

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Evaluación de la hidrodinámica del corto plazo en la playa de Caldera
mediante técnicas de modelado numérico usando el programa XBeach**

Trabajo de Graduación

Para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

María José Camacho Cordero

Director del proyecto de graduación:

Ing. Henry Alfaro Chavarría, Ph.D.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

Marzo, 2022

HOJA DE APROBACIÓN

María José Camacho C.

María José Camacho Cordero

Autora



Ing. Henry Alfaro Chavarría, PhD.

Director



Ing. Georges Govaere Vicarioli, PhD.

Asesor



Ing. Alberto Serrano Pacheco, PhD.

Asesor

DERECHOS DE AUTOR

Fecha: 09-03-2022

La suscrita, María José Camacho Cordero, cédula 1-1719-0748, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B61372**, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación **Evaluación de la hidrodinámica del corto plazo en la playa de Caldera mediante técnicas de modelado numérico usando el programa XBeach**, bajo la Dirección del **Ph.D. Henry Alfaro Chavarría**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

DEDICATORIA

A mi abuela, gracias por todo.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, que me ha apoyado siempre y sin miramientos, este logro es para ustedes.

A mis amigos y compañeros de la carrera: Gianluca, Leonardo, María Paula, Dianlly, Mario, Adrián, Santiago y Eric, así como todos aquellos con quien tuve la dicha de compartir tantos momentos durante la universidad. También a mis amigas: Mónica, Francela, Loana, Noelia, Ariana y Rebeca, quienes fueron un apoyo incondicional. Definitivamente, sin ellos y sin muchas otras personas que no llegué a mencionar, no habría logrado concluir la etapa universitaria que tanto disfruté.

A mi director, Henry Alfaro Chavarría, por su involucramiento y disponibilidad, así como por su comprensión y paciencia, muchas gracias.

A mis asesores, Georges Govaere Vicarioli y Alberto Serrano Pacheco, por su apoyo y retroalimentación durante este proceso.

Al equipo de trabajo e investigadores del iMARES que hicieron posible la realización de las distintas campañas de campo, así como por su apoyo durante todo el desarrollo del proyecto.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	1
1.1.1 Problema específico.....	1
1.1.2 Importancia.....	2
1.1.3 Antecedentes del problema	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Delimitación del problema	5
1.3.1 Alcance	5
1.3.2 Limitaciones.....	6
1.4 Metodología	6
1.4.1 Etapa 1. Revisión bibliográfica	9
1.4.2 Etapa 2. Recopilación de datos	9
1.4.3 Etapa 3. Modelado numérico	9
1.4.4 Etapa 4. Condiciones críticas de oleaje	10
1.4.5 Etapa 5. Conclusiones y recomendaciones	10
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	11
2.1 Generalidades del oleaje	11
2.2 Medición del oleaje.....	13
2.2.1 Perfiladores acústicos de corriente (ADCP).....	13
2.3 Análisis del oleaje	14
2.3.1 Análisis temporal.....	15
2.3.2 Análisis espectral.....	18
2.4 Modelos de propagación del oleaje.....	21
2.4.1 Generalidades	21
2.4.2 Dinámica del flujo de fluidos.....	22
2.4.3 Modelos integrados en profundidad	24
2.4.4 Modelos numéricos de generación y propagación de ondas largas	25
2.5 XBeach	27
2.5.1 Módulo hidrostático	27

2.5.2	Módulo no hidrostático	28
2.5.3	Validación del modelo numérico XBeach.....	29
CAPÍTULO 3. CAMPAÑAS DE CAMPO.....		31
3.1	Descripción general de la información recopilada	31
3.2	Información de Batimetría.....	31
3.3	Información de Mareas	31
3.4	Campañas de medición de oleaje.....	33
3.4.1	Campaña mayo 2019.....	34
3.4.2	Campaña marzo 2021.....	38
CAPÍTULO 4. MODELADO NUMÉRICO		45
4.1	Configuración del modelo.....	45
4.1.1	Aspectos generales	46
4.1.2	Parámetros de malla	47
4.1.3	Tiempo de modelado.....	49
4.1.4	Parámetros de fricción del fondo	49
4.1.5	Parámetros de condición de frontera de flujo.....	51
4.1.6	Condiciones de marea	52
4.1.7	Parámetros de condición de frontera de oleaje	54
4.1.8	Parámetros de corrección no hidrostática	58
4.1.9	Parámetros de salida.....	59
4.2	Calibración del modelo.....	62
4.2.1	Descripción del proceso	62
4.2.2	Resultados obtenidos	63
4.3	Validación del modelo.....	66
4.3.1	Descripción del proceso	66
4.3.2	Resultados obtenidos	67
CAPÍTULO 5. CONDICIONES CRÍTICAS DE OLEAJE EN EL SITIO.....		73
5.1	Descripción del proceso	73
5.2	Gráfico de rebase en Playa Caldera.....	73
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		75
6.1	Conclusiones.....	75
6.2	Recomendaciones	79

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
CAPÍTULO 8. APÉNDICES.....	A-1
8.1 Apéndice A. Campaña de medición 2019	A-1
8.2 Apéndice B. Campaña de medición 2021	B-1
8.3 Apéndice C. Archivo "params.txt" empleado en el modelado numérico	C-1

TABLA DE FIGURAS

Figura 1-1. Ubicación de la zona de estudio -----	6
Figura 1-2. Metodología -----	7
Figura 1-3. Metodología (cont.) -----	8
Figura 2-1. Período energía de las ondas -----	11
Figura 2-2. Estructura del oleaje aleatorio -----	14
Figura 2-3. Visualización gráfica de método de pasos ascendentes por cero -----	16
Figura 2-4. Parámetros estadísticos del oleaje en el dominio del tiempo -----	17
Figura 2-5. Metodología para el análisis temporal del oleaje -----	18
Figura 2-6. Parámetros espectrales del oleaje en el dominio de la frecuencia -----	20
Figura 2-7. Metodología para el análisis espectral del oleaje -----	21
Figura 3-1. Gráfico de superposición de campañas de medición de batimetrías del perfil en estudio -----	31
Figura 3-2. Gráfico de pronóstico de mareas en Puntarenas para el mes de mayo de 2019 -	32
Figura 3-3. Gráfico de pronóstico de mareas en Puntarenas para el mes de mayo de 2019 -	33
Figura 3-4. Fotografía a) del equipo individual y b) del equipo instalado -----	34
Figura 3-5. Ejemplo gráfico de corrección por marea de las series de presión medidas en mayo 2019 (Estado de mar N°6) -----	35
Figura 3-6. Ejemplo gráfico de las series de superficie libre medidas en la campaña de mayo 2019 (Estado de mar N°6) -----	35
Figura 3-7. Ejemplo de espectro de energía de campaña de medición de mayo 2019 -----	37
Figura 3-8. Ejemplo gráfico de corrección por marea de las series de presión medidas en marzo 2021 (Estado de mar N°4) -----	38
Figura 3-9. Ejemplo gráfico de las series de superficie libre medidas en la campaña de marzo 2021 (Estado de mar N°4) -----	39
Figura 3-10. Ejemplo de espectro de energía de campaña de medición de marzo 2021 -----	42
Figura 3-11. Fotografía de las estacas colocadas para la medición de la llegada del oleaje a la playa -----	43
Figura 3-12. Ubicación y número de las estacas analizadas en los videos -----	43
Figura 3-13. Histogramas de frecuencia del punto máximo de llegada de las olas en playa Caldera a partir de videos tomados el 25 de marzo de 2021 -----	44

Figura 4-1. Ejemplo de formato del archivo de forzamiento por series temporales en el programa XBeach	56
Figura 4-2. Ejemplo de formato del archivo de forzamiento por parámetros Jonswap en el programa XBeach	57
Figura 4-3. Ejemplo de formato del archivo de forzamiento por archivo de espectro SWAN en el programa XBeach	58
Figura 4-4. Proceso de calibración de XBeach	63
Figura 4-5. Gráfico de dispersión del modelo base en la calibración (cf=0.003)	64
Figura 4-6. Gráfico de dispersión del modelo de mejor ajuste obtenido en la calibración (cf=0.07)	64
Figura 4-7. Gráfico de dispersión del modelo forzado con parámetros espectrales y cf=0.07	65
Figura 4-8. Proceso de validación de XBeach	67
Figura 4-9. Gráfico de dispersión de la validación del modelo forzado con series temporales (cf=0.07)	68
Figura 4-10. Gráfico de dispersión de la validación del modelo forzado con parámetros espectrales (cf=0.07)	68
Figura 4-11. Gráfico de rebase del oleaje a lo largo del tiempo con un coeficiente de fricción de 0.07 para a) un espectro sin ondas IG y b) un espectro con ondas IG	70
Figura 4-12. Gráfico de rebase del oleaje a lo largo del tiempo con un coeficiente de fricción de 0.003 (valor por defecto) para a) un espectro sin ondas IG y b) un espectro con ondas IG	71
Figura 5-1. Gráfico de rebase del oleaje según su altura y periodo a partir de simulaciones Jonswap	74

TABLA DE CUADROS

Cuadro 2-1. Parámetros de medida del error en modelos.....	30
Cuadro 3-1. Parámetros estadísticos del oleaje en el dominio del tiempo campaña mayo 2019	36
Cuadro 3-2. Parámetros principales obtenidos del análisis espectral para la campaña de mayo 2019.....	37
Cuadro 3-3. Parámetros estadísticos del oleaje en el dominio del tiempo campaña marzo 2021	39
Cuadro 3-4. Parámetros principales obtenidos del análisis espectral para la campaña de marzo 2021.....	41
Cuadro 4-1. Descripción de los comandos generales del archivo params.txt	46
Cuadro 4-2. Descripción de los comandos de la malla de cálculo del archivo params.txt	47
Cuadro 4-3. Descripción de los comandos de modelación del archivo params.txt	49
Cuadro 4-4. Descripción de los comandos de fricción de fondo del archivo params.txt.....	50
Cuadro 4-5. Descripción de los comandos de condición de frontera de flujo del archivo params.txt	51
Cuadro 4-6. Descripción de los comandos de condiciones de marea del archivo params.txt .	53
Cuadro 4-7. Descripción de los comandos de condiciones de frontera del oleaje del archivo params.txt	54
Cuadro 4-8. Descripción de los comandos de corrección no hidrostática del archivo params.txt	59
Cuadro 4-9. Descripción de las variables de salida del archivo params.txt	60
Cuadro 4-10. Resumen de RMSE obtenidos durante la calibración de series temporales	65
Cuadro 4-11. Resumen de RMSE obtenidos durante la revisión del forzamiento con parámetros Jonswap	66
Cuadro 4-12. Resumen de RMSE obtenidos durante la validación del modelo	69

Camacho Cordero, María José

Evaluación de la hidrodinámica del corto plazo en la playa de Caldera mediante técnicas de modelado numérico usando el programa XBeach

Proyecto de Graduación-Ingeniería Civil-San José, C.R.:

M.J.Camacho C., 2022

xi,83 [35]h, ils.col. -23 refs.

RESUMEN

El presente proyecto buscó evaluar la capacidad del modelado numérico de la hidrodinámica del corto plazo del programa XBeach en la playa al norte de Puerto Caldera. Se realiza esta evaluación como un primer acercamiento al desarrollo de un sistema de pronóstico de rebase en la zona de estudio.

La calibración y validación del programa se realizan a partir de campañas de medición en campo a lo largo de un perfil, en una dimensión, representativo de la zona de rebase. Se calibra el valor del coeficiente de fricción (cf) en el modelo a partir de los resultados de parámetros estadísticos como el error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés) entre los datos medidos y los resultados obtenidos de las propagaciones. Se valida el modelo para el coeficiente calibrado y con datos de una campaña de medición adicional. Una vez validado el modelo, se procede a la generación de un gráfico de rebase a partir de los parámetros de altura (H_s) y periodo (T_p) de ola requeridos para el rebase en el modelo.

Se realiza la calibración del modelo a partir de una campaña de medición tomada realizada en mayo de 2019 y se obtiene un cf calibrado de 0.07, el cual se valida con una campaña en marzo de 2021, obteniendo una mejoría significativa en la correlación de los parámetros medidos y modelados en comparación con el caso del cf por defecto del programa. Se determinó que el cf calibrado es válido únicamente para un oleaje con un rango específico de energías, las cuales son menores a las requeridas para que se dé el rebase. Debido a esto, se desarrolla el gráfico de rebase, usando un cf de 0.003 (valor por defecto del programa) como una aproximación inicial que debe ser validada con campañas de medición asociadas oleajes más energéticos. M.J.C.C.

PROPAGACIÓN DEL OLAJE; MODELADO NUMÉRICO; XBEACH; PLAYA CALDERA; CALIBRACIÓN; VALIDACIÓN; REBASE DEL OLAJE.

Ing. Henry Alfaro Chavarría, P.h.D.

Escuela de Ingeniería Civil

Camacho Cordero, María José

Evaluation of the short-term hydrodynamics at Caldera beach through numerical modeling techniques using the XBeach program

Graduation Project-Civil Engineering-San José, C.R.:

M.J.Camacho C., 2022

xi,83 [35]h, ils.col. -23 refs.

ABSTRACT

The aim of this paper is to evaluate the capacity of the numerical modelling of the short-term hydrodynamics using the XBeach program at Caldera Beach. This assessment provides a first approach to the development of an XBeach-based overtopping forecast system in the study site.

The calibration and validation of the model is carried out based on the results obtained from measurement campaigns done along a 1D profile align with the zone where the overtopping occurs. The friction coefficient (cf) is calibrated comparing the statistical parameters such as the root mean square error (RMSE) between the measured and modeled wave parameters. The model is validated with an additional field campaign for the calibrated cf . Once the validation process is completed, an overtopping graph is generated from the combination of the wave height (H_s) and the peak period (T_p) that cause the overtopping in the model.

The model is calibrated based on wave data from May 2019. The results showed a calibrated cf of 0.07 which is validated with data from March 2021. There is a significant improvement in the correlation between the measured and modeled spectral parameters in comparison with the results obtained using the default cf value of the model. It was determined that the calibrated cf is valid only for waves within a specific energy range, which is lower than the required for the overtopping to occur. Due to the results obtained, an overstepping graph is developed using the default value for cf (0.003), however, this is done as an initial approximation which must be validated with measurements of more energetic waves. M.J.C.C.

WAVE PROPAGATION; NUMERICAL MODELLING; XBEACH; CALDERA BEACH; CALIBRATION; VALIDATION; WAVE OVERTOPPING.

Eng. Henry Alfaro Chavarría, P.h.D.

School of Civil Engineering

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

1.1.1 Problema específico

El uso de modelos numéricos que predicen el comportamiento hidrodinámico del oleaje se ha hecho más común debido a distintos avances tecnológicos que han permitido no solo el procesamiento de datos y la ejecución de programas computacionales de gran demanda, sino que también han hecho posible la recolección de datos de campo más detallados y confiables. Pero el uso de modelos computacionales de simulación numérica aún posee incertidumbres, ya que estos modelos se definen siguiendo propuestas teóricas que a su vez implican simplificaciones, supuestos y limitaciones que alejan los modelos de la realidad. Por lo que, a pesar de la gran cantidad de metodologías y programas que existen para el modelado de las variables hidrodinámicas en las zonas de playas, se debe tener presente que hay márgenes de error entre estos y lo que ocurre en la naturaleza.

XBeach (Xtreme Beach behaviour model) es un programa de código abierto de modelado de procesos físicos que incluyen rotura de olas, zonas de rotura, erosión, entre otros (Roelvink et al., 2009). Este programa se creó en el 2004 con el fin de modelar tormentas en las costas de Estados Unidos, y a partir de ese momento se ha validado para una amplia gama de playas y casos de estudio en Europa y Estados Unidos principalmente (van Dongeren, 2017). A pesar de que este programa tiene más de 10 años de estarse actualizando y validando en distintas zonas, no es posible determinar el grado de precisión que este posee al utilizar los datos específicos de la zona de estudio.

La playa al norte de Puerto Caldera se encuentra en el distrito de Caldera, del cantón de Esparza en la provincia de Puntarenas. Es una playa reflejante y es conocida por su atractivo turístico debido a la cercanía de esta con la Gran Área Metropolitana, pero también presenta en un tramo de su parte central un perfil reflejante con pendiente aproximada de 1/10. Es en ese sector donde se han reportado eventos de rebase que ascienden sobre la estructura perimetral de protección y provocan la inundación de la carretera adosada a la playa. Estos eventos presentan peligros directos sobre las personas que usan la ruta y sobre el estado de la carretera en sí, también se presentan pérdidas económicas para el gobierno nacional y local que debe limpiar y reparar la vía (incluyendo cunetas y aceras) cada vez que se dan estos eventos y

pérdidas económicas que se pueden dar en el puerto Caldera ya que esta ruta es un acceso terrestre directo al mismo.

Modelar las variables hidrodinámicas que interaccionan con el tramo de playa de estudio por medio del modelo XBeach, el cual resuelve procesos no lineales de propagación de oleaje que suceden en la zona permitirá determinar las capacidades, restricciones, eficiencia computacional y grado de aproximación con la realidad que el modelo presenta. Esta modelación se realizará con información existente medida en campo, como lo son mediciones de oleaje, levantamientos batimétricos y topográficos de resolución conveniente para el estudio.

1.1.2 Importancia

El oleaje es uno de los principales factores de afectación en las zonas costeras, especialmente las playas. Conocer la interacción entre el oleaje y la playa permite definir zonas de baño seguras, potenciales modificaciones en la forma de la playa, zonas de inundación y rebase, entre otros aspectos que permiten una planificación consciente de la seguridad de la playa, así como de la construcción de obras cercanas a la misma.

El poder caracterizar el comportamiento del oleaje y las ondas derivadas de largo periodo como son las ondas infra gravitatorias sobre estas playas y sus efectos como el ascenso sobre el talud de playa, su efecto derivado como lo es el rebase, y las corrientes producto de la rotura del oleaje, a partir de aproximaciones, permitiría, aunado a información de oleaje de pronóstico, aproximar cuándo y cómo podrían producirse estos eventos, evitar accidentes y reducir costos económicos.

Con este proyecto se busca generar conocimiento acerca del modelo XBeach, que cuenta con capacidad para modelar el oleaje en zonas con alta complejidad no lineal, en este caso una playa reflejante como lo es la ubicada al norte de Puerto Caldera.

La existencia de modelos numéricos de propagación del oleaje y de eventos como lo es el rebase, no es suficiente, por lo que la validación de estos modelos por medio de datos medidos en campo bajo las condiciones específicas que presenta la playa al norte de Puerto Caldera es indispensable para determinar la exactitud de los resultados obtenidos, así como posibles calibraciones que se le puedan realizar a estos para que se ajusten al comportamiento real de la zona de estudio.

1.1.3 Antecedentes del problema

García (2016), en su tesis presenta de manera extensa el estado del arte relacionado a la zona de rompientes, así como las ecuaciones de gobierno utilizadas en su modelado numérico.

El artículo por Roelvink et al. (2009) presenta una de las primeras evaluaciones del modelo XBeach, principalmente en su capacidad de simular condiciones de tormenta como lo son la erosión y el rebase. En este artículo se valida el modelo para distintos aspectos donde se presenta la importancia de las ondas infra gravitatorias en la zona de rompientes, así como también se determinó que los parámetros hidrodinámicos se predicen de manera correcta en el modelo.

En el estudio realizado por Bolle et al. (2011) se detalla la aplicación y validación de XBeach en tres sitios distintos en Bélgica y Ghana, tres sitios con diferentes estados iniciales y parámetros de interés.

Smit et al. (2017) muestra la validación, verificación y descripción del modo no hidrostático de XBeach, utilizando resultados de modelado físico para validar específicamente refracción y difracción, así como propagación y rotura de oleaje irregular. Los resultados obtenidos muestran que el modelo se comporta de manera adecuada cuando las olas se mantienen a poca profundidad. Además, se muestra que el proceso de rotura se simula correctamente, pero su disipación de subestima.

Kalligeris et al. (2020) presentan una aplicación reciente del modelo XBeach, así como la configuración usada en este. Principalmente se rescatan los parámetros usados para definir la correlación entre los resultados, donde se utiliza la raíz cuadrada media (RMS) y la "Brier Skill Score" (BSS).

El estudio realizado por Lashley et al. (2020) buscó cuantificar la exactitud y velocidad de computación de seis modelos usados para la propagación de oleaje en aguas poco profundas donde las ondas infra gravitatorias contribuyen de manera significativa. Dentro de estos se encontraba XBeach en su modo no hidrostático (XBeach-NH) y en su modo de Surf Beat, teniendo como principales resultados que, a pesar de tener menores tiempos de cómputo, el modelo XBeach-NH presenta resultados de gran calidad.

A pesar de la extensa bibliografía con respecto a la validación de XBeach en distintas playas en el mundo, donde se da un enfoque prioritario a la simulación de la morfodinámica. Hay muy pocos antecedentes de validación del modelo XBeach en las playas de Costa Rica. Destaca el trabajo presentado por Alfaro (2017), donde uno de los productos principales es la creación de la base de datos ROOL (Regionalización de Oleaje y Onda Larga), la cual es una base de datos que resume los parámetros de oleaje y onda infragravitatoria validados instrumentalmente. Y más allá de este producto, el estudio presenta el uso aplicado de la base de datos del ROOL, al utilizarla como insumo para el modelo XBeach para continuar la propagación hasta la playa, teniendo resultados conformes con observaciones en campo y el comportamiento del oleaje en el sitio, sin embargo, el modelo como tal no cuentan con una validación cuantitativa.

Con base en la revisión preliminar realizada, los documentos anteriores constituyen una referencia de utilidad para el presente trabajo, donde se da una idea de las distintas configuraciones del modelo, así como de los parámetros que generan mayor impacto a la hora de simular las condiciones del oleaje.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la capacidad del modelado numérico de la hidrodinámica del corto plazo del programa XBeach en la playa al norte de Puerto Caldera.

1.2.2 Objetivos específicos

Exponer la configuración del modelo XBeach en su modulo no hidrostático en una dimensión con la zona de rompiente en la playa de estudio.

Recopilar los insumos necesarios para las simulaciones numéricas, como levantamientos batimétricos y topográficos disponibles de la zona, mediciones o pronósticos de oleaje y mareas.

Calibrar el modelo XBeach para la reproducción de las condiciones hidrodinámicas del corto plazo de la playa en estudio con base en datos medidos en la zona.

Validar los resultados proporcionados por el modelo numérico calibrado por medio de campañas de campo adicionales.

Discriminar las condiciones de oleaje más probables para que se den eventos de rebase en la zona de estudio.

1.3 Delimitación del problema

1.3.1 Alcance

En el presente proyecto se busca evaluar las capacidades del modelo numérico XBeach. Para poder valorar dicho modelo se pretende compararlo con mediciones instrumentales en el sitio. Algunos de los insumos requeridos para la configuración de escenarios en el modelo son: información de oleaje, nivel del mar (marea), batimetría general y en detalle de la zona de estudio. La zona de estudio escogida es la playa ubicada al norte de Puerto Caldera, la cual se puede apreciar de mejor manera en la Figura 1-1. Esta área fue definida debido a que existen mediciones de oleaje en la zona, y además representa una zona de importancia debido a los eventos de rebase que se dan en la carretera cercana a la costa.

Los datos existentes de oleaje corresponden a mediciones realizadas en mayo del 2019, por lo que se utilizarán datos de marea astronómica de la fecha. Adicionalmente, se realizó una campaña de medición en marzo de 2021 donde se realizaron mediciones de oleaje y una batimetría del perfil a utilizar en el modelo numérico.

Como el modelo XBeach se enfoca en propagación de oleaje en aguas someras, y al limitar la modelación a una dimensión, la zona de estudio se limitará al perfil de análisis ubicado en la zona de menor separación entre la playa y la carretera como se muestra en la Figura 1-1.

Este modelo toma en cuenta procesos de rotura de las olas, reflexión, morfodinámica de las playas, interacción de energía entre ondas de diferentes frecuencias, entre otros. De estos procesos, el proyecto pretende evaluar únicamente los procesos asociados a la hidrodinámica del corto plazo, como lo es la propagación del oleaje, ondas infra gravitatorias, la rotura, el “run up” y el rebase. No se estará analizando la morfodinámica de la playa debido a la dificultad técnica que representa la medición en campo de procesos de erosión y evolución de la forma de la playa.

Con respecto a la determinación de parámetros de oleaje críticos, se pretende realizar simulaciones numéricas forzadas con distintos parámetros de oleaje y generar un gráfico con las combinaciones de parámetros que pueden causar rebase en la zona.

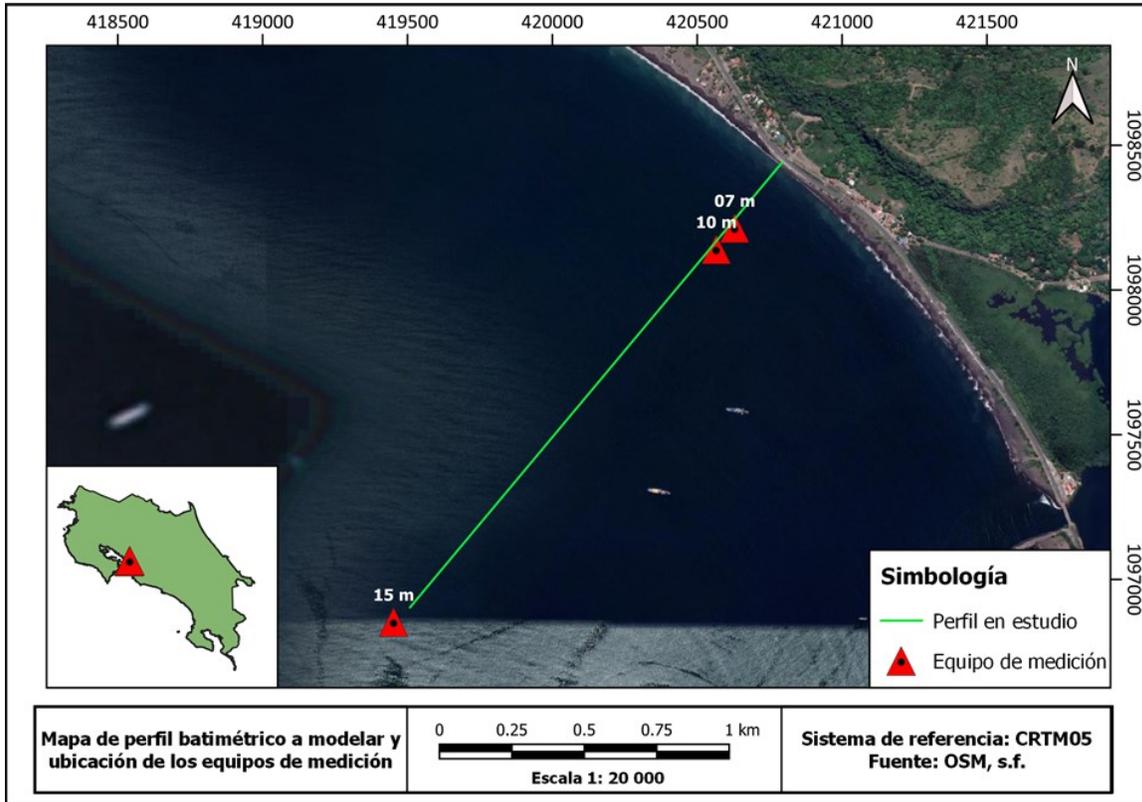


Figura 1-1. Ubicación de la zona de estudio

1.3.2 Limitaciones

Para poder medir la capacidad del modelo se requieren datos medidos en campo como base de comparación de los resultados obtenidos en XBeach. Debido a lo anterior, la calibración y validación del modelo se limita y es representativa de la zona de Caldera, ya que en esta ha disponibilidad de información existente de batimetría y mediciones de oleaje en campo.

Se pretende utilizar el modelo para la simulación de eventos de tormenta, los cuales presentan características que difieren de las condiciones de oleaje típicas, por lo que, al calibrar y validar el modelo a partir de datos tomados en condiciones típicas de oleaje, los resultados no reflejan completamente el comportamiento del modelo bajo condiciones de tormenta.

1.4 Metodología

La metodología por seguir para la elaboración del proyecto propuesto se muestra en la Figura 3 y la Figura 4. Esta está definida por cinco etapas principales. La primera etapa corresponde a la revisión bibliográfica acerca del modelado de la zona de rompiente, la segunda etapa se enfoca en la recopilación de los datos necesarios para la modelación, la tercera etapa

corresponde al modelado numérico y validación del programa, la cuarta etapa busca determinar las condiciones críticas de oleaje que generan el rebase de las olas en la zona de estudio, y en la quinta etapa se presentaran las conclusiones y recomendaciones finales del proyecto.

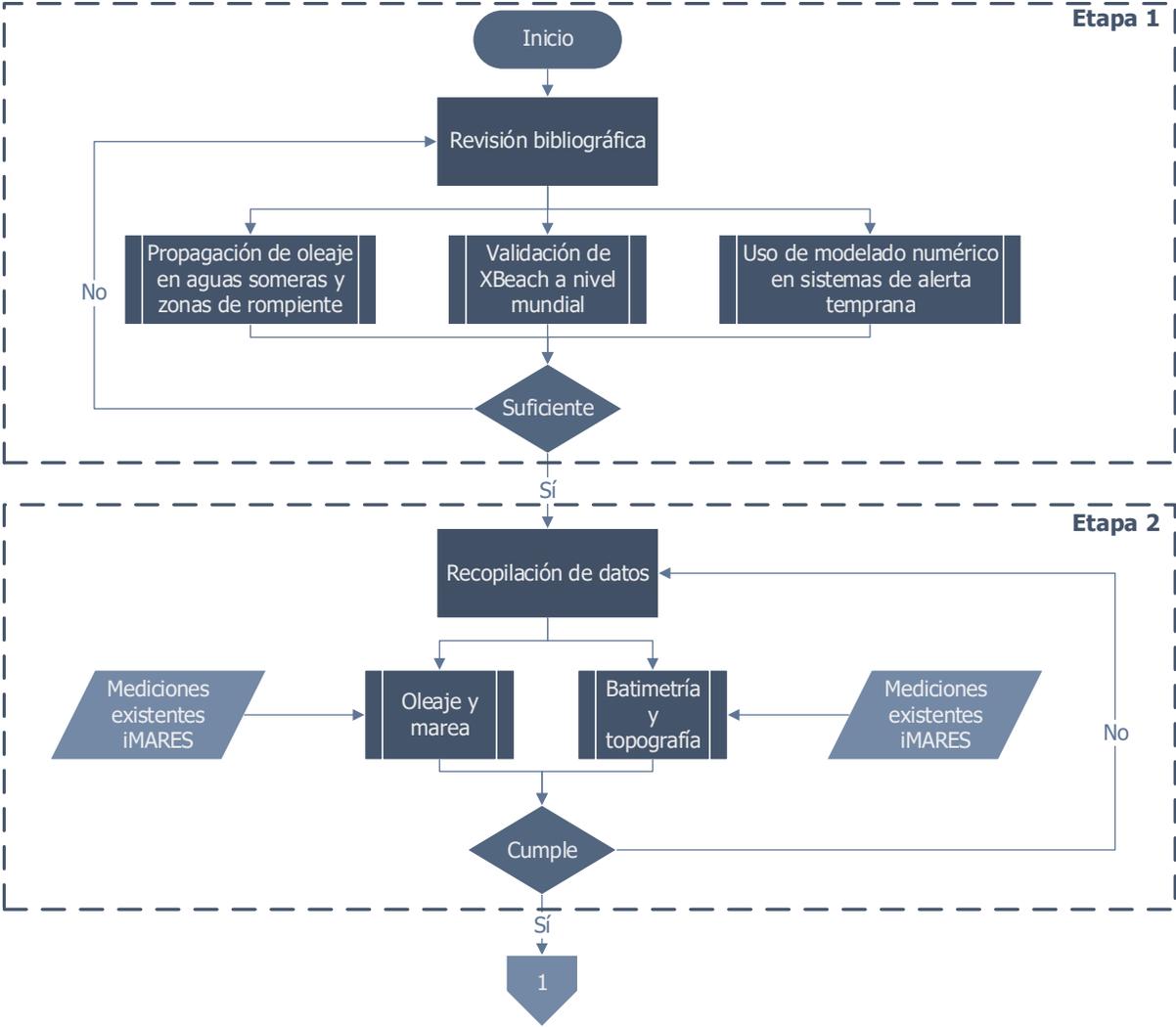


Figura 1-2. Metodología

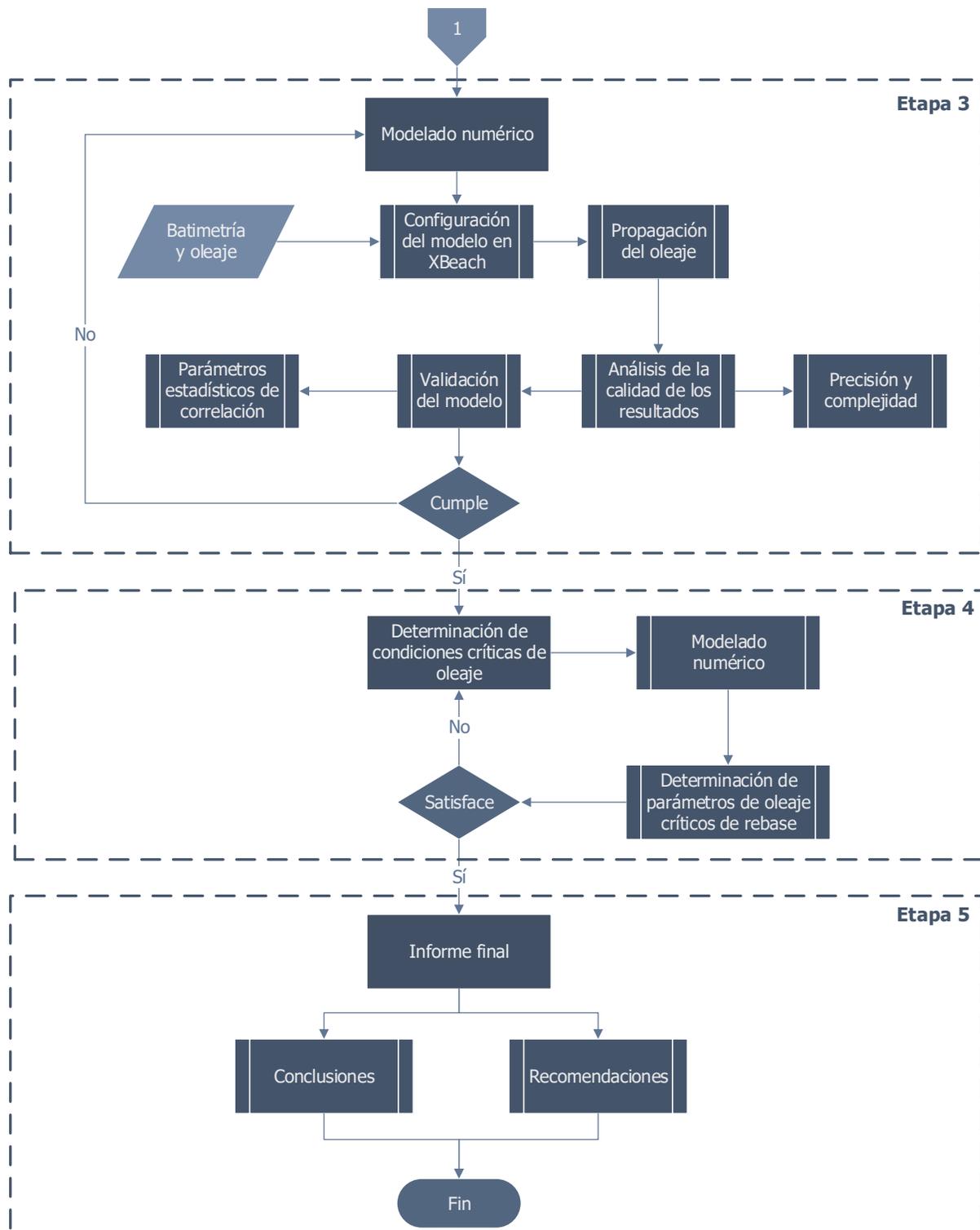


Figura 1-3. Metodología (cont.)

1.4.1 Etapa 1. Revisión bibliográfica

En esta etapa se busca profundizar con una revisión bibliográfica acerca de los modelos numéricos que resuelven el comportamiento de propagación de oleaje en la zona de rompiente, así como su idoneidad según el tipo de costa.

También, en esta etapa se revisan trabajos realizados a nivel mundial, similares al propuesto para comparar las metodologías a utilizar y los resultados obtenidos, así como la puesta en práctica de sistemas de alerta temprana para tener una referencia de posibles aplicaciones a partir de la validación del modelo.

1.4.2 Etapa 2. Recopilación de datos

La etapa dos consiste en la obtención de la información necesaria para la configuración del modelo numérico.

Para la obtención de la batimetría y topografía del sitio de estudio, se analiza información puesta a disposición por la Unidad de Ingeniería Marítima de Ríos y Estuarios (IMARES).

Los datos de oleaje y marea astronómica se le solicitan a IMARES y, con su ayuda, se busca instalar equipo para medir el oleaje en la playa de estudio. El equipo instalado es tipo ADCP en el fondo y a lo largo de los perfiles a medir en la playa de estudio.

Se analiza la calidad de la información obtenida, así como su resolución, niveles de referencia, sistemas de coordenadas y la existencia de los elementos morfológicos relevantes para las simulaciones.

1.4.3 Etapa 3. Modelado numérico

Con la información recopilada de la Etapa 2 y con la investigación bibliográfica realizada en la Etapa 1, se configura el modelo numérico XBeach para propagar el oleaje hasta la costa. Esta propagación se realiza por medio del módulo no hidrostático de XBeach, el cual permite una mejor aproximación del comportamiento de run up y rebase en la zona de rompientes. El modelo se fuerza utilizando las medidas de campo de oleaje.

Los resultados de la simulación son la propagación del oleaje en el perfil de estudio, el cual comprende una zona crítica de acuerdo con la información obtenida, también por medio de

boyas virtuales, se obtienen los estados de mar en puntos específicos de la malla que coinciden con los puntos de medición de los datos en campo.

Se validan de manera cuantitativa los resultados de las simulaciones numéricas con los datos medidos en campo. Para la validación se compararán los resultados obtenidos en las boyas virtuales con los obtenidos en las medidas en campo en los mismos puntos. Para determinar la correlación entre los resultados, se pretende utilizar el coeficiente de correlación de Pearson, así como el factor R, el error cuadrático medio (RMSE), entre otros.

Por último, se analiza la calidad de los resultados en cuanto a precisión y complejidad para configurar los casos y los tiempos de cálculo computacional.

1.4.4 Etapa 4. Condiciones críticas de oleaje

Una vez validado el modelo, se procede a discretizar las condiciones de oleaje que representarían situaciones inaceptables de rebase en la zona de estudio.

Se realizan distintas configuraciones del modelo para determinar las combinaciones de periodo de ola y altura de ola que implicarían rebase sobre la carretera. Lo anterior se discrimina en rangos prácticos de utilidad para una aplicación futura de alerta temprana de eventos de rebase en la zona.

1.4.5 Etapa 5. Conclusiones y recomendaciones

Las conclusiones sintetizan las lecciones aprendidas en la realización del proyecto, específicamente el cumplimiento de los objetivos del proyecto, teniendo la validación del programa XBeach como producto principal. Las recomendaciones incluyen aspectos relevantes que se deben tener en cuenta en estudios similares, esto considerando los alcances y limitaciones del proyecto.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades del oleaje

La variación en la superficie libre del océano sucede por distintas causas, siendo las principales la acción del viento, eventos sísmicos y la atracción gravitacional entre la Tierra, la Luna y el Sol (Toffoli & Bitner-Gregersen, 2017). Normalmente estas fuerzas generadoras son compensadas por la gravedad, la cual se define como una fuerza restauradora, sin embargo, también se da la presencia de fuerzas capilares (periodos muy bajos) y de la fuerza de Coriolis (periodos muy altos) como fuerzas restauradoras en el oleaje (Toffoli & Bitner-Gregersen, 2017). Estas fuerzas de la naturaleza determinan el tipo de onda que se generará y generalmente, las características de esta.

En la Figura 2-1 se pueden observar distintos tipos de olas clasificados por la frecuencia de sus ondas, así como las fuerzas generadoras y restauradoras de estas. Como se puede ver, el viento es una de las principales fuerzas generadoras tanto del oleaje de corto plazo como de las ondas infra gravitatorias.

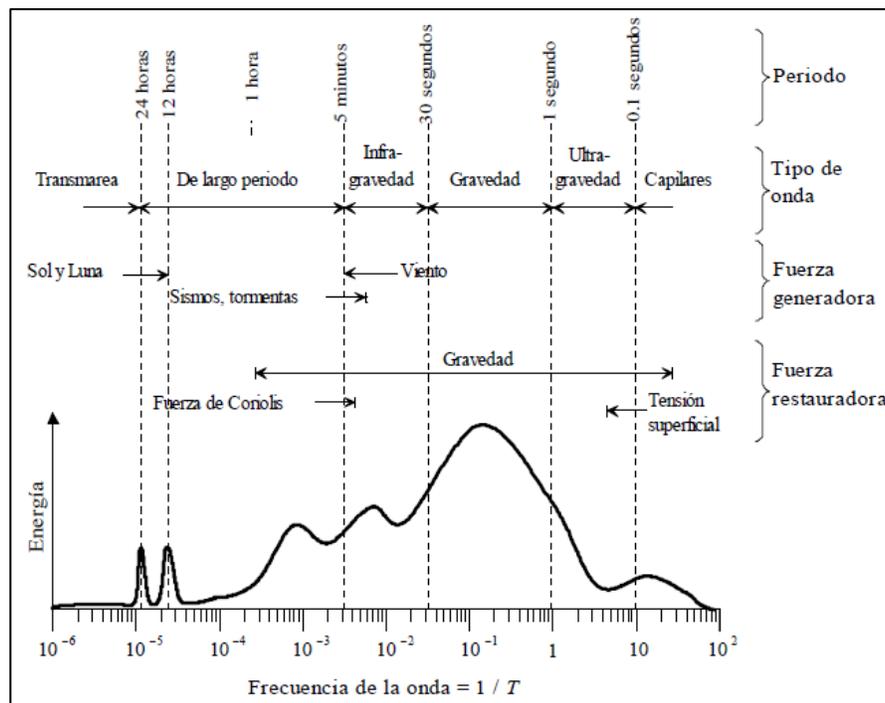


Figura 2-1. Período energía de las ondas

Fuente: (como se cita en Silva, 2005)

Dentro de este tipo de ondas, resaltan las ondas infra gravitatorias, las cuales representan gran importancia en los valores de run-up y rebase en playas, especialmente en situaciones de temporal (Lara et al., 2011).

El oleaje también se puede clasificar de acuerdo con la fuente de su origen, teniendo el oleaje local ("sea"), el cual se produce en la zona de generación donde se ve gran irregularidad en las olas, y el oleaje distante ("swell"), el cual se propaga lejos de su zona de generación donde las olas han perdido energía y son más ordenadas (Silva, 2005) por lo que se pueden estimar y predecir.

Conforme el oleaje se acerca a la costa, este sufre distintas transformaciones asociadas a la variabilidad del fondo, y se ve más afectado por las características propias de su entorno, como lo puede ser el lecho marino, la geometría de la playa, la presencia de vegetación, entre otros.

Los principales procesos de transformación del oleaje se definen a continuación (Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (GIOC), 2000):

- Asomeramiento: Variación en la altura y longitud de onda conforme el oleaje se acerca a la costa. Este fenómeno se da meramente por la influencia del fondo al aproximarse a la costa.
- Refracción: Cuando el oleaje incide en una dirección oblicua sobre la costa, una parte del frente irá en aguas menos profundas, por lo que su velocidad (celeridad) disminuye propiciando un cambio general en la dirección del oleaje, el cual tiende a una incidencia perpendicular a la batimetría del sitio. Este efecto se da por los cambios en profundidad, así como también se pueden dar por la influencia de corrientes que retrasen el frente del oleaje.
- Difracción: Este fenómeno se da cuando, bajo la presencia de una estructura u objeto, se genera una zona de sombra tras estas hacia la cual cierta energía de las olas se transmite, es decir, se da una cesión lateral de la energía.
- Reflexión: Conforme se acerca a la costa, una ola se puede ver afectada por la reflexión de las olas anteriores a esta con la playa o con estructuras. En playas reflejantes, este fenómeno es de gran importancia en la hidrodinámica de la zona de rompientes.
- Disipación: La disipación de la energía en las olas se da principalmente por la proximidad del fondo, percolación, fricción y la rotura.

