

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Determinación del impacto en el transporte litoral de
sedimentos debido a actuaciones en el litoral de
República Dominicana

Autor: Jordan Pantaleon Tejada

Tutor: Alejandro López Ruiz

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de
Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Determinación del impacto en el transporte litoral de sedimentos debido a actuaciones en el litoral de República Dominicana

Autor:

Jordan Pantaleon Tejada

Tutor:

Alejandro López Ruiz

Profesor Titular de Universidad

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Máster: Determinación del impacto en el transporte litoral de sedimentos debido a actuaciones en el litoral de República Dominicana

Autor: Jordan Pantaleon Tejada

Tutor: Alejandro López Ruiz

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

*A mis padres Pedro y Mercedes,
por su inagotable entrega para
darnos lo mejor a sus cuatro hijos
y permitirnos llegar adonde
estamos.*

*A mi esposa Vielka, por su
incondicional apoyo durante esta
gran transición que emprendimos
juntos.*

*A mis maestros Alejandro y
Gabriel, por su empeño en
dotarme con el conocimiento y las
herramientas para poder entender
mi pasión*

Agradecimientos

En primer lugar, a mis padres Mercedes y Pedro, quienes me han apoyado incondicionalmente en todos los pasos que me han permitido alcanzar esta meta. Son una parte inmensurable de mi persona y donde he podido llegar hasta ahora, siempre con palabras de amor y aliento para perseguir mis metas. A mis hermanos Edwin, Joel y Nidia, por su constante preocupación y apoyo a lo largo de mi vida, juntos seguro seguiremos alcanzando nuevos horizontes como familia.

A mi esposa Vielka, quien ha emprendido conmigo este turbulento viaje trasatlántico para alcanzar nuevos horizontes personales y profesionales. Que estos logros que hemos alcanzado sean solo pequeños pasos ante las metas que nos proponemos.

A esta gran familia sevillana que me ha adoptado como parte integral de su núcleo, quienes nos han recibido con una calidez y nos han apoyado tanto en este establecimiento que hemos tenido. Venir de tan lejos y sentirse en casa es algo increíble que solo ha podido ser posible gracias a Mari Reyes, Clara y Sofía. A los nuevos amigos que coincidimos en este camino por la Universidad de Sevilla, quienes han sido compañeros indispensables en las largas noches que pasamos haciendo sentido de lo nuevo que vivimos.

Por último, al profesor Alejandro López quien, dentro de todo lo que la vida le tenía en la mesa, ha apartado un espacio para poder conversar y guiarme en este conocimiento y estudio de la zona donde tanto tiempo pasé.

Resumen

En la costa sur de República Dominicana, el municipio de Nizao de la provincia de Peravia, fue escogido como el emplazamiento para la implementación de una central termoeléctrica de 670 mW que supliría el déficit energético nacional. Para garantizar la operación continua de esta central termoeléctrica, fue necesario dotarla de estructuras costeras, como rompeolas y protección costera, y un muelle para la recepción de carbón a 1,3 kilómetros de la costa.

El presente trabajo pretende, partiendo de información disponible nacional e internacionalmente, hacer un análisis del impacto en la hidrodinámica costera de la zona debido a estas actuaciones y determinar el impacto en el transporte litoral de sedimentos para estimar como se alterará la línea de costa a largo plazo en el emplazamiento. Para este análisis se recopila toda la información disponible, llegando a una serie de datos de partida que surgen principalmente de fuentes internacionales debido a la falta de información disponible de manera nacional.

Para la determinación de los estados de mar característicos, se genera una serie de datos partiendo de las informaciones extraídas de una boya alejada al emplazamiento, complementada con los datos del reanálisis WAVERYS del Sistema de Vigilancia Marítima Copernicus de la Unión Europea. De esta serie se determinan los regímenes normales y extremos que se tomarán en consideración para observar el impacto de las actuaciones.

En el caso de las actuaciones, el muelle se considera mediante la alteración de la batimetría natural agregando el dragado de la zona, las pilas del muelle se modelarían como rompeolas de pilas con pequeño espaciamiento según la formulación de Hayashi (1966), desconsiderándose la influencia de las pilas del puente de acceso debido a la gran distancia entre las pilas. Para los rompeolas y la protección costera, se considera como un dique con la formulación de Goda con los factores de forma sugeridos por Seelig (1979). Con estos datos de partida se modela con el simulador numérico DELFT 3D, basado en un modelo de simulación SWAN, de Deltares.

De esta serie de modelaciones se concluye que la hidrodinámica costera se muestra importantemente alterada únicamente en el área abrigada por los rompeolas, mientras la interacción considerada de las pilas del muelle hace que la altura del oleaje en la zona sea reducida en el sentido de propagación del oleaje en hasta un 10%, sin observarse una alteración relevante en la dirección del oleaje en el momento de rotura entre ambos escenarios. Consecuentemente, se determina que la tendencia de la dinámica litoral se mantiene en la línea de costa del emplazamiento entre ambos escenarios, siendo el rompeolas un obstáculo que impedirá el transporte de sedimentos que existía del este al oeste.

Abstract

On the southern coast of the Dominican Republic, the municipality of Nizao in the province of Peravia, was chosen as the site for the implementation of a 670 mW thermoelectric power central that would supply the national energy deficit. To guarantee the continuous operation of this thermoelectric central, it was necessary to provide it with coastal structures, such as breakwaters and coastal protection, and a pier for receiving coal 1,3 kilometers from the coast.

This project aims to, based on information available nationally and internationally, analyze the impact on the coastal hydrodynamics of the area due to these actions and determine the impact on coastal sediment transport to estimate how the coastline will be altered in the long term on site. For this analysis, all available information is collected, arriving at a series of starting data compiled mainly from international sources due to the lack of information available nationally.

To determine the characteristic sea states, a series of data is generated based on the information extracted from a buoy far from the site, complemented with the data from the WAVERYS reanalysis of the Copernicus Maritime Surveillance System of the European Union. From this series, the normal and extreme regimes that will be taken into consideration to observe the impact of the actions are determined.

In the case of the structures, the pier is considered by altering the natural bathymetry by adding the dredging of the area, the pier piles would be modeled as breakwaters closely spaced piles according to the formulation of Hayashi (1966), disregarding the influence of the piles that support the access bridge due to the great distance between the piles. For breakwaters and coastal protection, it is considered as a dike with Goda's formulation with the shape factors as suggested by Seelig (1979). With these as the input information, the system is modeled with the DELFT 3D numerical simulator, based on a SWAN simulation model, from Deltares.

From this series of simulations, it is concluded that the coastal hydrodynamics is significantly altered only in the area sheltered by the breakwaters, while the considered interaction of the pier piles causes the wave height in the area to be reduced in the direction of wave propagation by up to 10%, without observing any relevant alteration in the direction of the waves at the moment of breaking between both scenarios. Consequently, it is determined that the tendency of the coastal dynamics is maintained on the coastline of the site between both scenarios, the breakwater being an obstacle that will prevent the transport of sediments that existed from east to west.

Agradecimientos	9
Resumen	11
Abstract	13
Índice	14
Índice de Tablas	15
Índice de Figuras	15
1 Introducción	1
2 Información disponible de la zona de estudio	3
2.1 <i>Evolución de la línea de costa</i>	5
2.2 <i>Descripción de las estructuras</i>	8
2.2.1 Muelle	8
2.2.2 Rompeolas	8
2.2.3 Protección Costera	9
2.3 <i>Batimetría</i>	9
2.4 <i>Clima marítimo</i>	10
2.4.1 Levantamientos Locales	10
2.4.2 Levantamientos Internacionales	11
2.4.3 Información de modelos globales	11
3 Caracterización del emplazamiento	11
3.1 <i>Clima marítimo</i>	11
3.1.1 Mediciones NOAA	11
3.1.2 Simulaciones modelo global	14
3.1.3 Análisis mixto	17
3.1.4 Observaciones generales	22
3.2 <i>Batimetría</i>	23
3.3 <i>Condiciones de contorno</i>	25
3.3.1 Condición natural	25
3.3.2 Condición modificada	25
4 Metodología	29
4.1 <i>Propagación del oleaje</i>	29
4.1.1 Dominio de estudio	30
4.1.2 Condiciones de contorno	30
4.1.3 Resultados	32
4.2 <i>Transporte longitudinal de sedimentos</i>	47
4.2.1 Determinación de parámetros de rotura	48
4.2.2 Regimen normal	49
4.2.3 Regimen extremal este	50
4.2.4 Regimen extremal oeste	51
5 Conclusión y líneas futuras de investigación	52
Referencias	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1.- Localización del emplazamiento	4
Tabla 4-1.- Coeficientes de rotura considerados	48
Tabla 4-2.- Altura de rotura y tasas potenciales de sedimentación del régimen normal	50
Tabla 4-3.- Tendencia del transporte de sedimentos del régimen normal	50
Tabla 4-4.- Altura de rotura y tasas potenciales de sedimentación del régimen extremal este	50
Tabla 4-5.- Tendencia del transporte de sedimentos del régimen extremal este	50
Tabla 4-6.- Altura de rotura y tasas potenciales de sedimentación del régimen extremal oeste	51
Tabla 4-7.- Tendencia del transporte de sedimentos del régimen extremal oeste	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 2-1 - Zona costera de Punta Catalina	3
Ilustración 2-2 – Emplazamiento Punta Catalina	4
Ilustración 2-3 - Mapa geológico	4
Ilustración 2-4 - Alineación media 2014	5
Ilustración 2-5 - Evolución de la costa. Mayo 2001	5
Ilustración 2-6 - Evolución de la costa. Febrero 2007	6
Ilustración 2-7 – Comparativo evolución de la costa	6
Ilustraciones 2-8 y 2-9- Fotos aéreas sobrevuelos años 1967 y 2000 respectivamente	7
Ilustración 2-10 - Evolución de la costa. Enero 2021	7
Ilustración 2-11 - Muelle en cuestión	8
Ilustración 2-12 – Rompeolas ejecutados en el proyecto	9
Ilustración 2-13 - Carta Nautica Puerto Palenque (1991)	9
Ilustración 2-14 - Estaciones ONAMET (Oficina Nacional de Meteorología, 2022)	10
Ilustración 2-15 - Mapa de ubicación de boyas NOAA	11
Ilustración 3-1 – Datos de altura de ola significativa de la boya 42059	11
Ilustración 3-2 – Régimen medio en la boya 42059	12
Ilustración 3-3 – Gráficos de dispersión en la boya 42059	12
Ilustración 3-4 – Rosa de oleaje en la boya 42059	13
Ilustración 3-5 – Distribución probabilística del oleaje en la boya 42059	13
Ilustración 3-6 – Regimen extremal en la boya 42059	14

Ilustración 3-7 – Datos de altura de ola significativa de WAVERYS	14
Ilustración 3-8 – Régimen medio de WAVERYS	15
Ilustración 3-9 – Gráficos de dispersión de WAVERYS	15
Ilustración 3-10 – Distribución probabilística del oleaje WAVERYS	16
Ilustración 3-11 – Ajuste probabilístico del oleaje extremal en WAVERYS	16
Ilustración 3-12 – Modelo de Valores Extremos Generalizados ajustados a los datos de WAVERYS	17
Ilustración 3-13 – Peak Over Threshold WAVERYS	17
Ilustración 3-14, 15, 16 – Gráficos de dispersión de Hs, Dirección y período coincidentes entre datos	18
Ilustración 3-17, 18, 19 – Gráficos de dispersión de Hs, Dirección y período calibrados entre datos	19
Ilustración 3-20 – Serie temporal mixta	20
Ilustración 3-21 – Régimen medio de la serie temporal mixta	20
Ilustración 3-22 – Modelo de Valores Extremos Generalizados ajustados a la serie de datos mixtos	21
Ilustración 3-23 – Peak Over Threshold serie ajustada	21
Ilustración 3-24 – Desarrollo temporal del estado	22
Ilustración 3-25 – Desarrollo temporal del huracán Matthew (National Hurricane Center, 2017)	23
Ilustración 3-26 – Representación de la batimetría extraída (General Bathymetric Chart of the Oceans, 2020)	24
Ilustración 3-27 – Representación de la batimetría natural del emplazamiento	24
Ilustración 3-28 – Distribución granulométrica del material próximo al emplazamiento	25
Ilustración 3-29 – Representación de contornos en estructuras	26
Ilustración 3-30 – Representación del comportamiento de Kr (Hayashi, Hattori, Kano, & Shirai, 1966)	27
Ilustración 3-31 – Representación del comportamiento de Kr modelado (Hayashi, Hattori, Kano, & Shirai, 1966)	28
Ilustración 4-1 – Representación del dominio y las mallas	30
Ilustración 4-2 – Altura de ola significativa en la malla “GRID001”	32
Ilustración 4-3 – Altura de ola significativa en la malla “GRID003”	33
Ilustración 4-4 – Altura de ola significativa en la malla “GRID001”	33
Ilustración 4-5 – Altura de ola significativa en la malla “GRID003”	34
Ilustración 4-6 – Comparativo de alturas de ola significativa en ambos escenarios en la malla “GRID003”	35
Ilustración 4-7 – Secciones de alturas de ola significativa en ambos escenarios en la malla “GRID003”	35
Ilustración 4-8 – Porcentaje de rotura en ambos escenarios en la malla “GRID003”	36
Ilustración 4-9 – Dirección media de oleaje en ambos escenarios en la malla “GRID003”	36
Ilustración 4-10 – Altura de ola significativa en la malla “GRID001”	37
Ilustración 4-11 – Altura de ola significativa en la malla “GRID003”	38
Ilustración 4-12 – Altura de ola significativa en la malla “GRID001”	38
Ilustración 4-13 – Altura de ola significativa en la malla “GRID003”	39
Ilustración 4-14 – Comparativo de alturas de ola significativa en ambos escenarios en la malla “GRID003”	40
Ilustración 4-15 – Secciones de alturas de ola significativa en ambos escenarios en la malla “GRID003”	40
Ilustración 4-16 – Comparativo de porcentaje de rotura en ambos escenarios en la malla “GRID003”	41

Ilustración 4-17 – Dirección media de oleaje en ambos escenarios en la malla “GRID003”	41
Ilustración 4-18 – Altura de ola significativa en la malla “GRID001”	42
Ilustración 4-19 – Altura de ola significativa en la malla “GRID003”	43
Ilustración 4-20 – Altura de ola significativa en la malla “GRID001”	43
Ilustración 4-21 – Altura de ola significativa en la malla “GRID003”	44
Ilustración 4-22 – Comparativo de alturas de ola significativa en ambos escenarios en la malla “GRID003”	45
Ilustración 4-23 – Secciones de alturas de ola significativa en ambos escenarios en la malla “GRID003”	45
Ilustración 4-24 – Comparativo de porcentaje de rotura en ambos escenarios en la malla “GRID003”	46
Ilustración 4-25 – Dirección media de oleaje en ambos escenarios en la malla “GRID003”	46
Ilustración 4-26 – Identificación de secciones en la malla “GRID003”	47
Ilustración 4-27 – Identificación de secciones en vista satelital actual	48
Ilustración 4-28 – Altura de rotura en la condición extremal Este	49

1 INTRODUCCIÓN

Nada en el mundo tan blando como el agua, pero nada le supera contra lo duro y lo fuerte.

