel en presencia de eventos de marejadas, permite tomar decisiones que sean solo para esa zona a diferencia del mecanismo utilizado hoy en día que toma la misma decisión para una gran sección del país. Esto último permite evitar cierres innecesarios del puerto que genera grandes pérdidas monetarias y permite emitir alertas de forma oportuna.

Se sugiere como trabajo futuro tener una boya fuera del golfo de Arauco o utilizar modelos retrospectivos validados como condición de borde para calibrar de mejor manera el modelo. También se sugiere como alternativa evaluar el uso de malla no estructurada para representar de mejor manera las características de la costa.

REFERENCIAS

Kamphuis, J. W. (2000). Introduction to coastal engineering and management (Vol. 16). World Scientific Publishing Company.

Winckler, P. (2020). Introducción al modelado de procesos costeros. Apuntes de clases. Valparaíso, Chile: Universidad de Valparaíso.

Armella, A. Á., Acuña, A. P., Casarín, R. S., & Simmonds, D. J. PRINCIPALES TEORÍAS PARA EL MODELADO MATEMÁTICO DE LA PROPAGACIÓN DE OLEAJE.

SWAN team. (2016). SWAN User Manual—SWAN Cycle III Version 41.01 A. *Delft University of Technology, Delft*.

Whitham, G. B. (1974). Linear and Nonlinear Waves. John Wiley New York, 636 pp.

Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge university press.

Escuela de Ingeniería Civil Oceánica. (s.f.). Categorías de Marejadas [Afiche]. Universidad de Valparaíso. <https://marejadas.uv.cl/categorias>

Radio Biobio Chile. (2024, abril 24). Paro en Puerto Coronel cumple un mes: pérdidas se cifran en más de 75 millones de dólares. BioBioChile. <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-del-bio-bio/2024/04/24/paro-en-puerto-coronel-cumple-un-mes-perdidas-se-cifran-en-mas-de-75-millones-de-dolares.shtml>

Gobierno de Chile. (s.f.). *Nuestro país*. Gob.cl. <https://www.gob.cl/nuestro-pais/>

Martínez, C., Contreras-López, M., Winckler, P., Hidalgo, H., Godoy, E. Y Agredano, R. (2018). Coastal erosion in central Chile: A new hazard?, *Ocean & Coastal Management*, 156: 141-155.

Ministerio del Medio Ambiente, 2019. Resumen ejecutivo, en “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile”, Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile.

Airy, G. B. (1845). Tides and waves. B. Fellowes.

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

Parra C., Beyá J. (2017). PRONÓSTICO OPERACIONAL DE OLEAJE PARA LAS COSTAS Y PUERTOS DE CHILE

CAMPORT. (2021). Reporte N°12, "Las marejadas llegaron para quedarse ¿Qué estamos haciendo?". Cámara Marítima y Portuaria de Chile A.G.

Ferrer C. (2023) IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ESPECTRAL DE OLEAJE PARA LA REGION DEL BIOBÍO

Bosboom, J., & Stive, M. J. F. (2023). Coastal Dynamics (Version 1.2). Delft University of Technology

Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. W. (1964, August). Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. In Deep sea research and oceanographic abstracts (Vol. 11, No. 4, pp. 529-562). Elsevier.

ANEXOS

ANEXO 1 Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ☐ ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ☐ ODS-2 : Hambre cero.
- ☐ ODS-3 : Salud y bienestar.
- ☐ ODS-4 : Educación de calidad.
- ☐ ODS-5 : Igualdad de género.
- ☐ ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ☐ ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ☐ ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ☐ ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ☐ ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ☒ ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ☐ ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ☒ ODS-13 : Acción por el clima.
- ☐ ODS-14 : Vida Submarina.
- ☐ ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ☐ ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.

□ ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación
• Dentro de las metas del ODS-11 se encuentra: “De aquí a 2030, reducir significativamente el número de muertes causadas por los desastres, incluidos los relacionados con el agua, y de personas afectadas por ellos, y reducir considerablemente las pérdidas económicas directas provocadas por los desastres en comparación con el producto interno bruto mundial, haciendo especial hincapié en la protección de los pobres y las personas en situaciones de vulnerabilidad.” Esta meta tiene especial relación con esta memoria de título ya que permite entender el comportamiento del mar en escenarios de marejadas en la bahía de Coronel. Este conocimiento permite disminuir los cierres innecesarios del puerto y sus costos económicos asociados, además de saber cuando es necesario levantar una alerta de marejada que salvaguarde la vida de las personas. • Dentro de las metas del ODS-13 se encuentra: “Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana.” Como se mencionó en esta memoria, el cambio climático trae consigo un aumento en cantidad e intensidad de eventos de marejadas, la modelación y simulaciones realizadas pueden ayudar a las instituciones competentes a entender la agitación de la bahía de Coronel y con ello poder implementar un sistema de alerta temprana para la zona.