2.2 Medición del oleaje

Actualmente se presenta la disponibilidad de gran variedad de instrumentos y técnicas para la obtención de datos de oleaje. El equipo disponible para la medición en campo se divide principalmente en: sensores de nivel, equipos acústicos, sensores de presión, equipos ópticos (generalmente video o satélite) y datos visuales. También está la posibilidad de utilizar retro análisis basado en datos meteorológicos (por ejemplo, los datos proporcionados por NOAA) en caso de escasos de datos de campo (Silva, 2005).

En el presente estudio, se hace el uso de equipos de tipo perfiladores acústicos de corriente (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP, por sus siglas en inglés), los cuales se describen en más detalle a continuación.

2.2.1 Perfiladores acústicos de corriente (ADCP)

Los perfiladores acústicos de corriente (ADCP) son utilizados en la medición del movimiento del agua, tanto en forma de oleaje como de corrientes (Trembanis et al., 2021). Estos usualmente se anclan en el fondo marino, en conjunto con sensores de presión, para la medición de la columna de agua completa.

Los ADCPs se basan en el efecto Doppler y la reflexión de las ondas sonoras en las partículas suspendidas en el agua (Trembanis et al., 2021). Estos equipos emiten ondas sonoras a una frecuencia determinada a través de distintos haces acústicos que pueden encontrarse inclinados (corrientes y direcciones) o verticales (superficie libre). Así como emiten las ondas sonoras, los ADCPs poseen sensores acústicos que reciben las ondas reflejadas y, a partir de la diferencia en frecuencias de las ondas, se obtienen datos como la velocidad y dirección de corrientes de aguas a distintas profundidades en la columna de agua, y también las series de superficie libre sobre el instrumento.

Actualmente este tipo de equipos es ampliamente utilizado en los estudios de medición de oleaje, ya que, un ADCP anclado en el fondo marino con sensores verticales e inclinados permite una medición precisa de altura y dirección de olas tanto en aguas profundas como someras. Y si incorpora sensores de presión, presenta además la posibilidad de revisiones de consistencia en las mediciones (Kasinatha Pandian et al., 2010).

2.3 Análisis del oleaje

El análisis del oleaje parte de algunas hipótesis básicas; el oleaje es un proceso estocástico, estacionario y ergódico. A continuación se resumen estas hipótesis de acuerdo a lo mostrado por Silva (2005).

El oleaje, por su naturaleza, es un proceso prácticamente aleatorio. Este se puede considerar como la superposición de distintas ondas sinusoidales con dirección, amplitud y frecuencia aleatorias (ver Figura 2-2). Debido a esto, el análisis del oleaje debe ser un proceso estadístico a partir de una función muestra la cual se puede resumir en la siguiente ecuación:

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

Donde:

- η : Perfil de superficie libre
- a : Amplitud
- σ : Frecuencia angular ($2\pi/T$)
- T : Periodo de la onda
- θ : Ángulo de incidencia
- ε : Fase
- x, y : Posición espacial de la onda
- t : Tiempo

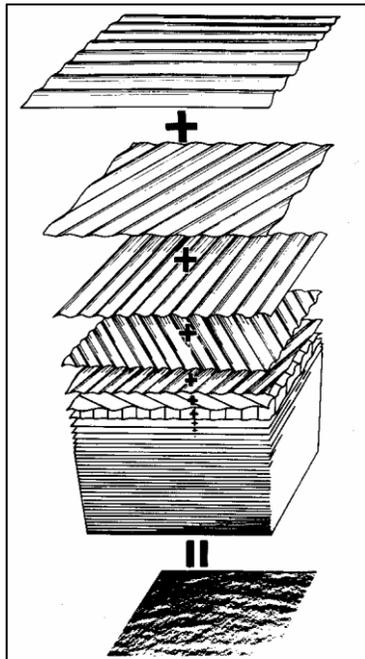


Figura 2-2. Estructura del oleaje aleatorio

Fuente: (como se cita en Silva, 2005)

Al considerar estacionario al oleaje, se está considerando que, durante un determinado periodo de tiempo, las características o aspectos que influyen el oleaje generan cierto equilibrio que causa que haya constancia. Al periodo de tiempo necesario para que haya estacionariedad, se le conoce como estado de mar.

La mayor parte de los procesos considerados estacionarios, también se pueden considerar como ergódicos. Un proceso se puede considerar ergódico si no hay variación entre los estadísticos de un proceso aleatorio y estacionario para distintas muestras.

A través de estas hipótesis, la ecuación inicial, se puede llegar a simplificar a la siguiente:

$$\eta(t) = \sum_i \eta_i(t) = \sum_i a_i \cos(\sigma_i t - \varepsilon_i) \quad [2]$$

Para los estados de mar mencionados, existen dos tipos de análisis que se le realizan a las señales de oleaje medidas en campo: el análisis temporal (dominio del tiempo) y el análisis espectral (dominio de la frecuencia).

2.3.1 Análisis temporal

El análisis temporal, también conocido como análisis estadístico, busca determinar propiedades estadísticas de un estado de mar a partir de una serie temporal de $\eta(t)$, que en muchas ocasiones proviene de un equipo de medición. Pero antes de poder evaluar los parámetros estadísticos del estado de mar, es necesario procesar las señales obtenidas directamente del equipo.

En primer lugar, se debe realizar la corrección del nivel medio. Para esto existen distintos métodos de corrección, donde se aproxima el nivel medio desde orden cero hasta el que se considere necesario (en el presente trabajo se utilizó una corrección del nivel medio de orden 5). Este valor medio se les resta a los valores originales con el fin de obtener una serie corregida.

$$\eta_{i \text{ corregida}} = \eta_{i \text{ original}} - \bar{\eta} \quad [3]$$

Después de corregir la señal por el nivel medio, se procede a caracterizarla, es decir, a obtener las alturas y periodos de cada ola en la señal. Los principales métodos de caracterización son: método de pasos descendentes por cero, método de pasos ascendentes por cero, método de

crestas y método de valles. Uno de los más utilizados, y el empleado en este análisis, es el método de pasos ascendentes por cero.

Este método se centra en la determinación de los pasos ascendentes según el criterio mostrado en la Ecuación [4]. Además, para definir valores máximos y mínimos se siguen los criterios de la Ecuación [5], donde a partir de tres puntos $(\eta_{i-1}, \eta_i, \eta_{i+1})$ se realiza un ajuste parabólico (ver Figura 2-3).

$$\eta_i * \eta_{i+1} < 0 \quad y \quad \eta_{i+1} > 0 \quad [4]$$

$$\eta_{i-1} < \eta_i \quad y \quad \eta_i > \eta_{i+1} \quad [5]$$

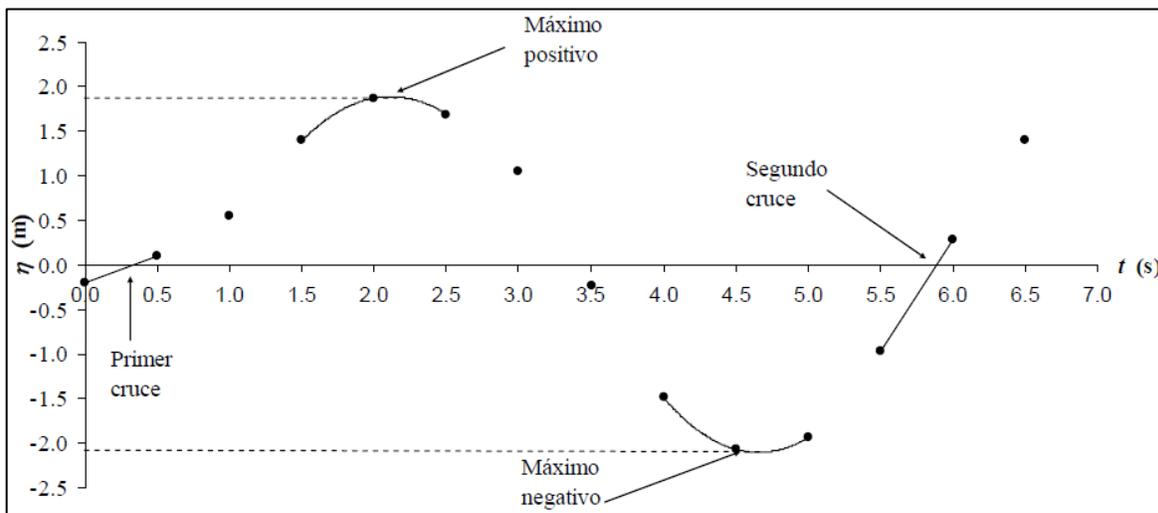


Figura 2-3. Visualización gráfica de método de pasos ascendentes por cero

Fuente: (Silva, 2005)

Cada ola se encuentra en el intervalo entre dos pasos ascendentes (definido como el periodo) y su altura será la diferencia entre los valores máximos y mínimos encontrados.

Una vez discretizada la serie temporal, se pueden calcular los parámetros estadísticos más importantes para definir un estado de mar en el dominio del tiempo. Estos parámetros se encuentran resumidos en la Figura 2-4 para la altura, considerando que estos son aplicables de igual manera al periodo, donde es recomendable asociar ambas variables y no trabajarlas como si estas fueran independientes.

Parámetros Estadísticos del oleaje	
1. Altura máxima de ola (H_{max})	$H_{max} = H_1$
2. Altura media de ola (H_m)	$H_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i$
3. Altura cuadrática media de ola (H_{rms})	$H_{rms} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2 \right]^{1/2}$
4. Altura de ola un medio ($H_{1/2}$)	$H_{1/2} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N/2} H_i$
5. Altura de ola un tercio o significativo (H_s)	$H_s = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^{N/3} H_i$
6. Altura de ola un décimo ($H_{1/10}$)	$H_{1/10} = \frac{10}{N} \sum_{i=1}^{N/10} H_i$
<p>N: Número total de olas individuales del registro</p> <p>H_i: Serie de alturas de ola individuales del registro, ordenadas de mayor a menor</p>	

Figura 2-4. Parámetros estadísticos del oleaje en el dominio del tiempo

En la Figura 2-5 se muestra un resumen de la metodología a seguir al realizar el análisis en el dominio del tiempo de un estado de mar (Silva, 2005).

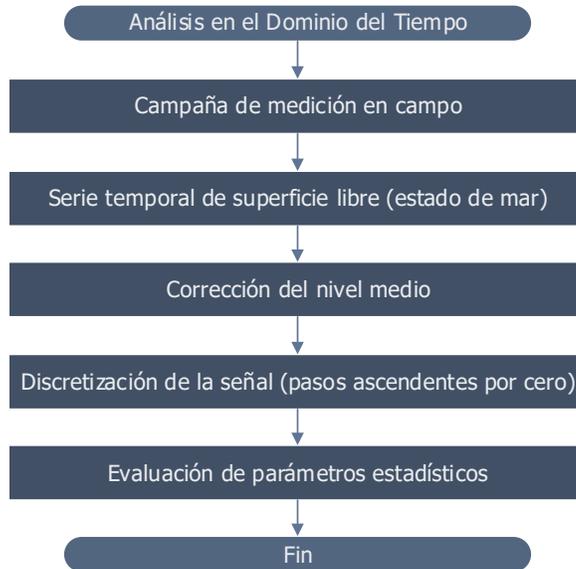


Figura 2-5. Metodología para el análisis temporal del oleaje

2.3.2 Análisis espectral

El análisis espectral o en el dominio de la frecuencia, se basa en que la función de superficie libre es el resultado de la suma de distintas ondas. Para calcular las frecuencias, y consecuentemente, la energía de cada valor, se utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT), la cual tiene como base la Transformada Discreta de Fourier (DFT). Para el análisis, la superficie libre se puede representar de la siguiente manera:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{N/2} [a_n \cos(2\pi f_n t) + b_n \text{sen}(2\pi f_n t)] \quad [6]$$

Donde:

η : Perfil de superficie libre
 a_n, b_n : Coeficientes de Fourier
 f_n : Frecuencia
 t : Tiempo

Al igual que para el análisis temporal, se debe realizar una corrección inicial por el nivel medio. Para esto se pueden utilizar los métodos propuestos para el dominio del tiempo, pero en caso de que la marea tenga un gran efecto, se debe realizar una corrección espectral, donde se filtran las frecuencias de la marea (ondas largas), usualmente las frecuencias menores a 0.02 Hz.

También, debido a que la FFT implica ciertas suposiciones, como que la muestra es periódica, usualmente se le aplica a la serie una función ventana en los extremos con el fin de que no haya discontinuidades. Las funciones ventana aplican un factor de peso, $b(t_*)$, a los puntos de la serie temporal como se muestra:

$$\eta(t_*) = b(t_*)\eta(t_*) \quad [7]$$

Una vez realizada la corrección del nivel medio y de los extremos de la serie, se puede realizar el cálculo de las componentes de Fourier. En la Ecuación [8] y la Ecuación [9] se muestra el par transformado de Fourier, que describe de manera compleja a $\eta(t)$.

$$F(\sigma) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t)e^{-i\sigma t} dt \quad [8]$$

$$\eta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\sigma)e^{i\sigma t} d\sigma = 2 \int_0^{\infty} F(\sigma)e^{i\sigma t} d\sigma \quad [9]$$

Al tener en cuenta que los datos medidos en campo son finitos, las ecuaciones anteriores se pueden traducir a:

$$F(f_j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \eta_n e^{-i2\pi f_j n \Delta t} \quad [10]$$

Donde:

- $j: 1, 2, \dots, N/2$
- N : Número de datos
- Δt : Intervalo de muestreo

Como se puede ver, el desarrollo mencionado se ha hecho a partir de la frecuencia angular, σ_j , por lo que, la siguiente ecuación correlaciona la frecuencia angular con la frecuencia, f_j :

$$\sigma_j = 2\pi f_j = \frac{2\pi j}{T} \quad [11]$$

En la actualidad, estos cálculos se resuelven utilizando la FFT, la cual se limita a registros que posean un número de datos $N=2^m$. En el caso de este proyecto, se utilizan registros de $N=1024$ (2^{10}) datos. Los cálculos de la FFT se resumen en el cálculo de la función de densidad espectral:

$$S(f_n) = 0 \text{ para } n = 0 \quad [12]$$

$$S(f_n) = \frac{1}{2\Delta f} |2F(f_n)|^2 \text{ para } n = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} \quad [13]$$

Donde:

$$f_n: n\Delta f$$

$$\Delta f: \frac{1}{N\Delta t}$$

Al igual que con el análisis en el dominio del tiempo, una vez estimado el espectro, se pueden calcular los parámetros espectrales, los cuales se resumen en la Figura 2-6.

Parámetros Espectrales del oleaje	
1. Momento de orden n (m_n)	$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df$ $m_n = \Delta f \sum_{i=1}^N f_i^n S(f_i)$
2. Anchura espectral (ε) (Cartwright & Longuet-Higgins, 1956)	$\varepsilon = \left[1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4} \right]^{1/2}$
3. Anchura espectral (ν) (Longuet-Higgins, 1983)	$\nu = \left[\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \right]^{1/2}$
4. Agudeza de pico (Q_p) (Goda, 1970)	$Q_p = \frac{2}{m_2} \int_0^{\infty} f (S(f))^2 df$
5. Periodo medio (T_m)	$T_{01} = \frac{m_0}{m_1}$ $T_{02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$
6. Altura de ola cuadrática media (H_{rms})	$H_{rms} = \sqrt{8m_0}$
7. Altura de ola momento orden cero (H_{m0}) *	$H_{m0} = 4.004 \sqrt{m_0}$
f: Frecuencia S(f): Función espectral * En espectros de banda ancha, $H_{m0} = H_s$	

Figura 2-6. Parámetros espectrales del oleaje en el dominio de la frecuencia

En la Figura 2-7 se muestra un resumen de la metodología a seguir al realizar el análisis en el dominio del tiempo de un estado de mar (Silva, 2005).

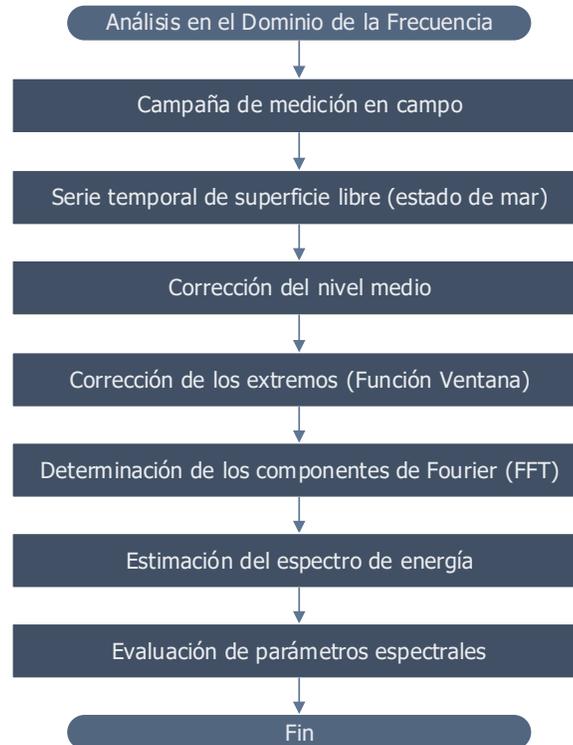


Figura 2-7. Metodología para el análisis espectral del oleaje

2.4 Modelos de propagación del oleaje

2.4.1 Generalidades

La capacidad de predecir el comportamiento del oleaje y hacerlo con cierto nivel de confianza es fundamental tanto para el desarrollo de estructuras marítimas, como para la protección de costas y vidas humanas. Para esto se han desarrollado distintos modelos numéricos que simulan y pronostican el comportamiento del oleaje, todos con distintas limitaciones según cada una de sus formulaciones.

Generalmente, los modelos de propagación del oleaje se pueden dividir en: modelos que resuelven la fase y modelos de fase promediada. Los modelos que resuelven la fase se basan en las ecuaciones de conservación de la masa y cantidad de movimiento integradas en vertical. Por otro lado, los modelos de fase promediada se enfocan en la conservación de energía espectral y toman en cuenta los efectos de la generación y disipación de energía en el oleaje (Guisado Pintado et al., 2010).

Los modelos que resuelven la fase se limitan a áreas pequeñas y se pueden dividir en aquellos basados en la teoría lineal de propagación de ondas y los basados en la simulación de la superficie libre.

Los modelos basados en la teoría lineal de ondas, como el de la pendiente suave (mild-slope), son adecuados para la simulación de procesos de refracción y difracción. La principal desventaja de estos modelos recae la dificultad relacionada a las condiciones de frontera de los modelos (F. Liu & Losada, 2000).

En el caso de los modelos asociados a la simulación de la superficie libre, como las aproximaciones de Boussinesq o ecuaciones de Stokes, se centran en la ecuación de continuidad y conservación del momento de inercia para ondas en superficie libre. Estos modelos son capaces de simular procesos como la refracción, difracción, reflexión e incluso la rotura de la ola (Guisado Pintado et al., 2010). Debido a su alta capacidad de modelado, representan un gran costo computacional, así como requieren de mayores datos de entrada y definición de parámetros para su uso.

2.4.2 Dinámica del flujo de fluidos

Esta se divide en tres principios principales: Principio de conservación de la masa, Principio de conservación del momento y Principio de conservación de la energía. A continuación, se describen de manera general estos tres principios, pero, en primer lugar, se considera importante definir el tensor de esfuerzos, concepto base para estos principios.

Los esfuerzos (fuerza por unidad de área) son tensores de segundo orden (σ_{ij}), lo que quiere decir que estos actúan sobre una superficie con un vector normal, por lo que, la magnitud y dirección de estos esfuerzos va a depender tanto de la posición de la superficie como de la dirección del vector normal (Svendsen, 2006). Siendo un tensor de segundo orden, el índice "i" representa la dirección del vector normal y el índice "j" representa la dirección del esfuerzo en la superficie, teniendo que el tensor posee nueve componentes en un espacio tridimensional (Svendsen, 2006):

$$\sigma_{ij} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{Bmatrix} \quad [14]$$

Con esta definición clara, se presentan los principios mencionados de acuerdo con lo presentado por (Svendsen, 2006):

El principio de conservación de la masa en fluidos está representado por la siguiente ecuación:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho v \cdot v = 0 \quad [15]$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido
 v : Velocidad del fluido (vector tridimensional)

Tomando como suposiciones que el flujo es incompresible y la densidad es constante, así como utilizando las formulaciones Eulerianas, la Ecuación [15] se transforma en lo que se conoce como la ecuación de continuidad:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad \text{o} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad [16]$$

Donde:

∇ : Gradiente
 u, v, w : Velocidades en las tres direcciones

El principio de conservación de momento se define por la ecuación de momento, que en términos de esfuerzos se puede representar como:

$$\frac{dv}{dt} = g + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \sigma_{ij} \quad [17]$$

Donde:

g : Aceleración de la gravedad

Los esfuerzos se desarrollan gracias a fuerzas intermoleculares, y están pueden modelarse a partir de la viscosidad dinámica (μ) del mismo. Además, al utilizar la relación entre los esfuerzos y la deformación para fluidos Newtonianos, y la Ley de Viscosidad de Stokes, se relacionan los esfuerzos con la velocidad del fluido, teniendo la ecuación de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot (\nabla v) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + g + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v \quad [18]$$

Donde:

μ : Viscosidad dinámica del fluido
 p : Presión

La ecuación de continuidad en conjunto con la ecuación de Navier-Stokes (de momento) representan las ecuaciones que definen el flujo del oleaje teniendo como incógnitas la velocidad y la presión, y teniendo como suposiciones, que el fluido es un líquido incompresible con presión constante y Newtoniano.

Finalmente, la disipación de la energía se da debido a las fuerzas internas que transforman parte de la energía mecánica del flujo en calor. La ecuación que describe esta pérdida de energía está dada por:

$$\epsilon = \mu \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad [19]$$

Donde:

ϵ : Disipación de energía por unidad de volumen

Al momento de modelar la propagación del oleaje, se deben resolver estas ecuaciones de gobierno, las cuales, computacionalmente, de manera directa no se pueden resolver. Por esto, se han implementado una serie de métodos que implican distintas hipótesis y suposiciones que hacen posible el cálculo de la hidrodinámica en el dominio de estudio.

A continuación, se describen algunos de los modelos más utilizados para el modelaje de la propagación del oleaje, los cuales se resumen en distintos acercamientos para resolver de manera eficiente y lo suficientemente precisa, las ecuaciones de gobierno mostradas anteriormente.

2.4.3 Modelos integrados en profundidad

La base de los modelos integrados en profundidad es, como lo dice su nombre, integrar las ecuaciones diferenciales de continuidad presentadas desde el fondo hasta la superficie libre, donde las diferencias entre distintos modelos del mismo tipo radican en la definición de sus condiciones de los contornos (Svendsen, 2006).

Algunos modelos se basan en la teoría lineal, como por ejemplo la Teoría del Rayo, la Ecuación de la Pendiente Suave y Ecuaciones de Stokes de primer orden (P. L. F. Liu & Losada, 2002). Sin embargo, en aguas someras donde los efectos de la fricción en el fondo y los esfuerzos provocados por el viento local (procesos altamente no lineales) comienzan a ser mucho más relevantes, este tipo de modelos dejan de tener validez (Ávila et al., 2003).

También se presentan los modelos de tipo Boussinesq, los cuales están diseñados para resolver los procesos en aguas someras, cerca de la zona de rompiente. Estos modelos parten de las ecuaciones de continuidad y conservación de momento de Boussinesq y se han desarrollado hasta las siguientes ecuaciones (P. L. F. Liu & Losada, 2002):

$$\eta_t + \nabla \cdot [(\eta + h)u_\alpha] + \nabla \cdot \left\{ \left(\frac{z_\alpha^2}{2} - \frac{h^2}{6} \right) h \nabla (\nabla \cdot u_\alpha) + \left(z_\alpha + \frac{h}{2} \right) h \nabla (\nabla \cdot hu_\alpha) \right\} = 0 \quad [20]$$

$$u_a + \frac{1}{2} \nabla |u_\alpha|^2 + g \nabla \eta + z_\alpha \left\{ \frac{1}{2} z_\alpha \nabla (\nabla \cdot u_{\alpha t}) + \nabla (\nabla \cdot (hu_{\alpha t})) \right\} = 0 \quad [21]$$

Donde:

η : Superficie libre

h : Profundidad del fondo

u_a : Vector horizontal de velocidad a la profundidad z_α

z_α : Usualmente se toma como $-0.531 h$

g : Aceleración gravitacional

∇ : Gradiente horizontal $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$

Las ecuaciones no-lineales para aguas someras (NLSWE por sus siglas en inglés) se presentan como un modelo apropiado para el modelaje en aguas someras y zonas de rompiente. Estas ecuaciones surgen de las aproximaciones de Boussinesq, resolviendo procesos con mayor grado de no linealidad. Incluyen los principios de conservación de la masa y el momento, pero no representan la disipación de energía, por lo que, en su resolución numérica, se incorporan usualmente parámetros de disipación artificialmente (Svendsen, 2006).

2.4.4 Modelos numéricos de generación y propagación de ondas largas

En aguas poco profundas el comportamiento del oleaje comienza a ser influenciado por los efectos no lineales debidos a la pendiente del fondo, también se presentan mayores dispersiones tanto en amplitud como en frecuencia del oleaje entre otros fenómenos como la rotura de la ola y el rebase (G. S. Stelling & Zijlema, 2010).

Para poder modelar de manera adecuada los fenómenos en aguas poco profundas tanto en el rango de frecuencias asociado al surf-beat, así como las ondas infra gravitatorias que puedan afectar la zona. Los siguientes modelos integrados en profundidad que resuelven las ecuaciones del movimiento del flujo son capaces de solventar los requisitos para una simulación adecuada de la zona de aguas poco profundas (Alfaro, 2017):

- Modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq.
- Modelos que resuelven mediante hipótesis que simplifican las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas según Reynolds.

- Modelos que resuelven las ecuaciones no lineales de aguas poco profundas (NLSW, por sus siglas en inglés).

Los modelos de tipo Boussinesq, basados en las ecuaciones de Boussinesq se presentan inicialmente por Peregrine en 1967 (como se cita en Ávila et al., 2003), donde se emplearon para modelar el oleaje en aguas poco profundas y con fondo de pendiente variable, sin embargo, este modelo se limitaba únicamente a aguas someras. Con el pasar del tiempo se han realizado modificaciones y mejoras a este tipo de modelos, por ejemplo el aporte de Madsen et al. (1991, como se cita en Ávila et al., 2003) quien incorpora un parámetro de dispersión, o trabajos como los de Nwogu (1993, como se cita en Alfaro, 2017) que ampliaron el rango de aplicación del modelo desde aguas intermedias a aguas someras. Posteriormente se presentaron ecuaciones capaces de tomar en cuenta los efectos no lineales de manera más completa (Wei et al., 1995; Gobbi y Kirby, 1999, como se cita en Alfaro, 2017), sin embargo estos esfuerzos a su vez implicaron un incremento en la demanda computacional e implementación numérica de simulaciones.

Los modelos CFD (Computational Fluid Dynamics) son parte de los modelos que resuelven la fase por medio de simplificaciones de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS por sus siglas en inglés) de manera tridimensional (Alfaro, 2017), sin embargo, este tipo de modelado se considera de gran dificultad debido a que este debe ser capaz de rastrear la superficie libre durante la rotura de la ola, debe poder modelar la turbulencia y su evolución durante todo el proceso de rotura, y por esto también implica una demanda muy alta de recursos computacionales para su implementación (P. L. F. Liu & Losada, 2002).

Otro tipo de modelos que resuelven la fase son basados en las ecuaciones no lineales de aguas someras (*Non Linear Shallow Water* NLSW, por sus siglas en inglés), y estos pueden simular especialmente la propagación del oleaje en zonas de rotura y la zona de ascenso y descenso del oleaje, donde predomina el comportamiento no lineal (Alfaro, 2017). Dentro de los modelos que resuelven las NLSW promediadas en profundidad, se encuentra el modelo XBeach en su modo no hidrostático (Smit et al., 2017).

2.5 XBeach

El modelo XBeach (Roelvink et al., 2009) es un modelo numérico inicialmente creado para la simulación de procesos hidrodinámicos y morfodinámicos e impactos en costas arenosas a causa de huracanes. Desde entonces, el modelo se ha aplicado a otros propósitos y costas, ampliando así, su alcance de uso.

El modelo puede simular procesos hidrodinámicos en aguas poco profundas tanto en perfiles en una dimensión como en dos dimensiones. Trabaja la transformación de la onda corta (refracción, ruptura y deformación), así como la transformación de la onda larga (infra gravedad), su generación, propagación y disipación. Este modelo, también es capaz de analizar la carga sobre el fondo, transporte de sedimentos, erosión, entre otros procesos morfodinámicos (van Dongeren, 2017).

En su modo no hidrostático, XBeach resuelve las NLSW. Este modo resuelve la fase y puede simular los procesos físicos de propagación del oleaje como refracción, difracción, asomeramiento y rotura. Sin embargo, su característica principal es simular la propagación del oleaje en zonas de rotura, rompientes y zona de swash (ascenso y descenso del oleaje), donde dominan los procesos no lineales. El modo no hidrostático usado en XBeach es capaz de predecir los puntos de rotura de manera precisa teniendo como mayor ventaja que al modelo no hay que incorporarle parámetros externos de rotura (Smit et al., 2017). Además, XBeach, al ser un modelo de código libre presenta grandes ventajas de libertad de uso.

2.5.1 Módulo hidrostático

La estrategia del modelo XBeach para el forzamiento de las olas utiliza la ecuación de balance de energía dependiente del tiempo, cuya representación matemática es (Roelvink et al., 2009):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = -\frac{D_w}{\sigma} \quad [22]$$

Donde:

A : Acción del oleaje

c_x, c_y, c_θ : Velocidades de propagación en el espacio geográfico y direccional

D_w : Disipación de la energía debida a la rotura del oleaje

σ : Frecuencia relativa del oleaje

Con la acción del oleaje:

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)} \quad [23]$$

Donde:

θ : Ángulo de incidencia
 S_w : Densidad de energía direccional
 σ : Frecuencia relativa del oleaje

Las ecuaciones utilizadas por el programa para aguas poco profundas se formulan teniendo las ecuaciones de momento y continuidad en términos de la Velocidad Lagrangiana, la cual se define como la distancia que una partícula de agua viaja en un periodo dividida por ese periodo.

Al resolver la ecuación de balance se obtienen las SWE (Roelvink et al., 2009):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v - v_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} \quad [24]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u - v_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} \quad [25]$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad [26]$$

Donde:

h : Profundidad del agua
 u, v : Componentes de la velocidad Lagrangiana en x y y
 τ_{bx}, τ_{by} : Esfuerzos cortantes en el fondo
 τ_{sx}, τ_{sy} : Esfuerzos cortantes en la superficie por el viento
 η : Nivel de la superficie libre del agua
 F_x, F_y : Fuerzas del oleaje debidas al tensor de radiación
 V_h : Viscosidad horizontal
 f : Coeficiente de Coriolis

2.5.2 Módulo no hidrostático

Este módulo se incorpora con el fin de aumentar la capacidad de predicción de XBeach, específicamente en la zona de rompientes (Smit et al., 2017). Este se basa en el modelo propuesto por (Zijlema & Stelling, 2008), el cual parte de las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo incompresible y densidad constante, incorporando la presión hidrostática en estas.

Este módulo permite la modelación del oleaje utilizando un modelo promediado en profundidad de segundo orden (dos capas), de manera que mantiene suficiente precisión que lo hace comparable con modelos basados en ecuaciones de Boussinesq de mayor orden y al mismo

tiempo disminuye significativamente la demanda computacional para su desarrollo (Zijlema & Stelling, 2008). Su representación matemática es:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad [27]$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial wu}{\partial z} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad [28]$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad [29]$$

Donde:

$u(x, z, t)$: Componente horizontal de la velocidad

$w(x, z, t)$: Componente vertical de la velocidad

$q(x, z, t)$: Presión no hidrostática

η : Superficie libre

ρ_0 : Densidad constante

g : Aceleración gravitacional

Adicionalmente, para obtener una solución única de las ecuaciones, se presentan las siguientes condiciones de frontera (Zijlema & Stelling, 2008):

- Superficie libre: Se asume que no haya afectación por el viento y que $q|_{z=\eta} = 0$.
- Fondo: Se supone que no hay fricción en el fondo y que $w|_{z=-d} = -u \frac{\partial d}{\partial x}$.
- Mar adentro: Este contorno se fuerza con una velocidad promediada en profundidad definida por $U = \frac{n\omega\eta}{kH}$.
- Línea de costa: Se propone un contorno donde tiene una línea de costa variable asegurando que no haya profundidades de agua negativas.

2.5.3 Validación del modelo numérico XBeach

Hay distintos tipos de validaciones de un modelo. Los principales son la validación con datos de campo, validación con respecto a otro modelo y validación con respecto a resultados analíticos. En todos estos casos, para determinar qué tan acertado es un modelo se requiere el uso de parámetros estadísticos que miden la calidad de los resultados. En el siguiente cuadro se presentan cuatro parámetros de relevancia para la validación de un modelo numérico con datos de campo.

Cuadro 2-1. Parámetros de medida del error en modelos

Parámetro	Fórmula (m: medido, c: simulado)	Descripción
Coefficiente de correlación R²	$\frac{\text{cov}(m, c)}{\sigma_m \sigma_c}$	R ² =1 Significa que no hay dispersión, pero la relación aún puede estar equivocada.
Índice de dispersión SCI	$\frac{\text{rms}_{c-m}}{\max(\text{rms}_m, \bar{m})}$	Medida relativa de la dispersión, normalizado con el máximo entre el rms de lo medido y la media absoluta del mismo. Es mejor en datos pequeños pero muy variables.
Sesgo relativo	$\frac{\bar{c} - \bar{m}}{\max(\text{rms}_m, \bar{m})}$	Medida relativa del sesgo, normalizada de la misma manera que el SCI.

Fuente: (Roelvink et al., 2009)

CAPÍTULO 3. CAMPAÑAS DE CAMPO

3.1 Descripción general de la información recopilada

3.2 Información de Batimetría

Se cuenta con dos batimetrías del perfil de estudio en dos épocas distintas, una realizada en 2013, y la otra en marzo de 2021.

La diferencia mencionada se puede apreciar de mejor manera en la Figura 3-1, donde se comparan ambos perfiles de batimetría recopilados. Como se puede observar, se llegan a dar diferencias en profundidades de hasta 3.0 m. Debido a esto, y como se retomará en el Capítulo 4, se opta por asociar la batimetría a la campaña de medición de oleaje de acuerdo con su fecha de realización.

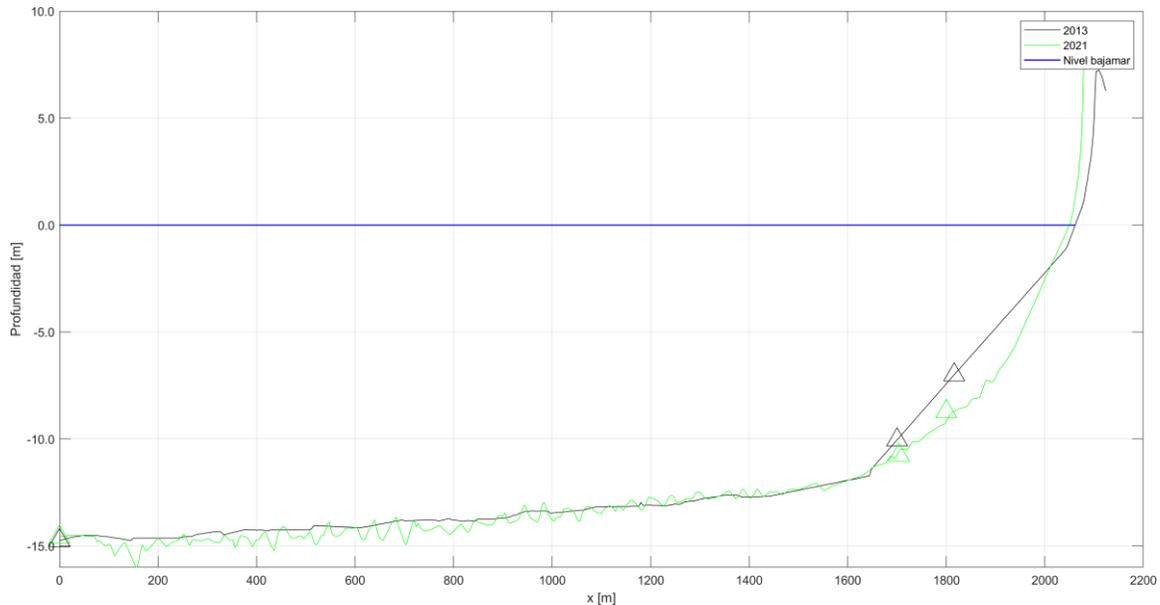


Figura 3-1. Gráfico de superposición de campañas de medición de batimetrías del perfil en estudio

3.3 Información de Mareas

Con respecto al nivel del mar se tomará en cuenta únicamente la marea astronómica, debido a que no se cuentan con datos de nivel del mar que incluyan adicionalmente la marea meteorológica. La marea astronómica se obtiene a partir del pronóstico de marea para Puntarenas proporcionado por el programa *WXTide32* para cada estado de mar analizado de manera horaria.

El programa WXTide32 es un software de libre acceso y bajos requerimientos computacionales, el cual provee pronósticos de mareas y corrientes en distintos formatos y espaciamentos temporales. El método utilizado por el programa para predecir las mareas se basa en el análisis armónico de las mareas, para el cuál se requieren datos de los armónicos en cada punto de pronóstico (Flater, s. f.), por lo que, el punto más cercano es el ubicado en Puntarenas.

Se tienen datos horarios de mareas astronómica para ambos intervalos de estudio, que corresponden al mes de mayo de 2019 y al mes de marzo de 2021. En la Figura 3-2 y la Figura 3-3 se muestran de manera gráfica la variación de la marea en estos dos meses, donde se puede observar el cambio entre mareas altas y bajas y sus transiciones.

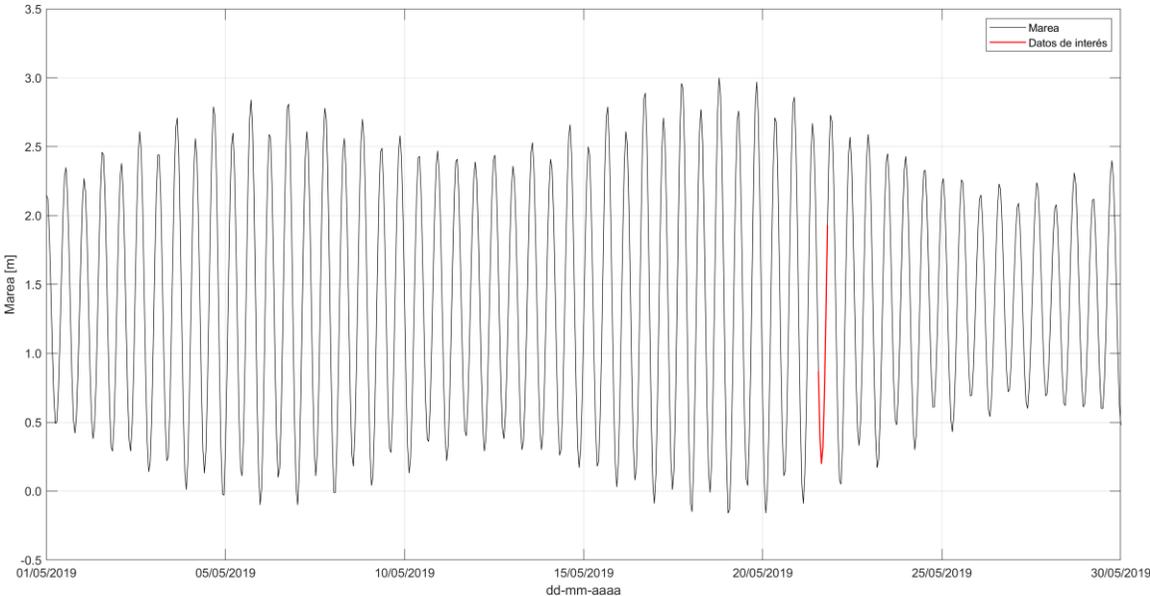


Figura 3-2. Gráfico de pronóstico de mareas en Puntarenas para el mes de mayo de 2019

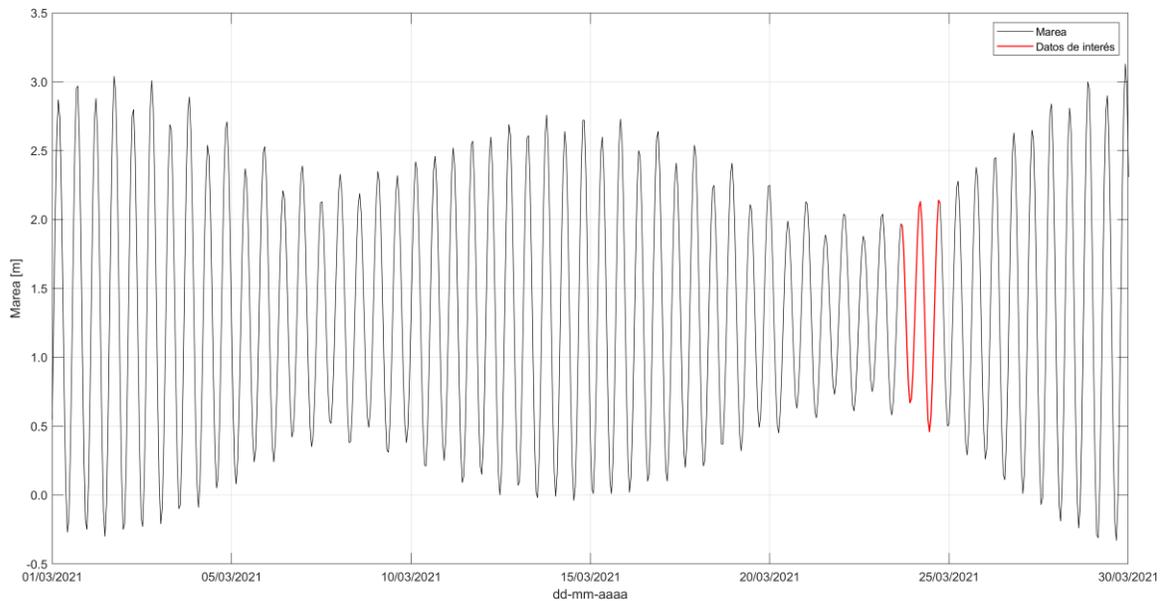


Figura 3-3. Gráfico de pronóstico de mareas en Puntarenas para el mes de mayo de 2019

3.4 Campañas de medición de oleaje

Como parte fundamental de la realización del presente proyecto, se cuenta con los resultados de la realización de dos campañas de campo en la zona de estudio, una en mayo de 2019 y la otra en marzo de 2021. Estas fueron realizadas por iMARES.

Las campañas se realizan con un instrumento de corriente modelo Aquadopp 300 m, marca NORTEK. El Aquadopp es un perfilador correntómetro acústico Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés). Este instrumento incluye sensores que permiten, entre otros, la medición de la presión y dirección de la columna de agua en un punto.

El Aquadopp es un equipo autónomo cuyo peso es de 2.3 kg el cual cuenta con tres haces acústicos, dos de ellos inclinados en ángulos de 45° y uno vertical (NORTEK, s.f.). Los Aquadopp requieren baterías alcalinas o de litio de 13.5 V (cuando nueva), cuya duración está en función de la forma en cómo se configure el equipo para el registro de información. La Figura 3-4 muestra fotografías del Aquadopp y la manera en que este es instalado en el lecho marino.