- Tao Te Ching y Lao Tzu-

La República Dominicana, instaurada en la isla de la Hispaniola, la cual comparte con Haití en el centro de las Antillas Mayores, cuenta con una superficie de 48.310,97 km² y un perímetro muy desarrollado de 1.964 km, de los cuales 1.576 km son de costa y 388 km son de frontera con la República de Haití. El país limita al norte con el océano Atlántico, al este con el canal de la Mona, al sur con el mar Caribe y al oeste con la República de Haití (Oficina Nacional de Estadística, 2020).

Su gran extensión costera y agradables temperaturas que oscilan entre los 25 °C y 30 °C le han permitido desarrollarse como un polo turístico en el Caribe, alcanzando los 6,5 millones de pasajeros no residentes en el 2019. Este flujo de turistas anuales permite un ingreso fiscal al Producto Interno Bruto (PIB) de la República Dominicana de RD\$ 10.986.514.497, equivalente a aproximadamente un 20% del mismo. La magnitud de lo que representa en la actualidad el turismo es el fruto de un sector que lleva desarrollándose desde hace más de 50 años en las costas del este de la isla y se ha extendido a todas las regiones del país.

Esta gran dependencia de la costa hace que su conocimiento, jurisdicción y protección sean de vital importancia para el desarrollo de las políticas de explotación de las costas, fomentando su uso sostenible y evitando las alteraciones que comprometan las líneas costeras existentes. Este conocimiento sería monitorizado con una red de estaciones en boyas para conocer el comportamiento y la caracterización del clima marítimo en las costas principales de la isla, similar al Sistema Portuario de Puertos del Estado que el Gobierno de España lleva a través del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana

A pesar de esta gran dependencia, la jurisdicción compartida entre las diferentes instituciones del estado y la falta de acción por las partes involucradas no han permitido el desarrollo de leyes que permitan el conocimiento de la costa. Por lo que, aún hoy en día, no se dispone de un Plan de Gestión Integral sobre el conocimiento y manejo de las costas. La consecuencia principal de esta falta de planificación es la acción poco controlada del sector económico sobre las costas, que repercute sobre este recurso público de manera directa, ocasionando modificaciones irremediables que se pueden extender por kilómetros en la línea de costa.

Motivación del trabajo

Este trabajo surge de la curiosidad del autor ante la falta de información disponible de manera pública para los ciudadanos del comportamiento de las actuaciones sobre las costas que son tan frecuentes en la isla y las consecuencias que traen las modificaciones a las costas.

Esta motivación llevo al autor a hacer una búsqueda en varios referentes de investigación internacionales, llegando a la observación de que no existía ninguna publicación técnica al respecto y viendo la necesidad de crear un precedente que facilite la investigación técnica en el país.

Con la realización de la formación del máster, se han adquirido los conocimientos y las competencias para poder hacer un estudio de la dinámica litoral en uno de los sitios más frecuentados por el autor, con el fin de entender las consecuencias debido a las intervenciones costeras que fueron implementadas, creando así un precedente partiendo de una intervención pública en el medio ambiente.

Objetivos generales

Este documento se centrará en hacer una recopilación de los datos disponibles de manera pública para, a partir de los mismos, estudiar la influencia de las actuaciones que han sido desarrolladas por el sector público en una playa de la costa sur de la isla mediante en análisis de la distribución de la energía de oleaje antes y después de estas actuaciones.

Objetivos específicos

Para lograr este objetivo se establecen

- Se levantarán y estudiarán los datos de clima marítimo disponibles en la zona para la caracterización del estado de mar predominante.
- Se establecerá la batimetría natural a partir de los datos existentes y se modificará para corresponder a las modificaciones realizadas en el proyecto.
- Se propagarán los estados de mar predominantes en ambas condiciones para determinar la influencia de estas actuaciones en las alturas de ola que se presentarían en la playa.
- Partiendo de estas condiciones en los estados de mar, se determinará la dinámica litoral y como esta se ha modificado debido a las actuaciones en la zona.

2 INFORMACIÓN DISPONIBLE DE LA ZONA DE ESTUDIO

Si el conocimiento puede crear problemas, no es a través de la ignorancia que podremos resolverlos.

Isaac Asimov

El emplazamiento a ser estudiado serán los alrededores de la Punta Catalina en el municipio de Nizao de la provincia Bani, en la costa sur de la isla. La zona se localiza al sur de la isla, a unos 25 km de la capital de la República Dominicana, Santo Domingo. Justo en esta punta, fue desarrollada la Central Termoeléctrica Punta Catalina, una central termoeléctrica a carbón con capacidad de 675 MW que actualmente es responsable de la producción del 20% de la energía en el país.



Ilustración 2-1 - Zona costera de Punta Catalina

Al situarse al sur de la isla, se encuentra en contacto con el mar Caribe, Punta Catalina actúa como punto de división entre las playas de Catalina al oeste y al este la playa Nizao, homólogo con el municipio y el río Nizao. Próximo a la punta, en la playa de Nizao, se encuentra la desembocadura del Arroyo Catalina, lo que influenciará en la sedimentación en el emplazamiento.

El punto elegido como representante del emplazamiento tendrá las siguientes coordenadas WGS84:

Tabla 2-1.- Localización del emplazamiento

Latitud	18°13'0.37"N
Longitud	70°13'44.42"O

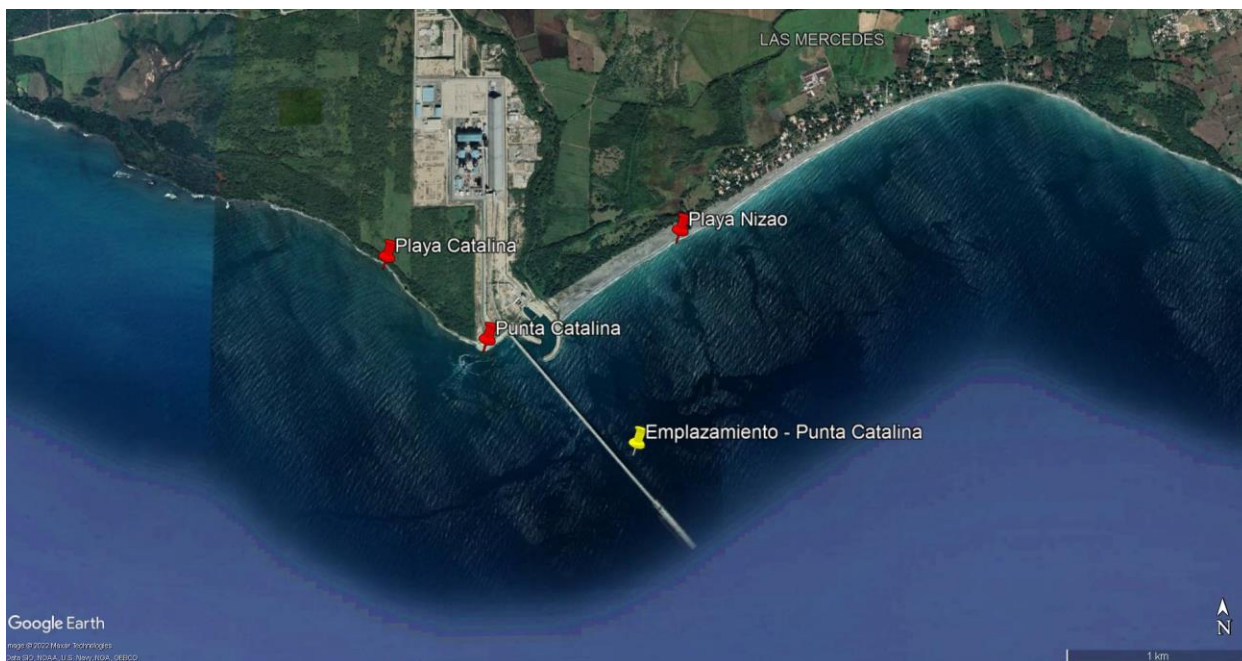


Ilustración 2-2 – Emplazamiento Punta Catalina

Geológicamente, se localiza en el límite sureste de la Cordillera Central en el dominio geológico Cinturón de Peralta, donde las unidades geológicas características son las Grupo Ingenio CAEI, el grupo Rio Ocoa y Las Palmas (Consortio IGME-BRGM-INYPSA, 2010). En su mapa geológico se muestra que la zona costera está categorizada como “Playas y cordón litoral. Arenas y gravas bioclásticas”, y la zona próxima a la costa se categoriza como piedemonte antiguo, con lutitas y arenas con gravas y cantos.

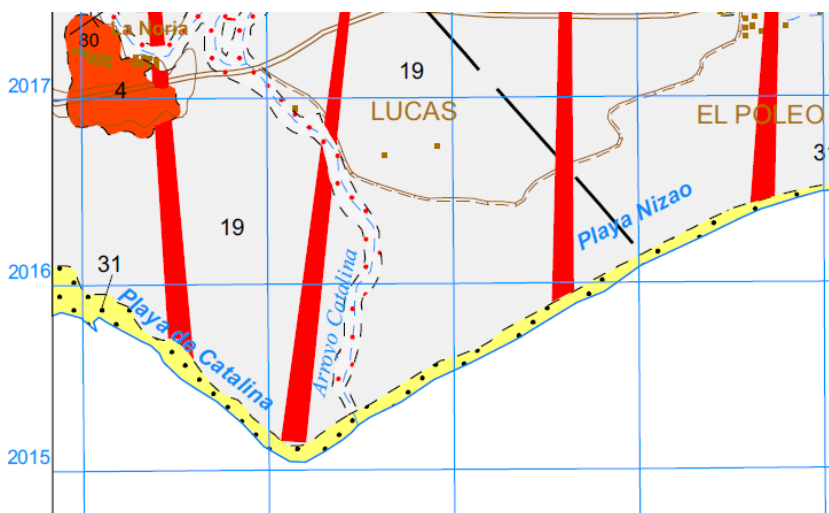


Ilustración 2-3 - Mapa geológico

Esta zona es descrita en la memoria del Mapa Geológico Nacional como un depósito cuaternario del pleistoceno, donde no se produce una clara separación entre la playa y su área correspondiente al cordón litoral, siendo agrupadas como un único depósito constituido por arenas medias negras, concantos y bloques de corales. Sobre los datos del fuera de la línea de costa, no es posible encontrar ningún documento en las instituciones gubernamentales que permitan conocer las plataformas costeras y sus características.