ANEXO 3.1

\$*** Encabezado *******

\$

PROJ 'BahiaCoronel' '1'

MODE NONSTAT

\$SET MAXERR 3

\$

\$

\$*** Inputs del Modelo *******

\$

\$CGRID [xpc] [ypc] [alpc] [xlenc] [ylenc] [mx] [my] [mdc] [flow] [fhigh] [msc]

CGRID 0. 0. 0. 48000 59000 48 59 Circle 180 .04 1

\$

\$ INPGRID [BOT] [xpin] [ypin] [alpin] [mxin] [myin] [dxin] [dyin]

INPGRID BOTTOM 0. 0. 0. 48 59 1000. 1000.

**\$ READInp [BOT] [fac] [fname1] [idla] [nhedf] [nhedt] [nhedvec] [FREE - input
format]**

READINP BOTTOM 1. 'batGC.bot' 1 0 FREE

\$-----

\$(BOU SHAPE) [JONSWAP] [gamma] [peak] []

BOU SHAPE JONSWAP 3.3 PEAK DSPR DEGREES

\$

\$ ----- Condiciones de Borde -----

\$[BOUN SIDE] [k] [CCW] [CON] [PAR] [hs] [per] [dir] [dd]

BOUN SIDE W CCW CON FILE 'TPAR1.txt' 1

BOUN SIDE N CCW CON FILE 'TPAR2.txt' 1

\$

\$*** Procesos fisicos *******

\$

GEN3

TRIADS

BREAKING

FRICITION

OFF QUAD

\$*** Ouputs del Modelo *******

\$

\$[NGRID] 'sname' [xpn] [ypn] [alpn] [xlenn] [ylenn] [mxn] [myn]

NGRID 'subN1' 36480 32229 0. 9000 10000 45 50

BLOCK 'COMPGRID' NOHEADER 'Hs_Large.mat' HS

BLOCK 'COMPGRID' NOHEADER 'Dir_Large.mat' DIR

BLOCK 'COMPGRID' NOHEADER 'Tp_Large.mat' TPS

NESTOUT 'subN1' 'CoronelNest1' OUTput 20240331.040000 1 HR

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

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Gabriela Fernanda Camino Cane
Título de la memoria : Pronóstico de oleaje para la alerta de marejadas.
Fecha de la presentación oral :

Profesor(es) Guía : Maricarmen Guerra Paris
Profesor(es) Revisor(es) : Oscar Link Lazo
Concepto :
Calificación :

Resumen

Una marejada es un fenómeno de oleaje que se caracteriza por un incremento en las alturas significativas, periodo, y energía de las olas. Estos eventos afectan el normal funcionamiento costero y pueden representar un riesgo para la vida de las personas. Con el cambio climático se espera que este fenómeno ocurra con mayor frecuencia e intensidad.

La bahía de Coronel es un punto estratégico para el comercio internacional y nacional gracias a su puerto, sin embargo, esta zona no posee un modelo de pronóstico de oleaje gratuito. Frente a un escenario de marejadas el puerto de Coronel se puede ver afectado negativamente, tanto estructuralmente como operacionalmente. Por lo que toma relevancia implementar un sistema de alerta de marejadas específico para la zona, que complemente el sistema actual, evitando así detenciones en su funcionamiento y la pérdida económica que esto representa.

Esta memoria de título tiene como objetivo implementar un modelo de propagación de oleaje de alta resolución de la bahía de Coronel para el pronóstico y alerta de marejadas.

Se realiza una modelación de la bahía de Coronel para entender su comportamiento frente al fenómeno de marejadas. Con este fin se crea una malla anidada a partir de cartas náuticas facilitadas por el SHOA, se implementa el modelo SWAN probando distintas fuentes como condiciones de borde y modificando parámetros físicos para obtener un mejor ajuste.

Se concluye que el modelo implementado genera simulaciones aceptables para la predicción de marejadas. No obstante, presenta una tendencia a amplificar las alturas significativas máximas. En lo relativo a la agitación de la bahía, se concluye que la dirección entrante del oleaje es fundamental en el comportamiento de esta, debido a que se encuentra protegida por la isla Santa María. También se destaca la importancia de implementar herramientas en contextos locales para poder así tomar decisiones acordes a cada contexto.