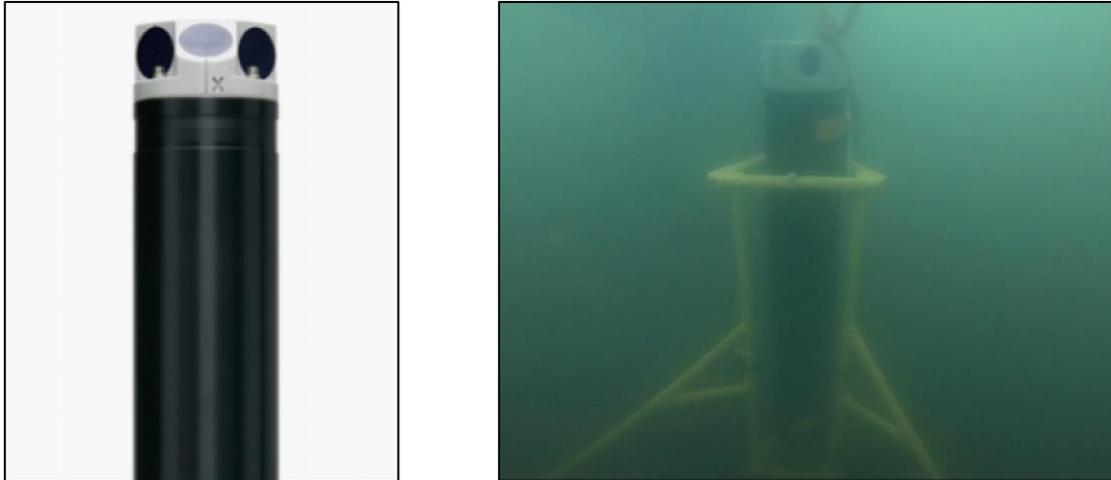


Figura 3-4. Fotografía a) del equipo individual y b) del equipo instalado

Fuente: (iMARES,2021)

Las campañas realizadas constaron de la colocación en el fondo marino de tres equipos Aquadopp a lo largo del perfil a analizar (zona de menor distancia entre la carretera y la playa), a aproximadamente 07 m, 10 m y 15 m de profundidad (ver Figura 1-1). Después de su instalación, dichos equipos toman datos de presión, velocidad de corrientes y dirección de estas con una frecuencia de 1 Hz (1 dato por segundo) por aproximadamente 17 min (1024 s) por cada hora. Lo anterior se realiza con el fin de obtener una muestra representativa para definir cada estado de mar.

3.4.1 Campaña mayo 2019

El 22 de mayo del 2019, se realizaron mediciones de aproximadamente 17 min cada hora a partir de las 09:00 horas hasta las 14:00 horas (incluidas).

Para el procesamiento de las series temporales de presión obtenidas en cada uno de los equipos de medición, se realizó el análisis en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

Por otro lado, se realizó un filtrado de las ondas infra gravitatorias con el fin de determinar la cantidad de energía asociada a cada estado de mar y su posible afectación en la costa.

3.4.1.1 Procesamiento inicial de los datos de los equipos

Inicialmente, se realiza la corrección por marea, así como la conversión de los datos de presión de dbar a mca. En la Figura 3-5 se muestra a manera de ejemplo la serie temporal de presiones del Estado de Mar asociado a las 14:00.

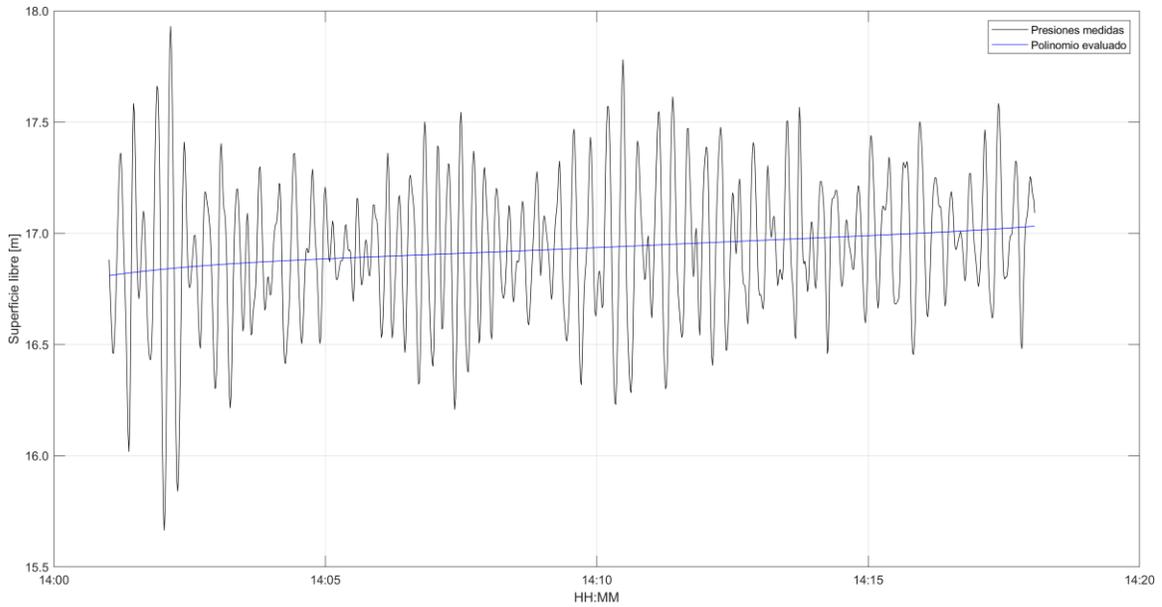


Figura 3-5. Ejemplo gráfico de corrección por marea de las series de presión medidas en mayo 2019 (Estado de mar N°6)

Al restar la marea, se obtienen series temporales de superficie libre como la que se puede observar en la Figura 3-6 (en el Apéndice A se muestran las gráficas de superficie libre de los Estados de Mar restantes), las cuales corresponden a un mismo estado de mar en cada uno de los tres equipos instalados. Esta información es el insumo base para el análisis tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

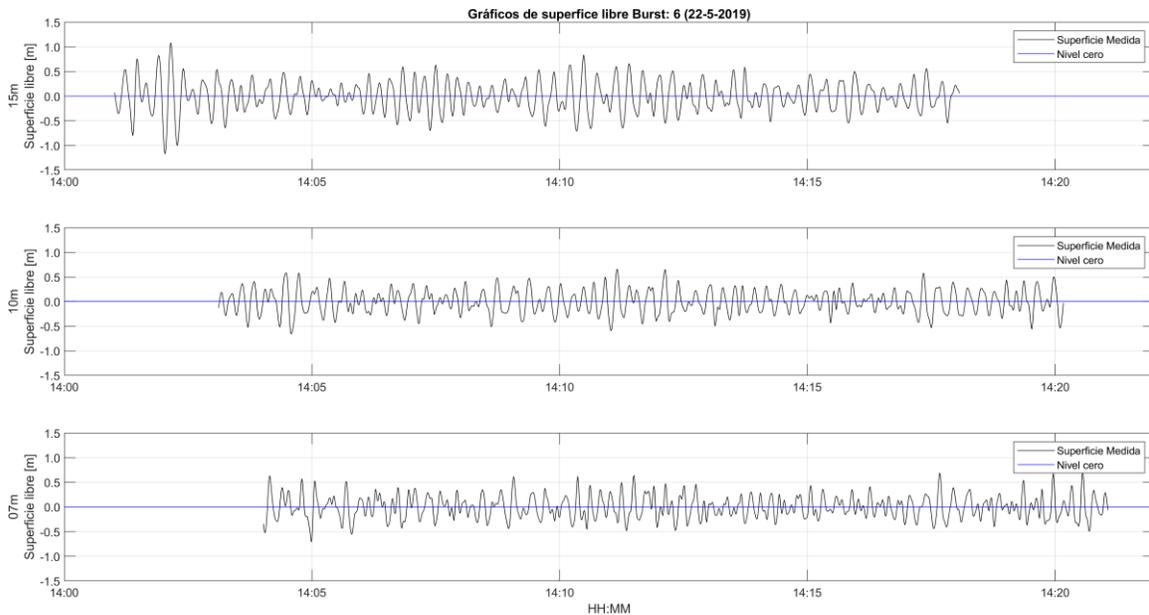


Figura 3-6. Ejemplo gráfico de las series de superficie libre medidas en la campaña de mayo 2019 (Estado de mar N°6)

3.4.1.2 Análisis en el dominio del tiempo

Se tiene la caracterización de 6 Estados de Mar, la cual se realiza siguiendo los pasos mostrados en la Figura 2-5 y con ayuda del software Matlab. En el siguiente Cuadro se muestra un resumen de los parámetros principales de oleaje obtenidos para cada Estado de Mar analizado en cada equipo de medición.

Cuadro 3-1. Parámetros estadísticos del oleaje en el dominio del tiempo campaña mayo 2019

May-19		H _s (m)			T _m (s)		
Estado de mar	Fecha y hora	15 m	10 m	07 m	15 m	10 m	07 m
1	22-05-19 09:00	1.05	-	0.99	13.76	-	11.33
2	22-05-19 10:00	1.28	1.11	1.10	16.00	13.99	12.31
3	22-05-19 11:00	1.16	1.07	1.08	14.54	15.71	13.20
4	22-05-19 12:00	1.11	1.19	1.22	13.59	15.21	13.75
5	22-05-19 13:00	1.20	1.04	1.02	15.97	13.45	12.18
6	22-05-19 14:00	1.15	0.85	0.88	14.56	13.80	12.34

3.4.1.3 Análisis en el dominio de la frecuencia

Se realizó el análisis espectral de cada estado de mar en cada profundidad, resultando en los parámetros espectrales de oleaje mostrados en el Cuadro 3-2. Adicionalmente, de manera ilustrativa, en la Figura 3-7 se muestra el espectro para el estado de mar de las 14:00 horas en las tres profundidades medidas (en el Apéndice A se muestra el espectro de cada estado de mar).

Cuadro 3-2. Parámetros principales obtenidos del análisis espectral para la campaña de mayo 2019

May-19		H _{m0} (m)			H _{m0_IG} (m)			T _{m02} (s)			T _{m02_IG} (s)		
Estado de mar	Fecha y hora	15 m	10 m	07 m	15 m	10 m	07 m	15 m	10 m	07 m	15 m	10 m	07 m
1	22-05-19 09:00	1.20	-	1.07	0.15	-	0.11	14.39	-	10.94	44.95	-	50.35
2	22-05-19 10:00	1.19	1.23	1.21	0.13	0.15	0.16	14.97	14.11	12.14	50.04	50.05	54.52
3	22-05-19 11:00	1.11	1.11	1.13	0.16	0.14	0.17	13.69	13.91	12.02	48.45	50.66	60.80
4	22-05-19 12:00	1.19	1.33	1.29	0.10	0.17	0.15	14.80	14.23	11.91	56.35	46.13	50.42
5	22-05-19 13:00	1.36	1.20	1.05	0.15	0.12	0.13	15.42	14.58	12.04	47.10	49.74	52.88
6	22-05-19 14:00	1.24	0.96	0.89	0.13	0.12	0.16	14.49	13.65	11.18	53.54	51.21	55.32

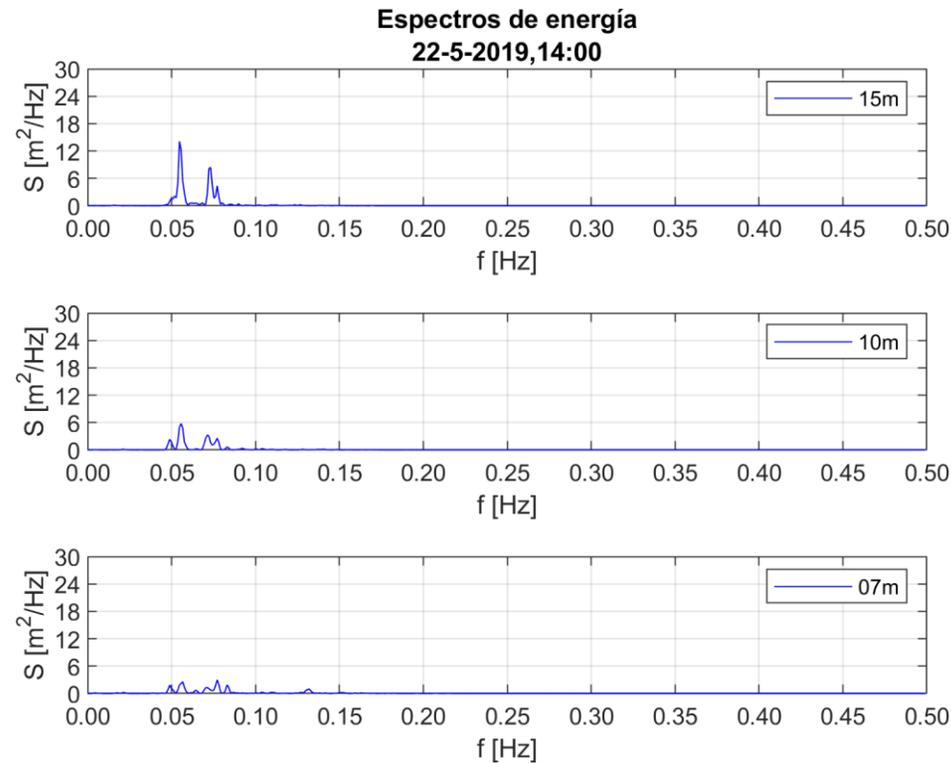


Figura 3-7. Ejemplo de espectro de energía de campaña de medición de mayo 2019

3.4.2 Campaña marzo 2021

El 24 de marzo del 2021, se realizaron mediciones de aproximadamente 17 min cada hora a partir de las 11:00 horas del 24 de marzo de 2021 hasta las 12:00 horas del 25 de marzo de 2021 (incluidas).

Adicionalmente se realizaron grabaciones por medio de una cámara de video de la llegada del oleaje a la costa en el perfil de los equipos; estas grabaciones se realizaron por aproximadamente 20 min cada hora a partir de las 06:00 horas del 25 de marzo de 2021 hasta las 12:00 horas del 25 de marzo de 2021 (incluidas).

Para el procesamiento de las series temporales de presión obtenidas de los equipos de medición a cada profundidad se realizó el análisis en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

También, se procesaron los videos obtenidos, donde se obtuvo la estadística en cada video con respecto a la llegada de las olas a la playa.

3.4.2.1 Procesamiento inicial de los datos de los equipos

En la Figura 3-8 se muestra a manera de ejemplo la serie temporal de superficie libre del Estado de Mar asociado a las 14:00.

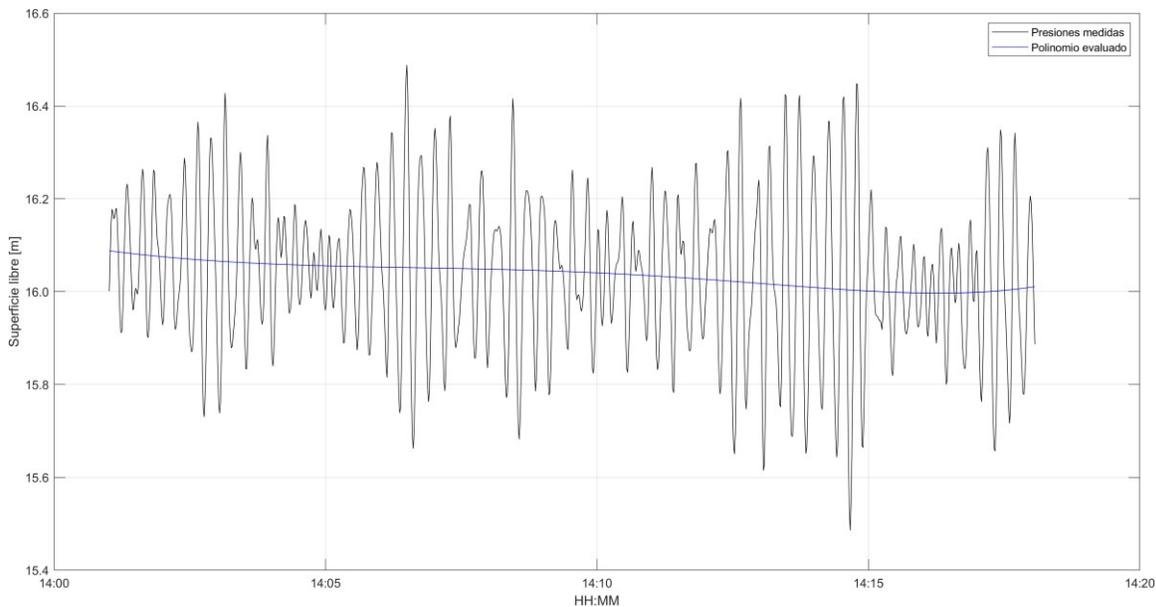


Figura 3-8. Ejemplo gráfico de corrección por marea de las series de presión medidas en marzo 2021 (Estado de mar N°4)

Al restar la marea, se obtienen series temporales de superficie libre como la que se puede observar en la Figura 3-9 (en el Apéndice B se muestran las gráficas de superficie libre de los Estados de Mar restantes), las cuales son utilizadas como insumos base para el análisis tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

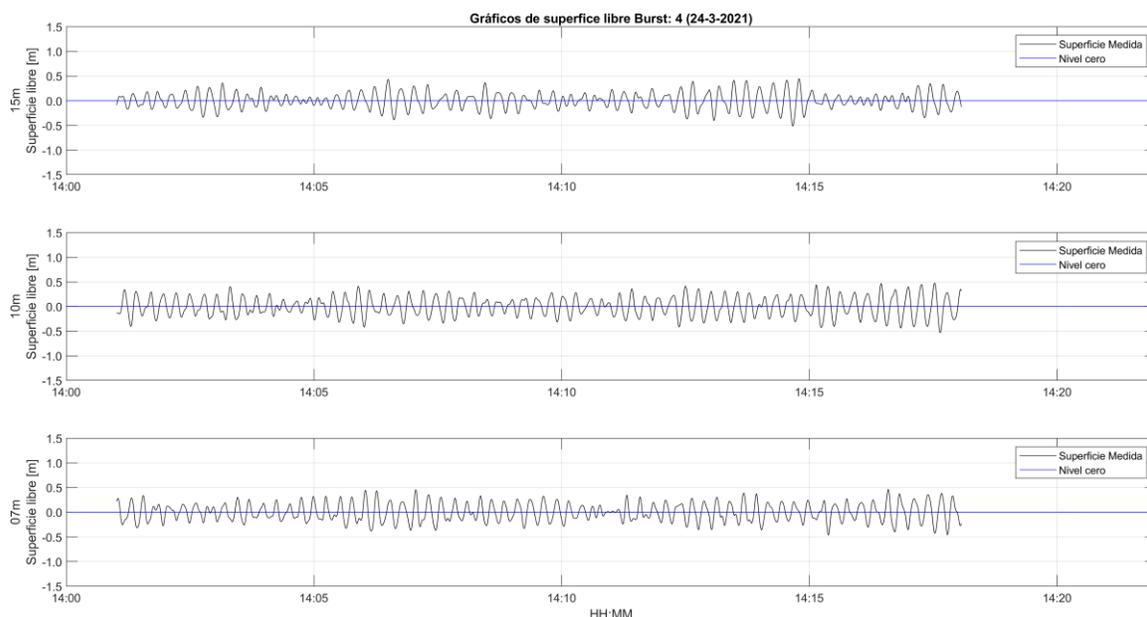


Figura 3-9. Ejemplo gráfico de las series de superficie libre medidas en la campaña de marzo 2021 (Estado de mar N°4)

3.4.2.2 Análisis en el dominio del tiempo

En el siguiente Cuadro se muestra un resumen de los parámetros principales obtenidos para cada Estado de Mar analizado en cada equipo de medición.

Cuadro 3-3. Parámetros estadísticos del oleaje en el dominio del tiempo campaña marzo 2021

Mar-21		H_s (m)			T_m (s)		
Estado de mar	Fecha y hora	15 m	10 m	07 m	15 m	10 m	07 m
1	24-03-21 11:00	1.14	0.56	0.50	27.43	14.27	13.41
2	24-03-21 12:00	0.52	0.56	0.50	14.57	14.46	13.52
3	24-03-21 13:00	0.54	0.42	0.44	14.54	13.46	12.02
4	24-03-21 14:00	0.65	0.73	0.68	14.69	15.11	14.85
5	24-03-21 15:00	0.69	0.63	0.71	14.43	14.70	13.68
6	24-03-21 16:00	0.59	0.58	0.64	13.26	13.22	13.94
7	24-03-21 17:00	0.73	0.63	0.71	14.82	14.08	13.82
8	24-03-21 18:00	0.54	0.48	0.62	13.42	12.82	13.97
9	24-03-21 19:00	0.56	0.68	0.65	13.61	13.84	13.43
10	24-03-21 20:00	0.77	0.77	0.83	14.26	14.26	14.56

Mar-21		H_s (m)			T_m (s)		
Estado de mar	Fecha y hora	15 m	10 m	07 m	15 m	10 m	07 m
11	24-03-21 21:00	0.64	0.64	0.65	13.75	14.05	13.81
12	24-03-21 22:00	0.49	0.48	0.44	13.53	13.62	12.57
13	24-03-21 23:00	0.58	0.56	0.58	13.80	12.98	12.89
14	25-03-21 00:00	0.66	0.61	0.56	14.29	14.22	13.78
15	25-03-21 01:00	0.73	0.58	0.69	13.56	13.24	13.99
16	25-03-21 02:00	0.56	0.56	0.65	13.42	13.06	12.54
17	25-03-21 03:00	0.69	0.59	0.71	12.93	12.74	13.48
18	25-03-21 04:00	0.62	0.50	0.68	13.25	13.30	13.17
19	25-03-21 05:00	0.60	0.55	0.57	12.66	12.75	12.36
20	25-03-21 06:00	0.64	0.58	0.59	12.76	13.53	12.55
21	25-03-21 07:00	0.65	0.55	0.61	12.99	12.15	13.03
22	25-03-21 08:00	0.61	0.52	0.58	13.35	12.96	12.30
23	25-03-21 09:00	0.54	0.50	0.48	11.67	11.95	11.27
24	25-03-21 10:00	0.56	0.46	0.56	12.60	11.19	12.25
25	25-03-21 11:00	0.52	0.48	0.57	12.23	12.00	12.39
26	25-03-21 12:00	0.48	0.47	0.50	11.48	11.93	11.83

3.4.2.3 Análisis en el dominio de la frecuencia

Se realizó el análisis espectral de cada estado de mar en cada profundidad, resultando en los parámetros espectrales mostrados en el Cuadro 3-4. Adicionalmente, de manera ilustrativa, en la Figura 3-10 se muestra el espectro para un estado de mar en las tres profundidades medidas (en el Apéndice B se muestra el espectro de cada estado de mar).

Cuadro 3-4. Parámetros principales obtenidos del análisis espectral para la campaña de marzo 2021

Mar-21		H _{m0} (m)			H _{m0_IG} (m)			T _{m02} (s)			T _{m02_IG} (s)		
Estado de mar	Fecha y hora	15 m	10 m	07 m	15 m	10 m	07 m	15 m	10 m	07 m	15 m	10 m	07 m
1	24-03-21 11:00	0.99	0.45	0.44	0.74	0.04	0.05	21.28	13.28	12.68	111.08	57.79	48.76
2	24-03-21 12:00	0.55	0.59	0.52	0.05	0.05	0.06	14.26	14.19	12.73	49.04	49.09	53.74
3	24-03-21 13:00	0.54	0.45	0.50	0.04	0.04	0.05	13.70	12.99	12.55	47.64	49.46	49.18
4	24-03-21 14:00	0.64	0.70	0.72	0.06	0.04	0.05	14.29	14.23	13.62	46.58	55.18	52.85
5	24-03-21 15:00	0.69	0.66	0.71	0.05	0.05	0.04	14.41	14.36	13.90	55.21	49.51	54.84
6	24-03-21 16:00	0.62	0.48	0.68	0.04	0.05	0.05	13.32	12.65	13.65	52.07	46.33	47.41
7	24-03-21 17:00	0.69	0.60	0.72	0.04	0.04	0.05	13.88	13.46	13.55	51.11	42.80	45.83
8	24-03-21 18:00	0.56	0.47	0.67	0.05	0.05	0.06	12.81	12.95	13.60	51.55	49.97	51.81
9	24-03-21 19:00	0.56	0.61	0.60	0.05	0.06	0.05	13.27	13.75	13.33	47.82	45.65	49.71
10	24-03-21 20:00	0.75	0.83	1.03	0.06	0.06	0.06	14.22	13.97	14.11	49.64	53.99	58.40
11	24-03-21 21:00	0.75	0.62	0.58	0.04	0.05	0.06	13.92	13.63	13.50	52.35	53.27	47.80
12	24-03-21 22:00	0.46	0.48	0.45	0.04	0.05	0.06	12.71	12.91	12.53	56.00	53.72	57.15
13	24-03-21 23:00	0.64	0.48	0.44	0.06	0.05	0.05	13.61	13.10	12.45	55.18	54.15	63.66
14	25-03-21 00:00	0.76	0.67	0.67	0.05	0.06	0.07	14.35	13.66	13.36	66.52	57.36	55.10
15	25-03-21 01:00	0.72	0.70	0.85	0.04	0.05	0.06	13.57	13.50	13.53	58.22	44.08	48.58
16	25-03-21 02:00	0.58	0.55	0.61	0.04	0.05	0.07	13.03	12.56	12.42	49.88	43.27	45.40
17	25-03-21 03:00	0.75	0.60	0.83	0.05	0.06	0.06	13.50	12.90	13.54	46.72	51.78	53.29
18	25-03-21 04:00	0.59	0.55	0.77	0.04	0.05	0.05	12.15	12.99	13.67	50.83	51.58	59.13
19	25-03-21 05:00	0.65	0.55	0.65	0.04	0.05	0.06	12.83	12.30	12.38	53.04	55.83	49.95
20	25-03-21 06:00	0.63	0.60	0.58	0.05	0.06	0.05	13.13	12.80	12.10	49.06	43.63	48.40
21	25-03-21 07:00	0.76	0.56	0.69	0.06	0.05	0.06	13.34	12.37	12.90	62.88	44.79	43.84
22	25-03-21 08:00	0.73	0.49	0.63	0.04	0.05	0.05	13.37	12.41	12.81	45.09	46.46	57.36
23	25-03-21 09:00	0.51	0.48	0.49	0.04	0.04	0.04	11.65	11.76	11.53	50.81	44.74	45.62
24	25-03-21 10:00	0.57	0.50	0.60	0.04	0.05	0.04	12.23	11.12	11.69	47.44	45.11	49.28
25	25-03-21 11:00	0.56	0.45	0.54	0.04	0.05	0.05	12.10	12.05	12.36	53.08	44.26	44.37
26	25-03-21 12:00	0.54	0.47	0.48	0.04	0.04	0.04	11.93	11.87	11.55	55.25	51.08	51.10

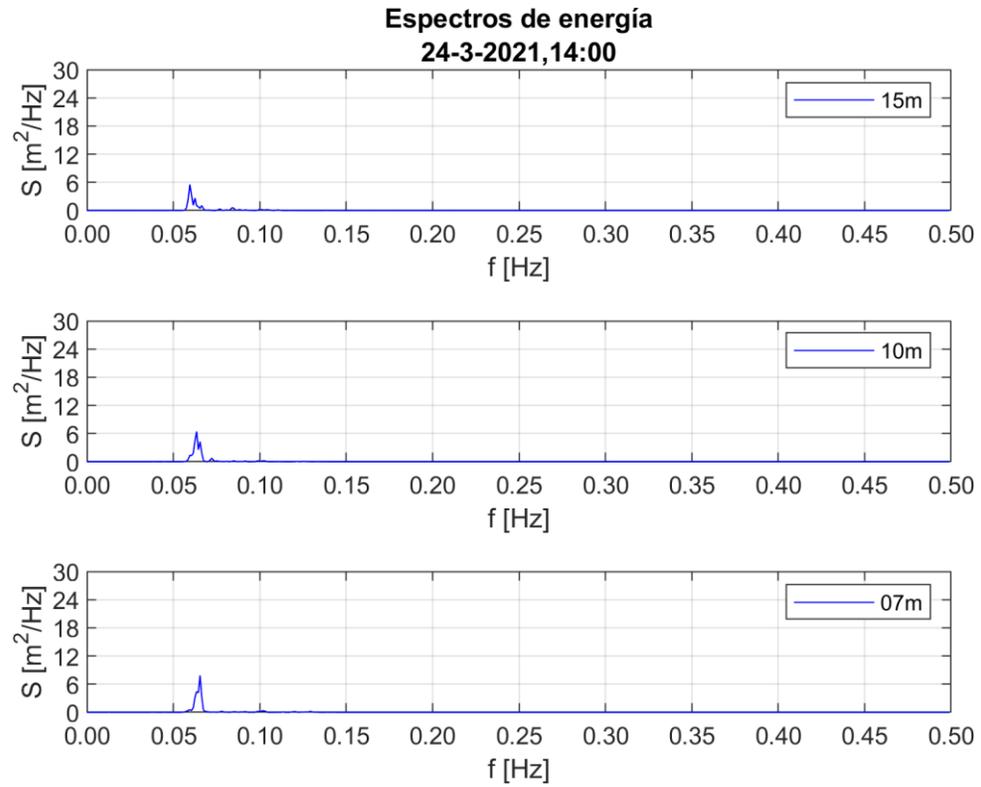


Figura 3-10. Ejemplo de espectro de energía de campaña de medición de marzo 2021

3.4.2.4 Procesamiento de los videos de oleaje

Adicionalmente, se realizó la toma de videos en la playa colocando estacas georreferenciadas, alineadas con el perfil de medida de los equipos de medición de oleaje. Estos videos fueron de aproximadamente 20 min cada uno por aproximadamente 7 h, desde las 6:00 hasta las 12:00 (incluidas) del día 25 de marzo de 2021. En la siguiente figura, se muestra una captura de pantalla de uno de los videos tomados, donde se pueden observar las estacas de referencia utilizadas.



Figura 3-11. Fotografía de las estacas colocadas para la medición de la llegada del oleaje a la playa

El perfil de la playa y la ubicación de las estacas de medición utilizadas en los videos para determinar la posición máxima del oleaje en los videos se detallan en la Figura 3-12.

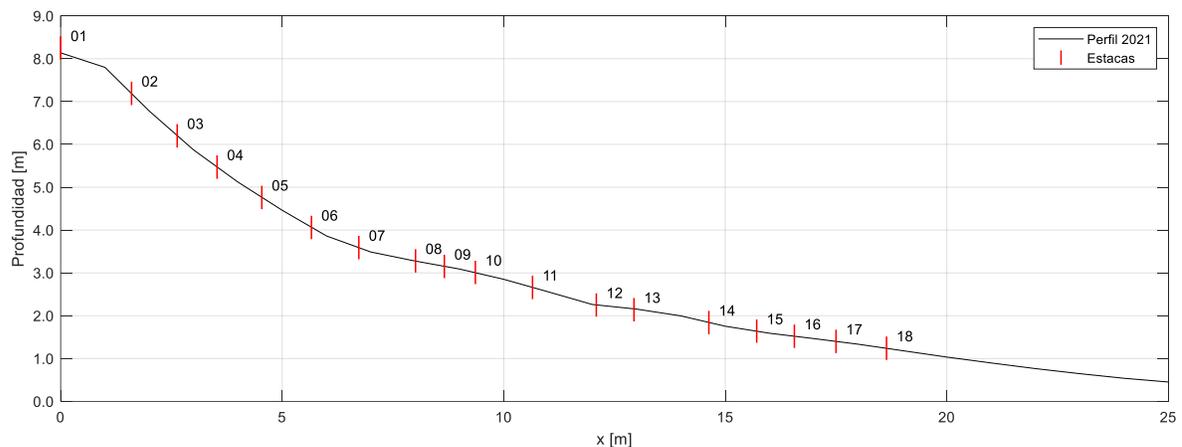


Figura 3-12. Ubicación y número de las estacas analizadas en los videos

Revisando cada video y la altura máxima que alcanzaba cada ola, se obtienen los histogramas de frecuencias resumidos en la Figura 3-13. En estos histogramas se puede observar la influencia de la marea, y como durante la marea alta, el oleaje se acerca más al límite de la playa.

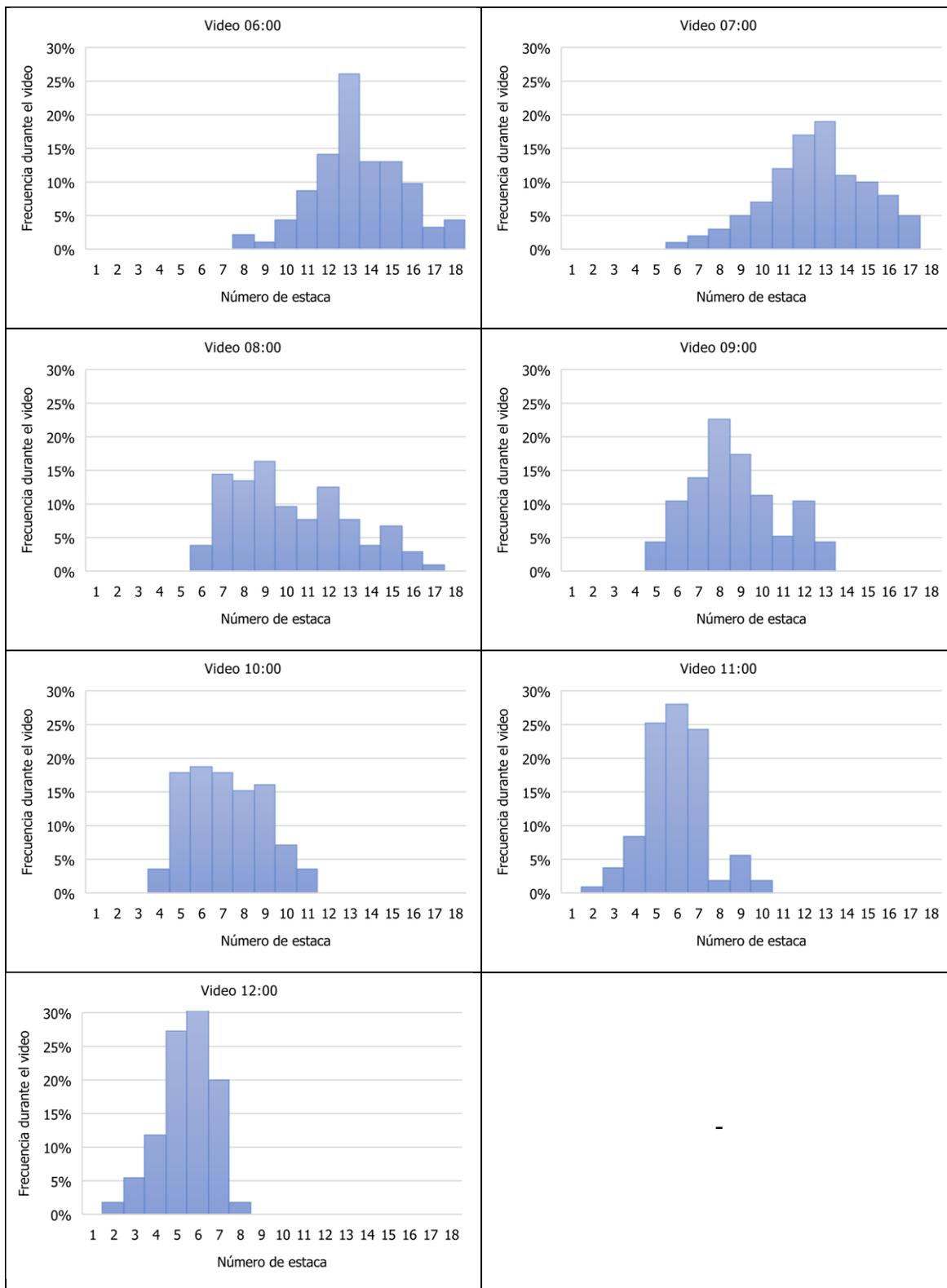


Figura 3-13. Histogramas de frecuencia del punto máximo de llegada de las olas en playa Caldera a partir de videos tomados el 25 de marzo de 2021

CAPÍTULO 4. MODELADO NUMÉRICO

Para la realización del modelado numérico, se tomó la decisión de emplear el programa XBeach, el cual es un modelo numérico de procesos del oleaje cercanos a la costa, específicamente durante eventos de tormenta o huracanes (Roelvink et al., 2010). De manera general, a continuación, se presentan algunas de las características principales del modelo que influyeron en su elección.

El software XBeach, especialmente en su módulo no hidrostático, el cual se basa en el método de cálculo propuesto por Stelling y Zijlema (2003), consiste en la aproximación del gradiente vertical de presión no hidrostática en las ecuaciones promediadas de Reynolds para la simulación del flujo de superficie libre en condiciones no hidrostáticas. Como resultado, este permite:

- Obtener resultados con una alta precisión y un bajo consumo computacional para la propagación.
- La inclusión de la presión dinámica en la superficie libre.
- La propagación de oleajes con características dispersivas bajo el modelo de flujo promediado en profundidad con la misma capacidad con la que se simularían con modelos de Boussinesq.

4.1 Configuración del modelo

La base de la configuración del modelo recae en la generación del archivo "params.txt", el cual incluye la definición de todos los parámetros e indicaciones asociadas al modelo. En el Apéndice C se muestra un ejemplo práctico de la configuración de un archivo de parámetros para el modelo XBeach.

A continuación, se describe cada sección del archivo y sus parámetros asociados. Cabe destacar que estos parámetros y sus descripciones se resumen del manual de uso del programa XBeach en su versión "v1.23.5527".

4.1.1 Aspectos generales

Esta sección se compone de los parámetros que definen qué módulos del programa se ejecutarán, y con esto, los parámetros y secciones posteriores que se utilizarán al momento de ejecutar el modelo de propagación. En el Cuadro 4-1 se resumen algunos de los comandos más importantes para la implementación del programa.

Cuadro 4-1. Descripción de los comandos generales del archivo params.txt

Comando	Descripción	Rango de valores	Valor utilizado	Observaciones
wavemodel	Define el modelo que emplea el programa	<u>stationary</u> : Resuelve las ecuaciones promediadas por ola, omitiendo las olas IG. <u>surfbeat</u> : Se resuelven tanto las ondas cortas como las IG. <u>nonh</u> : Se combinan las NLSWE con una corrección en la presión, permitiendo que el modelo resuelva la propagación ola a ola.	nonh	Modelo especialmente útil para playas con pendientes altas ya que este modelo incluye el rebase del oleaje
swave	Define si se calcula la ecuación de balance de olas cortas	<u>0</u> : No se emplea <u>1</u> : Sí se emplea	0	Al escoger el módulo "nonh", se toman en cuenta incluso las olas cortas, por lo que el balance aparte se considera innecesario.
sedtrans	Define si se calcula el transporte de sedimentos	<u>0</u> : No se emplea <u>1</u> : Sí se emplea	0	Al estar evaluando la capacidad del modelo de propagar el oleaje del modelo, el

Comando	Descripción	Rango de valores	Valor utilizado	Observaciones
morphology	Define si se calcula la morfología del fondo y su cambio	<u>0</u> : No se emplea <u>1</u> : Sí se emplea	0	modelado procesos morfológicos excede el alcance de la calibración, así como tampoco se cuenta con datos de campo para poder realizar esta.
wind	Define si se incluye el viento en el modelo de propagación	<u>0</u> : No se emplea <u>1</u> : Sí se emplea	0	Al no contar con datos medidos de viento para el perfil de estudio, no se considera la inclusión de este modelaje a la propagación.

4.1.2 Parámetros de malla

Una vez definidos los aspectos generales del modelo, se procede a la definición de los detalles asociados a la malla de cálculo a utilizar o la batimetría del sitio en estudio. En el Cuadro 4-2 se resumen los comandos de mayor relevancia para el proyecto en lo que respecta a la malla de cálculo.

Cuadro 4-2. Descripción de los comandos de la malla de cálculo del archivo params.txt

Comando	Descripción	Rango de valores	Valor utilizado	Observaciones
depfile	Llama al archivo bed.dep previamente descrito	N/A	Bed.dep	N/A
posdwn	Específica si la batimetría se define positiva hacia abajo o hacia arriba	<u>1</u> : Positivo hacia abajo <u>-1</u> : Positivo hacia arriba	-1	N/A

Comando	Descripción	Rango de valores	Valor utilizado	Observaciones
nx	Número de celdas en x	N/A	552	Se coloca cantidad de puntos ingresados en los archivos complementarios menos uno
ny	Número de celdas en y	N/A	0	Se coloca cantidad de puntos ingresados en los archivos complementarios menos uno
vardx	Define si la malla es de espaciamiento variable	<u>0: Espaciamiento constante</u> <u>1: Espaciamiento variable</u>	1	N/A
xfile	Llama al archivo de puntos en x de la malla de cálculo	N/A	x.grd	N/A
yfile	Llama al archivo de puntos en y de la malla de cálculo	N/A	y.grd	N/A
xori	Coordenada de origen en x	N/A	0	En este caso, y por ser únicamente un perfil, por facilidad en la interpretación de resultados, se define el origen como (0,0)
yori	Coordenada de origen en y	N/A	0	
alfa	Angulo en que se encuentra el eje x (medido desde el este contra horario)	N/A	0	En este caso, y por ser únicamente un perfil, por facilidad de la interpretación de resultados, se define el ángulo de rotación de la malla como 0°

4.1.3 Tiempo de modelado

Esta sección es especialmente importante, ya que se define la escala temporal de la simulación. En el Cuadro 4-3 se resumen los dos parámetros principales del modelo, sin embargo, cabe resaltar que en esta sección se presentan más comandos, que debido al modelo de solución empleado (nonh), no son requeridos para este caso en específico.

Cuadro 4-3. Descripción de los comandos de modelación del archivo params.txt

Comando	Descripción	Rango de valores	Valor utilizado	Observaciones
tstop	Duración de la propagación	[1 – 1 000 000] s	1500 s	Forzamiento con series temporales
			3600 s	Forzamiento con parámetros espectrales
CFL	Máximo número de Courant, asociado al intervalo de tiempo usado para la simulación	0.1 – 0.9	0.9	Al utilizar un valor menor, le permite al modelo emplear un intervalo de tiempo menor, permitiendo una convergencia mejor, pero una mayor demanda computacional.

4.1.4 Parámetros de fricción del fondo

Los comandos asociados a la fricción de fondo se muestran en el Cuadro 4-4. Cabe destacar que estos parámetros son de los de mayor influencia al momento de calibrar el modelo.

Cuadro 4-4. Descripción de los comandos de fricción de fondo del archivo params.txt

Comando	Descripción	Rango de valores	Valor utilizado	Observaciones
bedfriction	Metodología de determinación del coeficiente de fricción en el fondo	<p><u>cf</u>: Coeficiente de fricción</p> <p><u>chezy</u>: Se determina cf a partir de la formulación de Chezy $\left(cf = \sqrt{\frac{g}{C^2}} \right)$</p> <p><u>manning</u>: Se determina cf a partir del coeficiente de rugosidad de Manning de $\left(cf = \sqrt{\frac{gn^2}{h^{1/3}}} \right)$</p> <p><u>white-colebrook</u>: Se determina cf a partir del coeficiente de rugosidad de Nikuradse $(ks) \left(cf = \sqrt{\frac{g}{\left(18 \log\left(\frac{12h}{ks}\right)\right)^2}} \right)$</p> <p><u>white-colebrook-grainsize</u>: Se determina cf a partir del D90 $\left(cf = \sqrt{\frac{g}{\left(18 \log\left(\frac{12h}{3D90}\right)\right)^2}} \right)$</p>	cf	Se determina que al forzar el modelo directamente con un coeficiente de fricción determinado, se da mayor control sobre las variables que alteran su comportamiento, esto especialmente al momento de la calibración de este.
bedfriccoef	Coeficiente de fricción cf	0.001 – 0.9	Variable	N/A
bedfricfile	Definición del coeficiente de fricción variable a lo largo de la malla de cálculo	N/A	N/A	Para el presente proyecto no se utiliza este comando, pero se presenta en esta sección ya que se considera de gran interés y de utilidad en un posible seguimiento del tema.

4.1.5 Parámetros de condición de frontera de flujo

Las condiciones de borde se deben especificar en todas las fronteras de la malla de cálculo. Se presentan cuatro condiciones de frontera: costa (front), zona de forzamiento (back), lateral izquierdo (left) y lateral derecho (right). En Cuadro 4-5 se resumen los distintos comandos disponibles por frontera establecida.