2.1 Evolución de la línea de costa

En cuanto a la alineación media de las playas de Catalina y Nizao, como base será considerada la línea de playa justo antes de las actuaciones realizadas con el uso de la herramienta Google Earth, mostrando el alineamiento base y su perfil longitudinal a continuación:

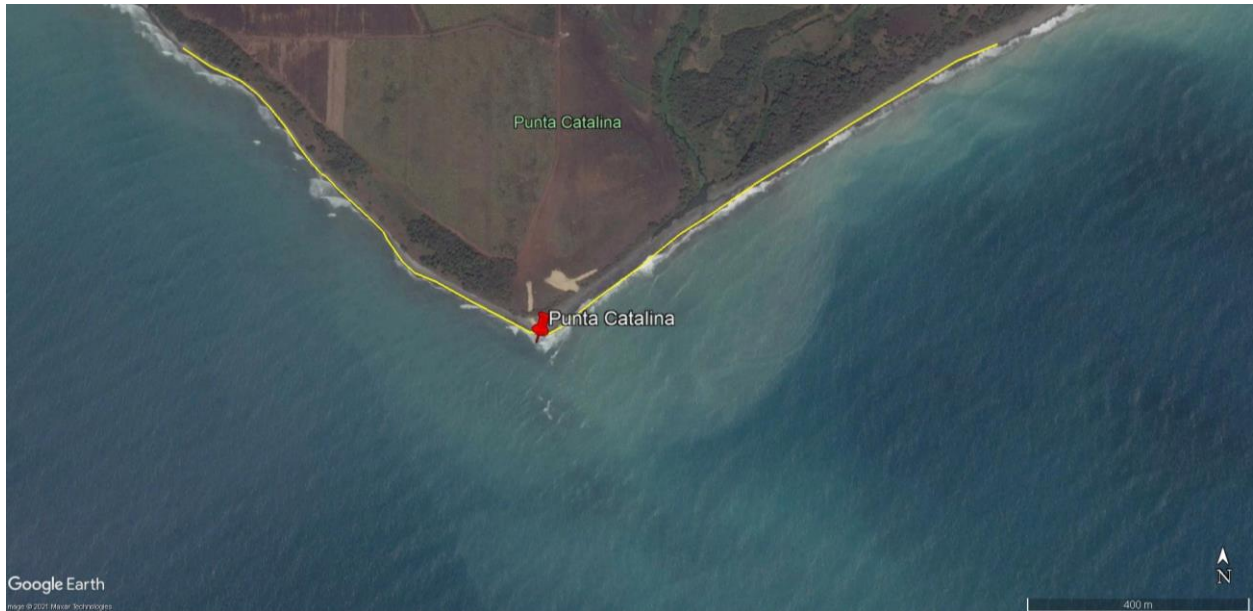


Ilustración 2-4 - Alineación media 2014

Como se muestra en la imagen, la playa Nizao presenta más playa seca que la playa de Catalina. Su evolución posterior a las actuaciones se muestra a continuación a través de imágenes satelitales obtenidas con Google Earth:

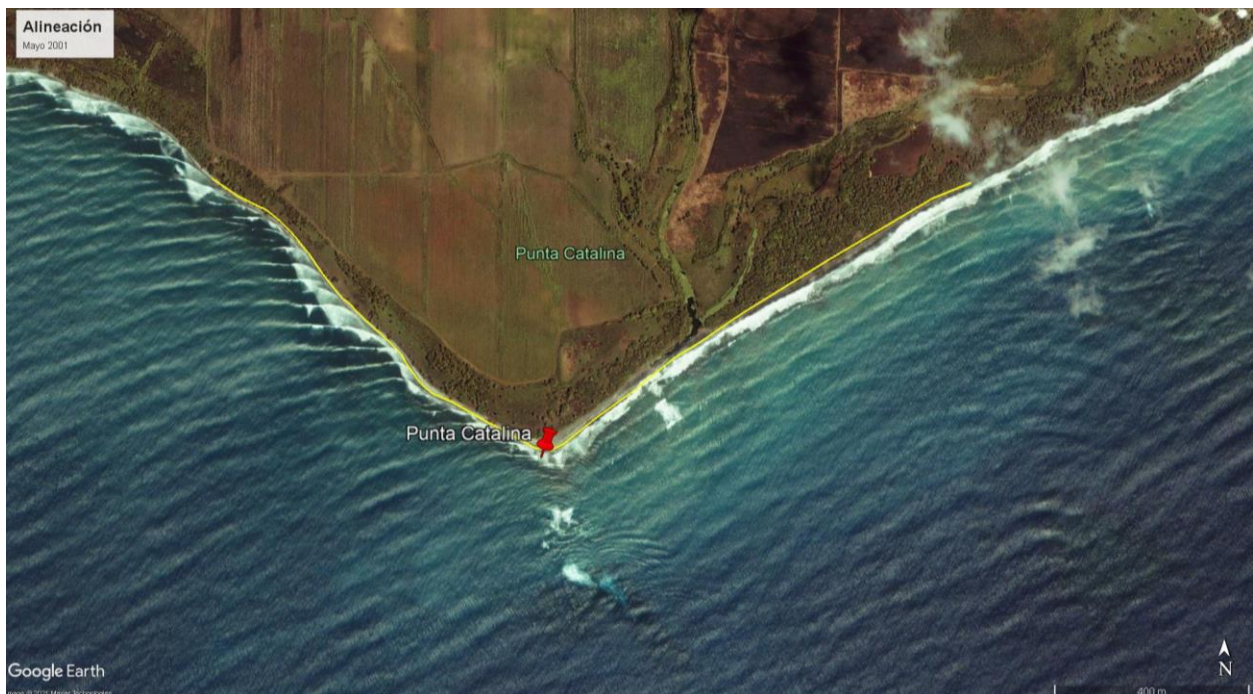


Ilustración 2-5 - Evolución de la costa. Mayo 2001

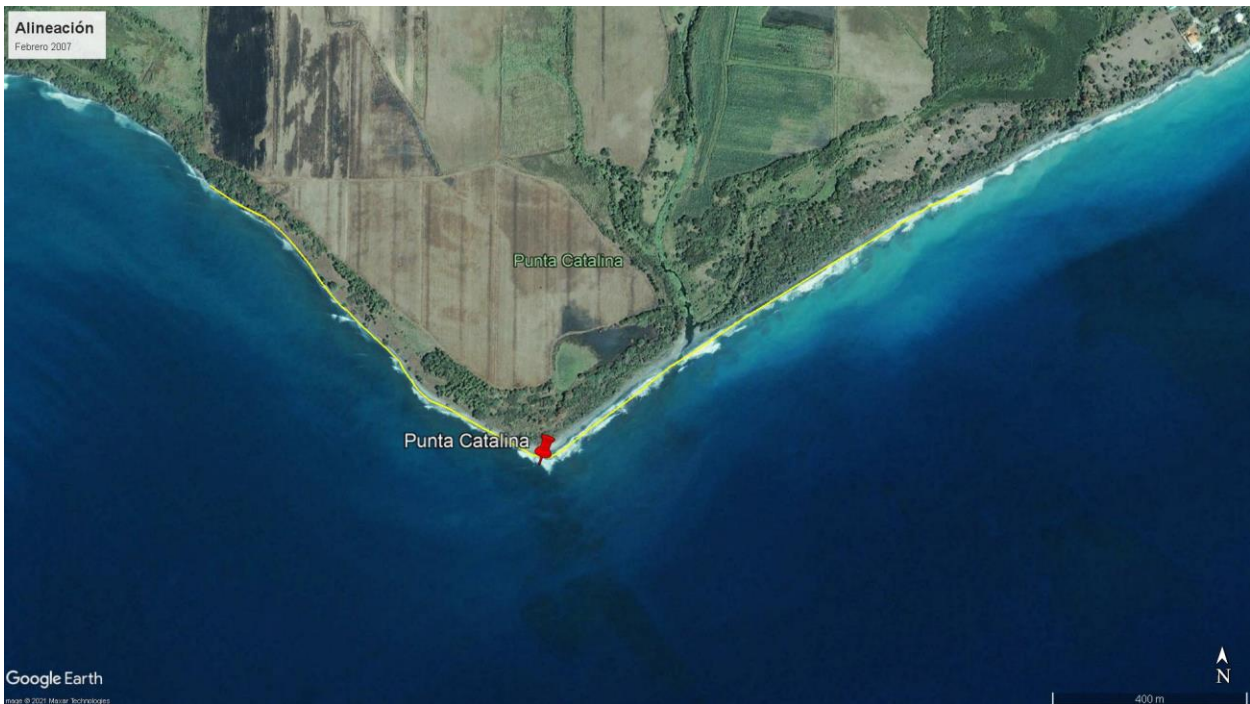


Ilustración 2-6 - Evolución de la costa. Febrero 2007

Comparando las imágenes, se puede observar un comportamiento bastante estable de la playa de Catalina, observándose apenas ninguna variación desde el 2001 al 2014. En el caso de la playa Nizao, se muestra que del 2001 al 2007 hubo un tramo después del arroyo Catalina que presentó pérdida de playa seca. Del 2007 al 2014 se mantiene estable sin apreciación visual de alteraciones en la costa.



Ilustración 2-7 – Comparativo evolución de la costa

Adicional a las informaciones de Google Earth, al consultar el Instituto Dominicano de Recursos Hidráulicos (INDRHI) fue posible obtener las imágenes originales de dos sobrevuelos que han sido realizados por la institución. El primer vuelo siendo el 27 de febrero del 1967 y el segundo el 05 de agosto del 2000. Al tratarse de imágenes sin georreferenciación, se puede obtener una apreciación visual de la evolución de las costas en este período, donde se confirma la estabilidad de la línea de costa a lo largo de los años.



Ilustraciones 2-8 y 2-9- Fotos aéreas sobrevuelos años 1967 y 2000 respectivamente

Establecida la tendencia en la evolución costera en la línea de costa previa a las actuaciones, se procede con la visualización del estado actual de la zona en evaluación. En esta se presenta una importante sedimentación en la playa Nizao, ganando hasta 110 metros de playa seca en la zona próxima al dique principal. En la zona de playa de Catalina, se muestra una erosión generalizada en la línea de costa, llegando en algunos puntos a una pérdida de 15 metros.



Ilustración 2-10 - Evolución de la costa. Enero 2021

En el desarrollo de la termoeléctrica, entre sus trabajos costeros, se implementan diques y contradiques en la playa Nizao, estructuras que modifican el patrón de transporte de sedimentos en la zona como se puede observar en la imagen. Con este importante cambio en la línea de costa, es claro que el transporte de sedimentos transversal va en sentido Este-Oeste tal como debería ser la tendencia del oleaje de máxima energía en la zona, como es de notar por la pluma de sedimentos en suspensión que se muestra en un tono más claro en el mar.

Con el análisis del clima marítimo y el transporte de sedimentos se podrá entender mejor este proceso.

2.2 Descripción de las estructuras

2.2.1 Muelle

Esta estructura consiste en un muelle de recepción de buques de carbón a ser descargados mediante buques autodescargantes. Debido a la longitud de los buques, se requiere que el muelle de 27 metros de ancho tenga una longitud de 330 metros, que se crea mediante dos estructuras de 165 metros independientes unidas por una junta elastomérica para crear una continuidad en la superficie sin crear dependencia estructural entre ambos tramos.



Ilustración 2-11 - Muelle en cuestión

Esta utilidad del muelle induce la estructura a una serie de condiciones exclusivas que se listan a continuación:

- El muelle se encuentra a 1.298m de la línea de costa, con un calado de 15 metros en el mar.
- Alberga sistemas electromecánicos que permiten la recepción del carbón y su traslado hacia tierra.
- Permite el atraque de buques de hasta 80,000DWT¹ con un sistema de bolardos de amarre y defensas.

El muelle es desarrollado con un formato de tablero sobre pilas y cuenta con dos secciones tipo. La primera sección constituye un puente de acceso con un tablero de 12,10 metros de ancho y una longitud de 1.298 metros. Este tablero es soportado por 114 ejes que cuentan con dos pilotes metálicos de 1,219 metros de diámetro dispuestos a 10,40 metros de manera transversal con una separación longitudinal entre ejes de 12 metros.

La segunda sección es el tablero correspondiente al muelle donde se prevé la realización de la descarga, este cuenta con un ancho de 27 metros y una longitud de 330 metros. Este tablero es soportado por 40 ejes de cinco pilotes metálicos iguales a la primera sección dispuestos con una separación transversal 5,20 metros, los ejes tienen una separación longitudinal típica de 8,70 metros.

2.2.2 Rompeolas

Para la protección del sistema de toma de agua en la central se contempla un rompeolas con su contradique, con el fin de aumentar la operatividad de la central ante los efectos de los temporales. El rompeolas ejecutado está compuesto por un núcleo de escolleras con la camada de protección en piezas patentadas de hormigón en masa y un talud final de 1V:1.33H.

¹ DWT – Dead Weight Tonnage – Peso muerto máximo que el buque puede transportar en toneladas



Ilustración 2-12 – Rompeolas ejecutados en el proyecto

2.2.3 Protección Costera

Como sistema de protección ante la posible morfodinámica costera que podría erosionar la línea costera después de los trabajos costeros previstos, se instala una protección costera con protección en escollera. Estas escolleras tienen un talud de 1V:1.5H, y un peso máximo de 600kg en su camada de protección.

2.3 Batimetría

Para el conocimiento del fondo marino en la zona del emplazamiento nos referenciamos inicialmente a las informaciones que tenga disponible el estado para el usuario. En esta información se resalta la carta náutica de la zona disponible en el Instituto Cartográfico Nacional, esta carta representa a escala las aguas navegables y la región terrestre aledaña y es suministrada de manera física por solicitud presencial en la institución. (Instituto Cartográfico Militar, 2022).

La información contenida en las cartas náuticas son suficientes para la navegación, indicando los diferentes puntos de atención, tales como los puertos, peligros de navegación y ayudas a la navegación. Sobre la batimetría, la información que se logra recopilar sin una visita presencial es una imagen con poca calidad de la carta náutica del 1991 de la zona.

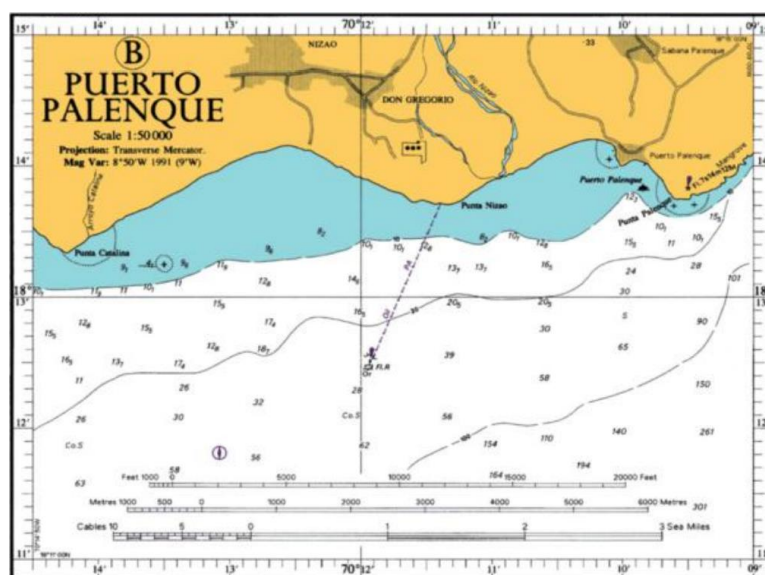


Ilustración 2-13 - Carta Náutica Puerto Palenque (1991)

La información incorporada en este mapa alcanza 1/5° hacia el sur, llegando a una profundidad de aproximadamente 100 metros, por lo que se hace necesaria la ampliación de esta información con otra fuente de información más extensa.