Cuadro 4-5. Descripción de los comandos de condición de frontera de flujo del archivo params.txt

Comando	Descripción	Rango de valores	Valor utilizado	Observaciones
front	Condición de frontera en la costa	<u>abs_1d</u> : Frontera absorbente, generadora (poco reflectiva) en 1D.	nonh_1d	Al utilizar el módulo no hidrostático, se fuerza el modelo con la frontera nonh_1d.
		<u>abs_2d</u> : Frontera absorbente, generadora (poco reflectiva) en 2D.		
		<u>wall</u> : Frontera sin flujo.		
		<u>wlevel</u> : Nivel definido por el usuario (archivo adicional).		
		<u>nonh_1d</u> : Frontera para condición no hidrostática.		
		<u>waveflume</u> : Frontera para experimentos con canales artificiales basada en la relación de continuidad.		
back	Condición de frontera en zona de forzamiento	<u>abs_1d</u> : Frontera absorbente, generadora (poco reflectiva) en 1D.	abs_1d	Al trabajar en 1D, se consideró más apropiado utilizar este tipo de forzamiento en la frontera trasera.
		<u>abs_2d</u> : Frontera absorbente, generadora (poco reflectiva) en 2D.		

Comando	Descripción	Rango de valores	Valor utilizado	Observaciones
		<u>wall</u> : Frontera sin flujo. <u>wlevel</u> : Nivel definido por el usuario (archivo adicional).		
left/right	Condición de frontera en las zonas de laterales de forzamiento	<u>wall</u> : Frontera sin flujo. <u>neumann</u> : Condición de frontera de Neumann (gradiente constante del nivel del agua). <u>neumann v</u> : Condición de frontera de velocidad determinada por la celda contigua. <u>no advec</u> : Condición de frontera de Neumann, pero solo los términos de advección se toman en cuenta (frontera intermedia entre wall y neumann).	neumann	Al trabajar en 1D y realizar el forzamiento en la dirección del perfil, estas fronteras no afectan al modelo, por lo que se mantiene neumann. En caso de que se trabajara en 2D, igualmente se sugiere mantener neumann, a menos que se tenga una situación topográfica específica que permita usar las otras alternativas.

4.1.6 Condiciones de marea

Correspondiente a la marea, el modelo permite ingresar valores de altura de marea de manera general, variable en el tiempo, e incluso variable en el espacio. En lo que respecta al presente proyecto, para el proceso de calibración y validación de resultados con las campañas de campo se emplea una marea constante debido al corto tiempo que cada Estado de mar implica (aproximadamente 17 min). Igualmente, en el Cuadro 4-6 se resumen los comandos principales para ingresar la marea en el modelo.

Cuadro 4-6. Descripción de los comandos de condiciones de marea del archivo params.txt

Comando	Descripción	Rango de valores	Valor utilizado	Observaciones
tideloc	Se especifica el número de puntos en la frontera donde se detalla la marea.	<p><u>0</u>: La marea no varía en el espacio ni en el tiempo. Es un valor constante.</p> <p><u>1</u>: La marea no varía en el espacio, pero sí en el tiempo. Serie temporal de marea.</p> <p><u>2-4</u>: La marea varía tanto en el espacio como en el tiempo. Serie temporal de marea.</p>	0	Se elige utilizar un único valor de marea para cada Estado de Mar debido a la poca variabilidad dentro de una misma hora.
zs0	En caso de que tideloc=0, se define la marea como una constante para todo el tiempo de modelado y es igual a lo largo de toda la frontera.	Variable (m)	Variable	Varía de acuerdo con la hora a la que corresponde cada Estado de mar.
zs0file	En caso de que tideloc≠0, se define el nombre del archivo que contiene los valores de marea dependientes del tiempo y en los puntos definidos por tideloc.	<p>Archivo de series temporales de marea. En el siguiente diagrama se puede observar su formato (tide.txt):</p> <pre style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <time 1> <zs 1,1> [<zs 2,1> [<zs 3,1> <zs 4,1>]] <time 2> <zs 1,2> [<zs 2,2> [<zs 3,2> <zs 4,2>]] <time 3> <zs 1,3> [<zs 2,3> [<zs 3,3> <zs 4,3>]] ... <time tlen> <zs 1,tlen> [<zs 2,tlen> [<zs 3,tlen> <zs 4,tlen>]] </pre>	N/A	N/A

4.1.7 Parámetros de condición de frontera de oleaje

Las condiciones de frontera que definen el forzamiento del oleaje en el modelo se pueden especificar por distintos métodos. Los métodos varían también dependiendo del módulo de oleaje utilizado (en este caso nonh). A continuación, se describen los métodos de forzamiento utilizados en el presente proyecto.

Cuadro 4-7. Descripción de los comandos de condiciones de frontera del oleaje del archivo params.txt

Comando	Descripción	Rango de valores	Valor utilizado	Observaciones
wbctype	Tipo de condición de frontera a utilizar.	<p><u>ts_nonh</u>: Se define un archivo con una serie temporal de superficie libre y velocidad orbital en la superficie.</p> <p><u>jonstable</u>: Se define un archivo con los parámetros espectrales necesarios para generar un espectro Jonswap. Se pueden ingresar varios espectros por duraciones variadas.</p> <p><u>swan</u>: A partir de una propagación con el programa Swan, se obtiene como resultado un archivo que contiene el espectro resultante de dicha propagación. El modelo puede leer directamente los archivos con este formato en específico.</p>	Variable	N/A

Comando	Descripción	Rango de valores	Valor utilizado	Observaciones
bcfile	Nombre del archivo según el tipo de condición que se utiliza	El detalle del formato de los archivos asociados a los tipos de condición de frontera se presenta a continuación.	Variable	N/A

4.1.7.1 *ts_nonh*

Al forzar el modelo con la serie temporal de superficie por estado de mar, debido a la configuración del programa, se debe realizar el ingreso de los valores de superficie libre y los valores de la velocidad orbital en superficie. Para esto se emplean los cálculos de velocidad orbital por cada dato medido utilizando la ecuación [30].

$$u = \eta \frac{\sigma \cosh(k(h+z))}{\sinh(kh)} \quad [30]$$

Donde:

u: Componente horizontal de la velocidad orbital (m/s)

η : Perfil de superficie libre (m)

σ : Frecuencia angular $\left(\frac{2\pi}{T}\right)$ (s^{-1})

k: Número de onda $\left(\frac{2\pi}{L}\right)$

h: Profundidad del fondo (m)

z: Profundidad de medición (m)

T: Periodo de la ola (s)

L: Longitud de la ola $\left(\frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kd)\right)$ (m)

Para cada grupo de datos de superficie libre pertenecientes a una ola, se les asigna el mismo valor de periodo (T) y número de ola (k) obtenido de un análisis temporal realizado con anterioridad sobre la serie temporal. En la Figura 4-1 se muestra un ejemplo de cómo se debe ver el archivo de forzamiento.

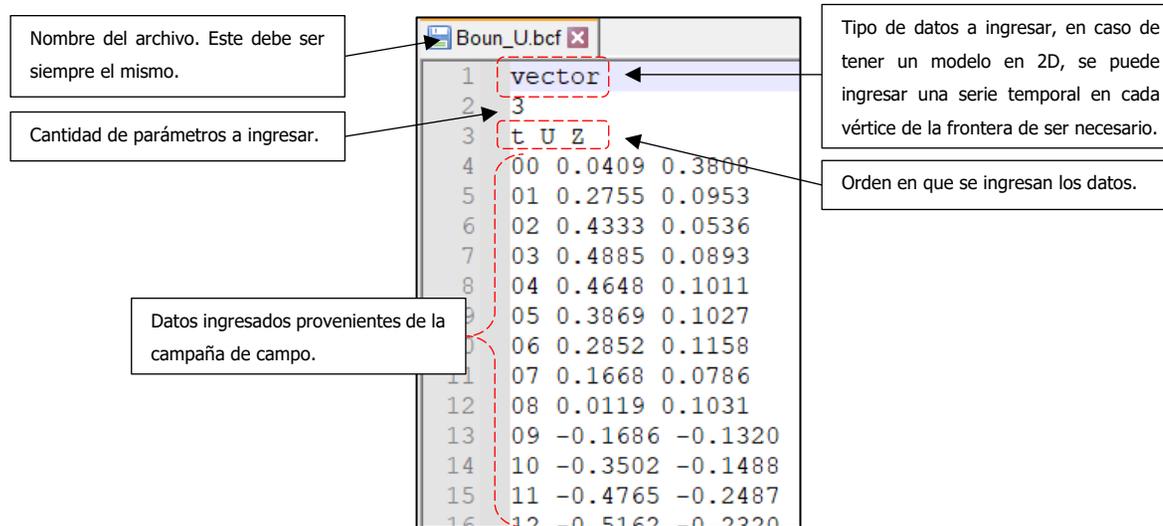


Figura 4-1. Ejemplo de formato del archivo de forzamiento por series temporales en el programa XBeach

4.1.7.2 *jonstable*

Al forzar el modelo con parámetros para un espectro Jonswap, se sugiere emplear el forzamiento *jonstable* ya que con este se podrían incluir distintos espectros dependientes del tiempo. La ecuación para un espectro de tipo Jonswap se obtiene después de analizar datos medidos durante un proyecto de caracterización del oleaje en el Mar del Norte (Joint North Sea Wave Observation Project - JONSWAP), a partir del cual se obtienen los parámetros por defecto que utiliza XBeach. En la Figura 4-2 se muestra un ejemplo de cómo se debe ver el archivo de forzamiento.

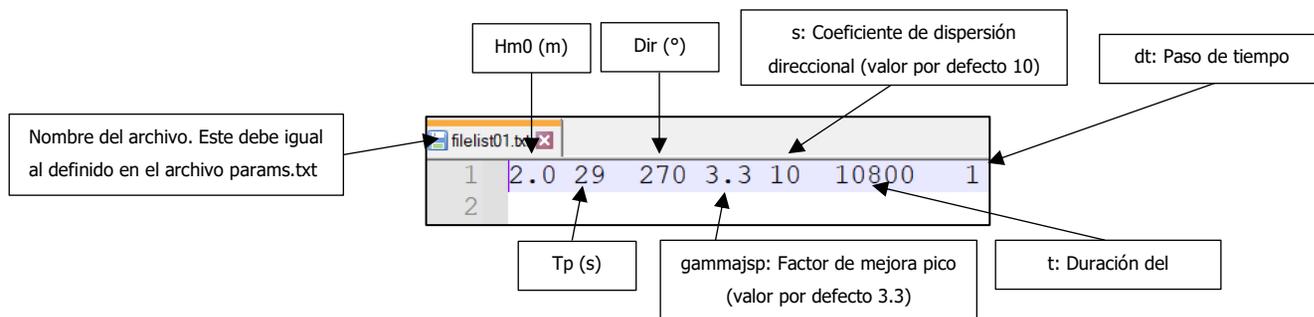


Figura 4-2. Ejemplo de formato del archivo de forzamiento por parámetros Jonswap en el programa XBeach

4.1.7.3 swan

XBeach tiene incorporada la capacidad de leer archivos de espectros de energía producto del programa SWAN 2D (extensión “.sp2”). El programa asume que el archivo SWAN se encuentra completado de acuerdo con la convención náutica para las direcciones, por lo que, en caso de utilizar una convención cartesiana, se deberá realizar la respectiva rotación en el archivo SWAN. En la Figura 4-3 se muestra un ejemplo de cómo se debe ver el archivo de forzamiento.

```

file_spectra_siLV.dat x
1 SWAN 1 Swan standard spectral file, version
2 $ Data produced by SWAN version 40.91ABC
3 $ Project: Juli1014LWF10Fin ; run number: ca01
4 LOCATIONS locations in x-y-space
5 1 number of locations
6 419253.9375 1097124.8750
7 AFREQ absolute frequencies in Hz
8 36 number of frequencies
9 0.0022
10 0.0025
11 0.0029
12 0.0034
13 0.0039
14 0.0045
15 0.0052
16 0.0060
44 0.3333
45 NDIR spectral nautical directions in degr
46 72 number of directions
47 267.5000
48 262.5000
49 257.5000
50 252.5000
51 247.5000
52 242.5000
53 237.5000
54 232.5000
55 227.5000
56 222.5000
57 217.5000
58 212.5000
59 207.5000
118 -87.5000
119 QUANT
120 1 number of quantities in table
121 VaDens variance densities in m2/Hz/degr
122 m2/Hz/degr unit
123 -0.9900E+02 exception value
124 FACTOR
125 0.14785446E-03
126 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 21 60 78 58 24 2
127 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 6 30 87 112 83 34 3
128 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 7 36 103 131 96 40 4
129 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 8 43 122 155 114 47 5
130 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 9 49 140 180 133 55 5
131 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 10 54 156 201 150 62 6
132 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 12 64 181 230 167 69 7
133 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 17 94 261 319 215 89 9
134 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 17 89 245 299 205 86 8
135 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 13 66 182 225 160 68 7
136 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 12 60 165 204 145 61 6
137 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 11 56 153 187 130 55 6
138 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 9 48 129 156 107 46 5
139 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 8 41 108 128 85 36 4
140 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 6 32 83 98 64 27 3

```

Figura 4-3. Ejemplo de formato del archivo de forzamiento por archivo de espectro SWAN en el programa XBeach

4.1.8 Parámetros de corrección no hidrostática

Al emplear el módulo no hidrostático, se presentan los parámetros mencionados en el Cuadro 4-8, asociados directamente a correcciones no hidrostáticas del modelo.

Cuadro 4-8. Descripción de los comandos de corrección no hidrostática del archivo params.txt

Comando	Descripción	Rango de valores	Valor utilizado		Observaciones
solver	Método de solución a utilizar para el sistema lineal.	<u>tridiag</u> <u>sip</u>	tridiag	N/A	
nhreaker	Modelo de rotura no hidrostática	0 – 2	1.0		Se mantiene el valor por defecto
dispc	Coefficiente frente al gradiente vertical de presiones	0.1 – 2.0	-1.0		Se mantiene el valor por defecto
maxbrsteep	Coefficiente de rotura de la ola definido a partir de la máxima pendiente que esta puede tener antes de romper	0.3 – 0.8	0.4		Se mantiene el valor por defecto

4.1.9 Parámetros de salida

Por último, en el archivo params.txt se colocan los archivos y parámetros de salida que se desean obtener del modelo. XBeach presenta una gran cantidad de parámetros de salida, sin embargo, a continuación, se describen algunos de los más relevantes utilizados durante la calibración y validación del programa.

Cuadro 4-9. Descripción de las variables de salida del archivo params.txt

Comando	Descripción	Rango de valores	Valor utilizado		Observaciones
outputformat	Formato de salida de los archivos	<u>fortran</u> <u>netcdf</u> <u>debug</u>	netcdf	N/A	
tintg	Intervalo de tiempo para las salidas globales	N/A	1		Se podría aumentar el valor para reducir el tamaño de los archivos de salida
tintp	Intervalo de tiempo para las salidas de los puntos	N/A	1		Se podría aumentar el valor para reducir el tamaño de los archivos de salida
nglobalvar	Número de variables a extraer de manera global	-1 - 20	Variable		Varía de acuerdo con la cantidad de variables a extraer
"variables"	Codificación de las variables a extraer de manera global	<u>zb0</u> : Nivel del fondo inicial (no varía si no se activa el módulo morfodinámico) <u>zs</u> : Nivel del agua total <u>zs0</u> : Nivel de marea <u>zs1</u> : Nivel del agua total menos el nivel de marea	N/A	N/A	
npoints	Número de puntos específicos donde se obtendrán variables	0 – 50	Variable		Varía de acuerdo con la cantidad de puntos a extraer
"ubicación de los puntos"	Se colocan seguidamente las coordenadas x y de los puntos a extraer según el	N/A	N/A	N/A	

Comando	Descripción	Rango de valores	Valor utilizado	Observaciones
	sistema definido en la malla de cálculo			
npointvar	Número de variables a extraer para cada punto	0 – 50	Variable	Varía de acuerdo con la cantidad de variables a extraer
“variables para los puntos”	Codificación de las variables a extraer para cada punto. Pueden ser iguales a las variables globales o diferir de estas.	<u>zb0</u> : Nivel del fondo inicial (no varía si no se activa el módulo morfodinámico) <u>zs</u> : Nivel del agua total <u>zs0</u> : Nivel de marea <u>zs1</u> : Nivel del agua total menos el nivel de marea	N/A	N/A

4.2 Calibración del modelo

4.2.1 Descripción del proceso

Para la calibración del modelo, se utilizaron las series de superficie libre obtenidas de la campaña de campo realizada en mayo de 2019. Se utilizó esta campaña para la realización de la calibración del modelo XBeach, porque a pesar de contar con menos mediciones, presentó un oleaje con más energía que la campaña realizada en 2021, situación que se asemeja en mayor medida con las condiciones de tormenta que busca simular este programa. En la Figura 4-4 se resume el proceso seguido para la calibración del modelo, el cual se describe a continuación.

Se definió el modelo de acuerdo con los parámetros caracterizados en la sección 4.1 (en el Apéndice C se muestra el archivo completo de parámetros empleado), donde se procedió a variar el valor del coeficiente de fricción (cf) en todo el rango de valores permitidos por el programa (0.001 – 0.9). Los valores de coeficiente de fricción analizados fueron: de 0.001 a 0.01, se usaron los casos a 0.001 y 0.003; de 0.01 a 0.1, se tomaron casos cada 0.01; y de 0.1 a 0.9, se tomaron casos cada 0.1.

Se extrajeron los resultados obtenidos de superficie libre en puntos asociados a los puntos de medición en la campaña de campo, y a estos se les realizó el análisis espectral para posteriormente realizar la comparación de los resultados del modelo con los resultados de las mediciones, para así luego determinar los estadísticos: RMSE, Sesgo, SI y r . Una vez obtenidos estos estadísticos para cada variación realizada del cf , se procedió a definir el coeficiente que implicara el mejor ajuste en general para los tres puntos de control, así como para los cuatro parámetros de oleaje estudiados (Hm_0 , Hm_0 IG, Tm_{02} y Tm_{02} IG).

Una vez calibrado el modelo a partir del forzamiento con series temporales, se procedió a revisar este mismo, pero en este caso se forzó con parámetros espectrales (Jonswap) y el cf calibrado previamente definido. Cabe destacar que, como parte de la definición de este forzamiento incluye la definición de parámetros de forma del espectro, se realizó también una revisión de los resultados que se obtendrían al optimizar estos valores para determinar si son significativos en comparación con los parámetros por defecto.

1. Definición del modelo	<ul style="list-style-type: none"> • Creación de archivos de forzamiento (params, oleaje y batimetría) para las series temporales
2. Variación de cf	<ul style="list-style-type: none"> • Variación del parámetro cf: [0.001 - 0.9]
3. Análisis espectral de resultados	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo de parámetros espectrales: Hm0, Hm0 IG, Tm02 y Tm02 IG para cada caso
4. Comparación de valores medidos y modelados	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo de estadísticos RMSE, Sesgo, SI y r
5. Definición de cf de calibración	<ul style="list-style-type: none"> • Resultados con el menor error en general para los tres puntos de control y cuatro parámetros espectrales
6. Corridas con espectro	<ul style="list-style-type: none"> • Corrida con parámetros para espectro Jonswap y cf calibrado • Revisión de significancia de la optimización de parámetros de forma del espectro Jonswap y cf calibrado

Figura 4-4. Proceso de calibración de XBeach

4.2.2 Resultados obtenidos

En primer lugar, se realizó una corrida base con $cf=0.003$ (valor por defecto del programa) para tener un resultado de comparación el cual mejorar con la calibración. En la Figura 4-5 se muestran gráficos de dispersión para distintos parámetros de oleaje y onda infragravitatoria, donde se comparan los resultados del modelo con el valor por defecto de $cf=0.003$ contra los datos medidos. Esto para cada una de las ubicaciones de los equipos.

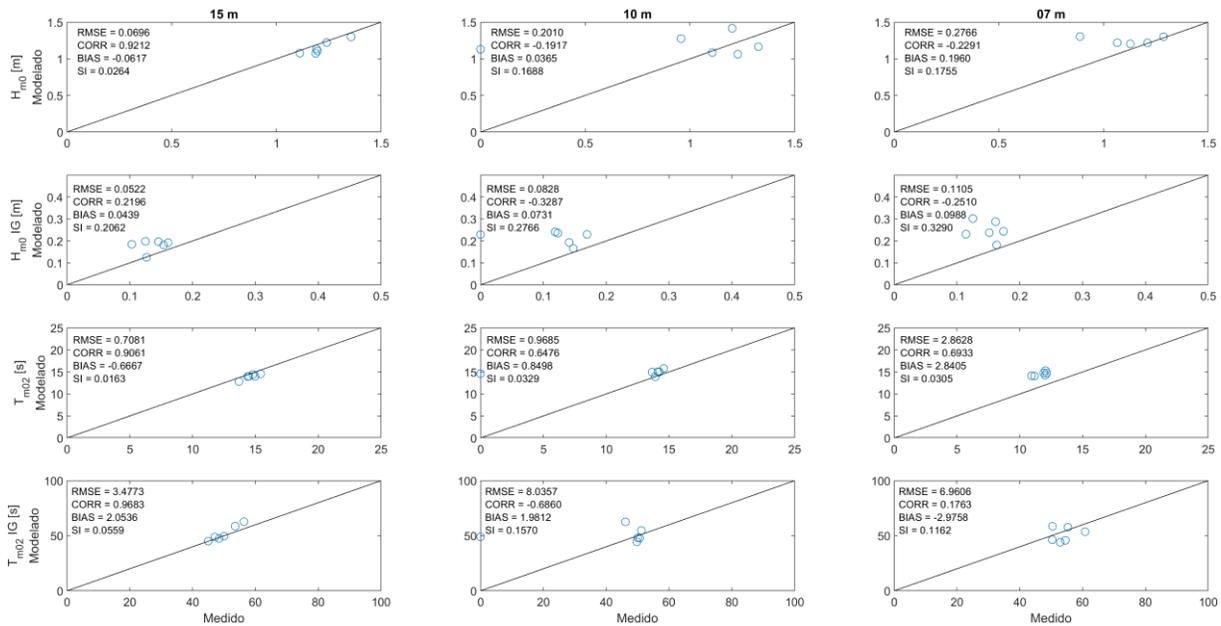


Figura 4-5. Gráfico de dispersión del modelo base en la calibración (cf=0.003)

En la Figura 4-6 se muestran la misma configuración de gráficos, pero esta vez corresponde a los resultados del modelo con un valor de **cf=0.07, que corresponde al de mejor ajuste, contra los datos medido por los equipos.**

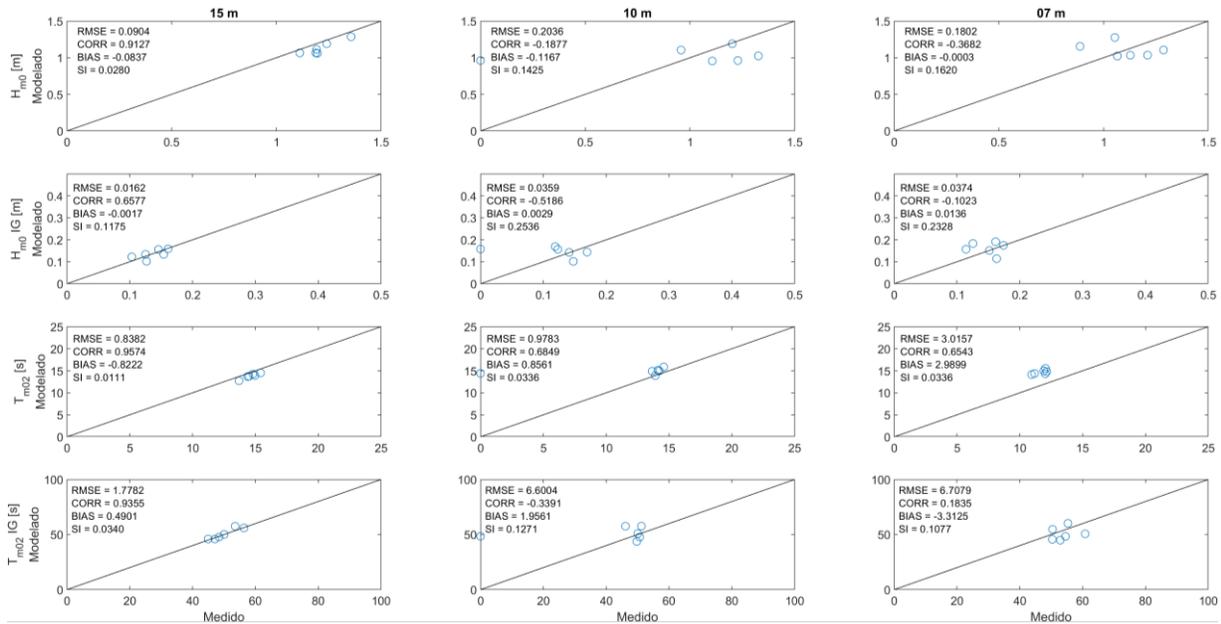


Figura 4-6. Gráfico de dispersión del modelo de mejor ajuste obtenido en la calibración (cf=0.07)

Con el fin de observar mejor la mejoría en cada caso, en el Cuadro 4-10 se resumen los resultados del RMSE obtenido para las corridas mostradas anteriormente.

Cuadro 4-10. Resumen de RMSE obtenidos durante la calibración de series temporales

Casos	Parámetro/Punto	07 m	10 m	15 m
Caso Base Forzamiento: Series temporales Fricción: cf=0.003	Hm0 (m)	0.2766	0.2010	0.0696
	Hm0 IG (m)	0.1105	0.0828	0.0522
	Tm02 (s)	2.8628	0.9685	0.7081
	Tm02 IG (s)	6.9606	8.0357	3.4773
Caso Calibrado Forzamiento: Series temporales Fricción: cf=0.07	Hm0 (m)	0.1802	0.2036	0.0904
	Hm0 IG (m)	0.0374	0.0359	0.0162
	Tm02 (s)	3.0157	0.9783	0.8382
	Tm02 IG (s)	6.7079	6.6004	1.7782

Como se puede notar, se da una mejoría en los resultados del modelo al calibrar el cf (el valor de RMSE disminuye), especialmente en lo que respecta al parámetro Hm0 IG, el cual se considera uno de los parámetros críticos para el modelado del oleaje en la playa de Caldera Norte debido a la influencia de las olas infragravitatorias en los eventos de rebase durante tormentas.

Una vez definido el cf de calibración, se procedió a realizar la misma corrida del modelo, pero en este caso utilizando el forzamiento de parámetros espectrales. En la Figura 4-7 se muestran los resultados obtenidos de este caso.

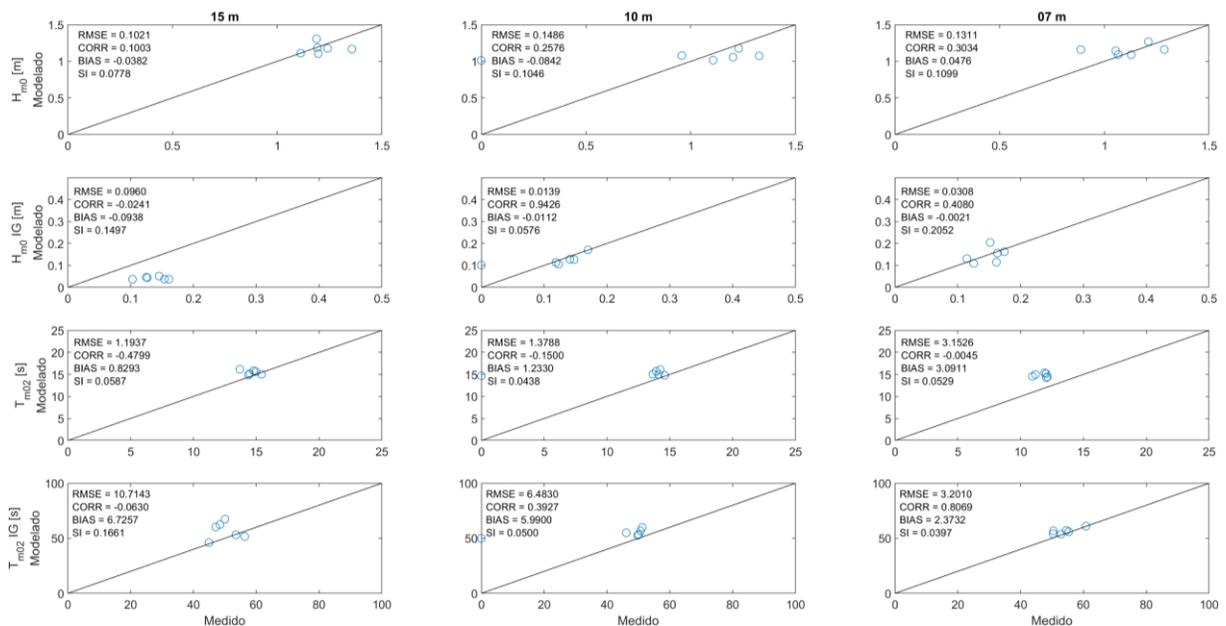


Figura 4-7. Gráfico de dispersión del modelo forzado con parámetros espectrales y cf=0.07

También, se realizaron diversas corridas variando los parámetros de forma del espectro (σ y γ) para el coeficiente de fricción calibrado, sin embargo, se obtuvo que los mejores resultados de manera general se tienen al mantener los valores por defecto para el espectro Jonswap.

Al igual que con el caso de forzamiento con series temporales, en el Cuadro 4-11 se resumen los resultados del RMSE obtenido para la corrida mostrada anteriormente.

Cuadro 4-11. Resumen de RMSE obtenidos durante la revisión del forzamiento con parámetros Jonswap

Casos	Parámetro/Punto	07 m	10 m	15 m
Caso Parámetros Espectrales Valores por defecto Forzamiento: Jonswap ($\sigma=10$ y $\gamma=3.3$) Fricción: $cf=0.003$	Hm0 (m)	0.2872	0.1927	0.1320
	Hm0 IG (m)	0.0901	0.0805	0.0332
	Tm02 (s)	2.9624	1.3438	1.5318
	Tm02 IG (s)	7.7621	13.3807	11.4102
Caso Parámetros Espectrales Forzamiento: Jonswap ($\sigma=10$ y $\gamma=3.3$) Fricción: $cf=0.07$	Hm0 (m)	0.1311	0.1486	0.1021
	Hm0 IG (m)	0.0308	0.0139	0.0960
	Tm02 (s)	3.1526	1.3788	1.1937
	Tm02 IG (s)	3.2010	6.4830	10.7143

El forzamiento por medio de los parámetros espectrales presenta resultados comparables a los del forzamiento con series temporales, permitiendo definir que bajo ambos forzamientos el modelo simula el oleaje de manera satisfactoria bajo las condiciones de calibración detalladas anteriormente.

4.3 Validación del modelo

4.3.1 Descripción del proceso

Una vez concluida la etapa de calibración, se procede a realizar la validación del modelo. Para esto se utilizaron las series de superficie libre obtenidas de la campaña de campo realizada en marzo de 2021. En la Figura 4-8 se resume el proceso seguido para la validación del modelo, el cual se describe a continuación.

Se definió el modelo de acuerdo con los parámetros mostrados en la siguiente imagen, donde se utiliza el coeficiente de fricción calibrado. Una vez realizadas las corridas, se siguió el mismo procedimiento de proceso de resultados empleado durante la etapa de calibración del modelo.

Una vez validado el modelo a partir del forzamiento con series temporales, se procedió a revisar este mismo, pero en este caso se validó con el forzamiento de parámetros espectrales (Jonswap) y el cf calibrado previamente definido.

Por último, se realizó una validación cualitativa del modelo, específicamente de su capacidad de simulación del rebase. Para esto se forzó el modelo por medio de un espectro direccional (Swan), para una condición de oleaje en la cual se confirmó el rebase de manera visual. La validación se considera satisfactoria si se da el rebase en algún momento en el modelo. De manera adicional, se fuerza el modelo con el espectro direccional que incluye la energía de las ondas infragravitatorias y también con el espectro que no contempla estas, con el fin de verificar el comportamiento esperado del modelo bajo la influencia de ondas infragravitatorias y su influencia en el rebase.

1. Definición del modelo con cf calibrado	<ul style="list-style-type: none"> • Creación de archivos de forzamiento (params, oleaje y batimetría) para las series temporales con $cf=0.07$
2. Análisis espectral de resultados	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo de parámetros espectrales: $Hm0$, $Hm0$ IG, $Tm02$ y $Tm02$ IG para cada caso
3. Comparación de valores medidos y modelados	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo de estadísticos RMSE, Sesgo, SI y r
4. Corridas con espectro con cf calibrado	<ul style="list-style-type: none"> • Corrida con parámetros para espectro Jonswap y cf calibrado
5. Validación cualitativa	<ul style="list-style-type: none"> • Corridas con espectros Swan pronosticados para un evento de tormenta donde se dio rebase, tomando en cuenta espectros con IG y sin IG.

Figura 4-8. Proceso de validación de XBeach

4.3.2 Resultados obtenidos

Se realizaron las corridas de validación con **$cf=0.07$** y el forzamiento con series temporales y con parámetros espectrales (Jonswap). En la Figura 4-9 y la Figura 4-10 se muestran los gráficos de dispersión obtenidos ambos casos.

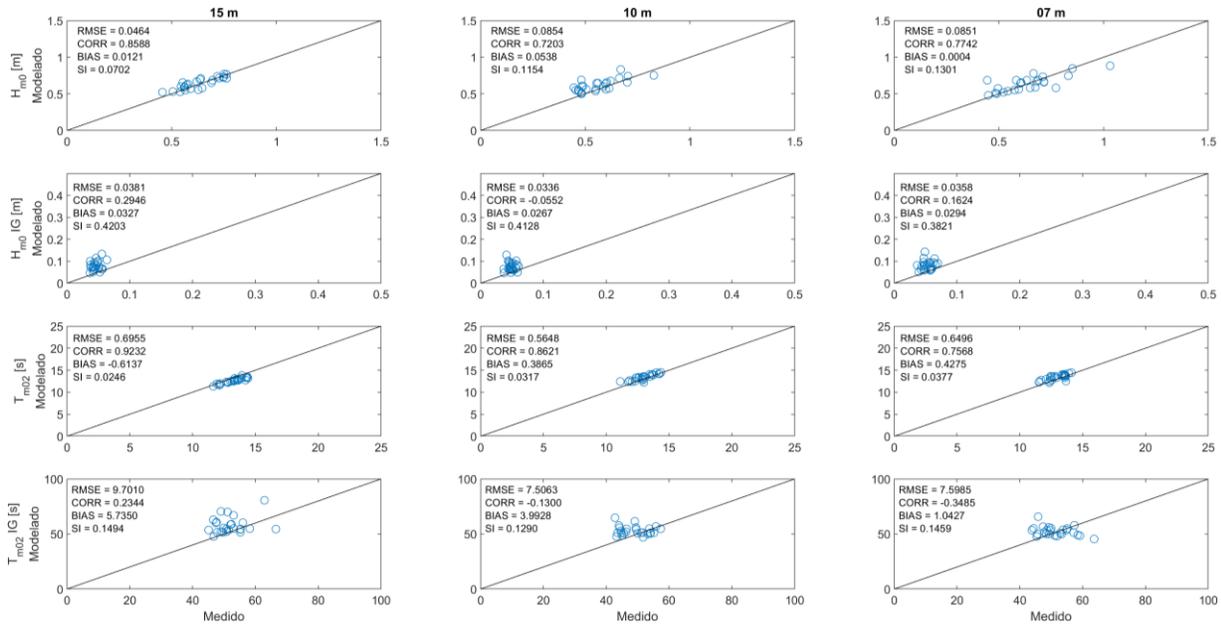


Figura 4-9. Gráfico de dispersión de la validación del modelo forzado con series temporales (cf=0.07)

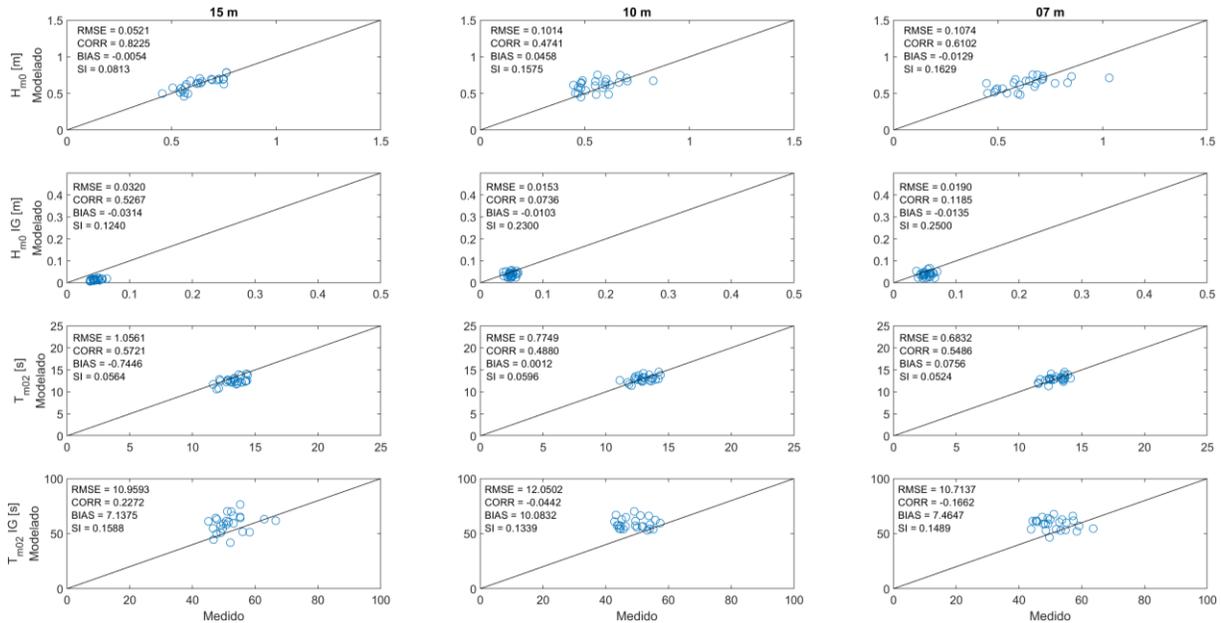


Figura 4-10. Gráfico de dispersión de la validación del modelo forzado con parámetros espectrales (cf=0.07)

En el Cuadro 4-12 se resumen los resultados del RMSE obtenido para las corridas mostradas anteriormente.

Cuadro 4-12. Resumen de RMSE obtenidos durante la validación del modelo

Casos Series Temporales	Parámetro/Punto	07 m	10 m	15 m
Fricción por defecto Forzamiento: Series temporales Fricción: cf=0.003	Hm0 (m)	0.1651	0.1806	0.1052
	Hm0 IG (m)	0.0578	0.0548	0.0530
	Tm02 (s)	0.6359	0.6483	0.5769
	Tm02 IG (s)	6.4686	6.5043	7.8817
Fricción calibrada Forzamiento: Series temporales Fricción: cf=0.07	Hm0 (m)	0.0851	0.0854	0.0464
	Hm0 IG (m)	0.0358	0.0336	0.0381
	Tm02 (s)	0.6496	0.5648	0.6955
	Tm02 IG (s)	7.5985	7.5063	9.7010
Casos Parámetros Espectrales	Parámetro/Punto	07 m	10 m	15 m
Fricción por defecto Forzamiento: Jonswap ($\sigma=10$ y $\gamma=3.3$) Fricción: cf=0.003	Hm0 (m)	0.2469	0.2226	0.0562
	Hm0 IG (m)	0.2650	0.2011	0.0157
	Tm02 (s)	31.7663	26.9804	1.0187
	Tm02 IG (s)	26.2996	20.8925	8.3521
Fricción calibrada Forzamiento: Jonswap ($\sigma=10$ y $\gamma=3.3$) Fricción: cf=0.07	Hm0 (m)	0.1074	0.1014	0.0521
	Hm0 IG (m)	0.0190	0.0153	0.0320
	Tm02 (s)	0.6832	0.7749	1.0561
	Tm02 IG (s)	10.7137	12.0502	10.9593

Se puede notar que los errores en la validación del modelo se mantienen aproximadamente en el mismo rango que durante la calibración, así como se nota una mejoría significativa en el RMSE al comparar los resultados con el coeficiente por defecto y el coeficiente calibrado para los dos tipos de forzamiento.

Cabe resaltar que la validación del modelo se realizó para estados de mar con poca energía (época de verano y sin afectación de tormenta), por lo que estos errores implican un mayor error relativo a los resultados obtenidos. A pesar de obtener estos resultados, la validación igualmente presenta que el modelo calibrado mantiene un error relativamente constante por lo que se espera que, al tratar con eventos de tormenta, este error se mantenga, reduciéndose relativamente a los valores de los parámetros espectrales de oleaje analizados.

Una vez concluida la validación del modelo, se procede a realizar la revisión cualitativa de rebase, forzando el modelo con dos espectros asociados a estados de mar energéticos y que se tiene evidencia histórica de que produjeron rebase. Los espectros son provenientes del

programa SWAN, donde ambos presentan la misma energía, pero una distribución distinta de esta variable. El primer espectro no incluye energía en las bajas frecuencias (IG) y el segundo sí.

Al correr el programa con los espectros descritos anteriormente y el coeficiente de fricción calibrado ($cf=0.07$), se obtienen los resultados de rebase mostrados en la Figura 4-11.

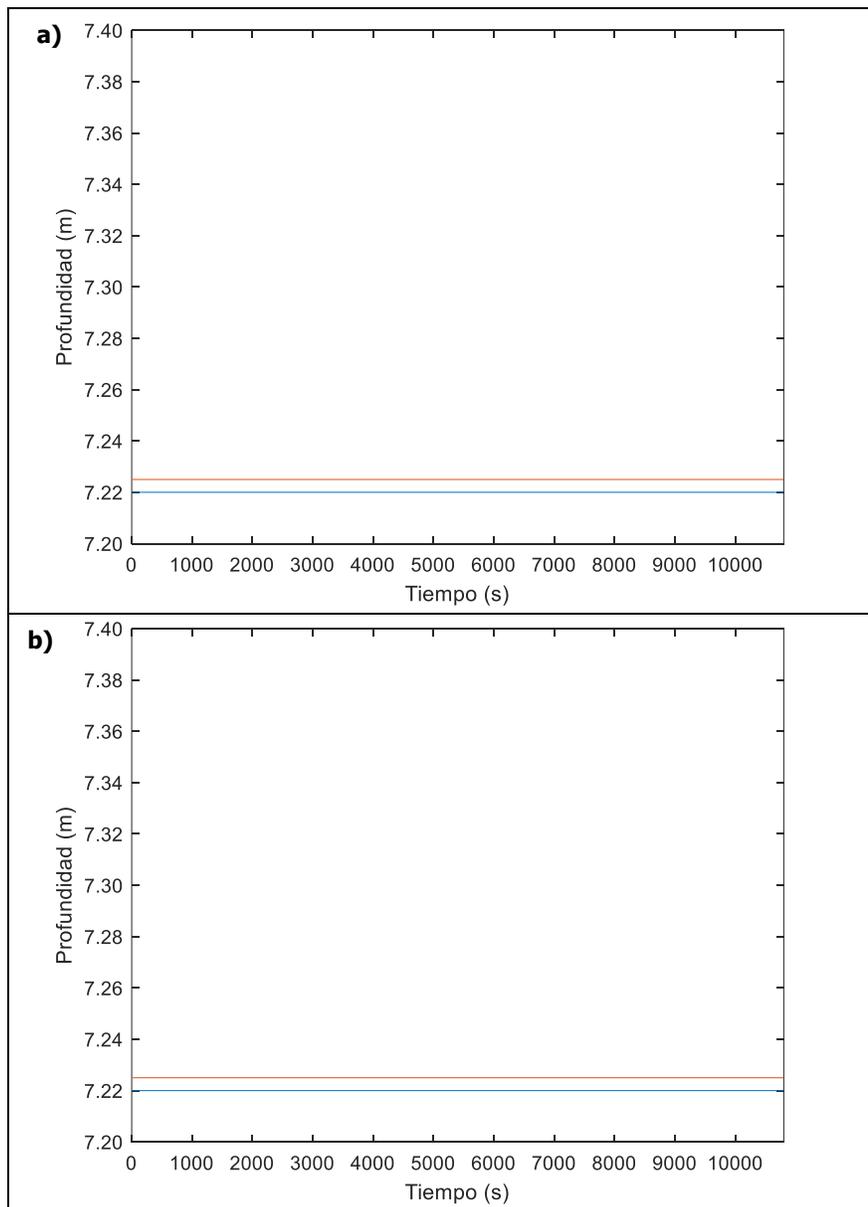


Figura 4-11. Gráfico de rebase del oleaje a lo largo del tiempo con un coeficiente de fricción de 0.07 para a) un espectro sin ondas IG y b) un espectro con ondas IG

Como se puede observar, no se da el rebase para ninguno de los dos casos, situación que permite identificar la influencia que tuvo la cantidad de energía presente en los datos utilizados

tanto para la calibración como para la validación. Al trabajar con bajas energías en comparación a los datos asociados a tormentas, esta calibración del modelo solo se verá aplicada a rangos de energía similares a los utilizados en la calibración y validación mostradas anteriormente.

Debido a lo anterior, y con el fin de observar la capacidad del modelo de manera cualitativa, se proceden a repetir las corridas, pero en este caso, utilizando el coeficiente de fricción que el programa incorpora por defecto ($cf=0.003$). Para estos casos se obtienen los resultados de rebase mostrados en la Figura 4-12.

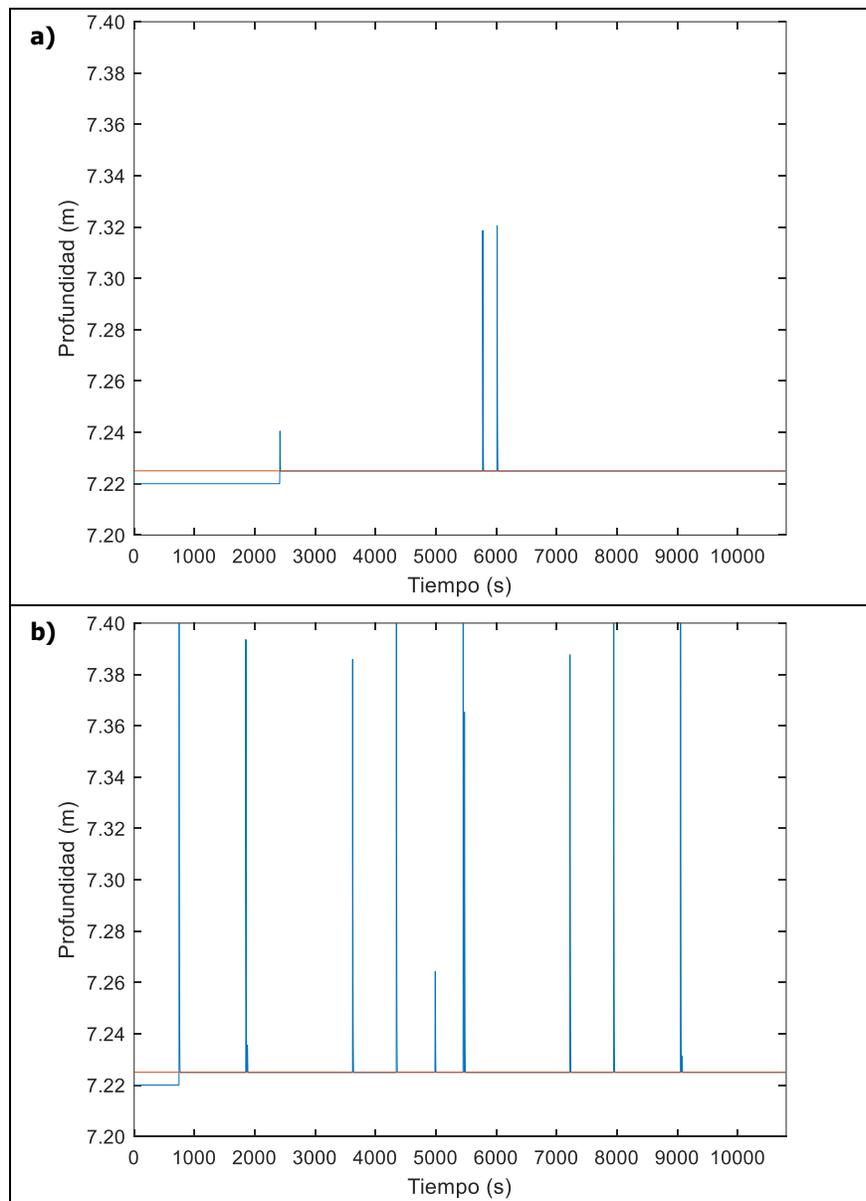


Figura 4-12. Gráfico de rebase del oleaje a lo largo del tiempo con un coeficiente de fricción de 0.003 (valor por defecto) para a) un espectro sin ondas IG y b) un espectro con ondas IG

En este caso, se pueden observar claramente los eventos de rebase en ambos casos energéticos (con IG y sin IG), donde se da un aumento claro en la cantidad de los eventos de rebase que presenta el modelo al incorporar las ondas infragravitatorias en el espectro de energía, indicador sumamente importante de un comportamiento consistente con entre el modelado y lo esperado para este tipo de playas y climas marítimos.

CAPÍTULO 5. CONDICIONES CRÍTICAS DE OLEAJE EN EL SITIO

5.1 Descripción del proceso

En esta etapa se busca definir límites de rebase en la zona según el periodo pico (T_p) y la altura de ola (H_{m0}). Adicionalmente, se determinan los intervalos de confianza de los resultados obtenidos con el fin de obtener una zona que cubra de manera conservadora las condiciones de rebase.

Para realizar lo anterior, se procedió a realizar corridas para definir la altura de ola necesaria para que se dé el rebase en periodos de ola desde 15 s hasta 30 s. Para definir el intervalo de confianza, se repitieron dichas corridas 50 veces para cada periodo estudiado y se empleó una distribución normal para la determinación del promedio y los intervalos de confianza presentados, con el fin de definir resultados estadísticamente más robustos en el modelo.

Para la configuración del modelo se tomaron en cuenta los hallazgos detectados durante la validación cualitativa de los eventos de rebase, por lo que se proceden a realizar corridas con forzamientos tipo Jonswap, con el coeficiente de fricción por defecto del modelo ($cf=0.003$) y con un nivel de pleamar de 3.0 m. Como se puede inferir, los resultados obtenidos podrán ser empleados únicamente como un primer acercamiento a la creación de una guía general de las condiciones requeridas para el rebase, el cual se deberá validar por medio de campañas de campo adicionales durante condiciones de tormenta donde se dé el rebase en la playa.

5.2 Gráfico de rebase en Playa Caldera

En la Figura 5-1 se puede observar el gráfico de rebase obtenido con sus respectivos intervalos de confianza (99 % de confianza).

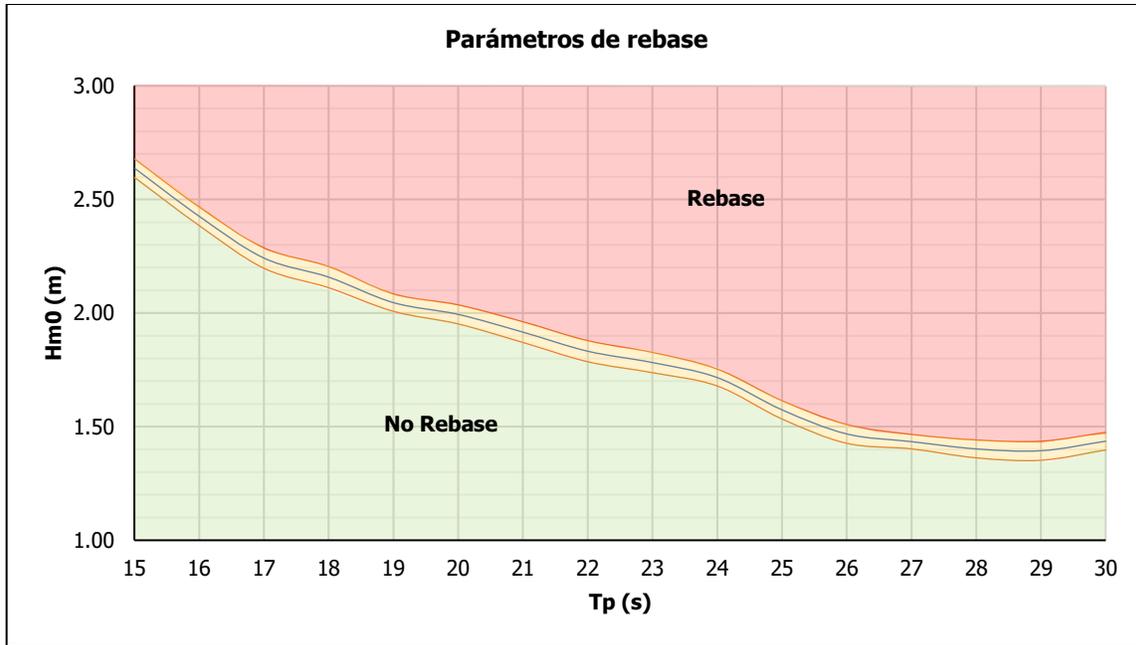


Figura 5-1. Gráfico de rebase del oleaje según su altura y periodo a partir de simulaciones Jonswap

Como se puede observar, conforme aumenta la altura de ola, se presenta más fácilmente el rebase, así como al aumentar el periodo, la altura de rebase se llega a estabilizar a aproximadamente 1.4 m.

Se considera importante destacar que este gráfico, en conjunto con la herramienta de pronóstico de oleaje, puede llegar a ser de gran ayuda para el gobierno local de la zona al momento de tener eventos de tormenta ya que se podrían prever estos y con anticipación colocar protecciones o alertas para quienes transitan la zona, así como implementar sistemas colaborativos con la policía de tránsito para regular el paso en caso de requerirse.

Se reitera que en el presente proyecto únicamente se realizó una validación cualitativa del rebase, por lo que, para validar el gráfico presentado anteriormente, se deberá realizar una validación cuantitativa del rebase en la zona a partir de campañas de observación en campo.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La zona cercana a la playa al norte de Caldera es de gran importancia para este estudio debido, principalmente, a la cercanía de la playa con la carretera Barranca-Caldera (Ruta 23). Esta cercanía ha generado que durante eventos de tormenta se generen rebases que llegan incluso a bloquear el paso por esta ruta, situación que afecta el tránsito de vehículos que utilizan la vía para fines turísticos y de transporte de cargas, así como la propia seguridad de las personas que transitan la zona durante estos eventos. Por esta razón, la determinación de un modelo de pronóstico de este tipo de eventos se presenta como una herramienta de gran utilidad para la minimización y prevención de daños o accidentes.

El programa XBeach es un modelo numérico de libre acceso diseñado inicialmente para la simulación de la hidrodinámica y morfodinámica asociadas a eventos extremos de oleaje (tormentas) en playas arenosas en Estados Unidos. Desde su creación, ha sido aplicado para otros tipos de playas y aplicaciones, como por ejemplo la propuesta en el presente proyecto.

Se determinó el uso del programa XBeach en su módulo no hidrostático debido a que este módulo presenta un conjunto de características que lo hacen ideal para el modelado y, especialmente, para el pronóstico de oleaje en la zona de la costa de Caldera. Entre estas características están su bajo requerimiento computacional en comparación con otros modelos del mismo tipo (que resuelven la ola), su alto nivel de exactitud en los resultados debido al tipo de esquema de solución donde se da una propagación ola a ola y no con una envolvente como lo realiza el otro módulo que presenta XBeach (módulo surfbeat) y su libre uso.

Para la calibración y validación del programa, se utilizaron dos campañas de campo, donde se colocaron tres equipos a lo largo de un perfil crítico definido en la zona de menor distancia entre el enrocado de la playa y la carretera. Los equipos se ubicaron a profundidades de 15 m, 10 m y 7 m aproximadamente.

La primera campaña de campo se realizó en mayo de 2019, en esta se obtuvieron 6 estados de mar en cada equipo. La segunda campaña de campo se realizó en marzo de 2021 y en esta se obtuvieron 26 estados de mar en cada equipo. Adicionalmente, en la segunda campaña de campo también se obtuvieron videos del oleaje en la costa (zona asociada al perfil definido

previamente) para 6 estados de mar ubicados dentro del espacio de tiempo medido por el equipo.

Para determinar los parámetros que más adelante se usarían como referencia, se procesaron los datos de ambas campañas de campo realizando tanto un análisis en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

Se obtuvieron batimetrías realizadas en los años 2013 y 2021 para el perfil de análisis. Estas batimetrías, al igual que los datos de oleaje, fueron proporcionadas por el iMARES. Las batimetrías se tenían en un formato de puntos donde se daba el espaciamiento entre los puntos y la profundidad de estos, formato similar al requerido por el programa XBeach.

Los datos de mareas se obtuvieron a partir de los pronósticos realizados por el programa WXTide para las fechas asociadas a las campañas de campo realizadas.

Se expuso la configuración utilizada en el modelo XBeach en su módulo no hidrostático, donde se da especial atención al tipo de forzamiento empleado para la zona de frontera de oleaje. Para la implementación y posterior calibración se empleó un modelo en una dimensión con un forzamiento de series temporales de superficie libre y velocidades orbitales en la superficie. Por otro lado, también se utilizaron otros tipos de forzamientos del oleaje, con el fin de verificar el efecto en el rebase en la costa. El principal de estos métodos es el forzamiento con parámetros espectrales para un espectro tipo Jonswap.

Cabe destacar que, debido a su complejidad y robustez, el modelo presenta gran cantidad de parámetros de ajuste que no se contemplaron durante la calibración y validación, sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos, se determinó que los valores por defecto de estos parámetros son suficientes para obtener resultados apropiados en las simulaciones.

Se realizó la calibración del programa XBeach en su módulo no hidrostático utilizando como forzamiento del oleaje las series temporales de superficie libre obtenidas de la campaña de campo realizada en mayo de 2019. Se determinó utilizar esta campaña ya que en estas mediciones se obtuvieron mayores energías de las olas, situación que se asemeja en mayor medida a una situación de tormenta, esto en comparación con los resultados medidos en la campaña de marzo de 2021. Para el forzamiento de la calibración del modelo, se utilizaron específicamente los datos obtenidos en el equipo ubicado a aproximadamente 15 m de profundidad y estos se propagaron hacia la costa.

La calibración del modelo se realizó ajustando el coeficiente de fricción, por lo que se procesaron las series temporales de superficie libre que resultaron en los puntos asociados a los equipos de medición en 10 m y 7 m de profundidad. A estas series temporales se les realizó un análisis en el dominio de la frecuencia con el fin de determinar si los parámetros de altura y periodo tanto en su rango total de frecuencias como en las bajas frecuencias (ondas infra gravitatorias) eran concordantes con los valores medidos. Para determinar qué valor de coeficiente de fricción presentaba los resultados de mayor exactitud, se procedió a calcular los parámetros estadísticos: RMSE, Sesgo, SI y r.

Se determinó que el coeficiente de fricción que presentaba el menor error en general fue el coeficiente de $cf=0.07$. Como se puede observar en la Figura 4-6, se da una buena correlación entre los resultados modelados y los medidos en los cuatro parámetros estudiados (H_{m0} , H_{m0} IG, T_{m02} y T_{m02} IG). También se revisó el forzamiento del modelo ya calibrado con un forzamiento espectral con parámetros para un espectro Jonswap, donde se obtuvo que el modelo se comportó de manera adecuada presentando errores relativamente bajos en comparación con los resultados obtenidos.

Una vez concluida la etapa de calibración, se validó el modelo calibrado utilizando los resultados de la campaña de medición de marzo de 2021, esto por medio de un forzamiento con series temporales y parámetros espectrales (espectro Jonswap). Los resultados obtenidos se consideran satisfactorios ya que se puede observar una constancia en los errores obtenidos, sin embargo, al ser una campaña de oleaje menos energética, los resultados presentan mayores errores relativos a los parámetros estudiados.

También, como parte de la validación, se realizó una revisión cualitativa del rebase en la zona a partir de un espectro proveniente del programa Swan de una época donde se observó el rebase en la zona, tomando en cuenta la influencia de las ondas infragravitatorias y omitiéndolas con el fin de determinar la influencia de estas en el rebase en el sitio.

Se determinó que el parámetro calibrado del coeficiente de fricción está asociado a bajas energías del oleaje, por lo que, al forzar el modelo con el espectro Swan y el coeficiente de fricción calibrado ($cf=0.07$), no se dieron rebases. Por esta razón, se procedió a realizar nuevamente la propagación, pero en este caso con el coeficiente de fricción por defecto ($cf=0.003$) como una primera aproximación, teniendo que en este caso sí se da el rebase y, además, al incorporar la energía en las bajas frecuencias, se dan hasta 3 veces más eventos

de rebase en comparación al forzamiento del modelo con el espectro sin energía en dichas frecuencias.

Por último, se procedió a realizar un gráfico de rebase en el sitio en función de los parámetros espectrales del oleaje H_{m0} y T_p . Para esto se realizaron 50 corridas por punto de periodo definido para determinar el H_{m0} de rebase. Es importante destacar que este gráfico únicamente puede ser considerado como una primera aproximación a un sistema de pronóstico del oleaje que potencialmente podría afectar la zona de Playa Caldera ya que, como se ha mencionado, al no tener mediciones durante eventos extremos (tormentas), no se puede realizar calibración para eventos asociados a alta energía.

Se concluye que el modelo numérico XBeach, en su módulo no hidrostático, posee la capacidad suficiente para simular la hidrodinámica del corto plazo en la playa al norte de Puerto Caldera de una manera eficiente y de bajo costo computacional. Debido a lo anterior, se determina que este modelo numérico puede ser empleado como base para un sistema de predicción de eventos de rebase en la zona.

6.2 Recomendaciones

Para toda persona que desee utilizar el modelo XBeach, se recomienda recurrir al manual del usuario de la versión en que se esté trabajando, ya que si la versión difiere de la utilizada en el presente proyecto se podrían presentar discrepancias en los módulos disponibles, formato de archivos externos, parámetros por defecto, entre otros que influyen directamente en los resultados a obtener del modelo.

Según las batimetrías observadas en ambos años donde se presentaron mediciones, la playa presenta cambios significativos con el paso del tiempo, especialmente en las zonas de menor profundidad, situación que se da por la dinámica de la playa, que presenta una alta cantidad de transporte de sedimentos. Teniendo esta situación en cuenta, se recomienda ampliar la línea de estudio para la predicción del rebase, incorporando el módulo de morfodinámica del modelo XBeach, en este caso para la predicción del comportamiento de la playa en términos de erosión y transporte de sedimentos.

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda explorar futuras líneas de investigación donde se tome en cuenta la calibración o abordaje de diversos parámetros que, debido al alcance de este proyecto, no se tomaron en cuenta. Por ejemplo, la calibración del coeficiente de fricción variable con la profundidad, el uso del módulo surfbeat (y los posibles parámetros adicionales de afectación) y su comparación con el módulo no hidrostático y, el empleo de forzamientos con espectros elaborados externamente al modelo XBeach (espectros más representativos a la zona como lo son los de dos picos).

Es recomendable la continuación en la creación de un sistema de predicción por medio de la validación cuantitativa de eventos de rebase en el sitio de estudio. Para esto será necesaria la ejecución de campañas de campo adicionales, así como medidas del oleaje en la costa en épocas de mayor energía del oleaje donde realmente se dé el rebase en el punto crítico al norte de playa Caldera. Por otro lado, se pueden utilizar los resultados presentados de los videos grabados en la playa para calibrar el modelo con respecto al run up de los estados de mar obtenidos.

Por último, se recomienda involucrar a las autoridades locales en la confección de un sistema de pronóstico del rebase en la zona de estudio, tomando en cuenta posibles registros históricos de rebase, ya sean cualitativos o cuantitativos, para la validación del modelo; así como futuros

acuerdos que permitan la medición en campo de datos que sirvan como insumo para elaborar un modelo predictivo de mayor precisión y velocidad de respuesta.

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, H. (2017). *Estudio de la dinámica del oleaje en el litoral pacífico de costa rica: metodologías de regionalización y avances en servicios relativos al clima marítimo*. Universidad de Cantabria.
- Ávila, A., Pedrozo, A., Silva, R., & Simmonds, D. J. (2003). Principales teorías para el modelado matemático de la propagación de oleaje. *IV Congreso Internacional: Puertos y Costas, Realidades y Perspectivas*.
- Bolle, A., Mercelis, P., Roelvink, D., Haerens, P., & Trouw, K. (2011). Application and Validation of Xbeach for Three Different Field Sites. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), 40. <https://doi.org/10.9753/icce.v32.sediment.40>
- Flater, D. (s. f.). *Introduction WXTide*. Introduction WXTide. Recuperado 13 de octubre de 2021, de <https://flaterco.com/xtide/introduction.html>
- Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (GIOC). (2000). *Documento de referencia: Dinámicas*. Universidad de Cantabria.
- Guisado Pintado, E., Malvárez García, G., & Concha Navas, F. (2010). Los Modelos De Propagación De Oleaje, Simulación Morfodinámica Y Las Tig. *La información geográfica al servicio de los ciudadanos [Recurso electrónico]: de lo global a lo local.*, 861-872.
- Kalligeris, N., Smit, P. B., Ludka, B. C., Guza, R. T., & Gallien, T. W. (2020). Calibration and assessment of process-based numerical models for beach profile evolution in southern California. *Coastal Engineering*, 158(November 2019), 103650. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103650>
- Kasinatha Pandian, P., Emmanuel, O., Ruscoe, J. P., Side, J. C., Harris, R. E., Kerr, S. A., & Bullen, C. R. (2010). An overview of recent technologies on wave and current measurement in coastal and marine applications. *Journal of Oceanography and Marine Science*, 1(1), 1-10. <http://www.academicjournals.org/joms>
- Lara, J. L., Ruju, A., & Losada, I. J. (2011). Reynolds averaged Navier-Stokes modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 467(2129), 1215-1242. <https://doi.org/10.1098/rspa.2010.0331>

- Lashley, C. H., Zanuttigh, B., Bricker, J. D., van der Meer, J., Altomare, C., Suzuki, T., Roeber, V., & Oosterlo, P. (2020). Benchmarking of numerical models for wave overtopping at dikes with shallow mildly sloping foreshores: Accuracy versus speed. *Environmental Modelling and Software*, *130*(April), 104740. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104740>
- Liu, F., & Losada, J. (2000). EL MODELADO MATEMATICO DE LA PROPAGACION DEL OLEAJE EN INGENIERÍA DE COSTAS. *Ingeniería del agua*, *7*(1), 37-46.
- Liu, P. L. F., & Losada, I. J. (2002). Wave propagation modeling in coastal engineering. *Journal of Hydraulic Research*, *40*(3), 229-240. <https://doi.org/10.1080/00221680209499939>
- Roelvink, D., Reiners, A., Van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., Lescinski, J., & McCall, R. (2010). XBeach Model Description and Manual. En *Dynamics of Marine Sands*. <https://doi.org/10.1680/doms.25844>
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, *56*(11-12), 1133-1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Instituto de ingeniería UNAM.
- Smit, P. ., Stelling, G. ., Roelvink, D., van Thiel de Vries, J., McCall, R., Van Dongeren, A., Zwinkels, C., & Jacobs, R. (2017). *XBeach: Non-hydrostatic model Delft University of Technology and Deltares*.
- Stelling, G. S., & Zijlema, M. (2010). Numerical modeling of wave propagation, breaking and run-up on a beach. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, *71 LNCSE*, 373-401. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03344-5-13>
- Stelling, G., & Zijlema, M. (2003). An accurate and efficient finite-difference algorithm for non-hydrostatic free-surface flow with application to wave propagation. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, *43*(1), 1-23. <https://doi.org/10.1002/flid.595>
- Svendsen, A. (2006). *Introduction to nearshore hydrodynamics*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Toffoli, A., & Bitner-Gregersen, E. M. (2017). Types of Ocean Surface Waves, Wave

Classification. *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*, 1-8.
<https://doi.org/10.1002/9781118476406.emoe077>

Trembanis, A., Lundine, M., & McPherran, K. (2021). Coastal Mapping and Monitoring. En *Encyclopedia of Geology* (2.^a ed.). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.12466-2>

van Dongeren, A. (2017). *XBeach: 10 years of open-source coastal modelling*. Deltares.nl.
<https://www.deltares.nl/en/blog/xbeach-10-years-of-open-source-coastal-modelling/>

Zijlema, M., & Stelling, G. S. (2008). Efficient computation of surf zone waves using the nonlinear shallow water equations with non-hydrostatic pressure. *Coastal Engineering*, 55(10), 780-790. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.02.020>

CAPÍTULO 8. APÉNDICES

8.1 Apéndice A. Campaña de medición 2019

8.1.1 Análisis en el dominio del tiempo

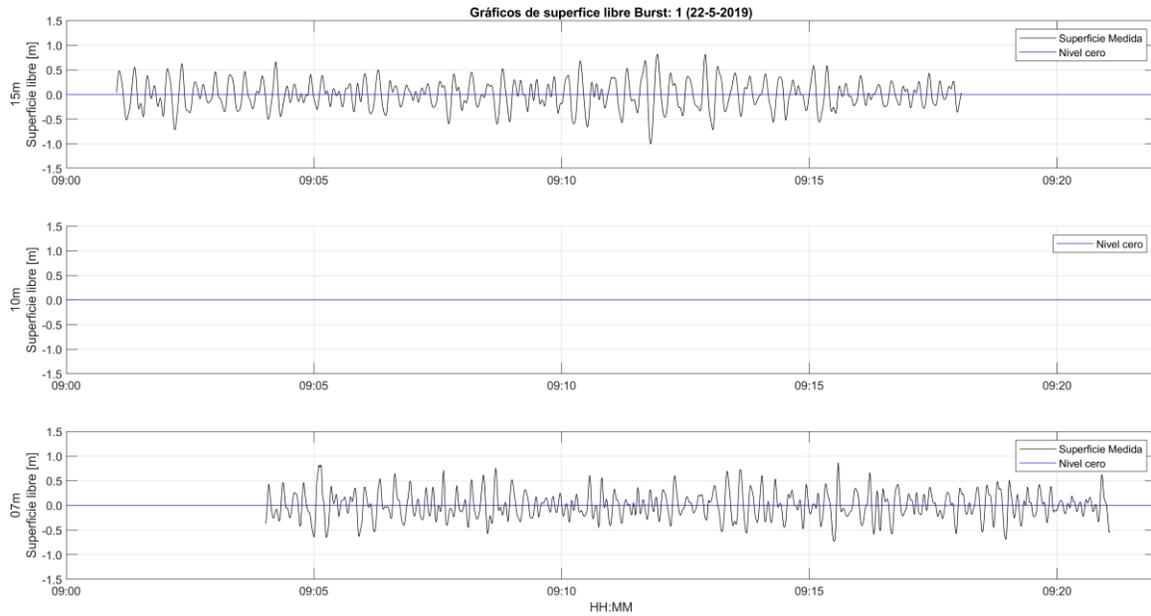


Figura A- 1. Superficie libre Estado de mar 22-05-2019 09:00

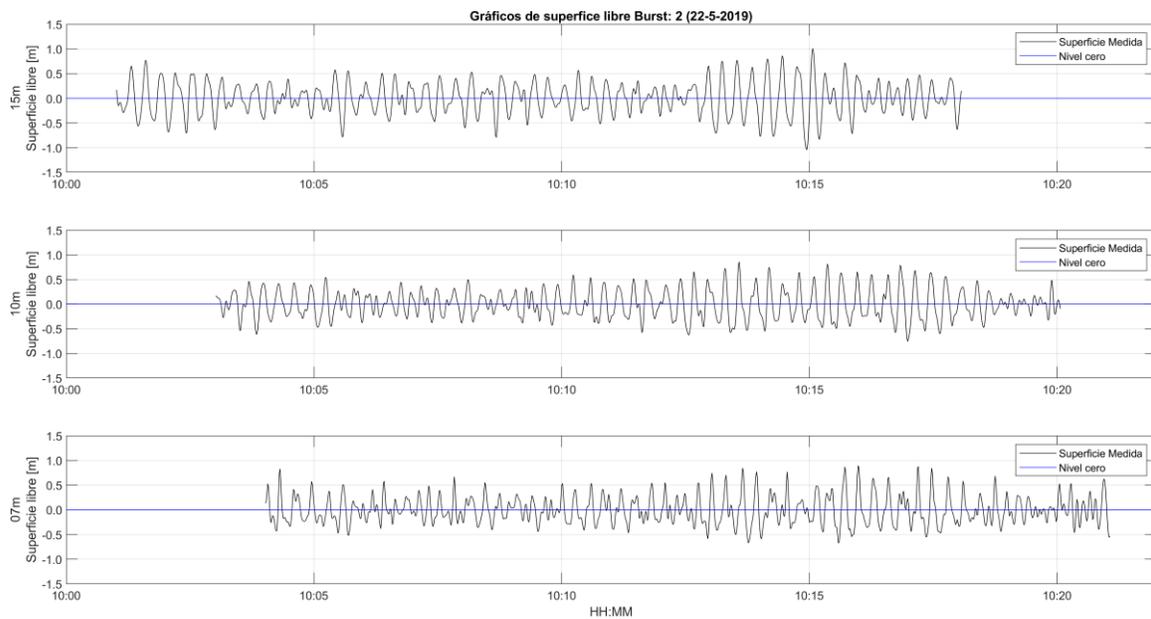


Figura A- 2. Superficie libre Estado de mar 22-05-2019 10:00

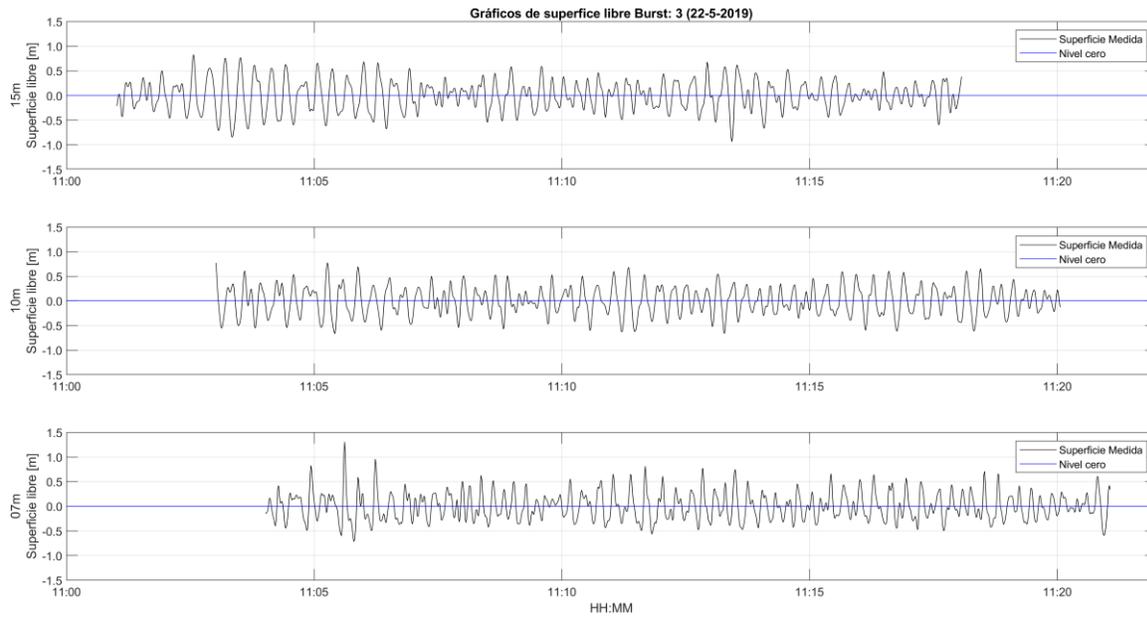


Figura A- 3. Superficie libre Estado de mar 22-05-2019 11:00

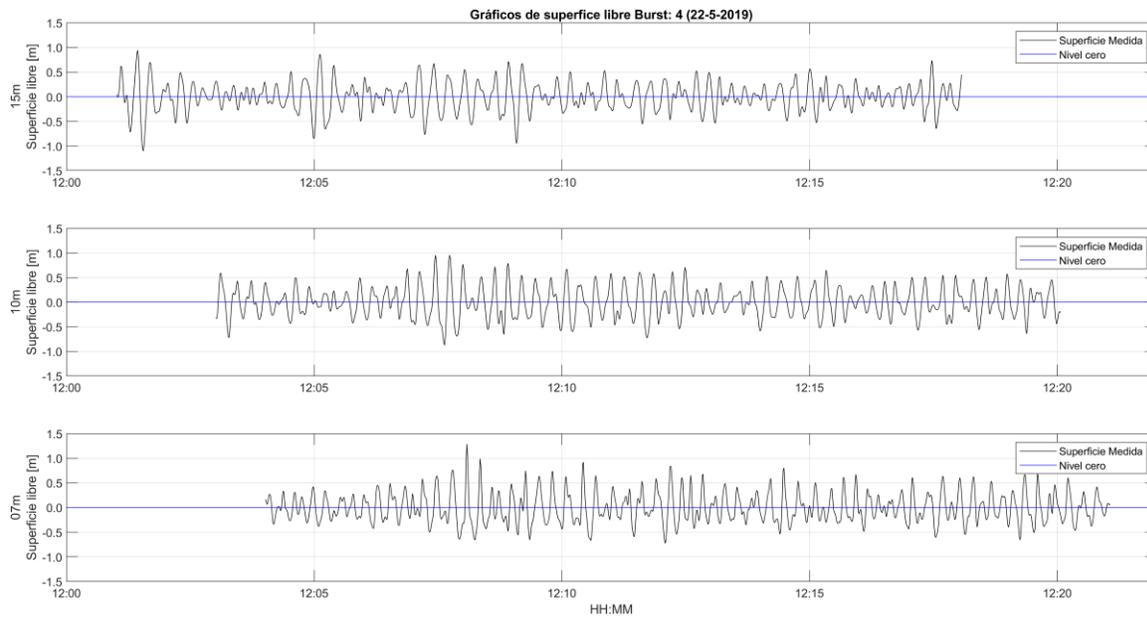


Figura A- 4. Superficie libre Estado de mar 22-05-2019 12:00

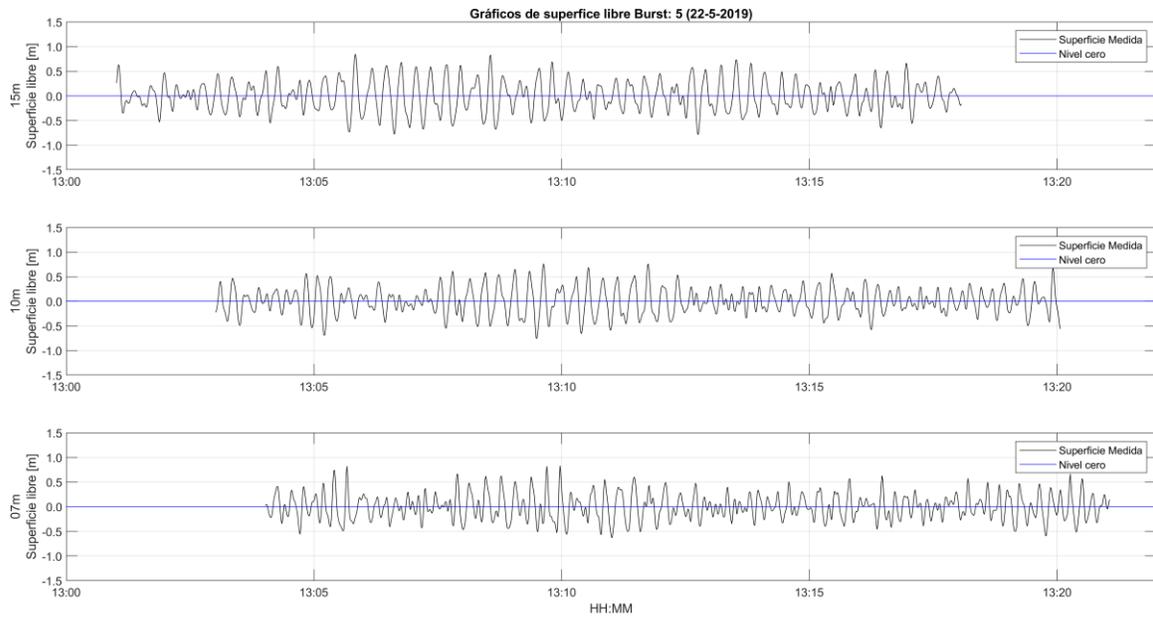


Figura A- 5. Superficie libre Estado de mar 22-05-2019 13:00

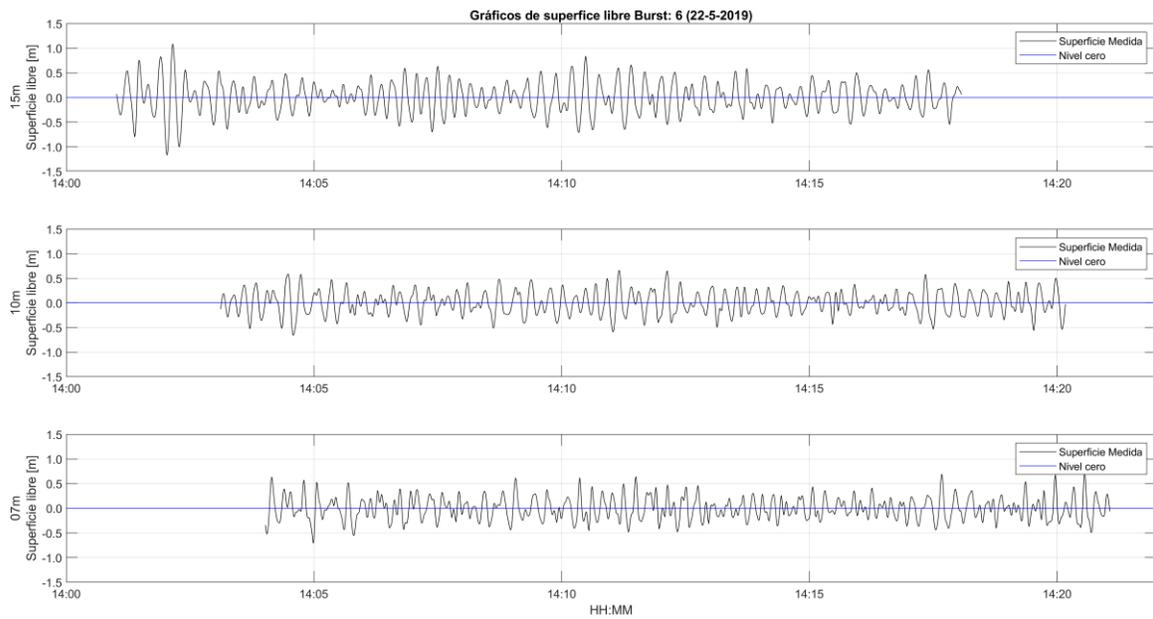


Figura A- 6. Superficie libre Estado de mar 22-05-2019 14:00

8.1.2 Análisis en el dominio de la frecuencia

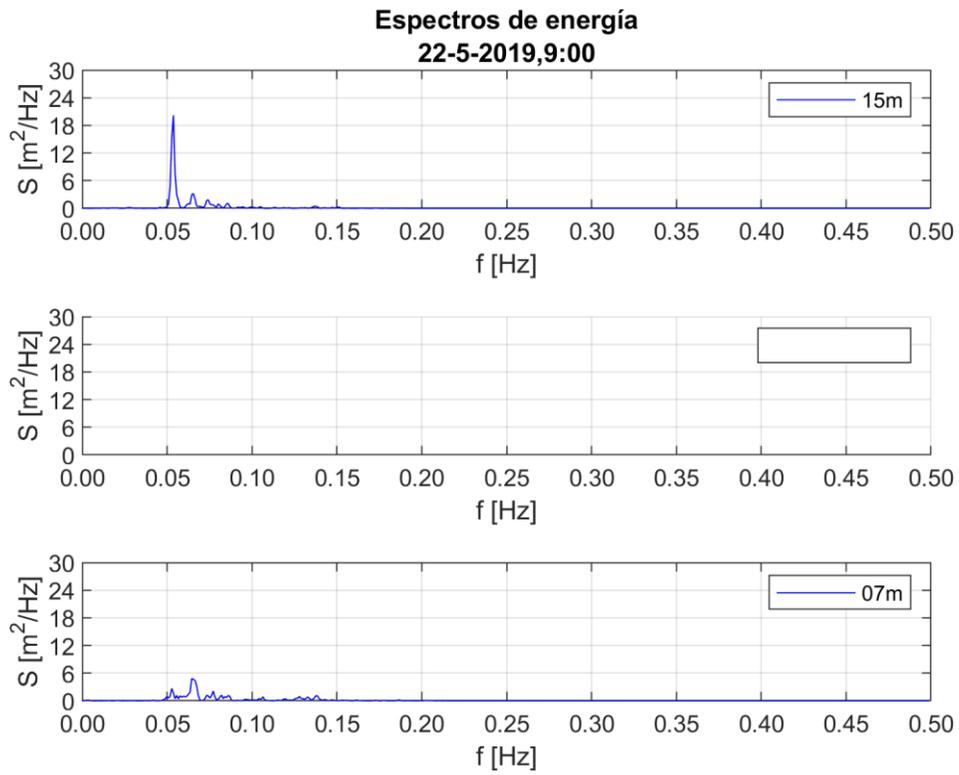


Figura A- 7. Espectro de energía Estado de mar 22-05-2019 09:00

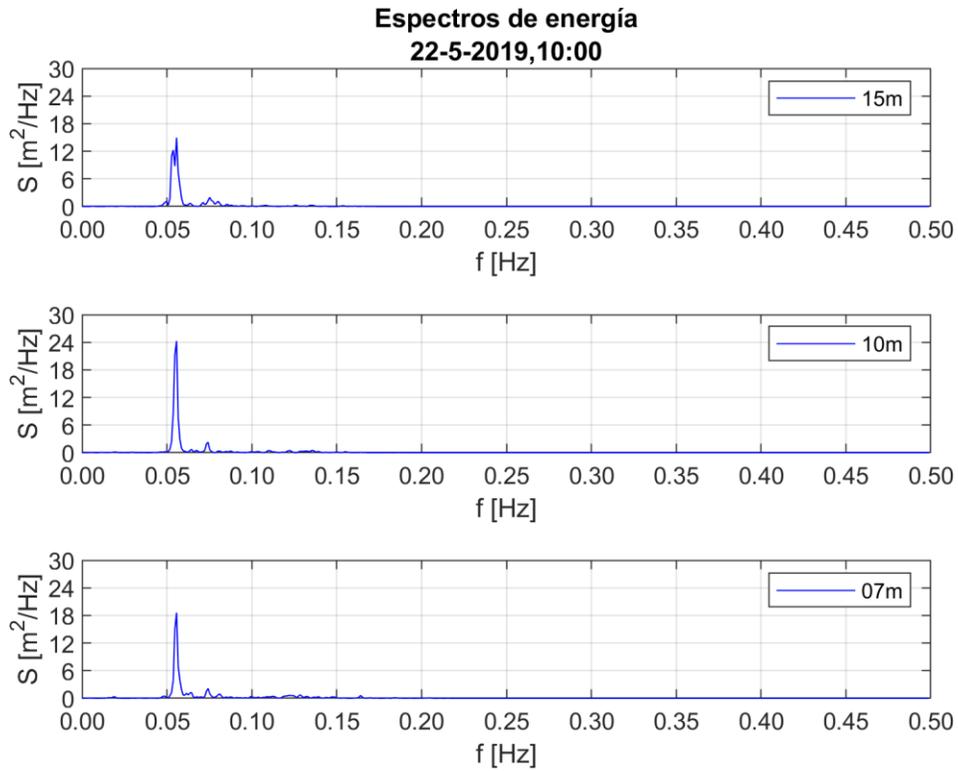


Figura A- 8. Espectro de energía Estado de mar 22-05-2019 10:00

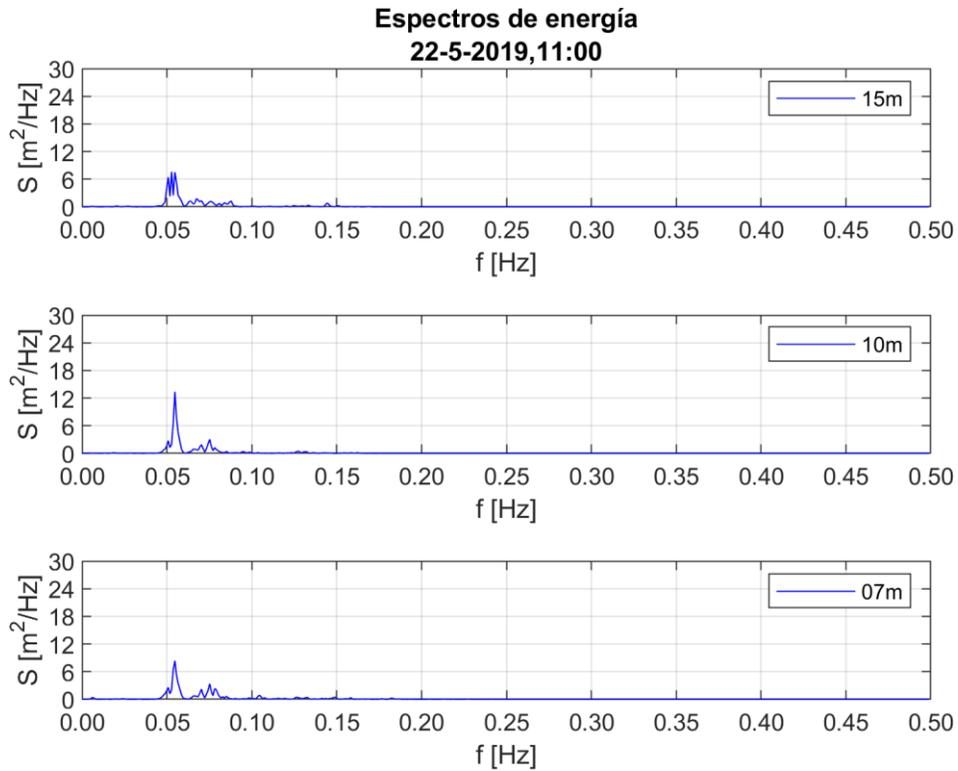
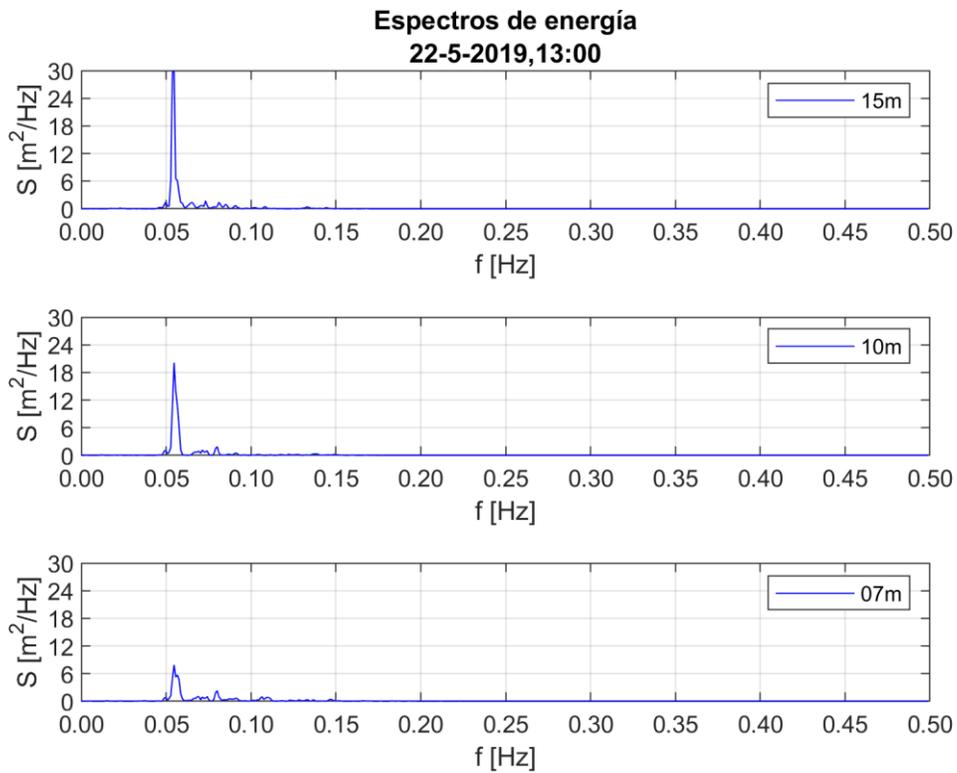
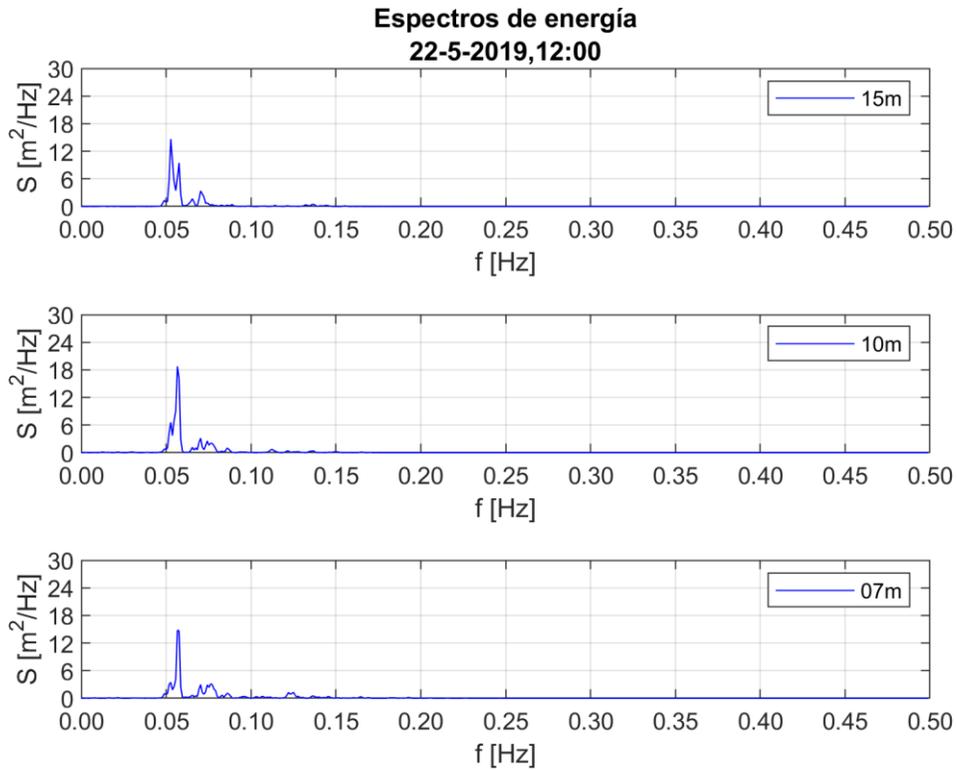