Entre la información disponible de manera pública, se destaca la Carta Oceánica General Batimétrica (“General Bathymetric Chart of the Oceans”), que opera bajo el auspicio de la Organización Hidrográfica Internacional (“International Hydrographic Organization”) y la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO (“Intergovernmental Oceanographic Commission”). Esta es una organización sin fines de lucro que recopila las contribuciones voluntarias de un equipo internacional de hidrográfos y geocientíficos en un mapa mundial disponible de manera gratuita. (General Bathymetric Chart of the Oceans, 2020).

2.4 Clima marítimo

Otro aspecto fundamental para conocer la zona de estudio es el clima marítimo. Para ello será necesaria la recopilación de información que permita caracterizar de manera fiable el clima marítimo representativo de la zona. Para esto se hace un levantamiento de la información disponible sobre estados de mar en el mar Caribe, con especial atención a datos medidos con una boya en aguas profundas, que serán los más fiables para representar las condiciones extremas de mar que se presentan en huracanes.

2.4.1 Levantamientos Locales

Al investigar las diferentes instituciones gubernamentales que pudieran tener mediciones reales por su naturaleza, como serían la Armada de la República Dominicana o el Cuerpo Especializado de Seguridad Portuaria, dependencia de las Fuerzas Armadas de la República Dominicana que tendrían jurisdicción sobre las costas y ninguno tiene a su disposición una boya en aguas profundas.

La única institución gubernamental que presenta alguna información al respecto es la Oficina Nacional de Meteorología, la que tiene en sus servicios los informes de las condiciones de estados de mar presentes y esperadas y cuenta con una serie de estaciones meteorológicas. Esta institución presenta diariamente un “Informe Marino” donde se presenta un pronóstico general de oleaje por zonas, mostrando el viento, las alturas de olas y el período a partir del “Sistema de predicción a corto plazo basado en el acoplamiento de modelos de alta resolución y asimilación de datos” del Instituto de Meteorología de Cuba INSMET (Oficina Nacional de Meteorología, 2022).

Mapa EMA ONAMET

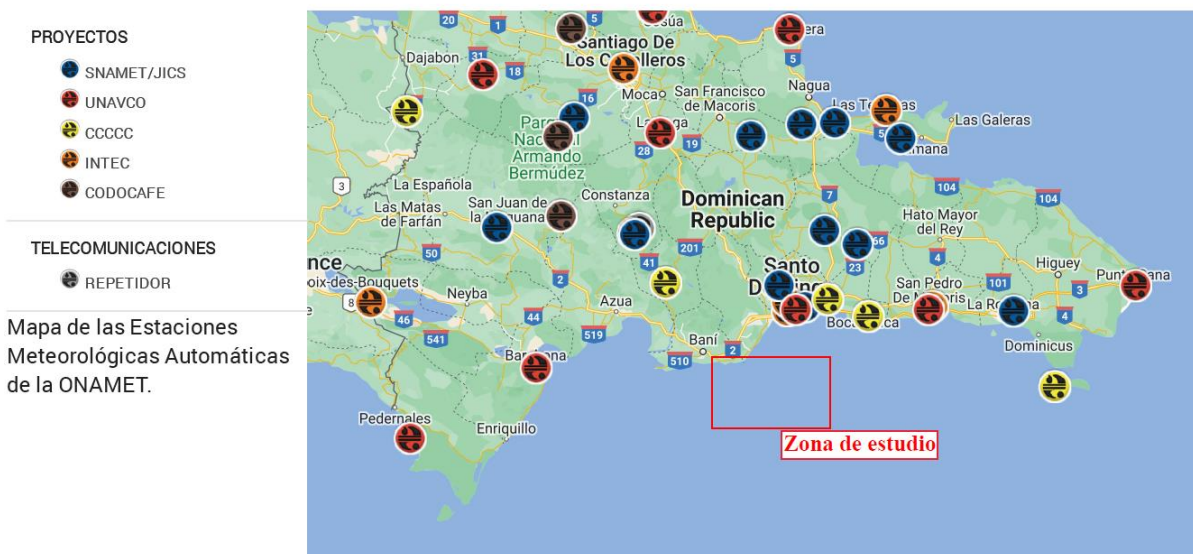


Ilustración 2-14 - Estaciones ONAMET (Oficina Nacional de Meteorología, 2022)

Como puede observarse en la ilustración 2-10, esta institución no tiene ninguna estación meteorológica cerca de la zona de estudio o alguna boya que pueda usarse en nuestro estudio, por lo que no será de relevancia para

nuestro estudio, agotando así toda fuente de información pública en la República Dominicana.

2.4.2 Levantamientos Internacionales

Dada la cercanía de la República Dominicana con el Estado Libre Asociado de los Estados Unidos, Puerto Rico, se buscan las boyas que se tengan disponibles en la zona. La “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NOAA) de los Estados Unidos actualmente tiene 1325 boyas desplegadas en todo el continente americano, de las cuales la más próxima (Boya 42059) se encuentra a 440 km de la zona de estudio. Esta boya ubicada en $15^{\circ}17'14''$ N $67^{\circ}28'36''$ W de foam de tres metros es propiedad del Centro Nacional de Boyas de Datos (National Data Buoy Center) y ha estado en funcionamiento desde el año 2007. (National Data Buoy Center, 2022)

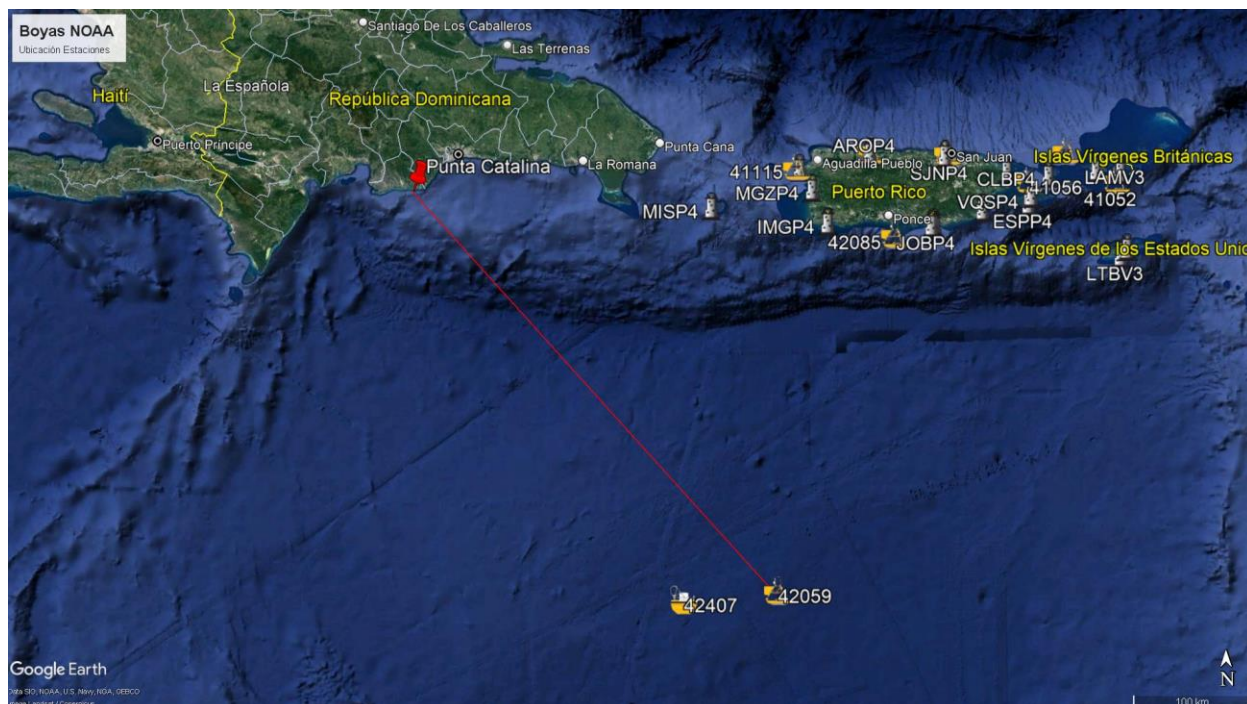


Ilustración 2-15 - Mapa de ubicación de boyas NOAA

Entre los datos históricos a disposición se encuentran las siguientes informaciones:

- Viento: Dirección y velocidad de viento promedio
- Oleaje: Altura significativa, período y dirección predominante y período promedio

2.4.3 Información de modelos globales

Como otra opción, existen modelos numéricos globales disponibles que permitirían obtener estados de mar que permitan la modelación del flujo de energía en la zona de estudio. Entre los modelos numéricos posibles se resalta el Sistema de Vigilancia Marina Copernicus de la Unión Europea, implementado por la organización Mercator Ocean International. Este programa tiene como objetivo proveer información abierta libre de costos, desarrollada con la última tecnología a partir de observación satelital, datos in situ y modelos numéricos. (Copernicus, 2022).

En la amplia gama de productos de información que ofrece este programa se resalta el reanálisis global “WAVERYS” publicado en el año 2019, basado en el modelo MFWAM (Météo-France WAVE Model), un modelo numérico de oleaje de tercera generación que calcula los espectros de oleaje en una malla de $1/5^{\circ}$ en el modelo WGS 84 (aproximadamente 20 km de discretización) describiendo los estados de mar desde el año 1993 en intervalos de 3 horas.

La resolución de esta malla permite utilizar datos generados por el reanálisis global en cualquier punto de interés próximo a la zona de estudio, por lo que podrá ser considerado como información inicial en el proyecto.

3 CARACTERIZACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO

En este capítulo se analizarán los diferentes aspectos que caracterizan el entorno en que se desarrollan las obras, analizándose de manera específica la influencia que tendrán estos en el modelo y las condiciones matemáticas que representan estos aspectos

3.1 Clima marítimo

Para determinar el impacto que se tendrá en las diferentes áreas del emplazamiento será necesario representar un clima marítimo predominante de la zona estudiada. En vista de las diferentes fuentes de información que se han podido encontrar sobre el clima marítimo del emplazamiento, será realizado un análisis de los diferentes datos de las fuentes para determinar el clima marítimo representativo a ser usado en el comparativo de las condiciones.

3.1.1 Mediciones NOAA

En primera instancia se estudiarán los datos provenientes del NOAA, pues las mediciones realizadas de una manera controlada en campo siempre serán la mejor representación de la realidad. Para esto se analizan los datos de la Boya 42059, siendo esta la boya más próxima al emplazamiento con mediciones periódicas de los estados de mar de su emplazamiento a cada 10 minutos.

La boya inicia el registro de datos desde el 4 de abril del 2007 y se tienen registros hasta 31 de diciembre del 2021. En este período la boya estuvo fuera de servicio en diferentes períodos, siempre volviendo a ponerse en comisionamiento hasta la fecha de lectura final actual. De los períodos que estuvo fuera de servicio, el más largo fue desde el 28 de mayo del 2018 al 7 de abril del 2019 con una duración total de 314 días. Considerando exclusivamente el período de lectura, se tienen 277329 datos a cada 10 minutos, con lecturas de oleaje horarios, considerandose la altura de ola representativa de esa hora.

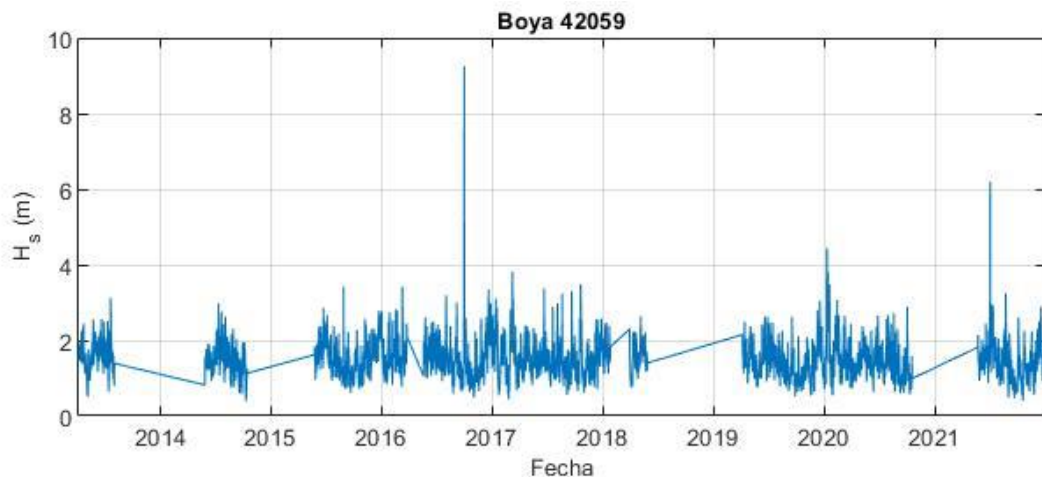


Ilustración 3-1 – Datos de altura de ola significativa de la boya 42059

En la representación de los datos levantados, se desconsideran los datos sin lecturas de oleaje, que sería el factor de interés principal en esta caracterización, para un total de 993 estados de mar a considerar. De estos datos se representa a continuación el régimen medio del clima marítimo:

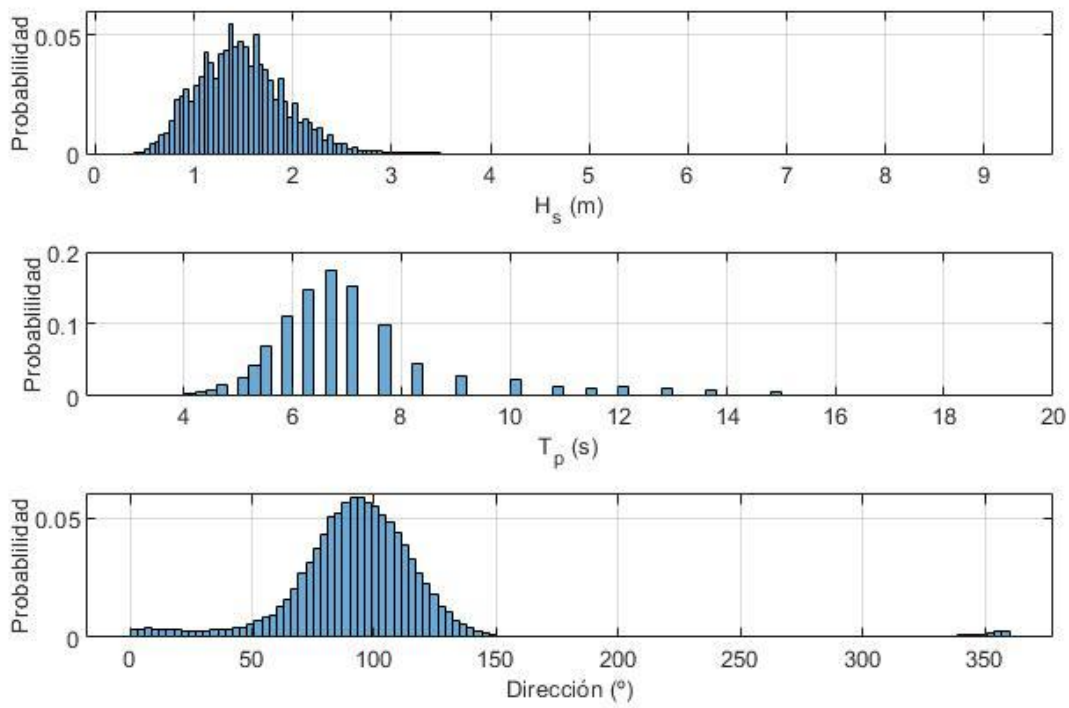


Ilustración 3-2 – Régimen medio en la boya 42059

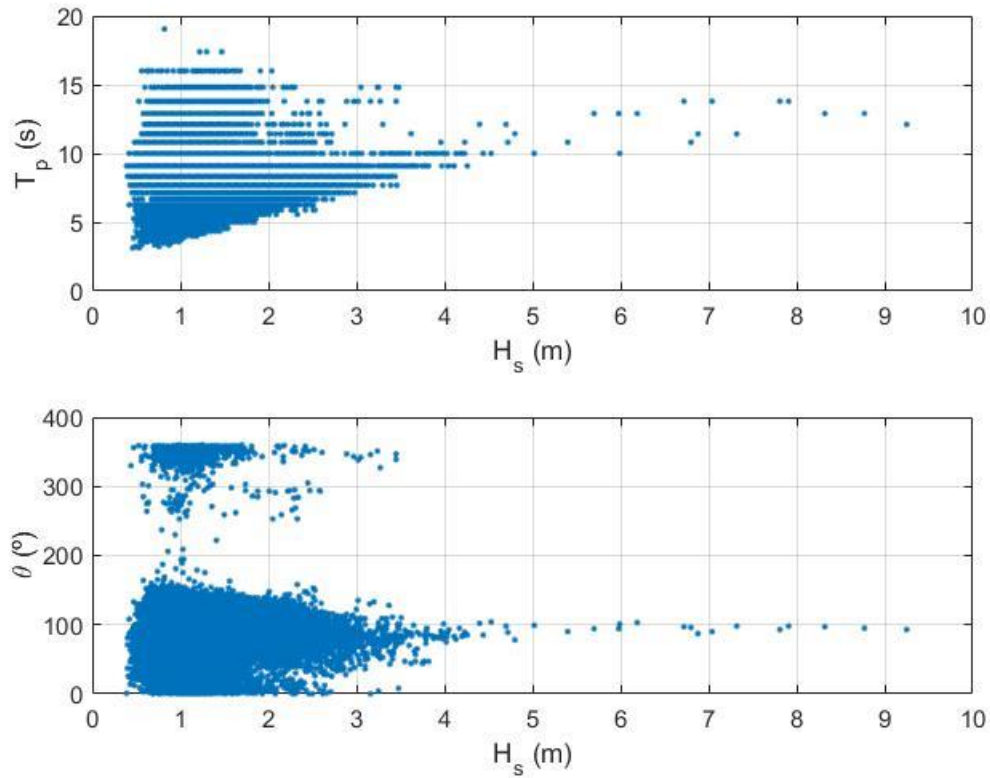


Ilustración 3-3 – Gráficos de dispersión en la boya 42059

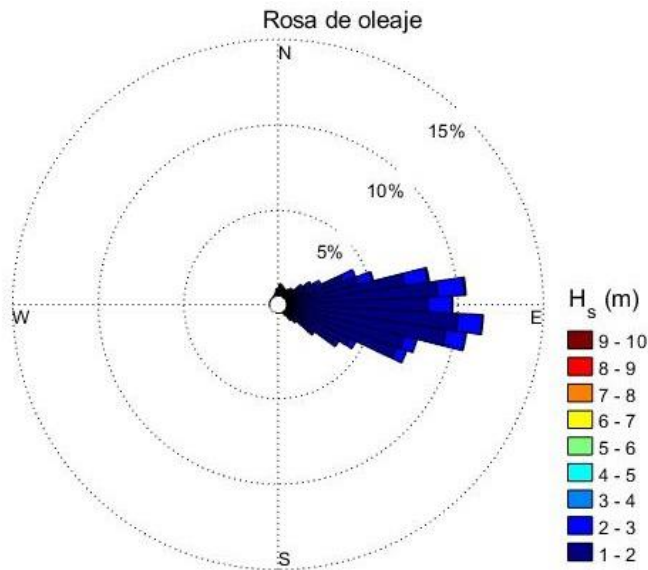


Ilustración 3-4 – Rosa de oleaje en la boya 42059

Tomando estas ilustraciones como referencia, se muestra una predominancia en las olas de 1,35 a 1,40m de altura, seguido de olas de 1,60 a 1,65m de altura sumando estos rangos un 10% de probabilidad en el tiempo de muestreo considerado. De esta manera también se observa que los períodos pico de oleaje se predominan en un rango de 6 a 8 segundos, con un 57% del oleaje mostrado en este rango, puntualmente se resalta el rango de 6,6 a 6,8 segundos que sería el predominante en regímenes medios. Sobre las direcciones de oleaje, se muestran predominantemente desde el sentido este con poca variabilidad entre las direcciones ENE y ESE.

En el gráfico de dispersión se muestran condiciones diferentes para los estados de mar con mayor altura de oleaje. Siendo la dirección del oleaje muy marcada en la dirección este, y un período pico que se muestra en un rango de 10 a 15 segundos.

Los datos observados pueden ser relacionados a una distribución probabilística para relacionar los valores con su probabilidad de ocurrencia. En este caso en cuestión, se denota que la distribución de probabilidad Gamma con parametro de forma de 10,5249 y parámetro de escala 0,1431 es la que mejor se ajusta a los datos observados:

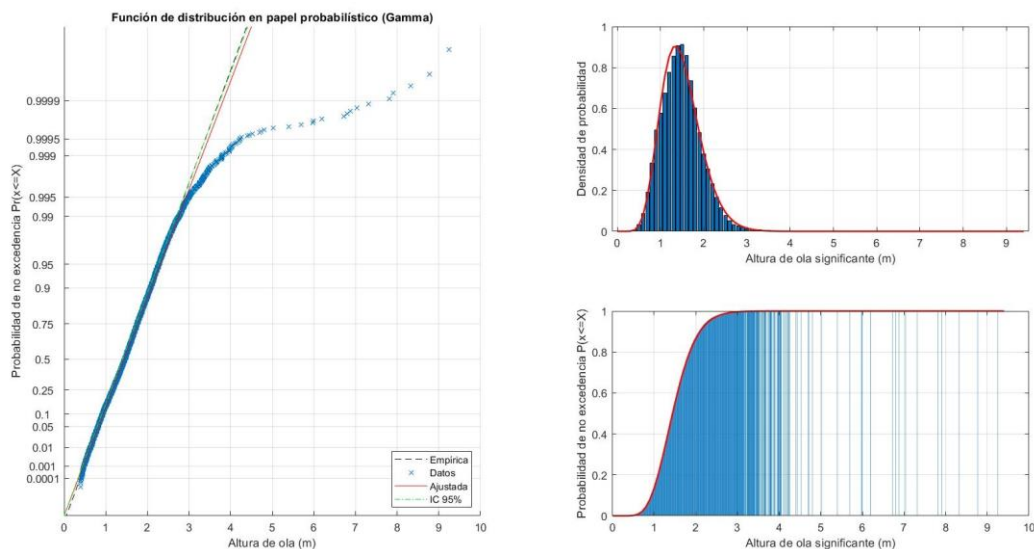


Ilustración 3-5 – Distribución probabilística del oleaje en la boya 42059

Con el régimen normal estudiado se intenta caracterizar el régimen extremal que caracterizará esta boya. De los datos observados se denota que de las funciones estudiadas no se presentan ninguna función de probabilidad que se ajuste de manera adecuada a los datos obtenidos. Esto se debería a la falta de datos levantados, donde solo se

han considerado para este estudio los 7 años que se tienen de observación en esta boya.

Para representar los datos actuales en condición extremal, se muestran a continuación los valores máximos anuales, haciendo atención adicional a los valores extremales según el método de “Peak Over Threshold” o POT, donde se establece un umbral de consideración, resaltando los valores que sobrepasan el 99% de las lecturas registradas.

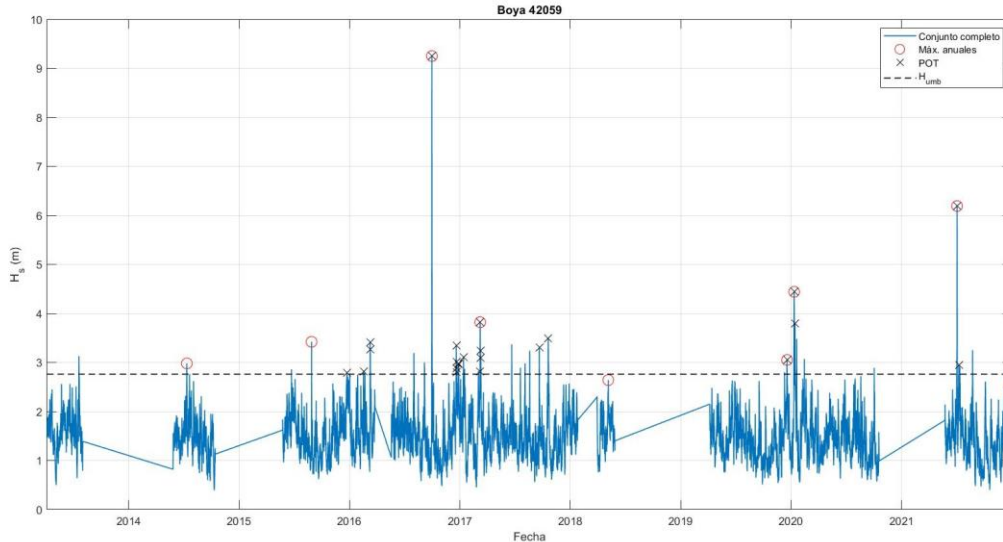


Ilustración 3-6 – Regimen extremal en la boya 42059

En estas lecturas se resaltan los valores extremos que sobrepasan esta ocurrencia, siendo el umbral establecido en 2,91m para determinar si existen fenómenos extremales. En este se resaltan el año 2017 por tener la mayor ocurrencia de condiciones extremales en el mar con 7 eventos anómalos, que superan el umbral establecido.

3.1.2 Simulaciones modelo global

Para tomar en consideración un mayor período de medición, y permitir la caracterización probabilística del estado de mar en la zona, se utilizan los datos de reanálisis de Copernicus. Para la extracción de los datos del modelo, al tratarse de un modelo oceánico que tiene a disposición toda la zona del mar Caribe, se escoge el punto exacto donde se encontraría la boya para permitir el relacionamiento de los datos con relación a los obtenidos de la boya del NOAA.