Figura A- 9. Espectro de energía Estado de mar 22-05-2019 11:00



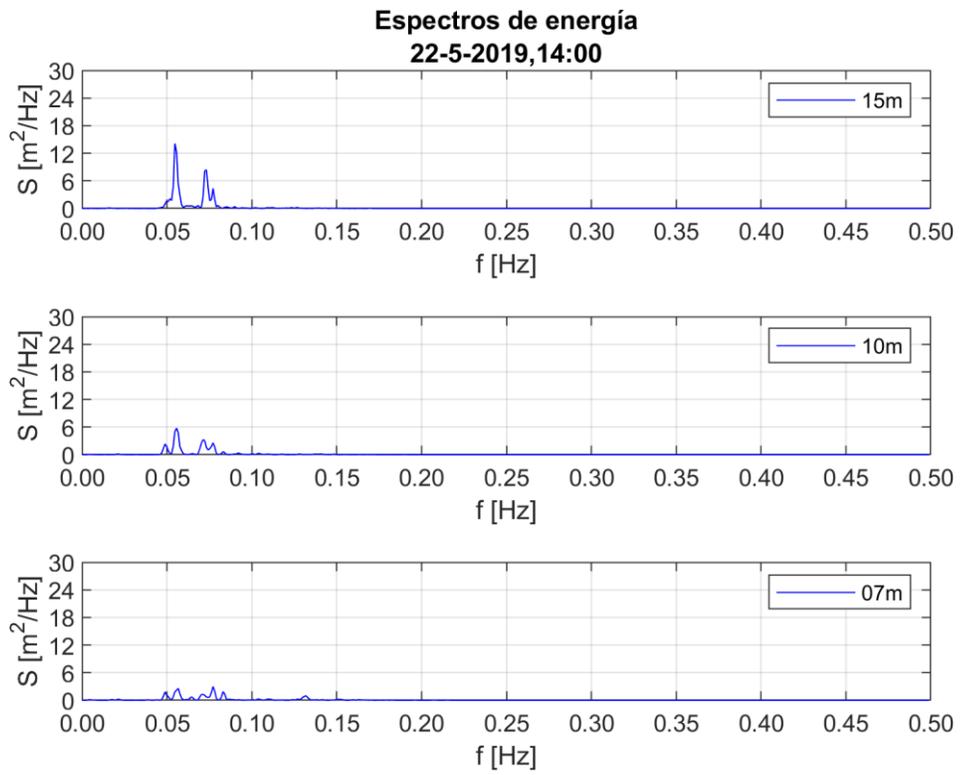


Figura A- 12. Espectro de energía Estado de mar 22-05-2019 14:00

8.2 Apéndice B. Campaña de medición 2021

8.2.1 Análisis en el dominio del tiempo

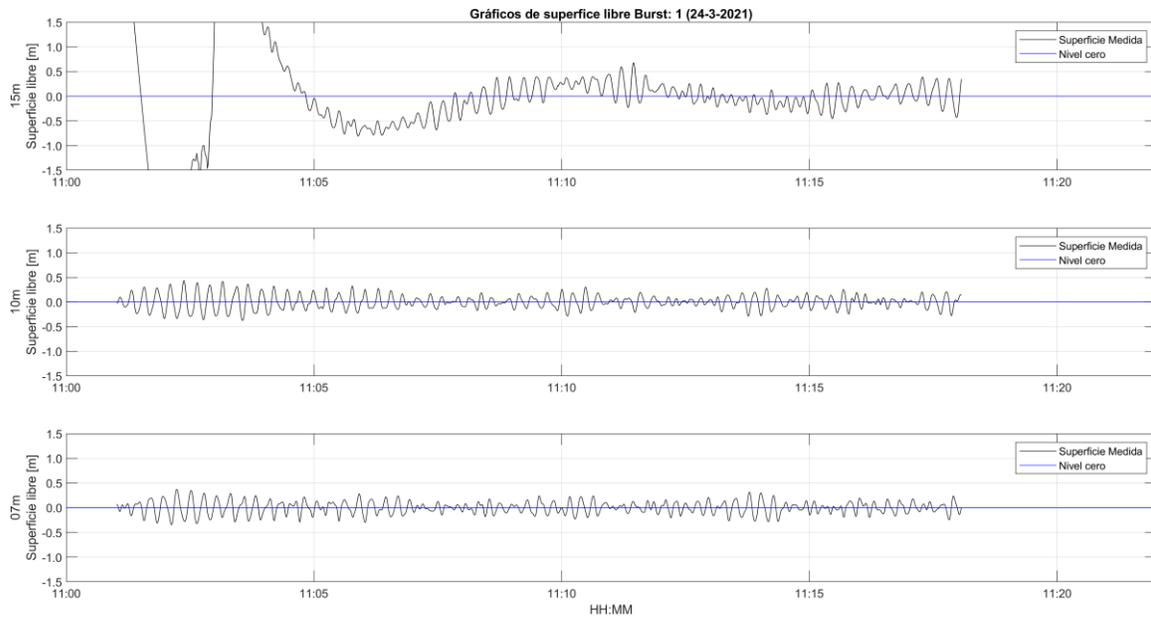


Figura B- 1. Superficie libre Estado de mar 24-03-2021 11:00

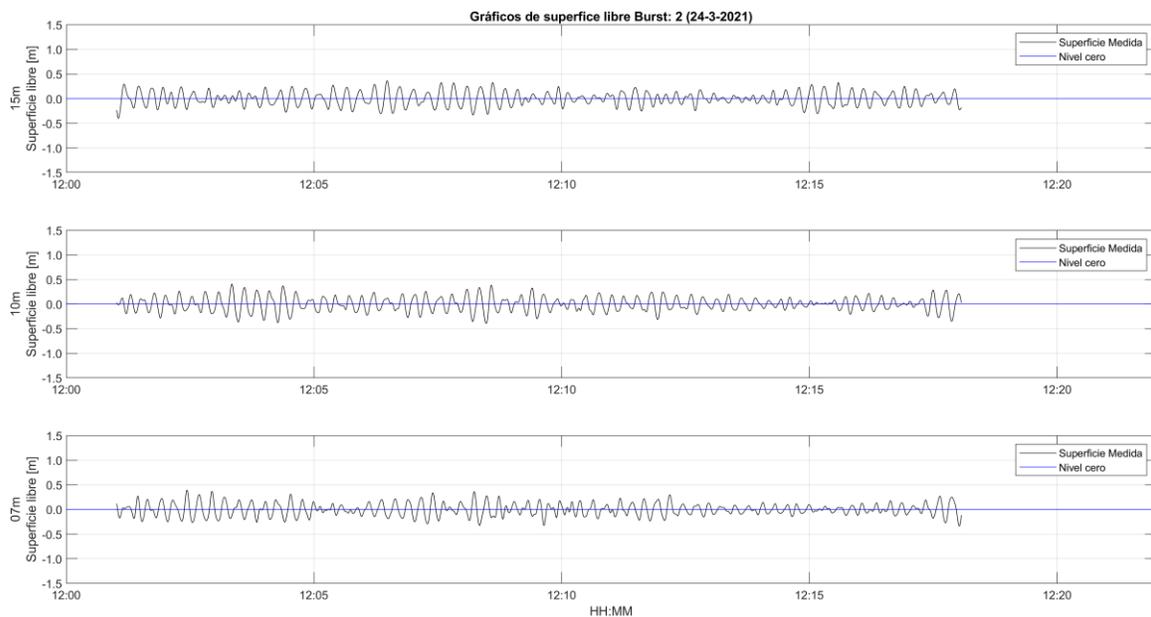


Figura B- 2. Superficie libre Estado de mar 24-03-2021 12:00

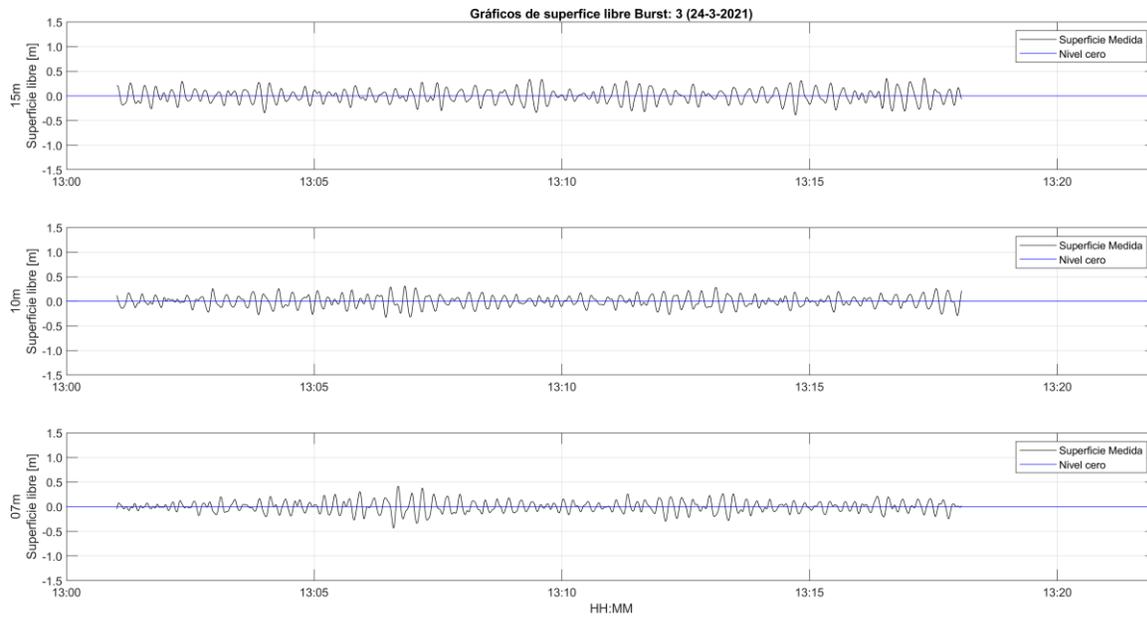


Figura B- 3. Superficie libre Estado de mar 24-03-2021 13:00

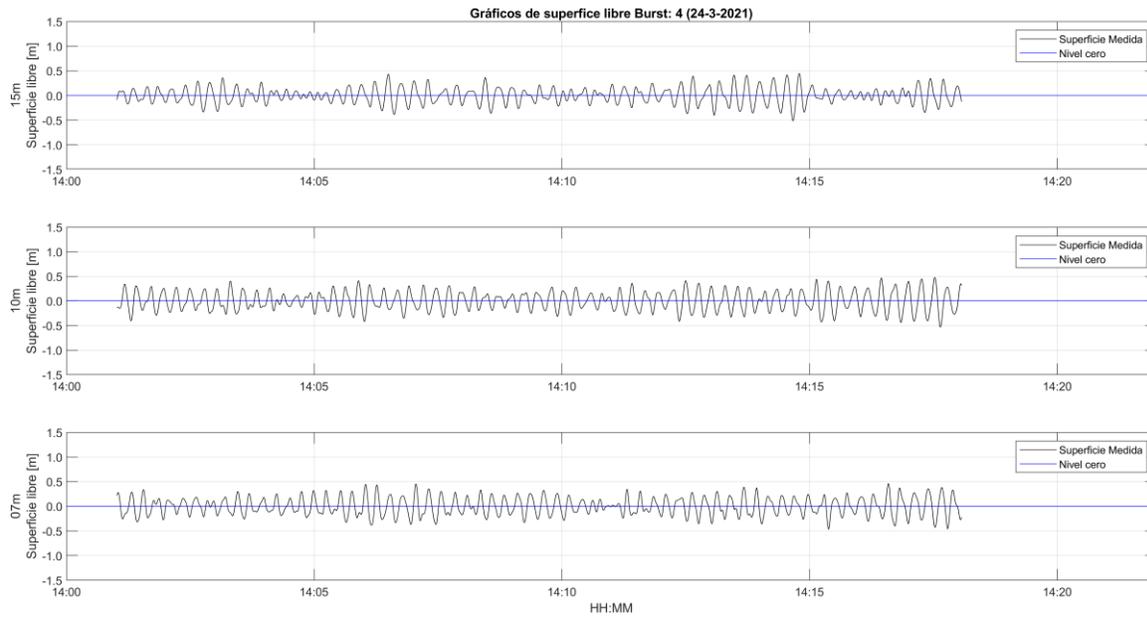


Figura B- 4. Superficie libre Estado de mar 24-03-2021 14:00

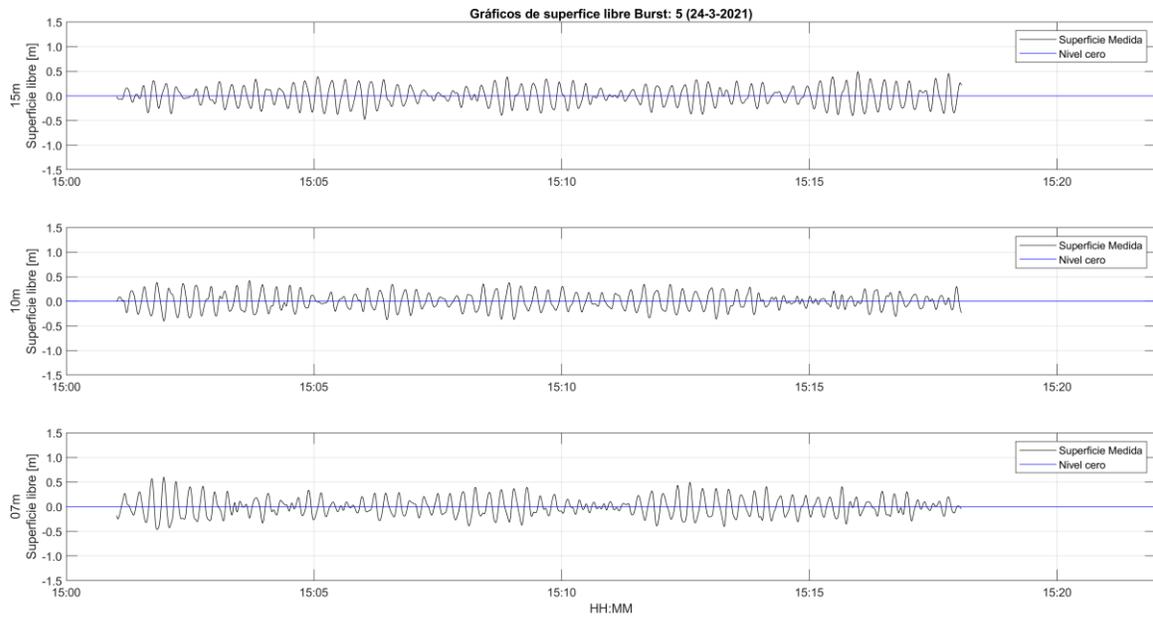


Figura B- 5. Superficie libre Estado de mar 24-03-2021 15:00

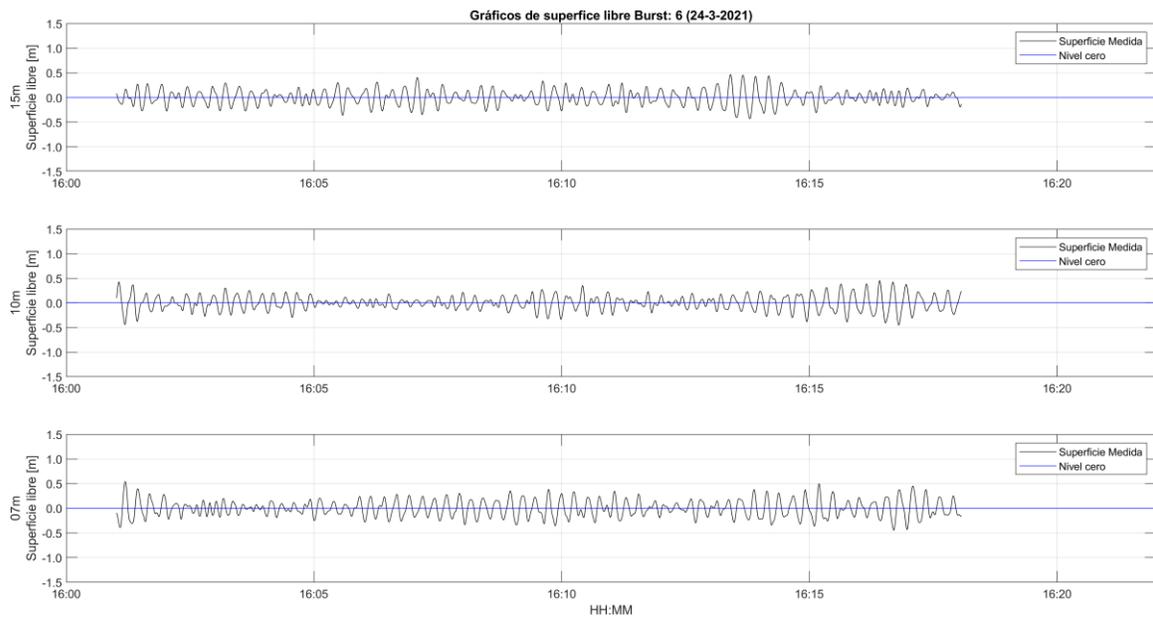


Figura B- 6. Superficie libre Estado de mar 24-03-2021 16:00

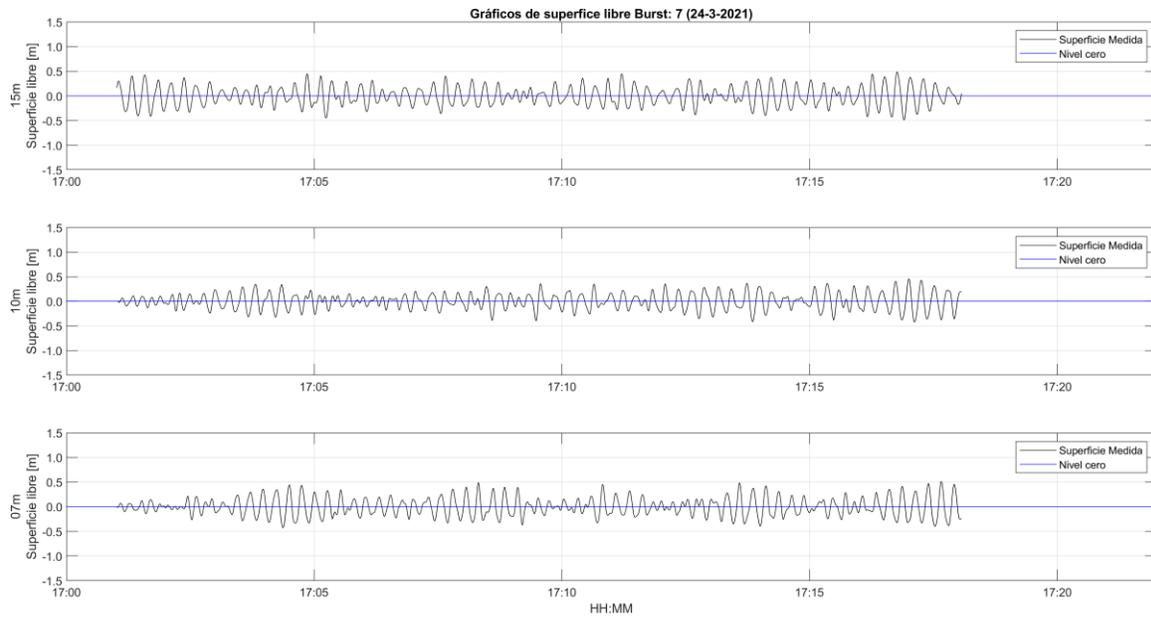


Figura B- 7. Superficie libre Estado de mar 24-03-2021 17:00

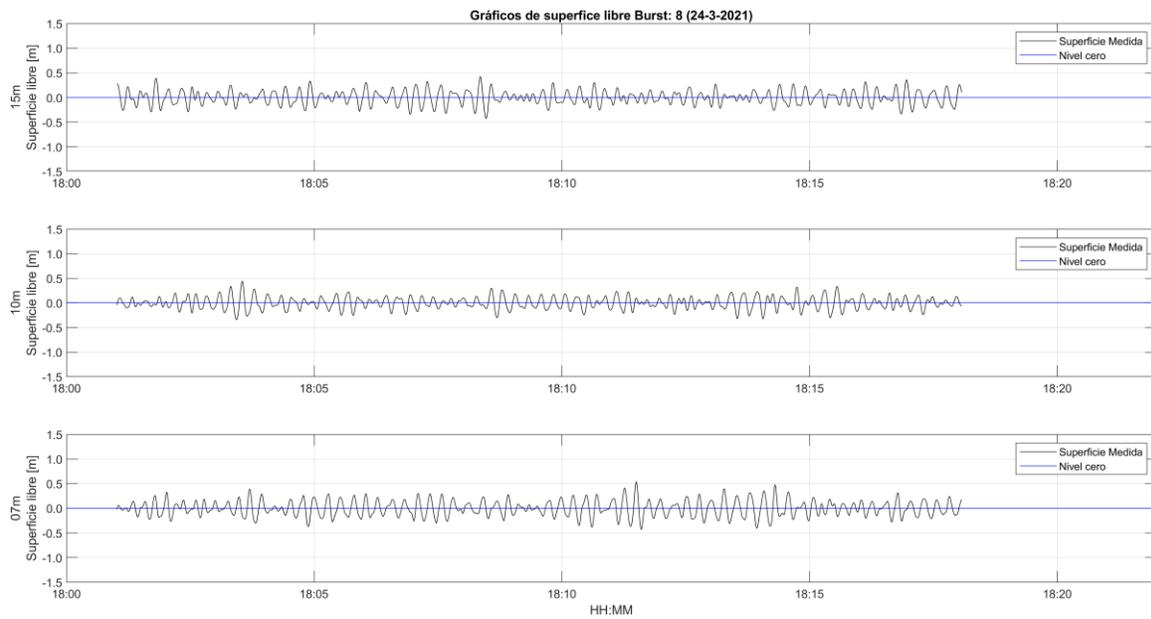


Figura B- 8. Superficie libre Estado de mar 24-03-2021 18:00

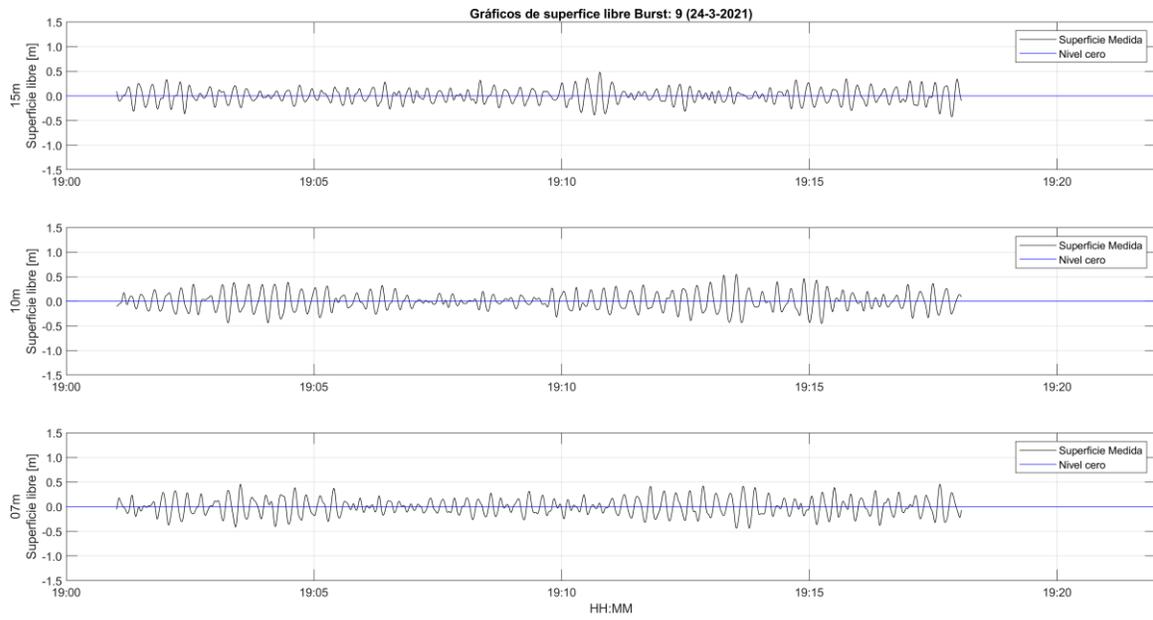


Figura B- 9. Superficie libre Estado de mar 24-03-2021 19:00

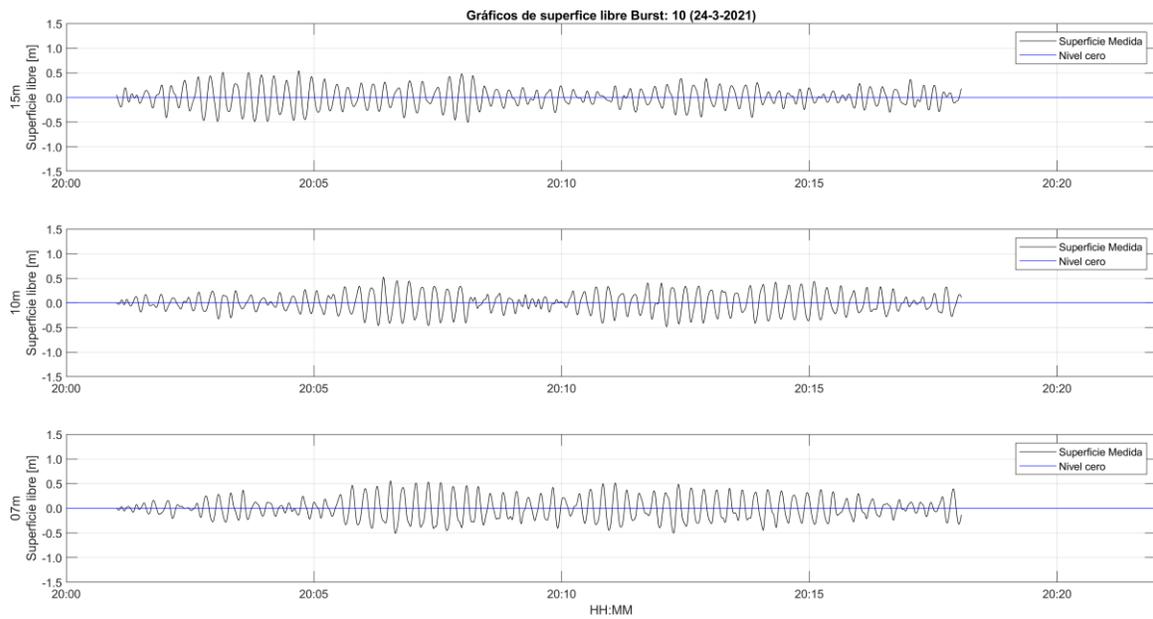


Figura B- 10. Superficie libre Estado de mar 24-03-2021 20:00

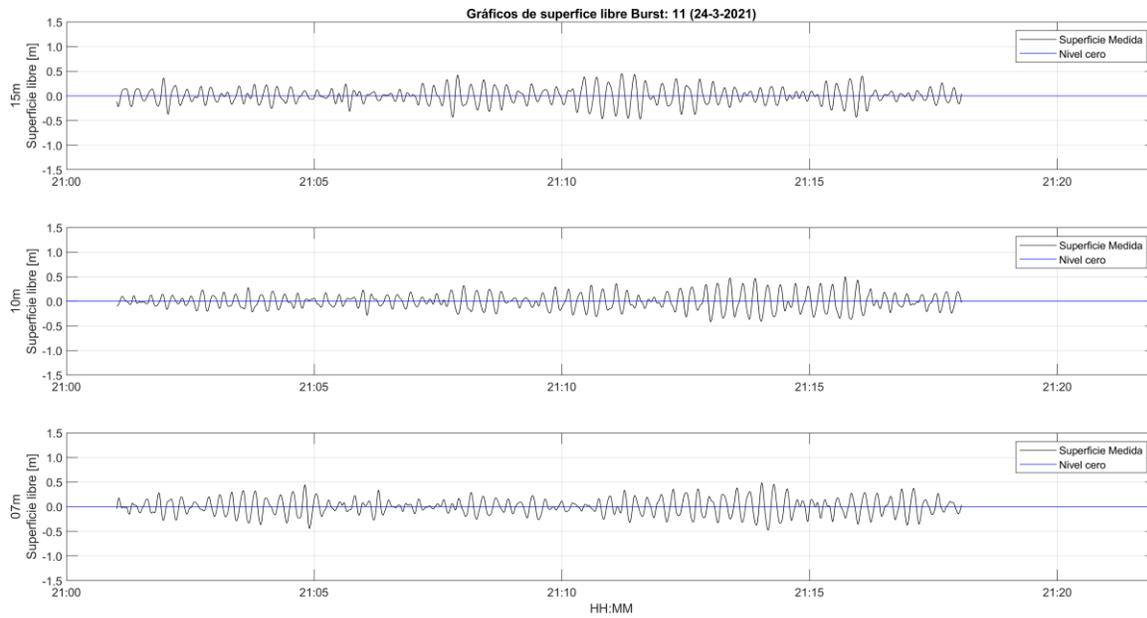


Figura B- 11. Superficie libre Estado de mar 24-03-2021 21:00

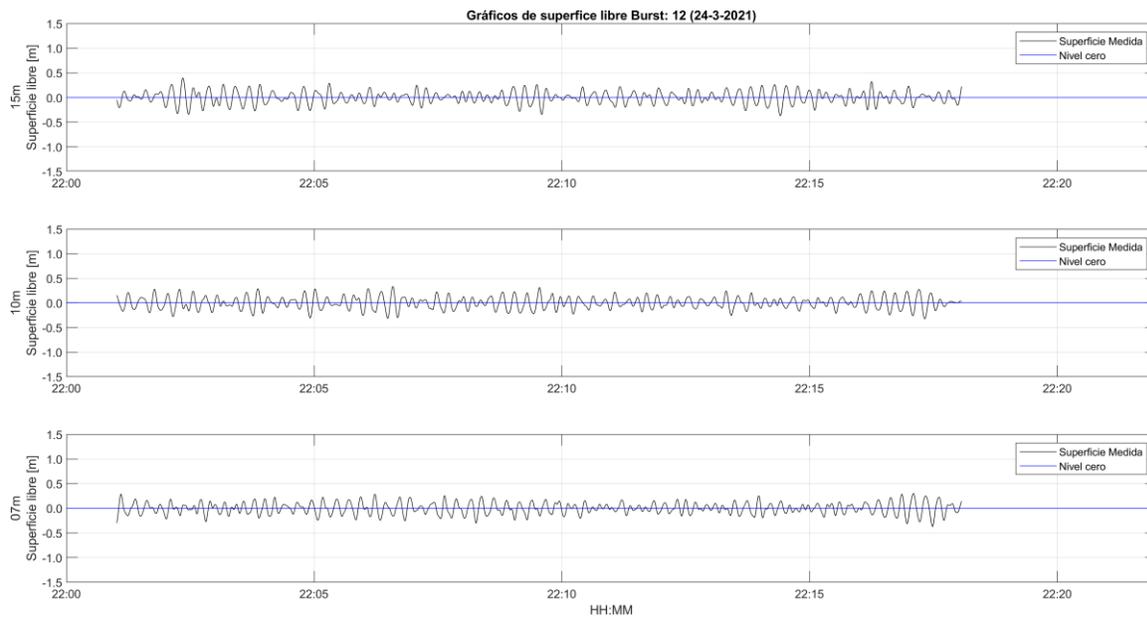


Figura B- 12. Superficie libre Estado de mar 24-03-2021 22:00

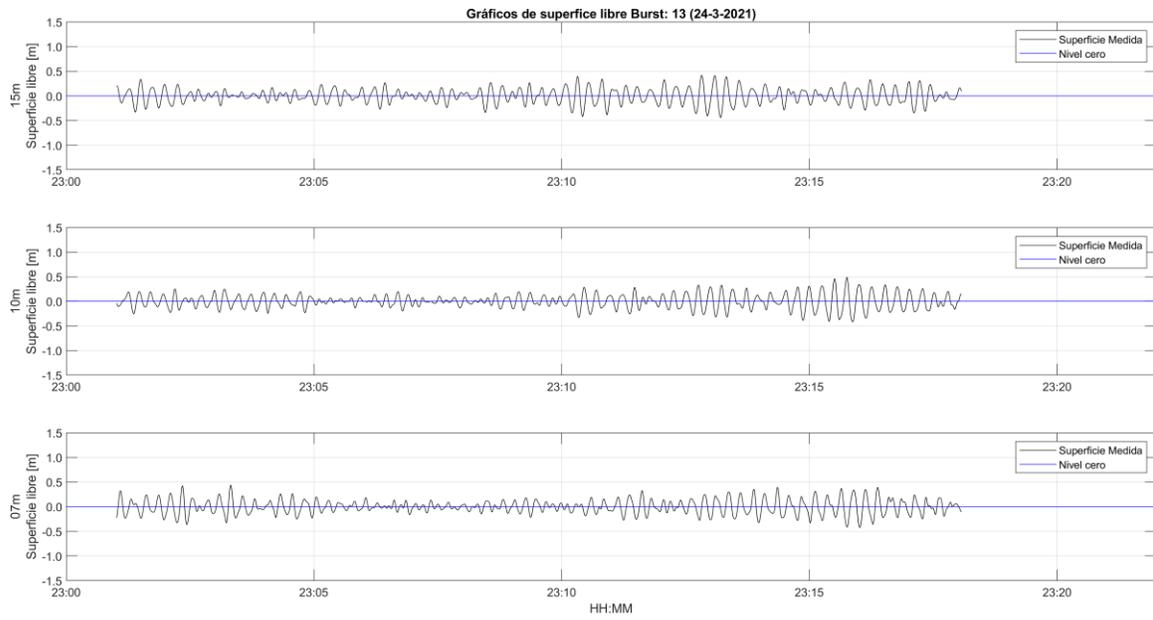


Figura B- 13. Superficie libre Estado de mar 24-03-2021 23:00

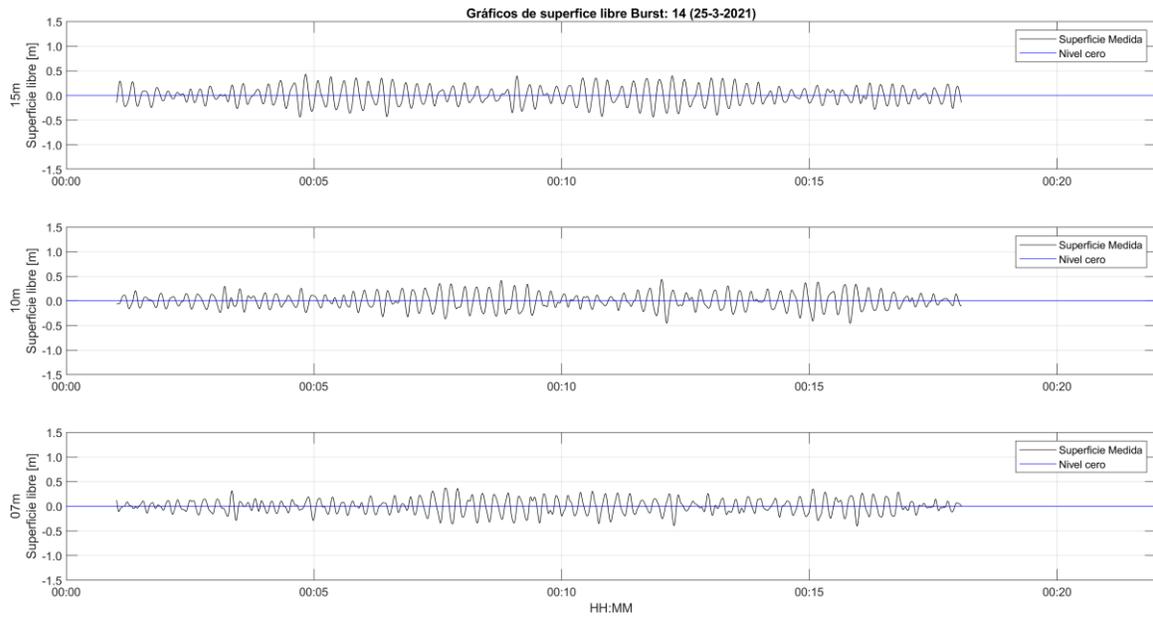


Figura B- 14. Superficie libre Estado de mar 25-03-2021 00:00

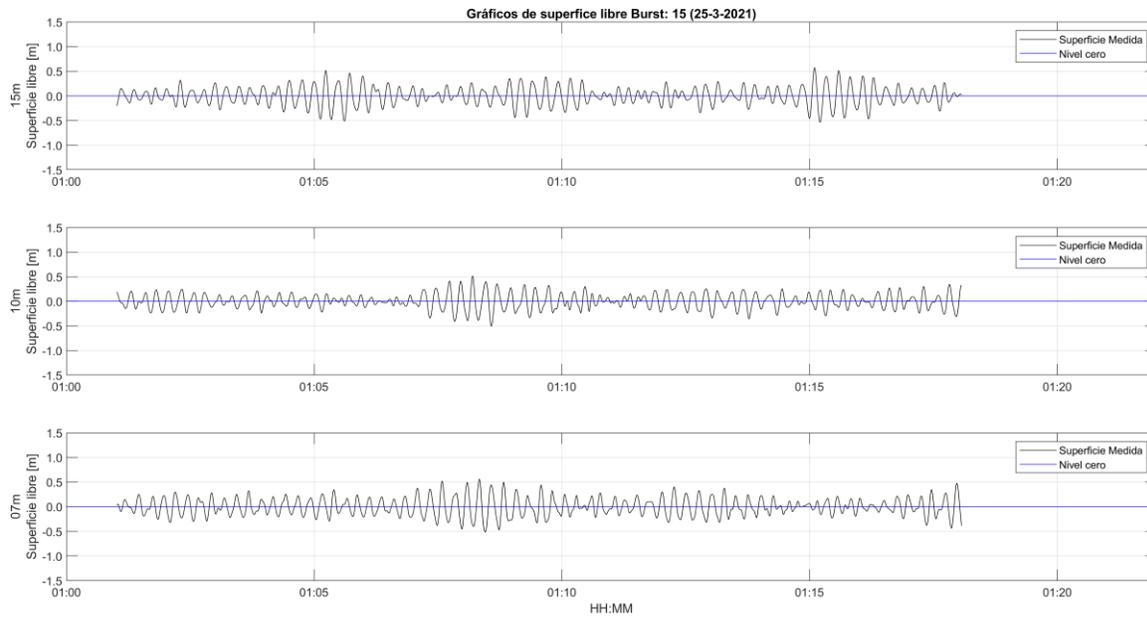


Figura B- 15. Superficie libre Estado de mar 25-03-2021 01:00

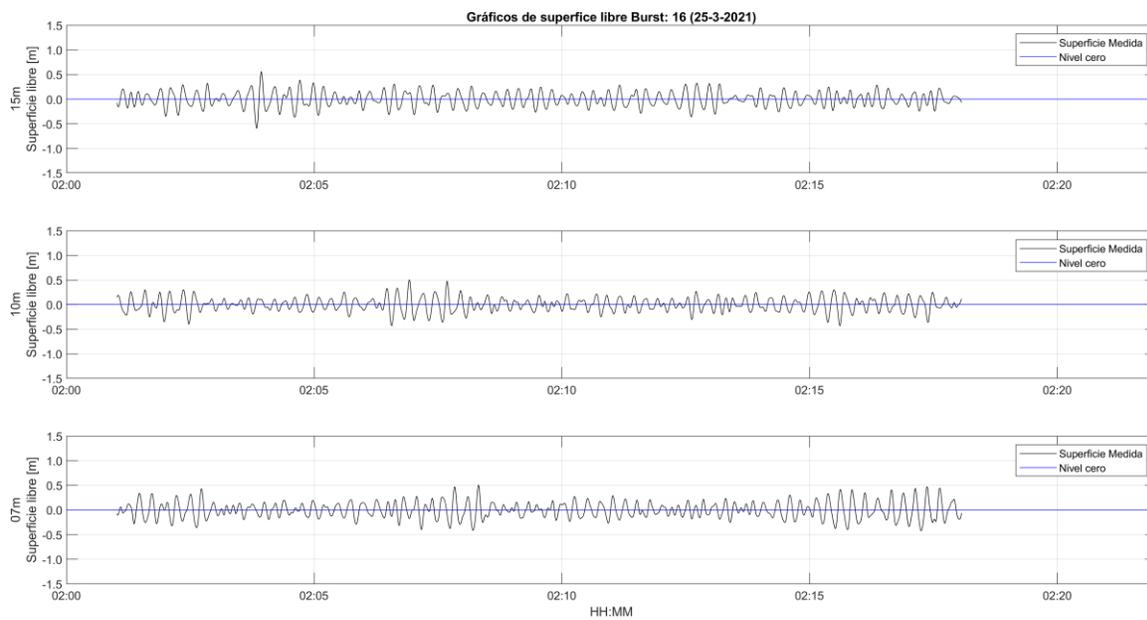


Figura B- 16. Superficie libre Estado de mar 25-03-2021 02:00

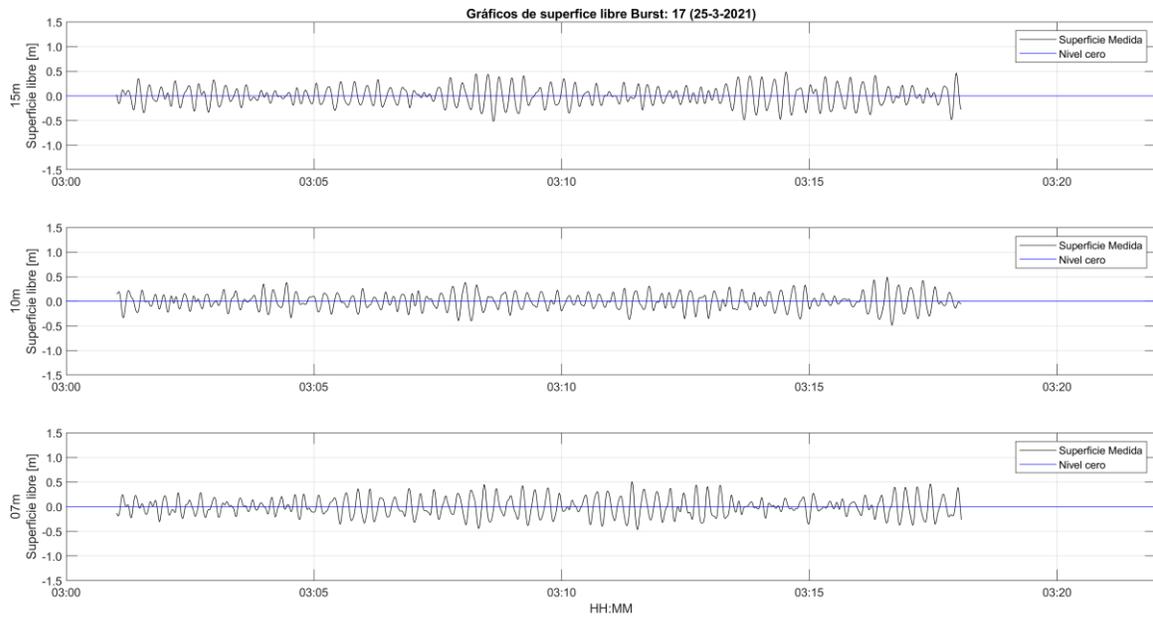


Figura B- 17. Superficie libre Estado de mar 25-03-2021 03:00

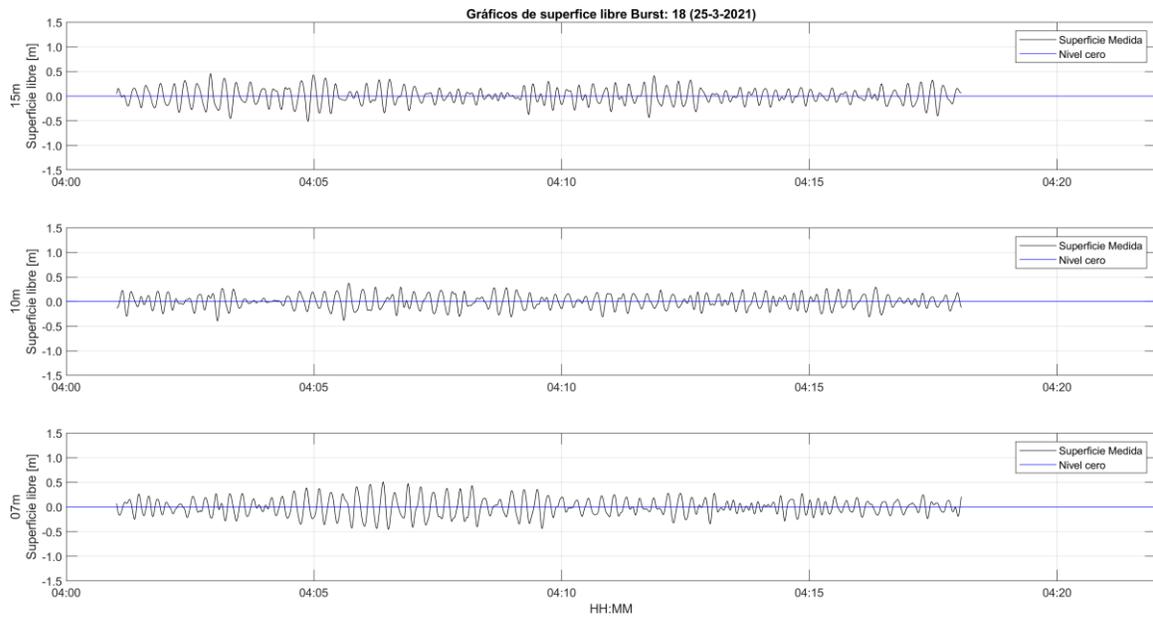


Figura B- 18. Superficie libre Estado de mar 25-03-2021 04:00

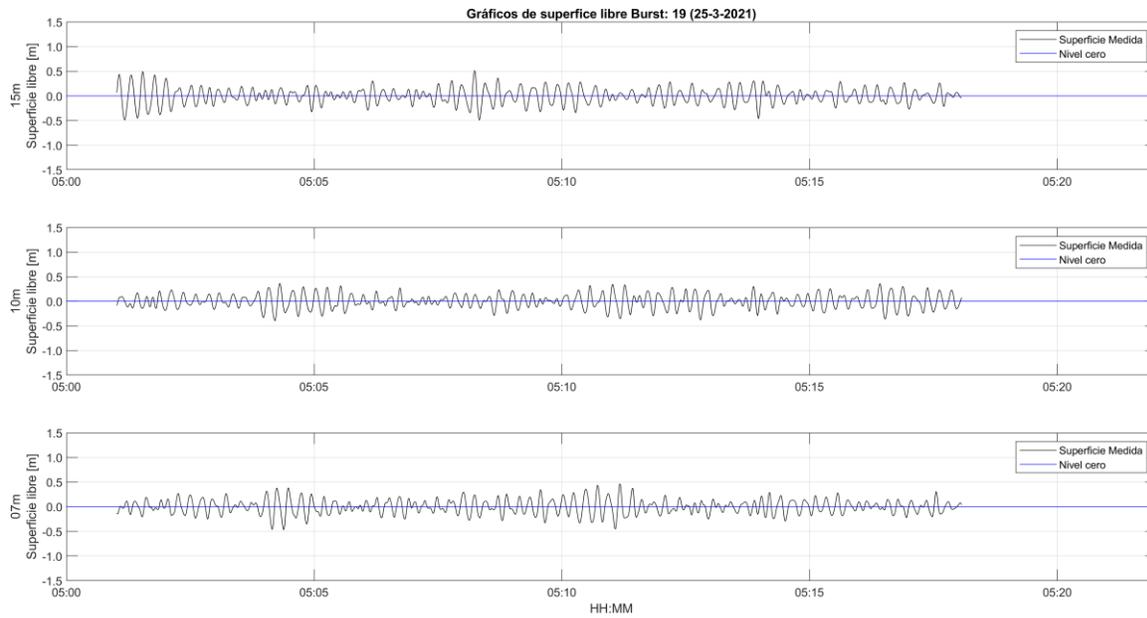


Figura B- 19. Superficie libre Estado de mar 25-03-2021 05:00

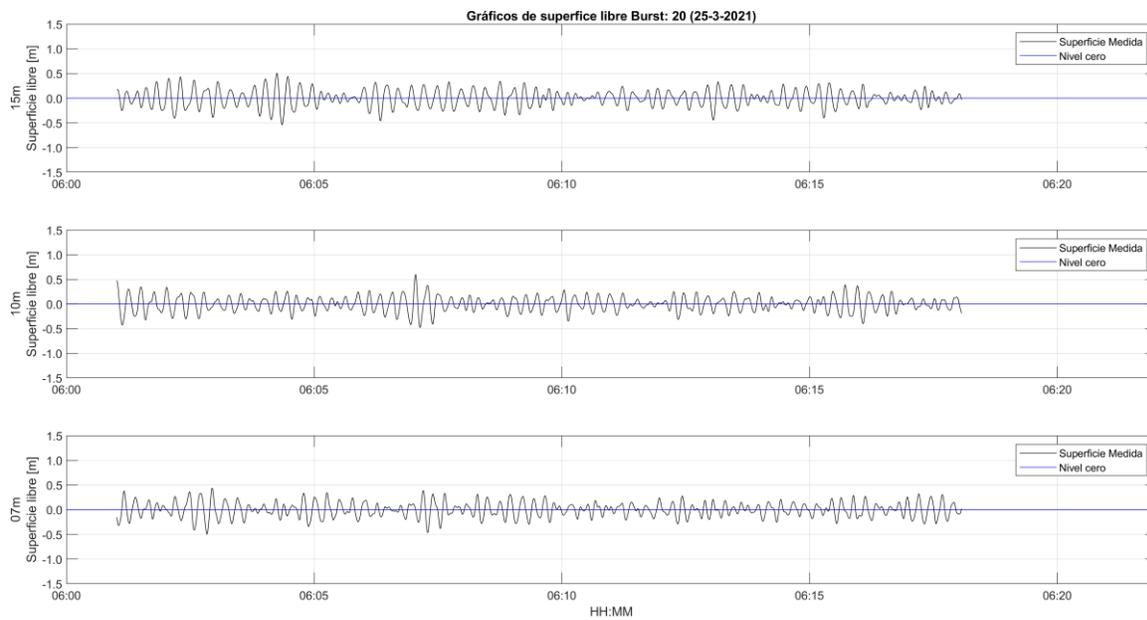


Figura B- 20. Superficie libre Estado de mar 25-03-2021 06:00

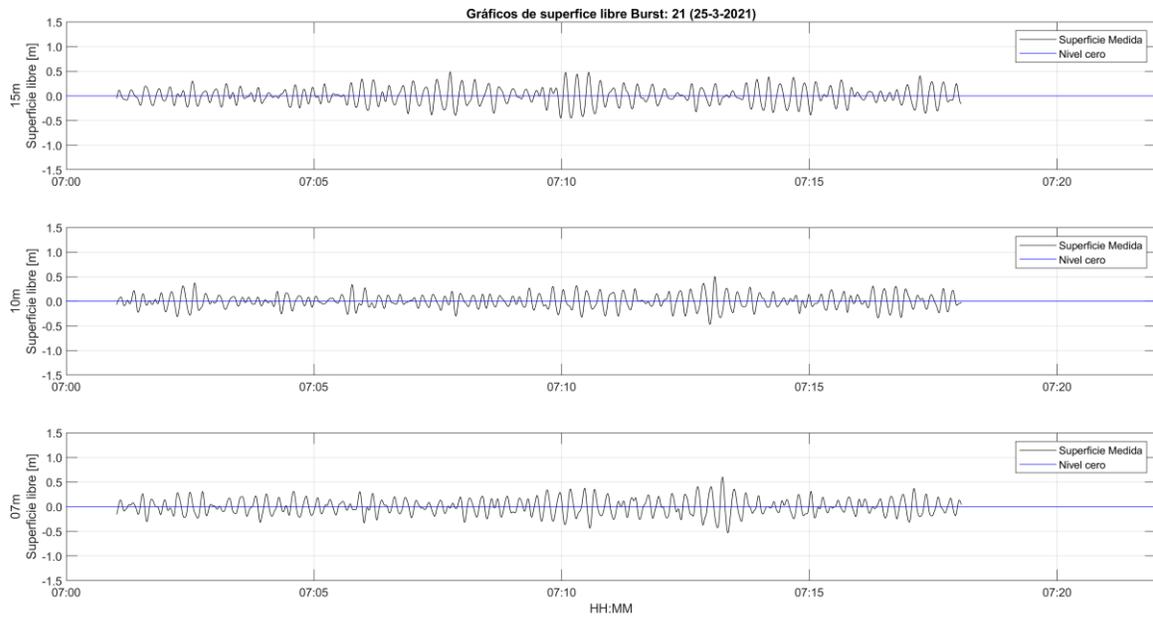


Figura B- 21. Superficie libre Estado de mar 25-03-2021 07:00

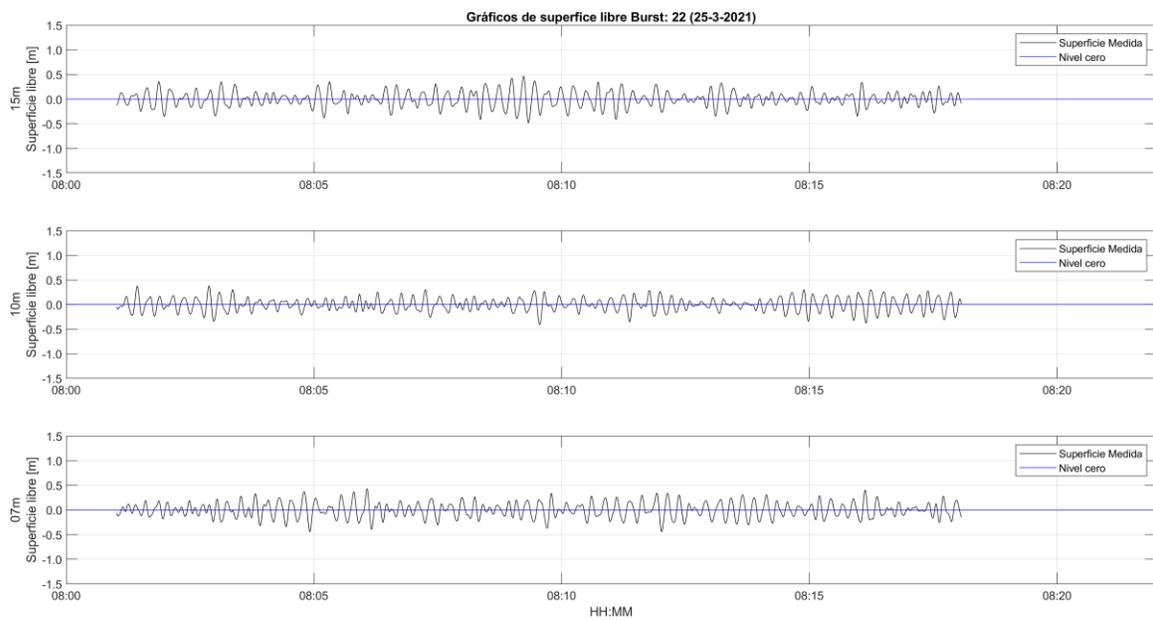


Figura B- 22. Superficie libre Estado de mar 25-03-2021 08:00

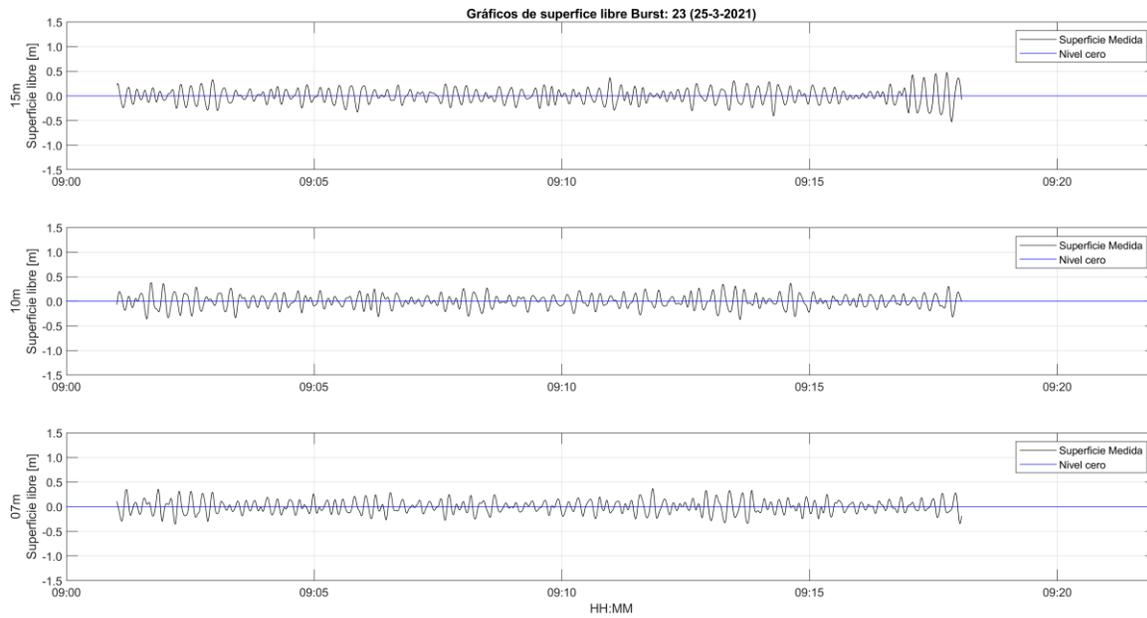


Figura B- 23. Superficie libre Estado de mar 25-03-2021 09:00

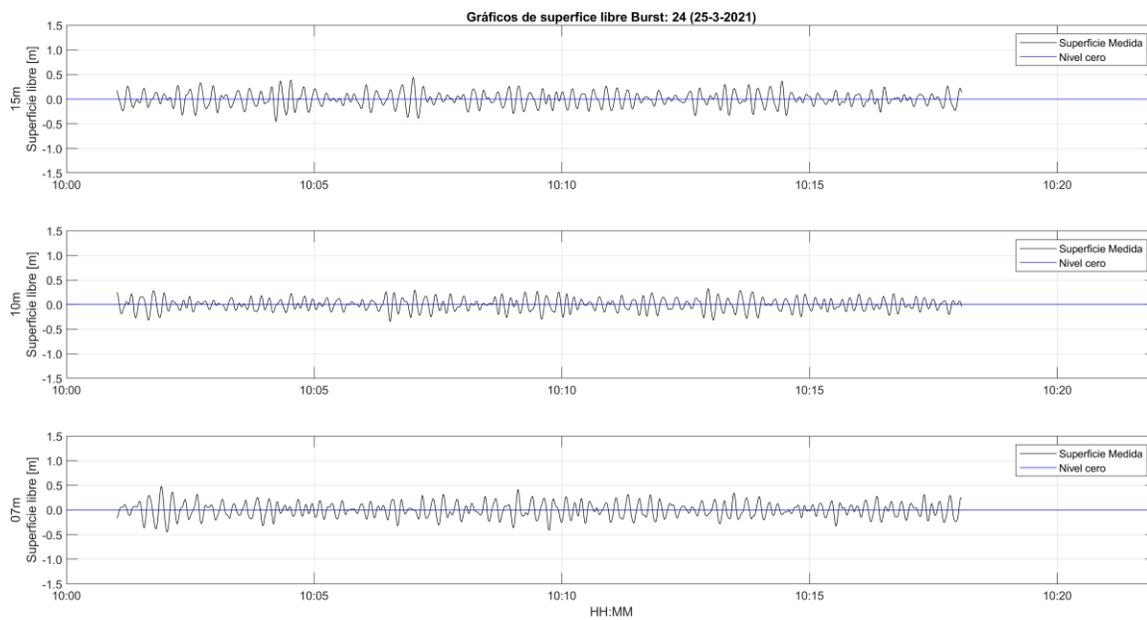


Figura B- 24. Superficie libre Estado de mar 25-03-2021 10:00

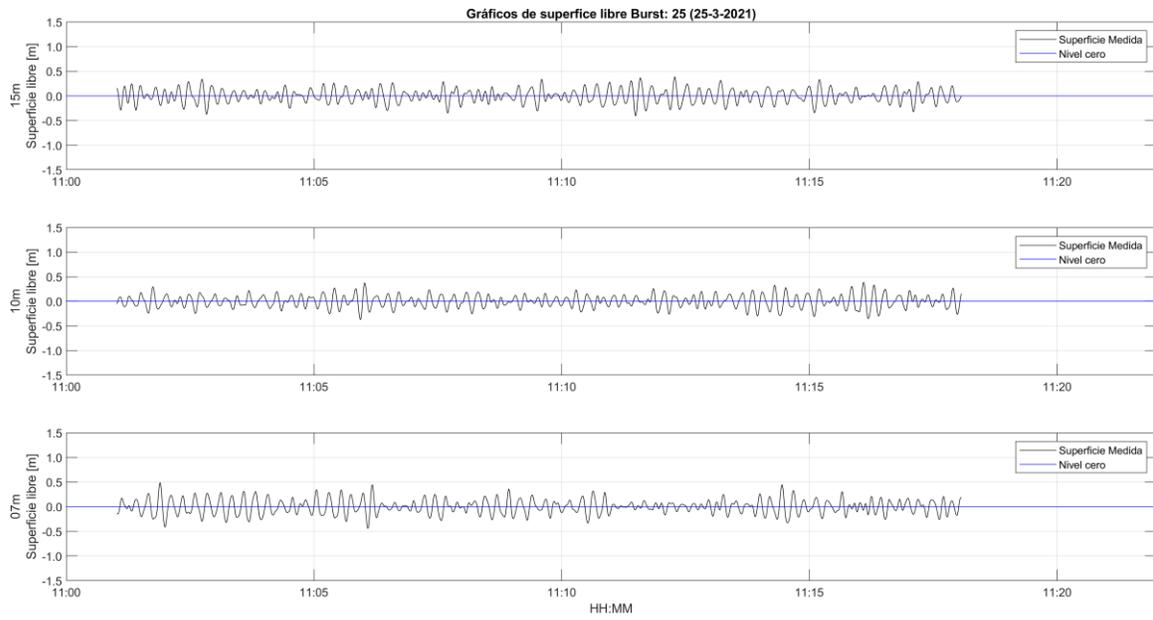


Figura B- 25. Superficie libre Estado de mar 25-03-2021 11:00

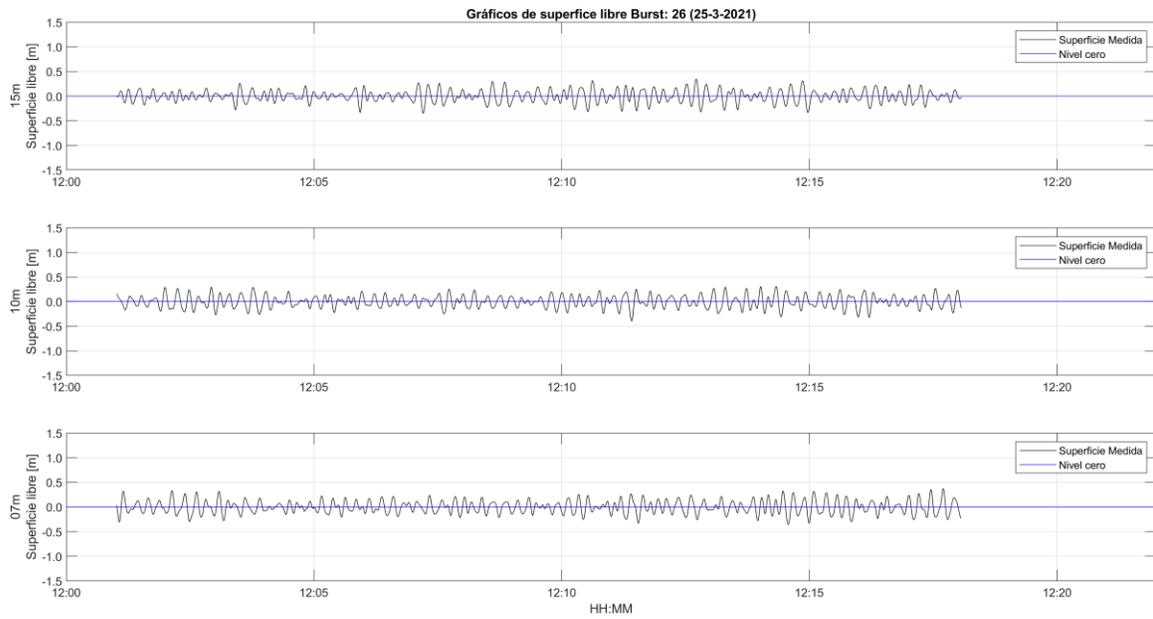


Figura B- 26. Superficie libre Estado de mar 25-03-2021 12:00

8.2.2 Análisis en el dominio de la frecuencia

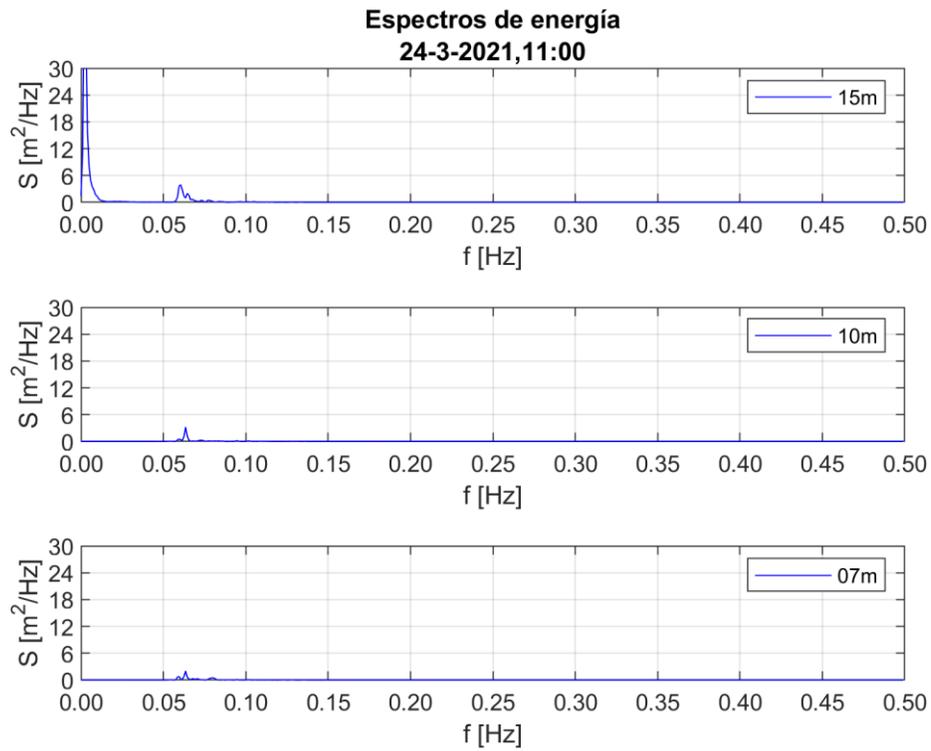


Figura B- 27. Espectro de energía Estado de mar 24-03-2021 11:00

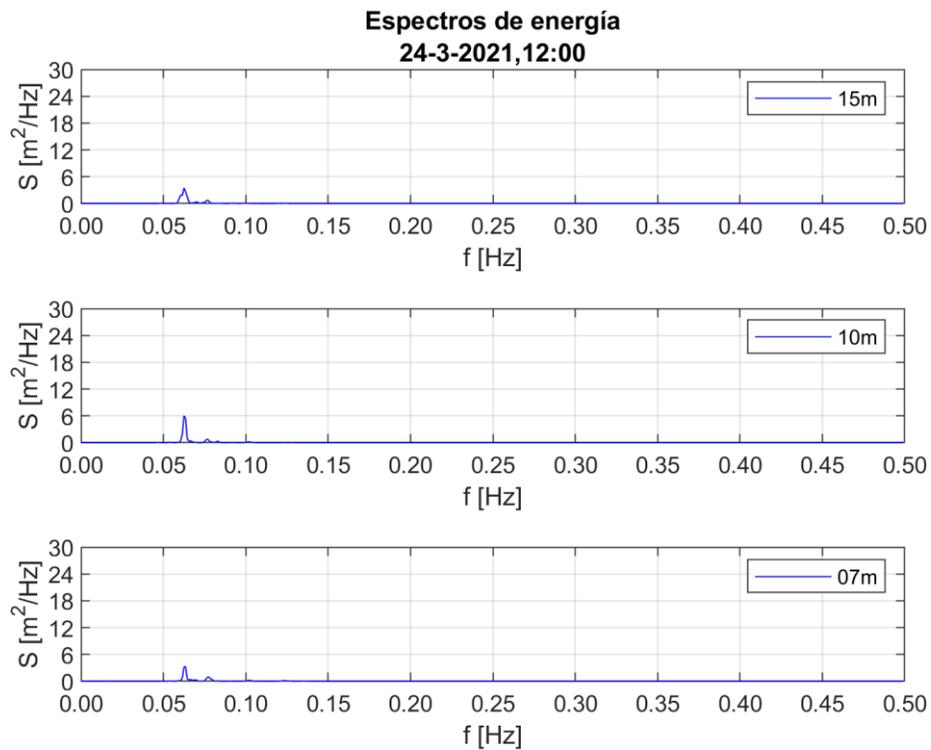


Figura B- 28. Espectro de energía Estado de mar 24-03-2021 12:00

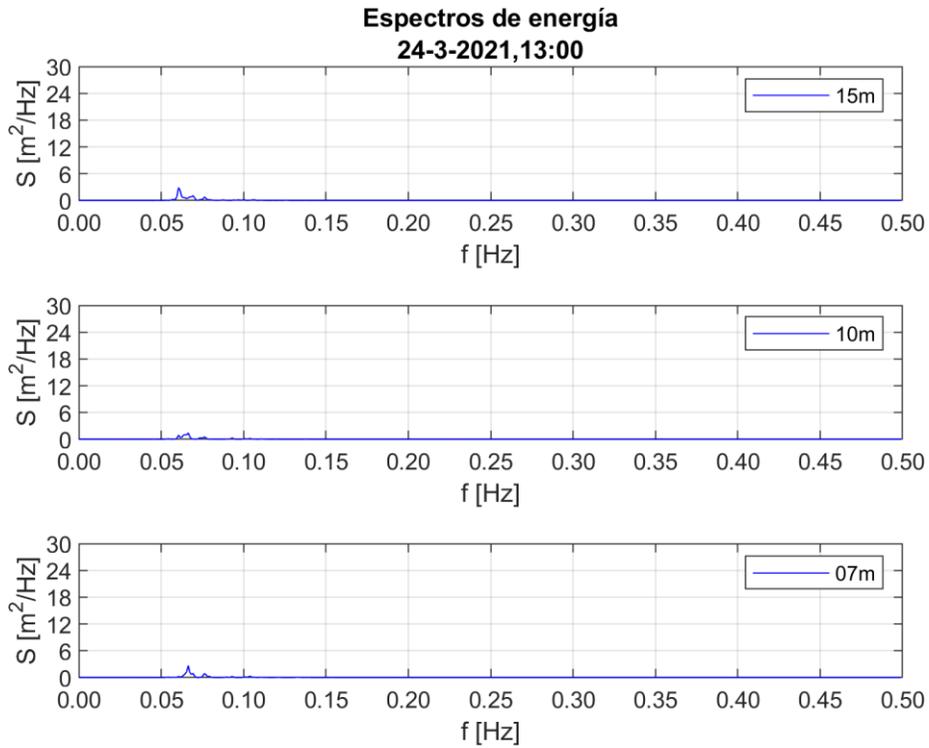


Figura B- 29. Espectro de energía Estado de mar 24-03-2021 13:00

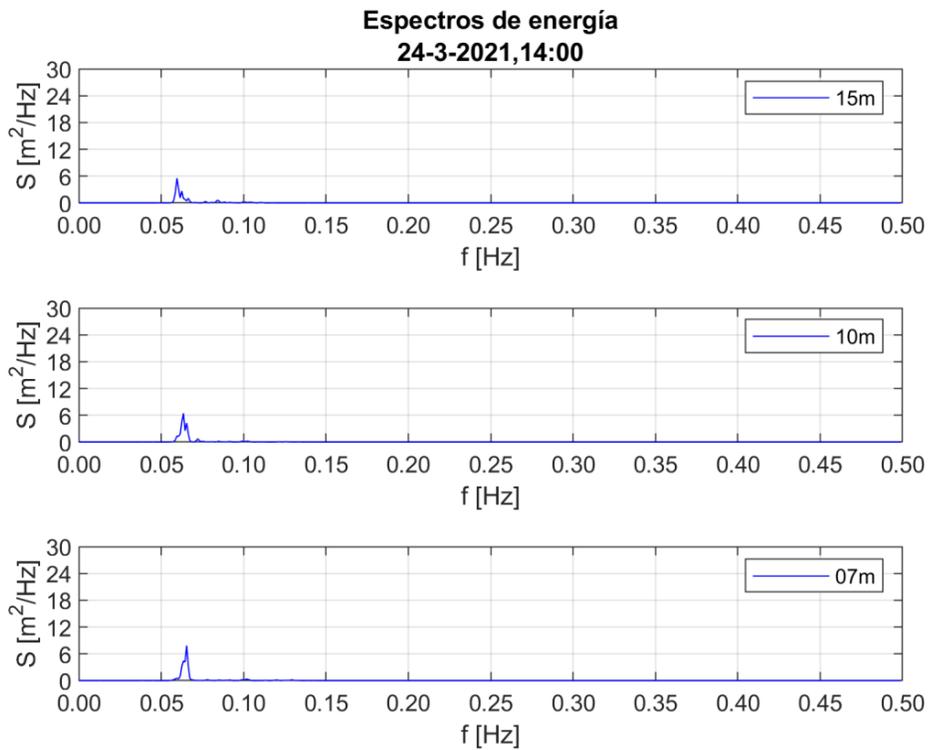


Figura B- 30. Espectro de energía Estado de mar 24-03-2021 14:00

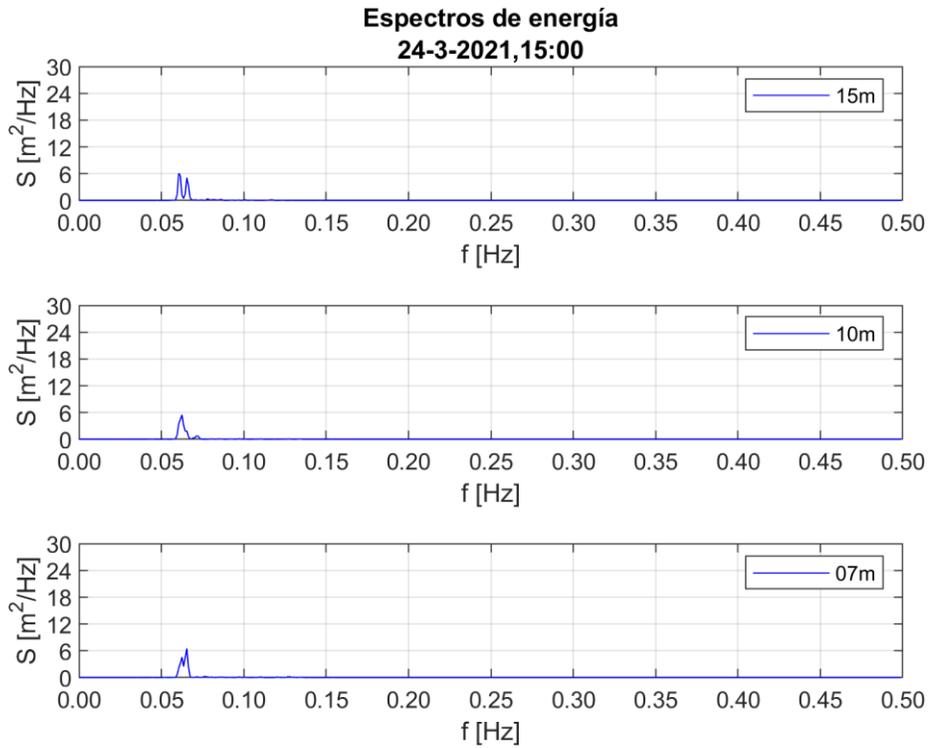


Figura B- 31. Espectro de energía Estado de mar 24-03-2021 15:00

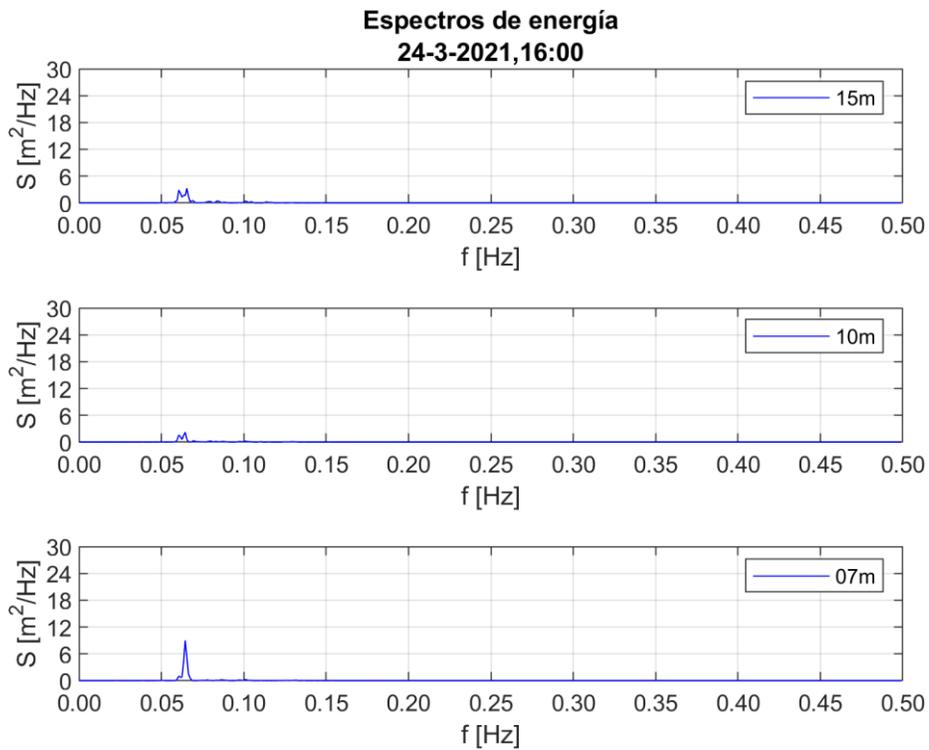


Figura B- 32. Espectro de energía Estado de mar 24-03-2021 16:00

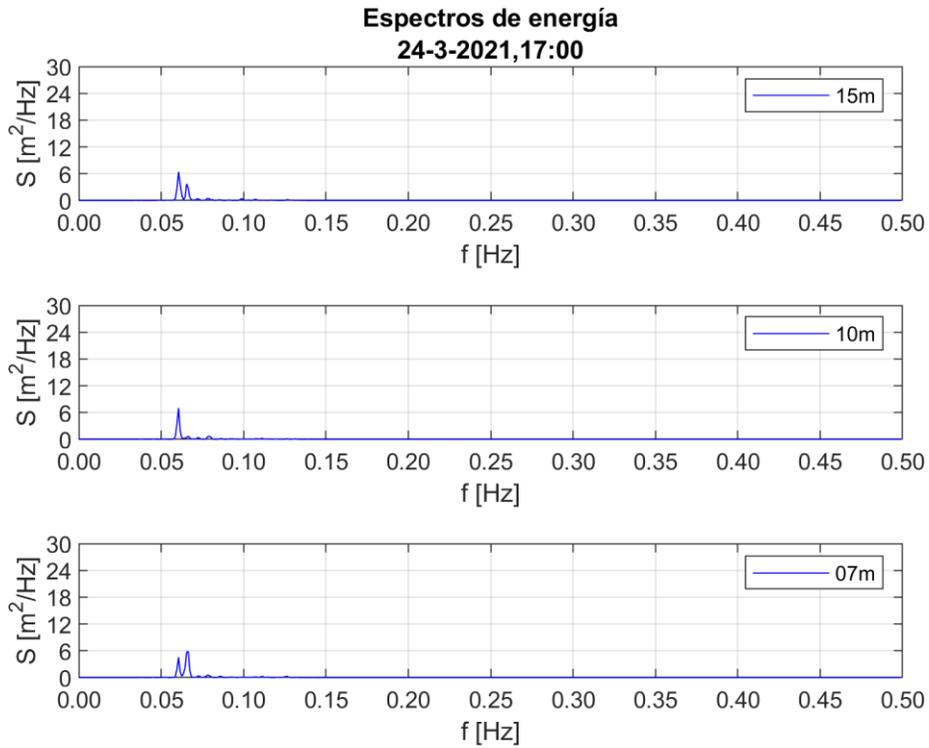


Figura B- 33. Espectro de energía Estado de mar 24-03-2021 17:00

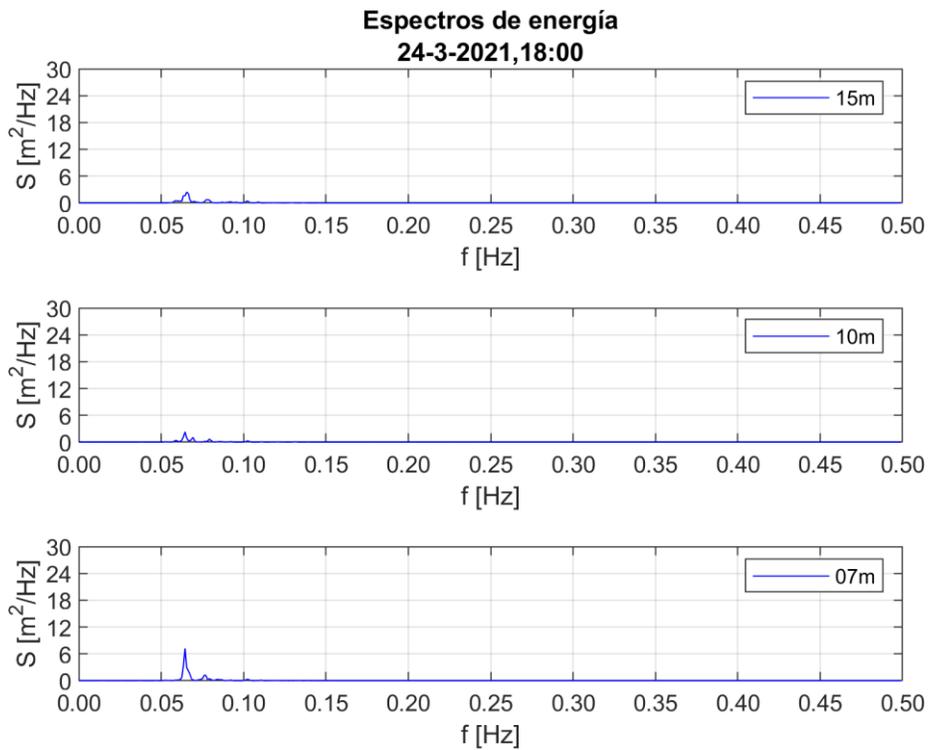


Figura B- 34. Espectro de energía Estado de mar 24-03-2021 18:00

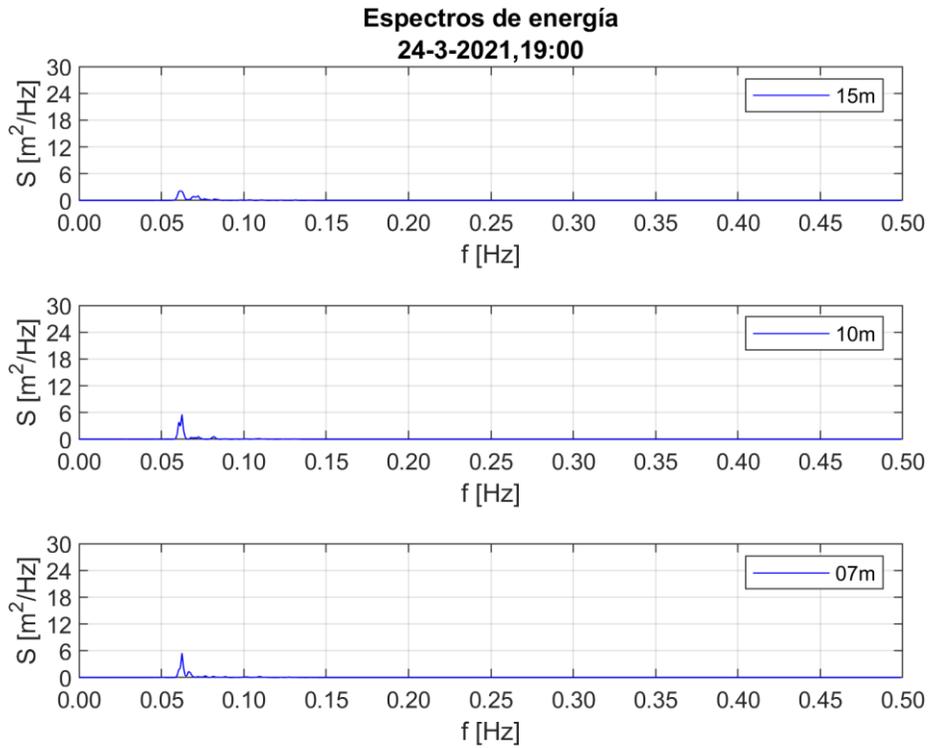


Figura B- 35. Espectro de energía Estado de mar 24-03-2021 19:00

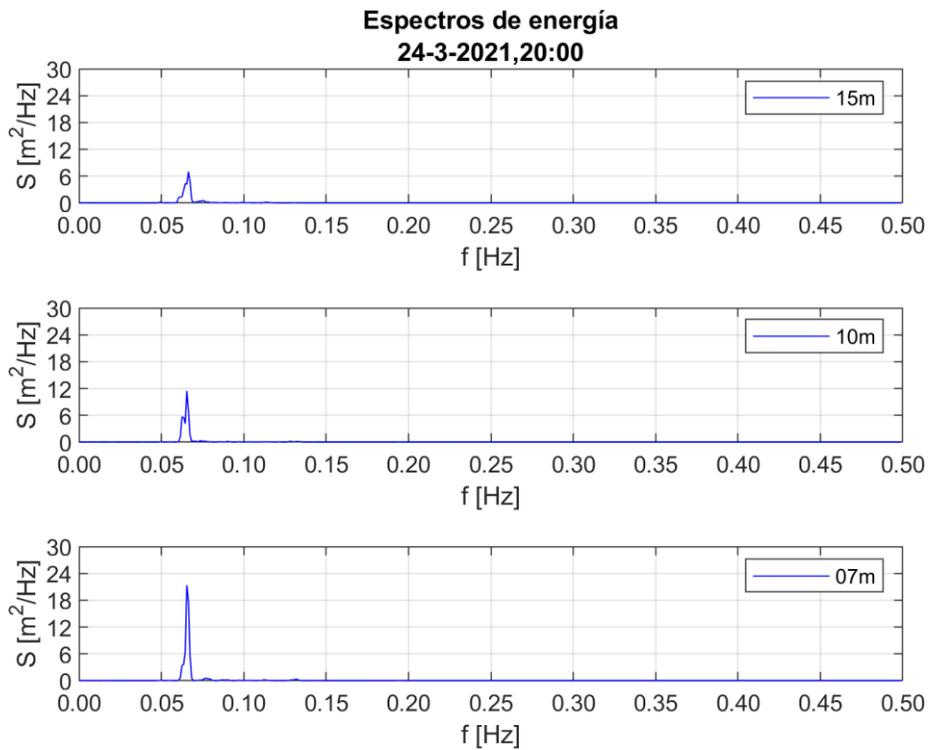


Figura B- 36. Espectro de energía Estado de mar 24-03-2021 20:00

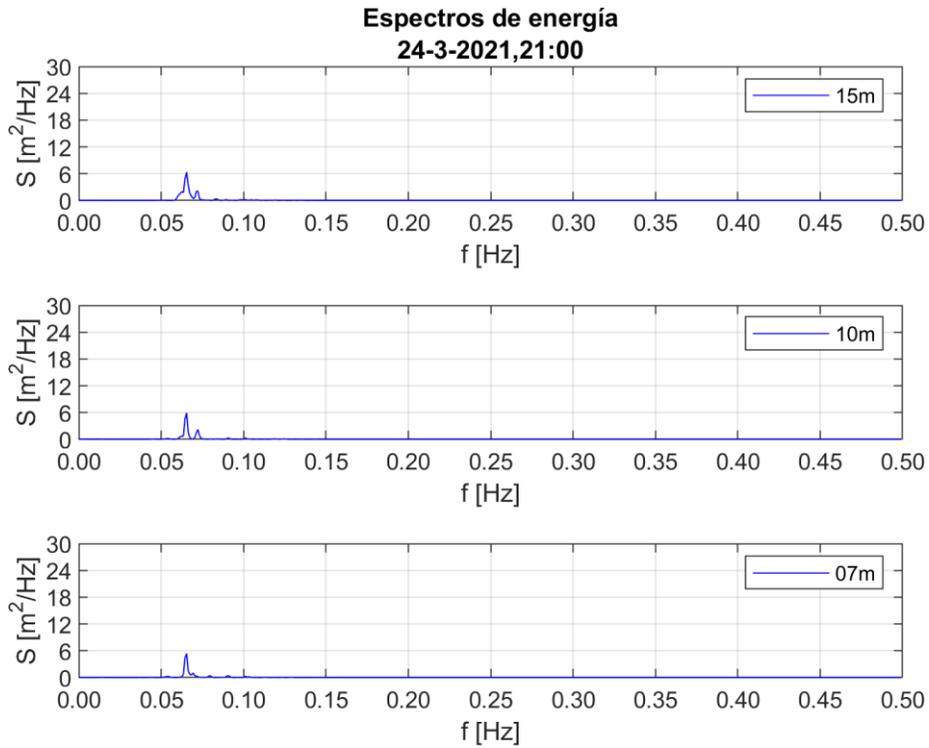


Figura B- 37. Espectro de energía Estado de mar 24-03-2021 21:00

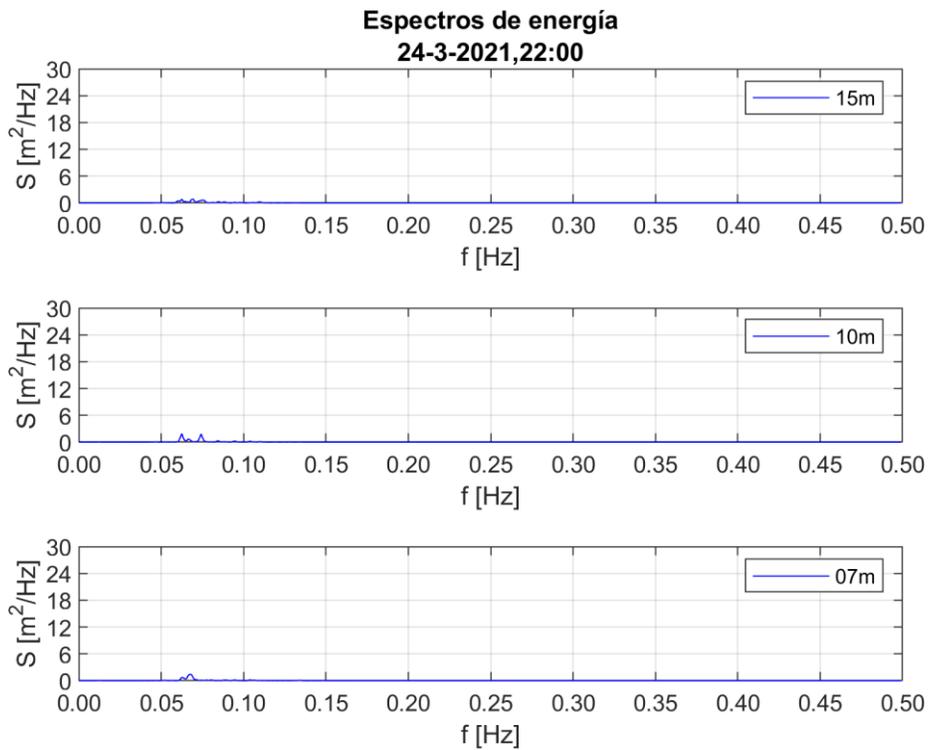


Figura B- 38. Espectro de energía Estado de mar 24-03-2021 22:00

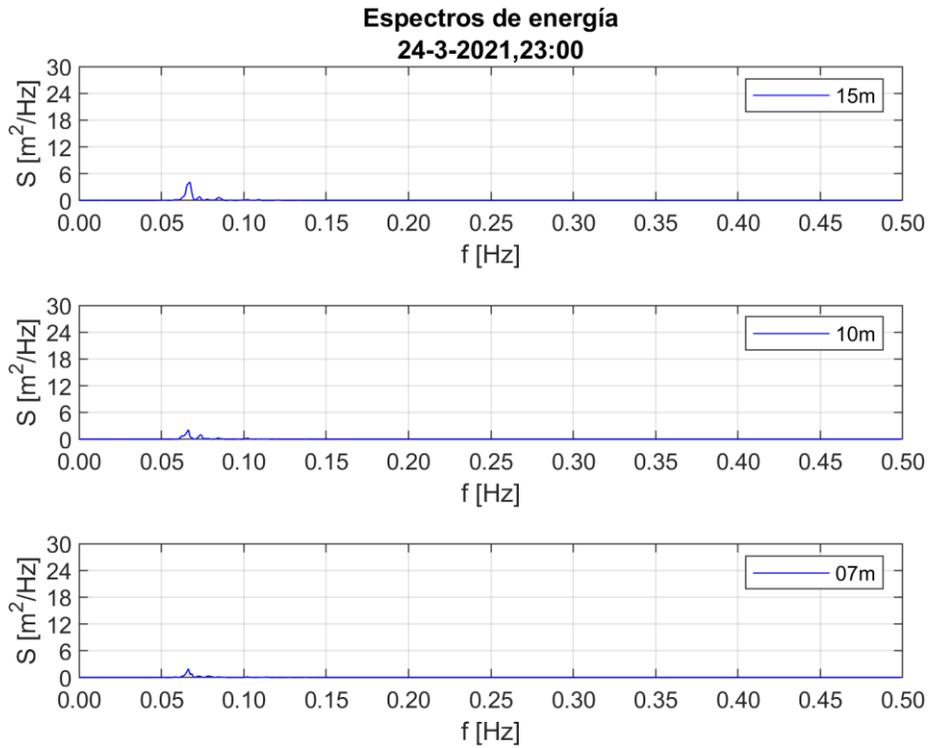


Figura B- 39. Espectro de energía Estado de mar 24-03-2021 23:00

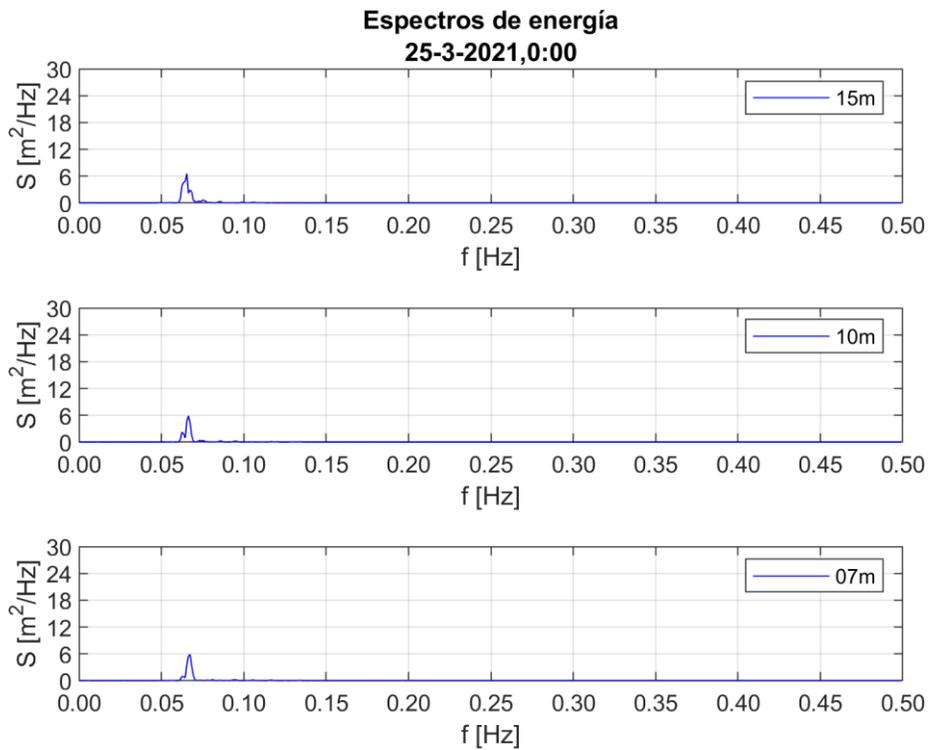


Figura B- 40. Espectro de energía Estado de mar 25-03-2021 00:00

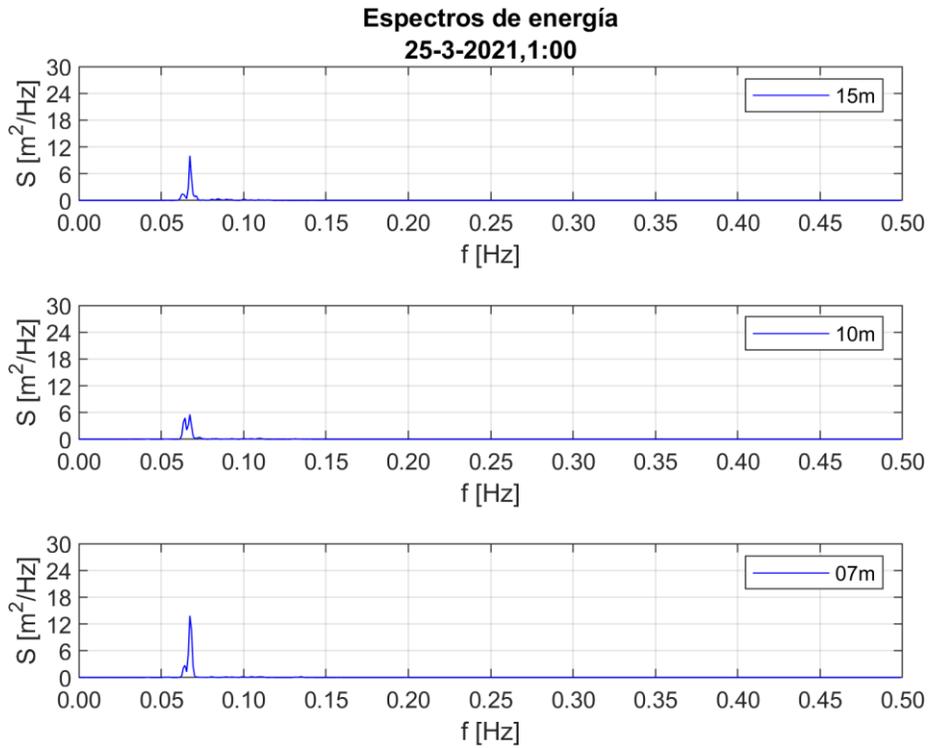


Figura B- 41. Espectro de energía Estado de mar 25-03-2021 01:00

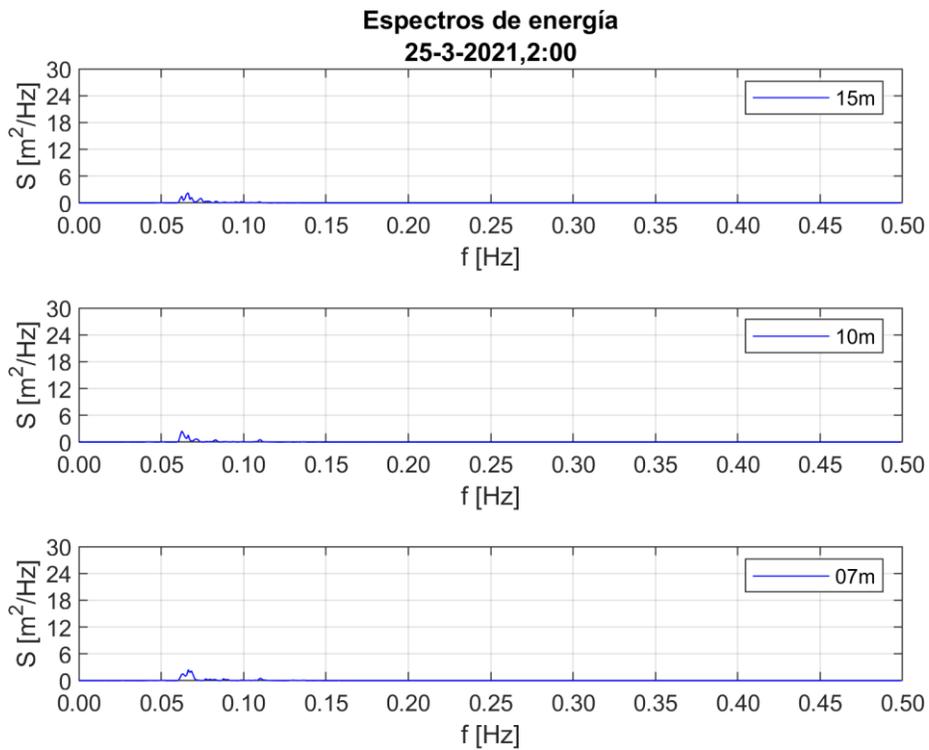


Figura B- 42. Espectro de energía Estado de mar 25-03-2021 02:00

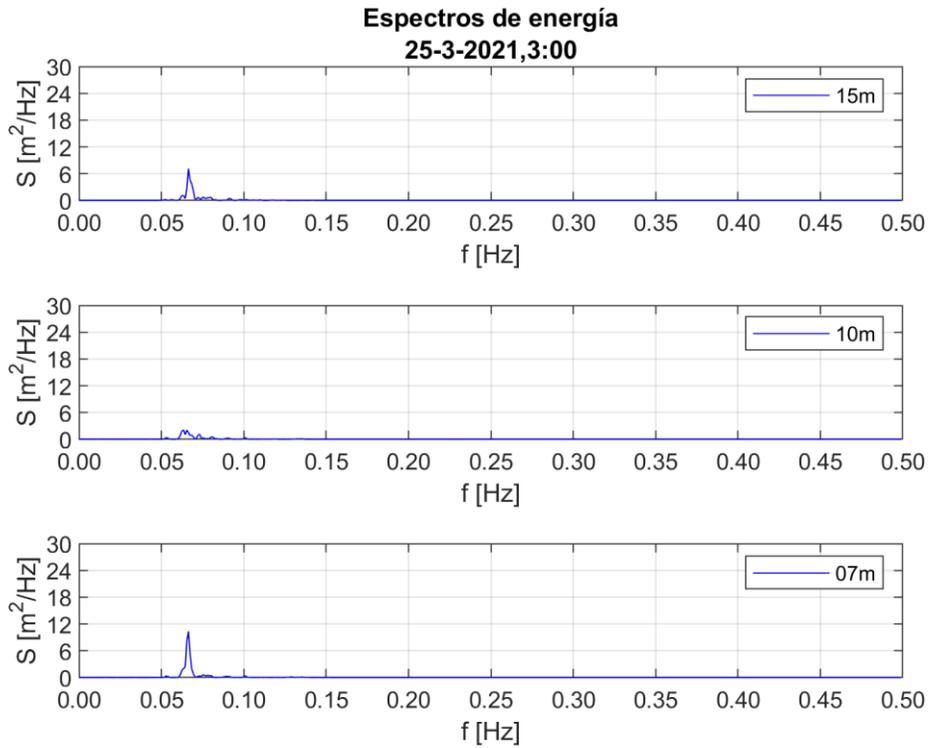


Figura B- 43. Espectro de energía Estado de mar 25-03-2021 03:00

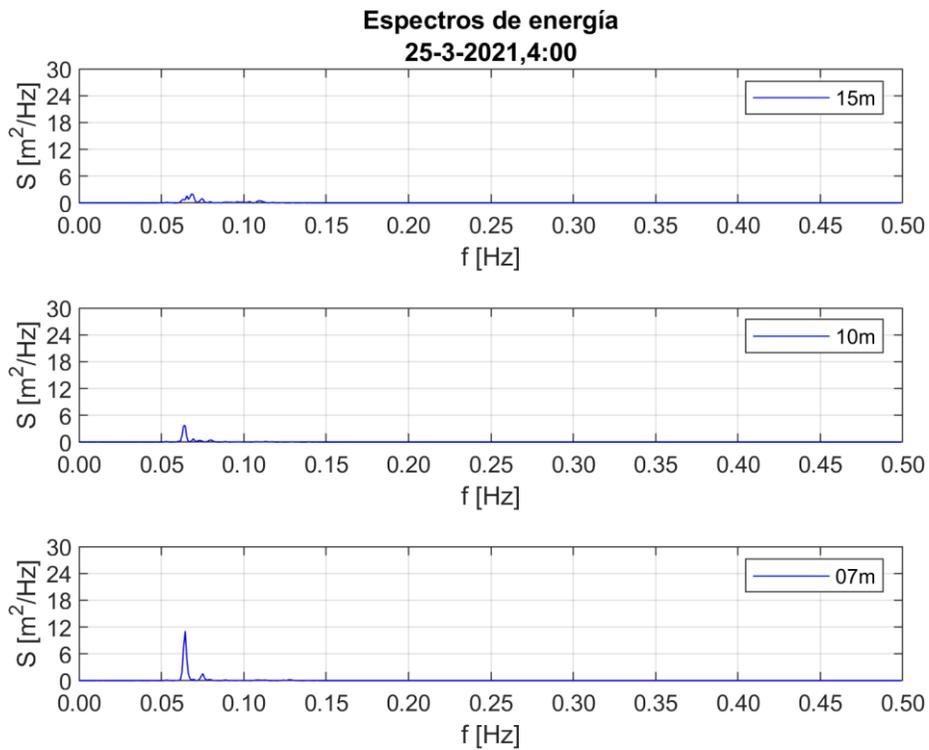


Figura B- 44. Espectro de energía Estado de mar 25-03-2021 04:00

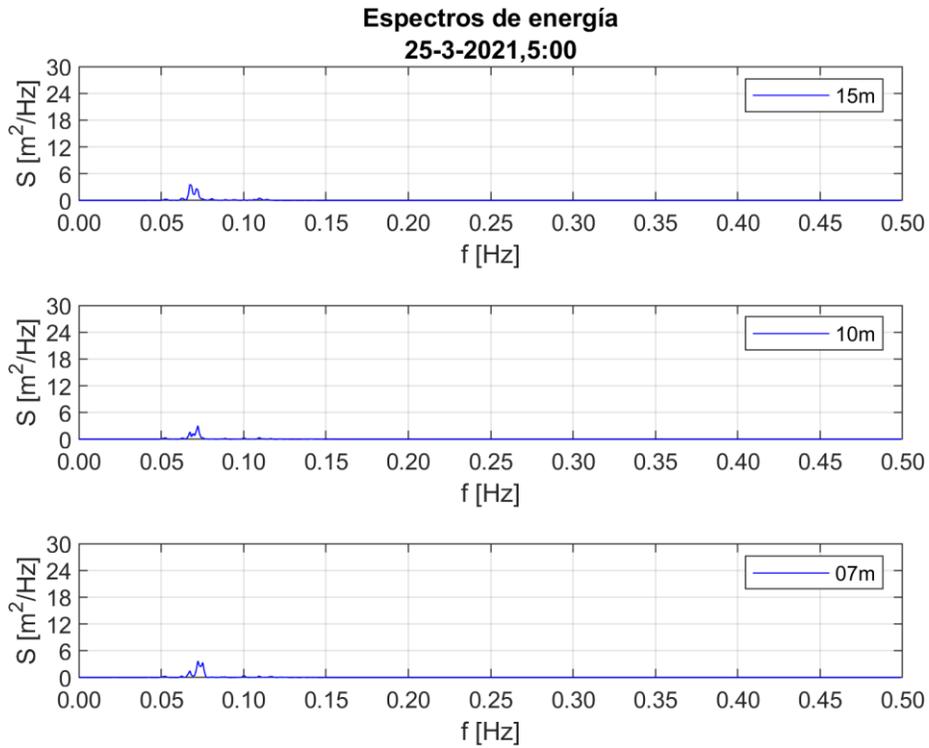


Figura B- 45. Espectro de energía Estado de mar 25-03-2021 05:00

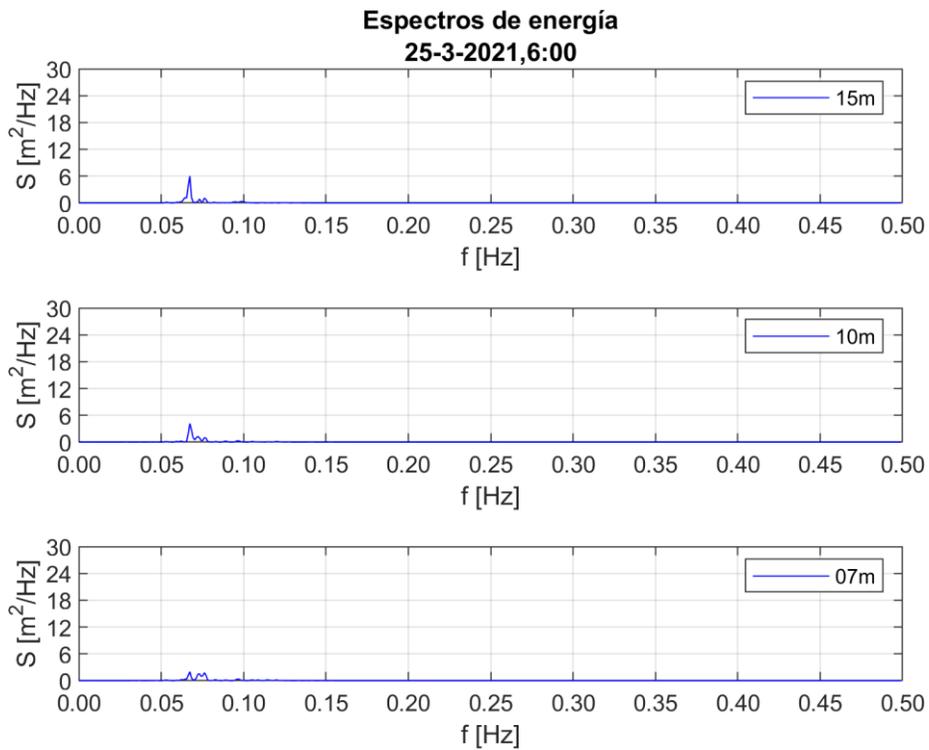


Figura B- 46. Espectro de energía Estado de mar 25-03-2021 06:00

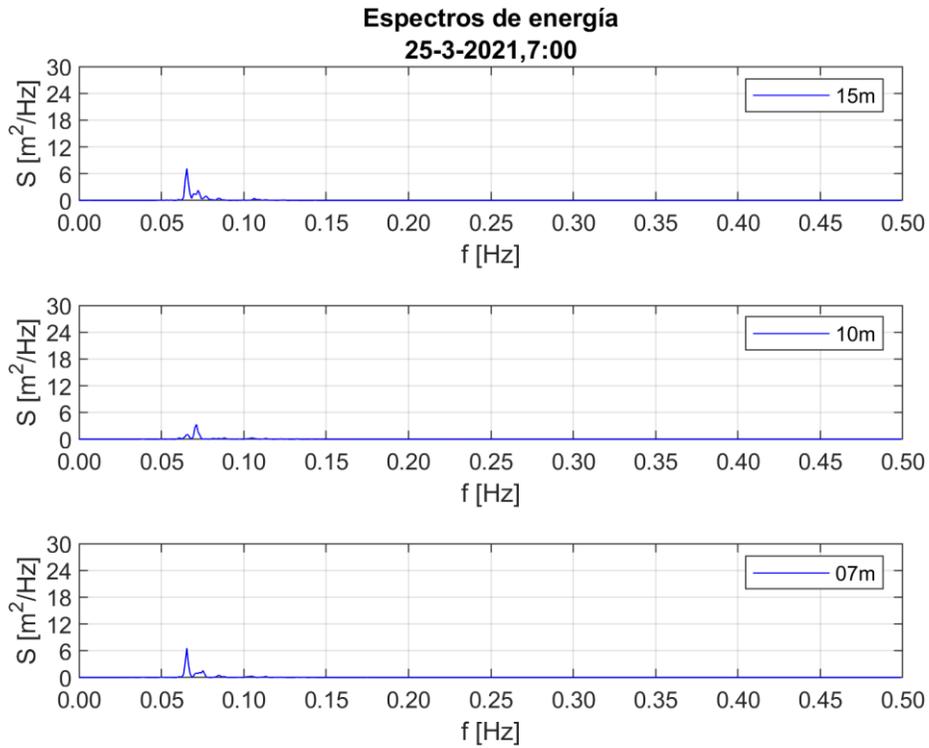


Figura B- 47. Espectro de energía Estado de mar 25-03-2021 07:00