Los datos extraídos se representan a continuación, con simulaciones a cada 3 horas desde el año 1993 hasta el 2020:

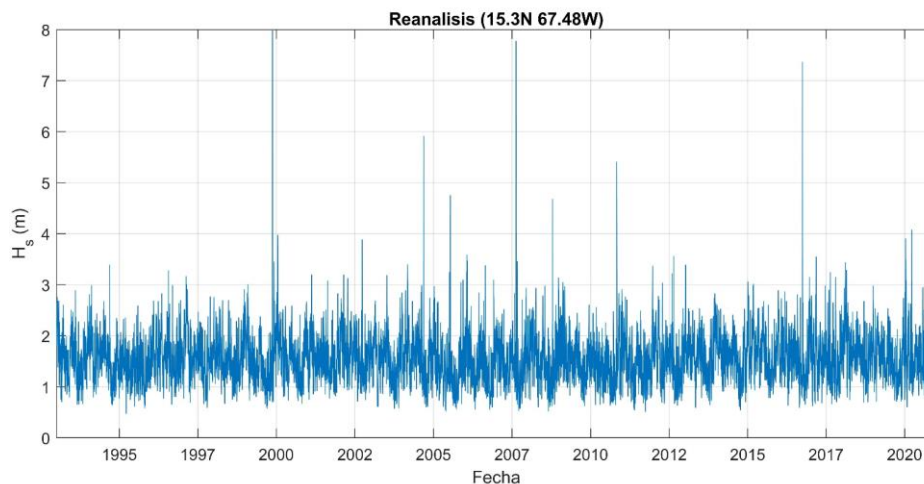


Ilustración 3-7 – Datos de altura de ola significativa de WAVERYS

Con el histórico de datos que se extrae de la simulación se representa a continuación el régimen medio del clima marítimo:

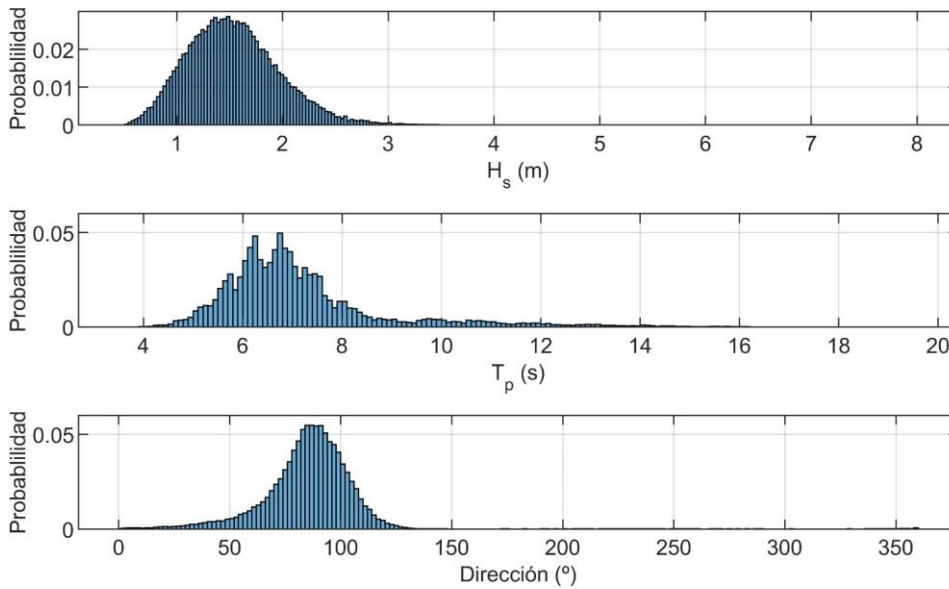


Ilustración 3-8 – Régimen medio de WAVERYS

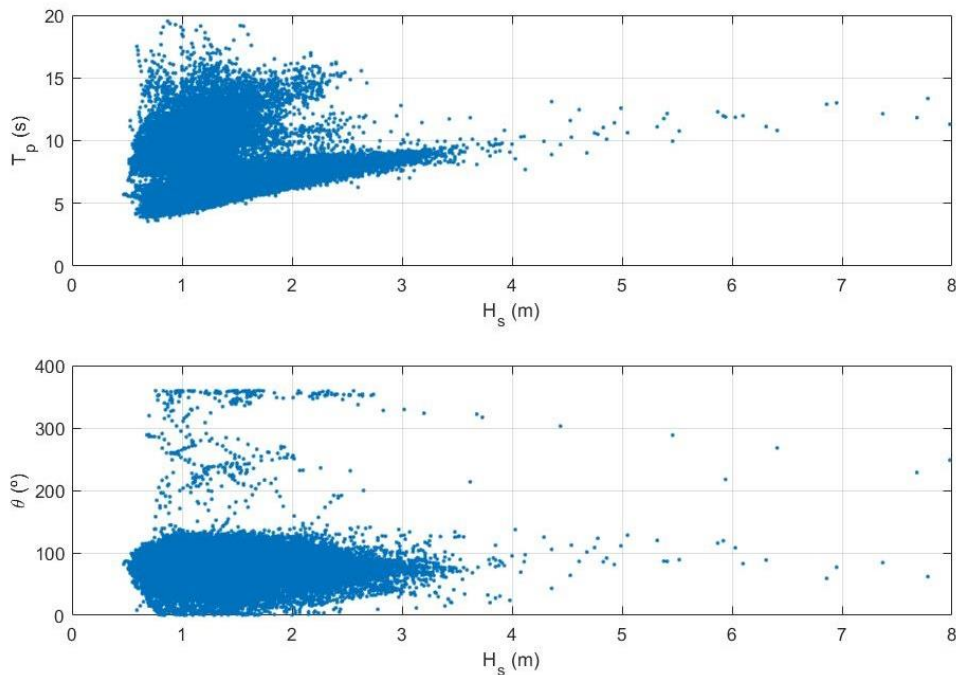


Ilustración 3-9 – Gráficos de dispersión de WAVERYS

Conforme con los datos obtenidos en la simulación, las olas significativas que se observan están en el rango de 1,45 a 1,50m de altura, seguido de las olas de 1,35 a 1,40m. Estas alturas están de acuerdo con las registradas en las boyas, reforzando la fiabilidad del modelo con relación a la realidad.

En el caso de los períodos pico de este oleaje modelado, similar a las lecturas de la boya, se muestra un rango predominante de 6 a 8 segundos ahora con un 62,5% del oleaje modelado entrando dentro de este rango. En la modelación se destacan los rangos de 6,2 a 6,3 segundos y de 6,7 a 6,8 segundos siendo los más predominantes en la modelación. Sobre las direcciones de oleaje, aunque se muestra una mayor variabilidad con relación a las lecturas de la boya, se muestran predominantemente desde el sentido este con poca variabilidad entre las

direcciones ENE y ESE.

Sobre los gráficos de dispersión, el mayor muestreo de los datos simulados por el WAVERYS mantiene la predominancia de los estados de mar, donde se muestra una dirección muy marcada en la dirección este, y un período pico que se muestra en un rango de 10 a 15 segundos para los mayores. Es interesante resaltar que, al momento de identificar los estados de mar con altura de ola superior a 5 metros, se muestran algunos estados con una importante altura con direcciones entre las direcciones SO y O.

Ahora con los datos modelados se puede relacionar el comportamiento a una distribución probabilística para relacionar los valores con su probabilidad de ocurrencia. En este caso en cuestión, se denota que la distribución de probabilidad Gamma con coeficiente de forma de 12,291 y parámetro de escala 0,1248 es la que mejor se ajusta a los datos observados:

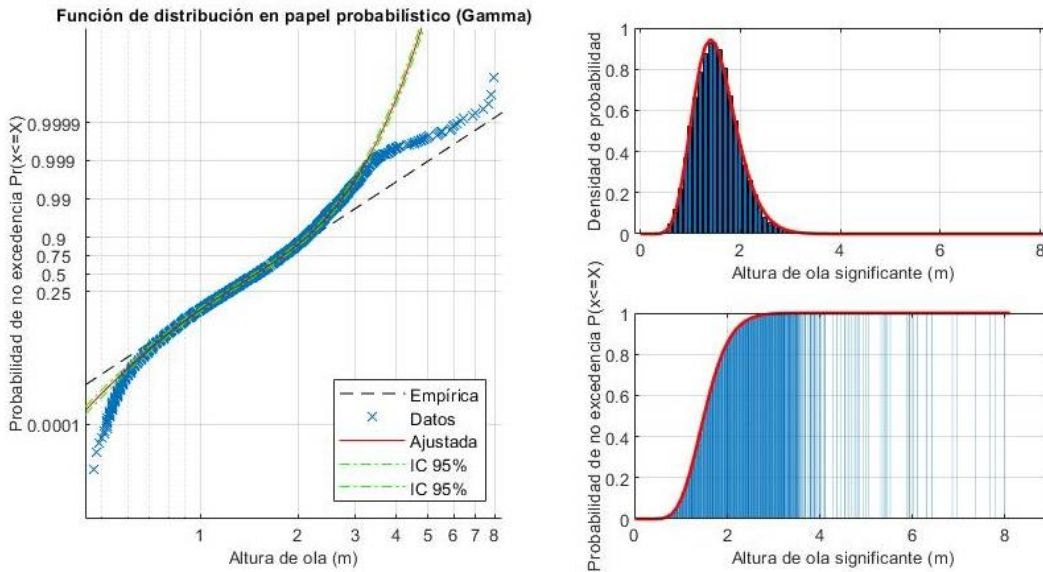


Ilustración 3-10 – Distribución probabilística del oleaje WAVERYS

Caracterizados los valores normales para los estados de mar que predominan en esta zona según el modelo WAVERYS, pasamos a la caracterización de los valores máximos que se han podido observar en el modelo. Para esta caracterización se extraen los valores máximos de cada año para relacionarlos con una distribución probabilística que se ajuste a estos datos específicamente:

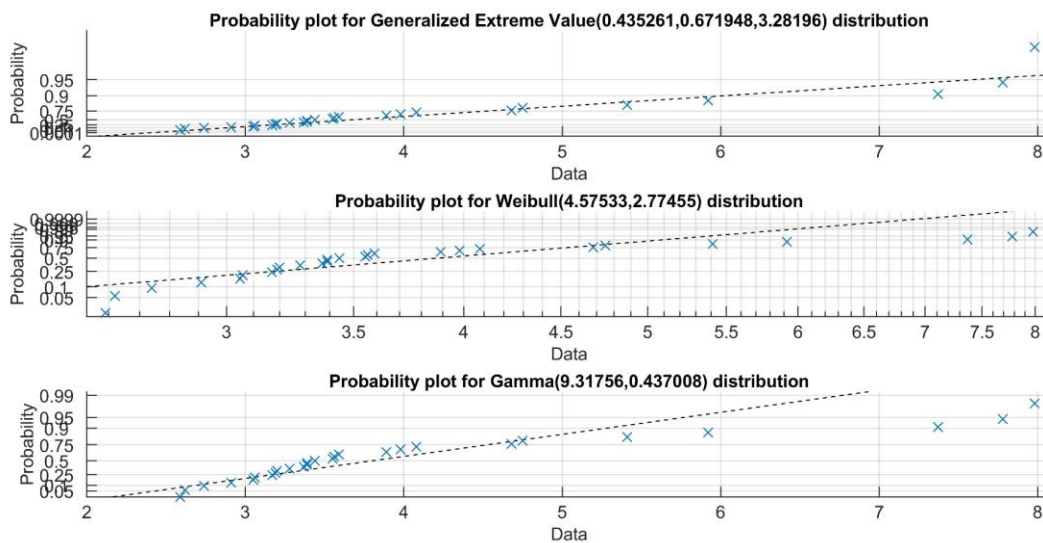


Ilustración 3-11 – Ajuste probabilístico del oleaje extremal en WAVERYS

Como se observa en las diferentes representaciones de modelos probabilísticos, el modelo que mas se acerca a

los datos modelados es el modelo probabilístico de Valores Extremos Generalizados con sus coeficientes ajustados a los datos obtenidos del modelo WAVERYS. Partiendo de este modelo probabilístico, se conoce su curva de probabilidad y consecuentemente su curva de ocurrencia expresada en años, mejor conocido como el período de retorno para las diferentes alturas de ola.

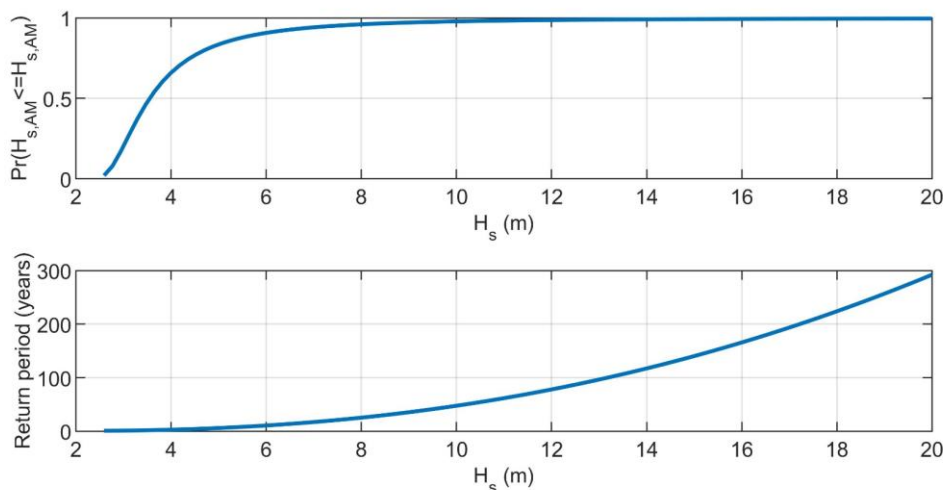


Ilustración 3-12 – Modelo de Valores Extremos Generalizados ajustados a los datos de WAVERYS

Con este gráfico, se pueden relacionar los oleajes máximos a períodos de retorno establecidos. En el caso puntual de la ola máxima observada en la modelación del WAVERYS de 7,98 metros, se estima un período de retorno de 25 años según este gráfico.

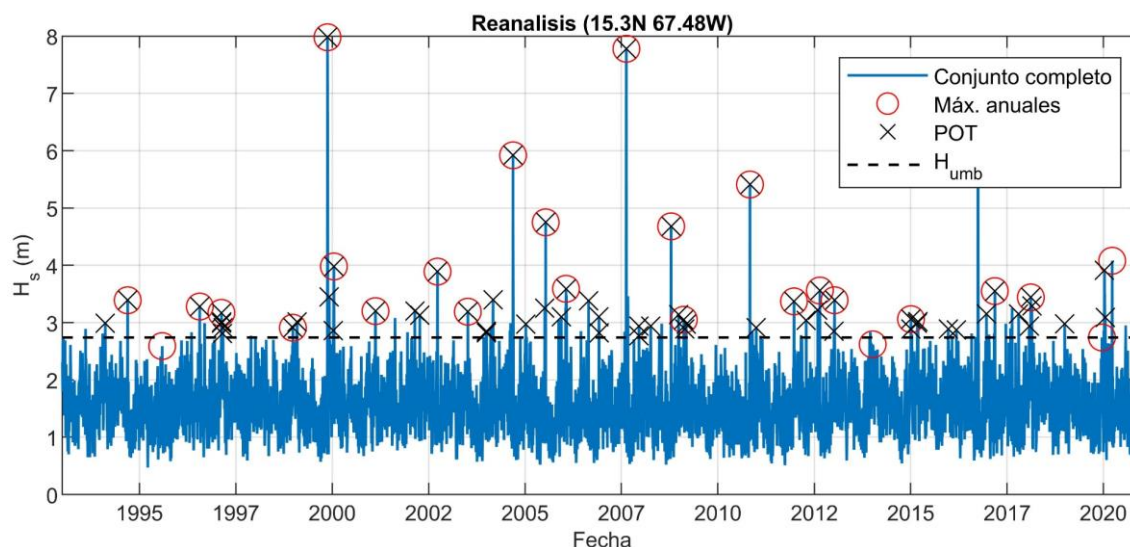


Ilustración 3-13 – Peak Over Threshold WAVERYS

Al representar el gráfico, se mantiene un umbral similar al establecido anteriormente en el análisis de la boya, en este caso con 2,74m. En esta situación también se resalta el año 2017 que se observó en la boya, con una gran cantidad de estados anómalos de mar.