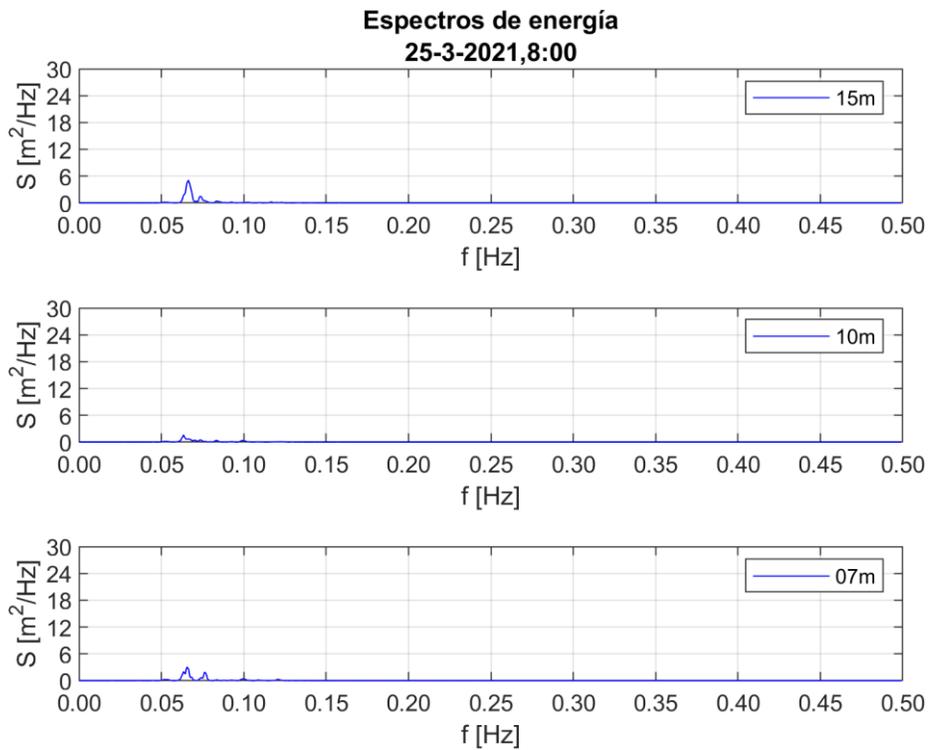


Figura B- 48. Espectro de energía Estado de mar 25-03-2021 08:00

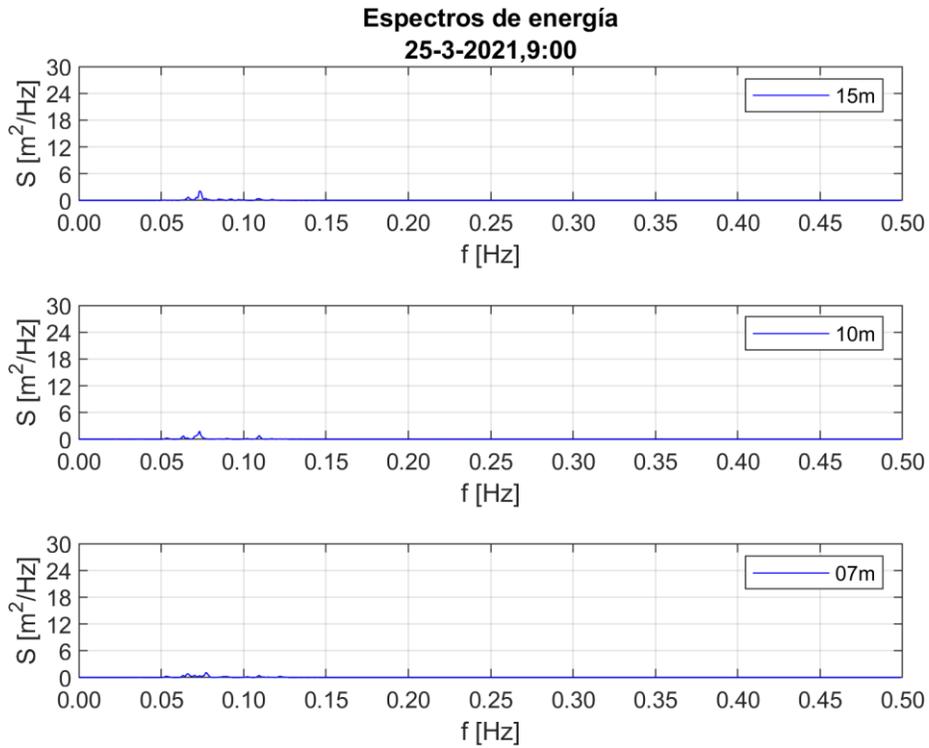


Figura B- 49. Espectro de energía Estado de mar 25-03-2021 09:00

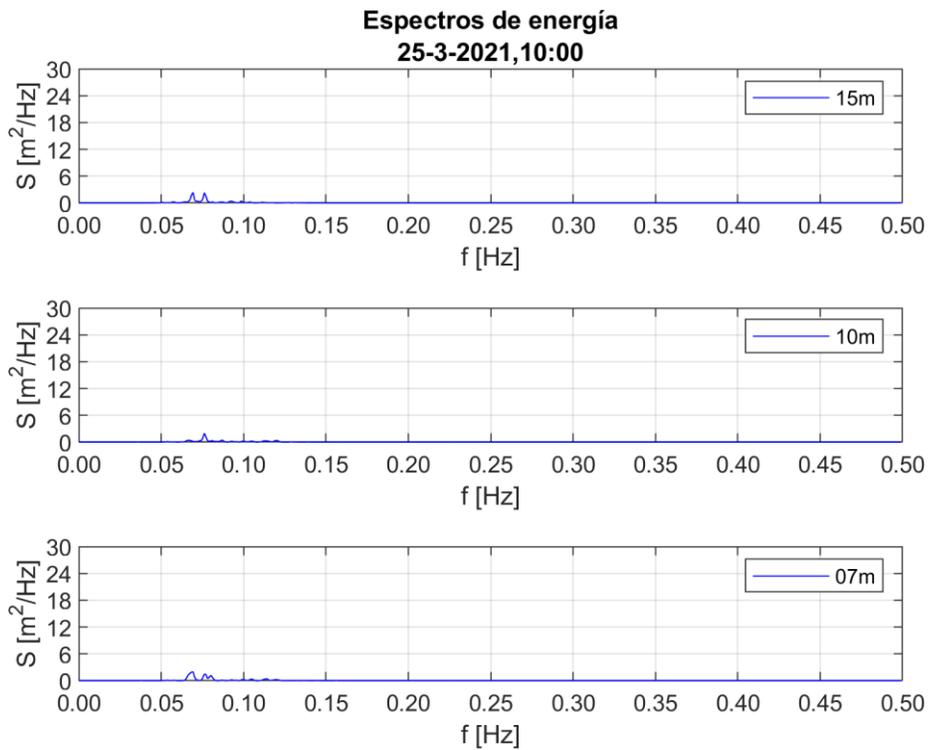


Figura B- 50. Espectro de energía Estado de mar 25-03-2021 10:00

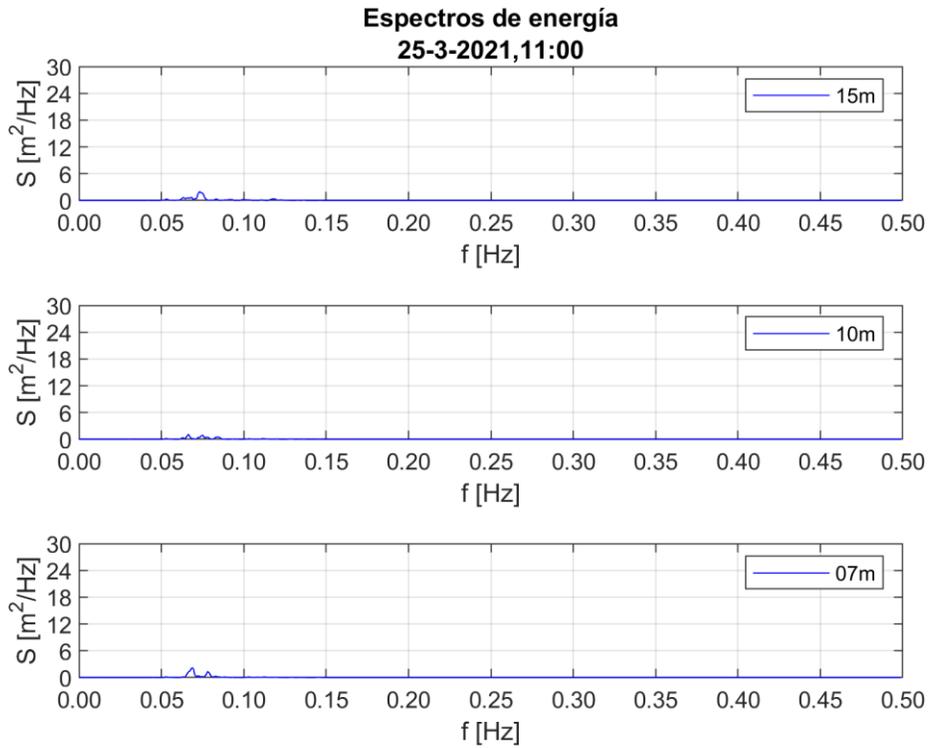


Figura B- 51. Espectro de energía Estado de mar 25-03-2021 11:00

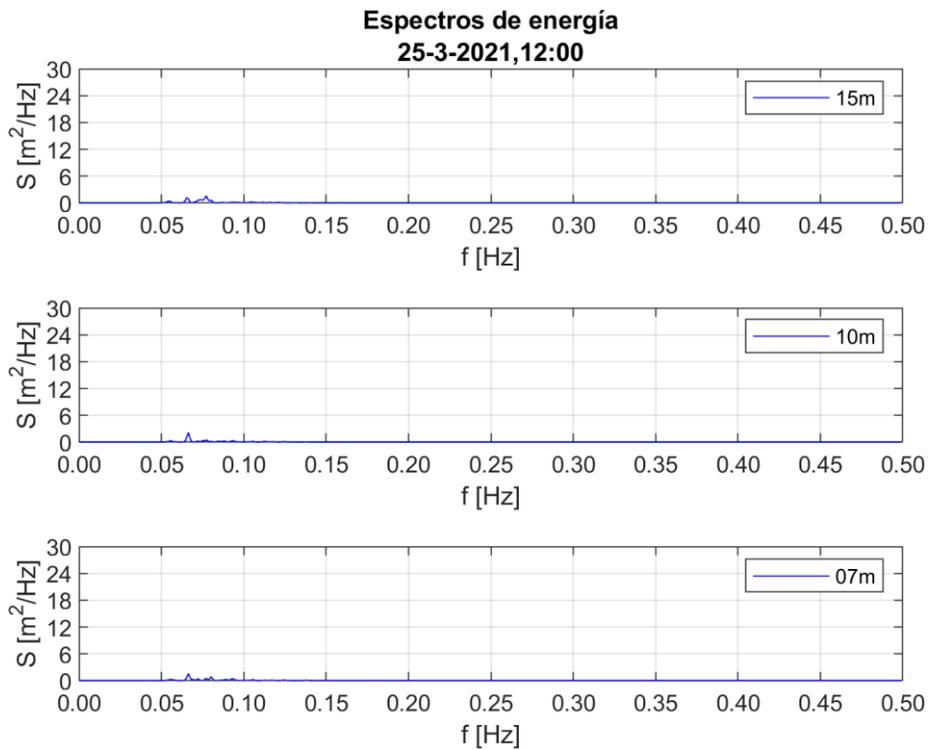


Figura B- 52. Espectro de energía Estado de mar 25-03-2021 12:00

8.3 Apéndice C. Archivo "params.txt" empleado en el modelado numérico

```
1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  %%% ARCHIVO DE PARAMETROS XBEACH %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
3  %%% BURST_1_2019 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4  %%% FECHA: 13/09/21 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
5  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
6
7  %%% General %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
8
9  wavemodel      = nonh
10 swave          = 0
11 sedtrans       = 0
12 morphology     = 0
13 wind           = 0
14
15
16 %%% Grid parameters %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
17
18 depfile        = bed.dep
19 posdwn         = -1
20 nx             = 552
21 ny            = 0
22 vardx         = 1
23 xfile         = x.grd
24 yfile         = y.grd
25 xori          = 0
26 yori          = 0
27 alfa          = 0
28
29 %%% Model time %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
30
31 tstop          = 1500
32 CFL           = 0.9
33
34 %%% Bed composition parameters %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
35
36 bedfriction    = cf
37
38 %%% Flow boundary condition parameters %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
39
40 front          = nonh_ld
41 back           = abs_ld
42
43 %%% Tide boundary conditions %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
44
45 tideloc       = 0
46 zs0           = 0.87
47
48 %%% Wave boundary condition parameters %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
49
50 wbctype       = ts_nonh
51 bcfile        = Boun_U.bcf
52
53 %%% Non Hydrostatic Correction Params %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
54
55 Topt          = 10
56
57 %%% Output variables %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
58
59 outputformat = netcdf
60
61 tintg         = 1
62 tintm         = 1
63
64 nglobalvar    = 4
65 zb0
66 zs
67 zs0
68 zs1
69
70 npoints=4
71 0 0
72 1620 0
73 1700 0
74 1816 0
75
76 npointvar     = 4
77 zb0
78 zs
79 zs0
80 zs1
```

Figura C- 1. Archivo "params.txt" utilizado para las corridas de validación del modelo