3.1.3 Análisis mixto

En vista de las deficiencias particulares de las diferentes fuentes de datos, una manera de hacer un análisis en conjunto de toda la información disponible sería la de complementar los datos de las lecturas de campo con los datos de la modelación. Para la complementación de los datos e incorporarlos en una serie única de datos a ser analizados de manera única, se tomará como base de datos principal la provista por el NOAA en la boya, ajustándose los datos modelados por el WAVERYS partiendo de un análisis de la información disponible que coincida en el tiempo entre ambas.

Para el ajuste a ser aplicado a la base de datos del WAVERYS, se analizan por separado las alturas de ola, períodos pico y direcciones promedio del oleaje en el mismo instante para observar el comportamiento de los datos y su correlación, representada numéricamente como el error cuadrático medio en la parte superior de los gráficos:

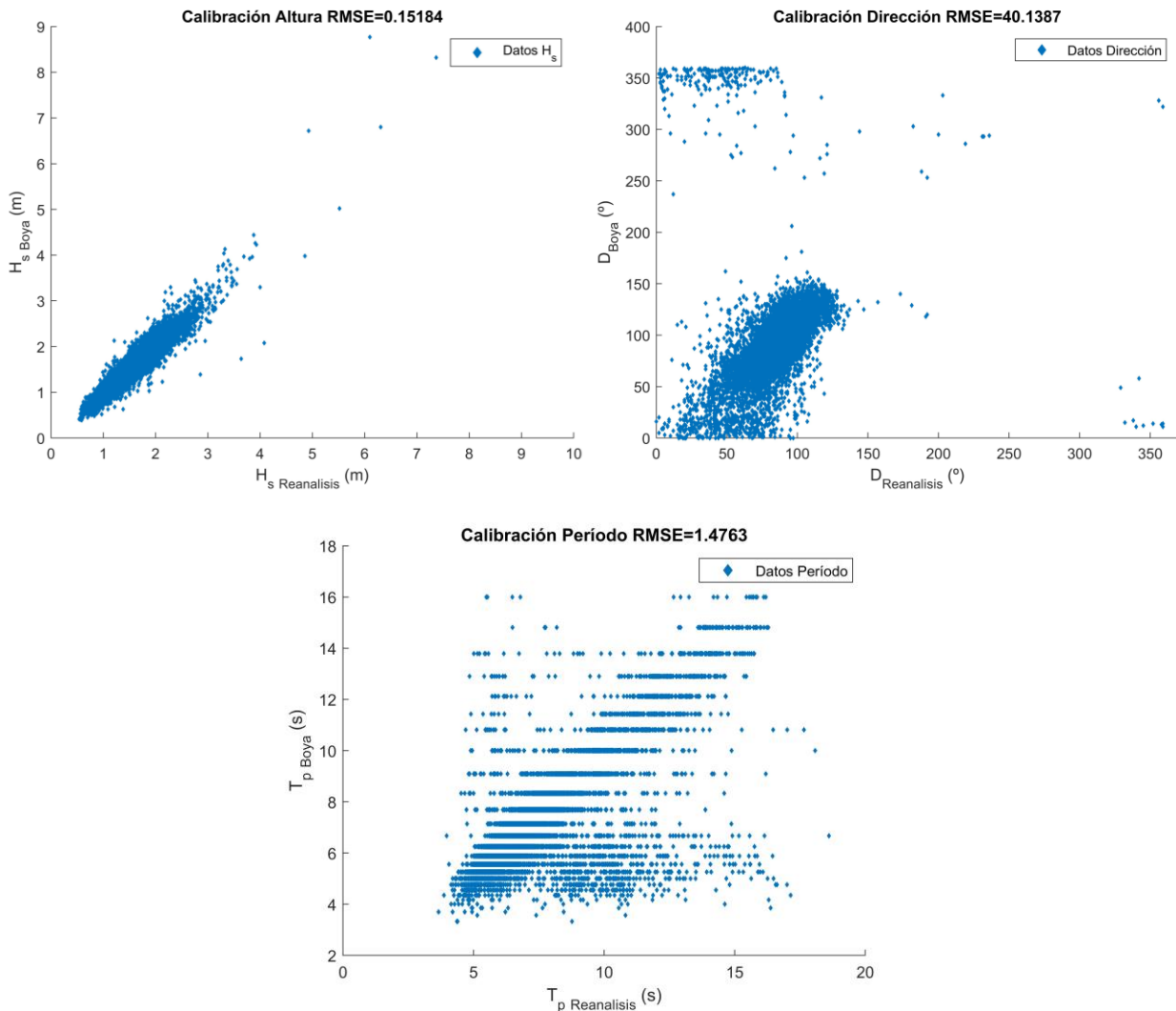


Ilustración 3-14, 15, 16 – Gráficos de dispersión de H_s , Dirección y período coincidentes entre datos

En los gráficos de dispersión se muestran los datos con patrones de relación diferentes para cada uno de los parámetros, donde la altura significativa del oleaje se muestra con una relación mucho más directa, con un error cuadrático medio de 0,15 metros entre ambas fuentes de datos. En el caso de la dirección del oleaje se observa una dispersión mayor de los datos con un error cuadrático medio de 40 grados en la dirección, mientras el período presenta una dispersión importante también con valores de errores de 1,4 segundos.

Para permitir una calibración de los datos modelados con relación a los valores observados en campo, se hace un ajuste lineal de los datos en el modelo. De manera particular, para evitar un ajuste que no sea ideal por el comportamiento polar de las direcciones del oleaje se desestimarían los datos de oleaje superiores a 300 grados en la boya y en el modelo pues estos valores estarían más próximos al 0 y los modelos considerados no prevén este comportamiento.

Los valores calibrados por un modelo lineal son representados en un nuevo gráfico de dispersión, en los cuales se refleja también en error cuadrático medio de la serie de datos resultantes al hacer la calibración:

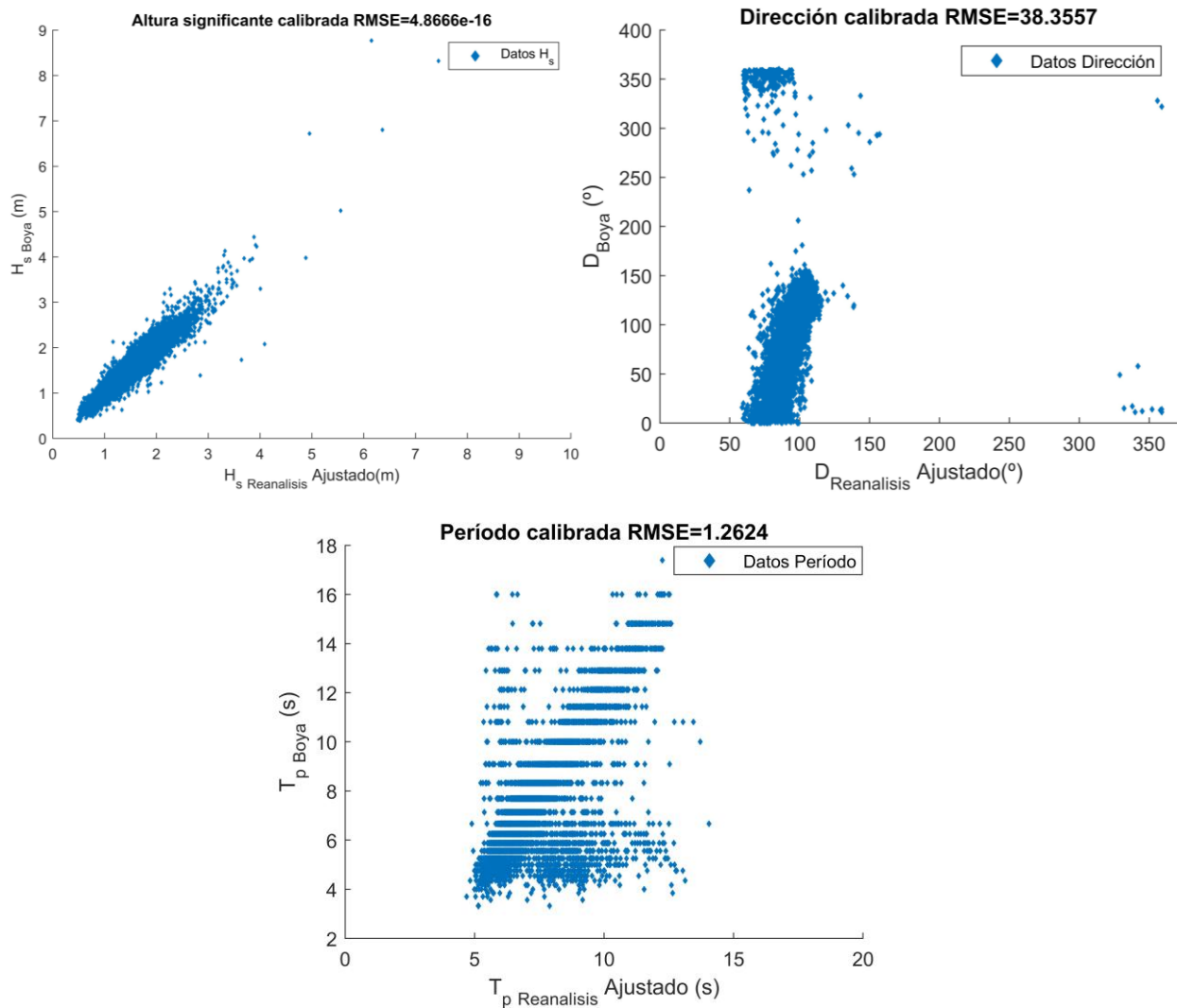


Ilustración 3-17, 18, 19 – Gráficos de dispersión de H_s , Dirección y período calibrados entre datos

En el caso de la altura significativa, se muestra una importante reducción del valor cuadrático medio llegando a valores muy próximos al 0, por lo que se observa un buen comportamiento del ajuste lineal implementado a los valores modelados.

Mientras, aún con las previsiones tomadas para el ajuste de las direcciones del oleaje los resultados observados de la dispersión y con un error cuadrático medio ligeramente reducido, se observa un comportamiento mucho menos representativo en los datos. Esto se muestra principalmente en la falta de datos entre las direcciones 0 y 50 que no se muestran datos debido a la constante de la ecuación de ajuste. Algo similar se muestra en los períodos pico, donde los datos de períodos mayores a 15 segundos no son considerados en la dispersión de los datos ajustados.

Con el comportamiento observado de la dispersión y la posible calibración de los datos, se concluye que los datos de altura significativa del oleaje muestran un comportamiento mejorado con la calibración, por lo que es adecuada su consideración en este análisis. Por lo contrario, en las direcciones y los períodos ajustados se desconsideran valores que existen en las lecturas en campo, por lo que su consideración traería consigo la eliminación de estos datos en el análisis probabilístico de los datos a ser analizados, por lo que no es prudente en este ejercicio considerar estos ajustes.

Con esto expuesto, se considerarán los datos ajustados de las alturas significativas del modelo, mientras las direcciones promedio del oleaje y los períodos pico considerarán los datos modelados sin ajuste alguno, pues estos ya muestran una dispersión similar a la observada en las medidas de campo. Con los datos a considerar en la serie temporal mixta establecidos, se representa a continuación la serie temporal con la distinción de la fuente de datos para las diferentes fechas:

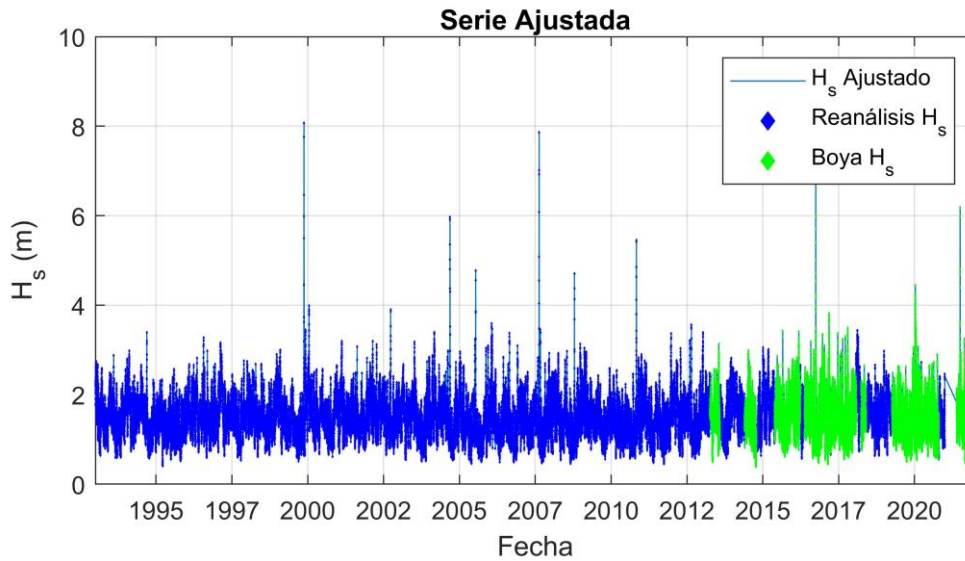


Ilustración 3-20 – Serie temporal mixta

En este se observa como los datos de la modelación componen la mayor parte de la serie temporal siendo evaluada en este análisis mixto, donde los valores de la boya consideran los datos obtenidos del levantamiento de campo sin ningún ajuste, mientras los datos de la modelación se mantienen conforme con las premisas establecidas en este acápite. Con esta serie de datos se representa a continuación el régimen medio del clima marítimo:

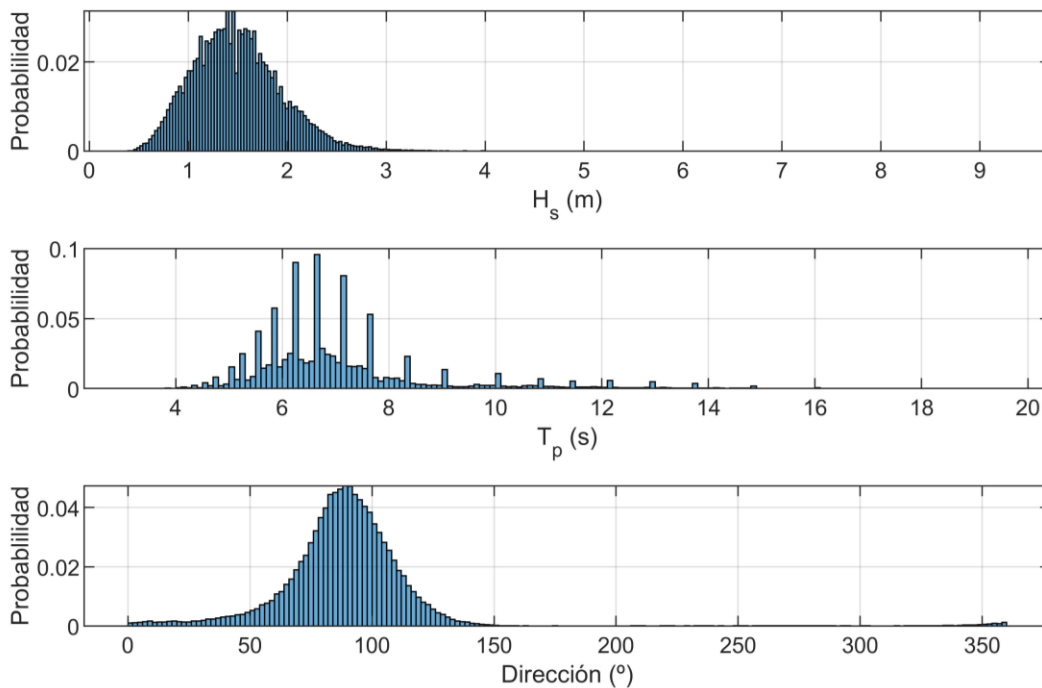


Ilustración 3-21 – Régimen medio de la serie temporal mixta

Conforme con los datos considerados, las olas significativas predominantes están en el rango de 1,38 a 1,41m de altura, alturas que están de acuerdo con los datos registrados de las boyas y los modelados, reforzando la fiabilidad del modelo con relación a la realidad.

En el caso de los períodos pico de este oleaje modelado, similar a las lecturas de la boya, se muestra un rango predominante de 6 a 8 segundos con un rango predominante entre los 6,6 y los 6,7 segundos, valores ligeramente reducidos con relación al modelo de WAYERYS. Sobre las direcciones de oleaje, se muestran valores similares a los observados de ambas fuentes de datos, con una dirección predominante entre los 90 y 92 grados, con poca variabilidad entre las direcciones ENE y ESE.

Caracterizados los valores normales para los estados de mar considerando la calibración de los datos modelados en conjunto con los datos observados en campo, pasamos a la caracterización de los valores máximos que se muestran en esta serie mixta. Similar a los casos anteriores, los valores máximos de cada año respetan una distribución probabilística de Valores Generalizados Extremos. Partiendo de este modelo probabilístico, se conoce su curva de probabilidad y consecuentemente su curva de ocurrencia expresada en años, mejor conocido como el período de retorno para las diferentes alturas de ola.

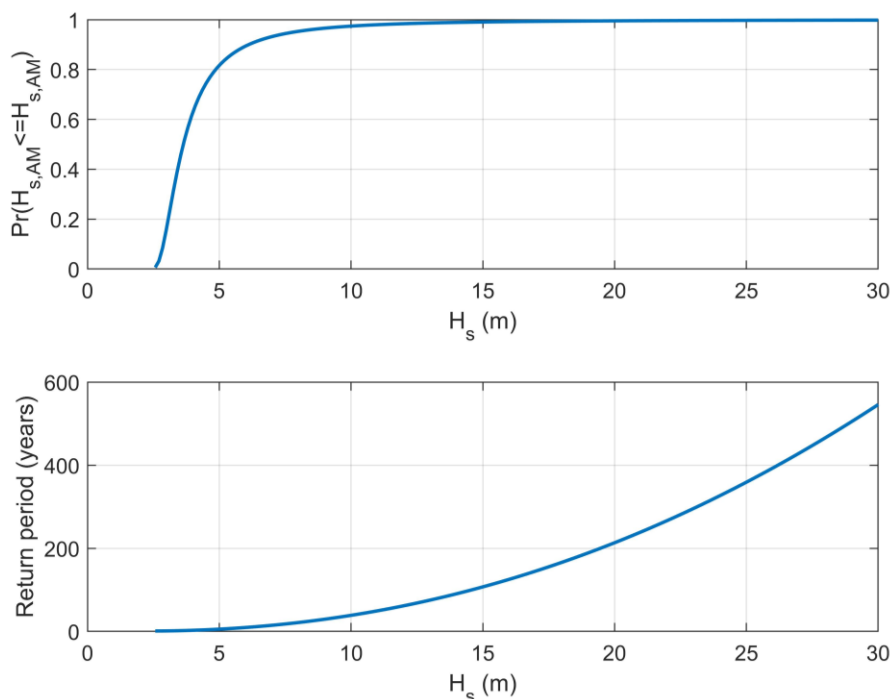


Ilustración 3-22 – Modelo de Valores Extremos Generalizados ajustados a la serie de datos mixtos

Con este gráfico, se observa un comportamiento probabilístico extremal ligeramente diferente al observado en la modelación del WAVERYS, con períodos de retorno de 22 años para la altura de 7,98m que se presentaba como el máximo de esta serie de datos. En el caso de esta serie, la altura de oleaje mayor de 9,25m se presenta con un período de retorno de 32 años.

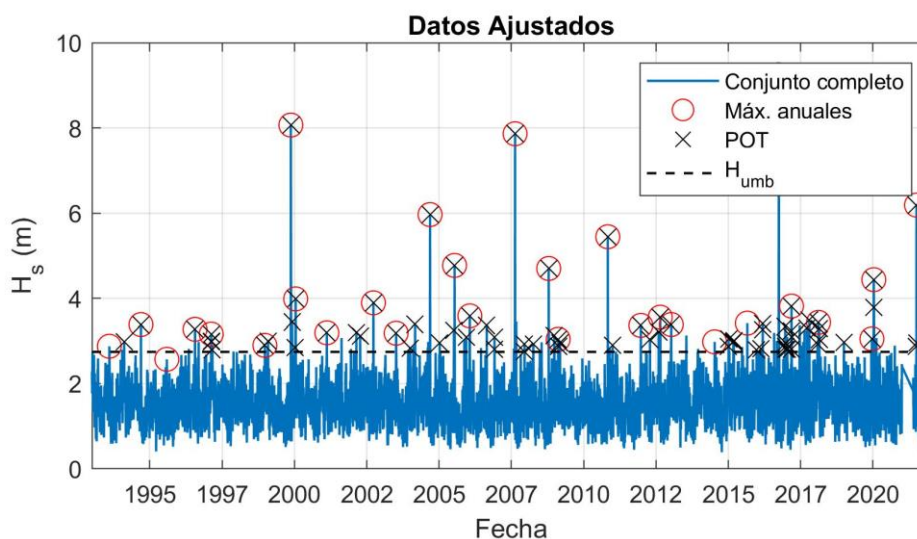


Ilustración 3-23 – Peak Over Threshold serie ajustada

Al representar el gráfico, se mantiene un umbral similar al establecido en los análisis anteriores con 2,74m. Pero más interesantemente se muestran todos los temporales observados en la serie temporal ajustada con los datos de boyas. En estos datos se resaltan los dos estados con mayor altura significativa del oleaje, de los que se mantiene la altura de 9,25 metros extraídos de la lectura de la boya y un valor ajustado de 8,068 metros como

segundo valor crítico.

Al observar estos estados de mar, se obtiene la coincidencia de que ambos estados se presentan desde direcciones del oleaje completamente diferentes, proveniente el máximo de la dirección este de la cual predomina el oleaje, mientras este segundo valor extremal proviene del Oeste, identificándose así las siguientes condiciones extremas de interés:

- **Regimen extremal Este**
 - $H_s=9,25\text{m}$
 - $T_p=12,1\text{s}$
 - $\text{Dir}=93$
- **Regimen extremal Oeste**
 - $H_s=8,07\text{m}$
 - $T_p=11,3\text{s}$
 - $\text{Dir}=248$

3.1.4 Observaciones generales

El análisis de los datos de ambas fuentes nos permite tener una confianza en datos que, a falta de datos levantados en el emplazamiento, dan una idea sobre los estados de mar que caracterizan el emplazamiento. Al analizar los regímenes medios de ambos datos en conjunto, se observa un comportamiento de la distribución probabilística de la altura de ola significativa similar entre los datos de la boya, los datos de reanálisis y el análisis mixto. Acontece lo mismo en el caso de la dirección de proveniencia del oleaje, que muestra su mayor probabilidad desde el sentido Este en ambos levantamientos.

Una diferencia importante entre ambas fuentes de datos viene en el período de medición para determinar la altura de ola significativa, pues el reanálisis considera un muestreo típico de 3 horas, mientras el levantamiento en la boya representa un muestreo de 1 hora. Aunque esta diferencia no es de considerable impacto en la caracterización del régimen medio, si es de relevancia al momento de caracterizar los eventos extremos. Esto se hace evidente al considerar el evento extremal principal del período de medición de la boya, cuyo estado de mar con la ola significativa máxima de 9,30 metros se encuentra en el 29 de septiembre del 2016, a las 19:00. En este mismo período de medición, el reanálisis presenta su estado de mar con la ola significativa máxima de 7,37 metros en esta misma fecha, solo que en la hora 21:00. Para ilustrar una comparación en términos similares, se hace un ponderado de 3 horas de los datos la boya para permitir la representación a cada 3 horas, similar al reanálisis y se representan un mismo gráfico.

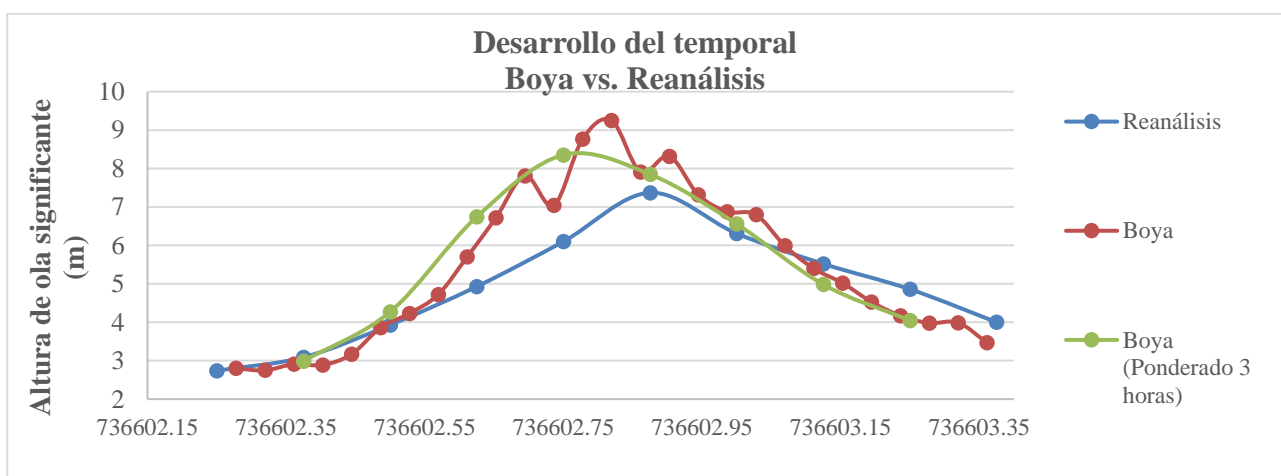


Ilustración 3-24 – Desarrollo temporal del estado

En este se puede observar la diferencia en los datos en este momento, donde los valores de máximos varían en 1,93 metros considerando el muestreo de 1 hora de la boya, o 0,95 metros considerando el ponderado de tres

horas. Estas medidas en campo representan valores mayores con relación a los valores del reanálisis del 26% o 13% respectivamente, lo que muestra una importante variación de los valores máximos a ser considerados en una caracterización extremal en el emplazamiento. La falta de datos medidos en campo no permite hacer relación directa entre los datos de campo y los datos del reanálisis en regímenes extremales, al solo tener este evento con valores tan importantes, por lo que el ajuste de los datos realizados mediante la serie mixta permite una mejor consideraciones de todos los datos de manera ponderada.

Al buscar información sobre fenómenos anómalos en este período analizado al detalle, resalta el reporte “AL142016” del Centro Nacional de Hurácanes de los Estados Unidos, donde se describe el comportamiento del Huracán Matthew desde el 28 de septiembre al 9 de octubre del 2016. Este huracán, que llegó a alcanzar la categoría 5 en la escala de Saffir-Simpson, entre el 29 y el 30 de septiembre alcanzó la categoría 1 con velocidades de viento de 36 m/s. (National Hurricane Center, 2017)

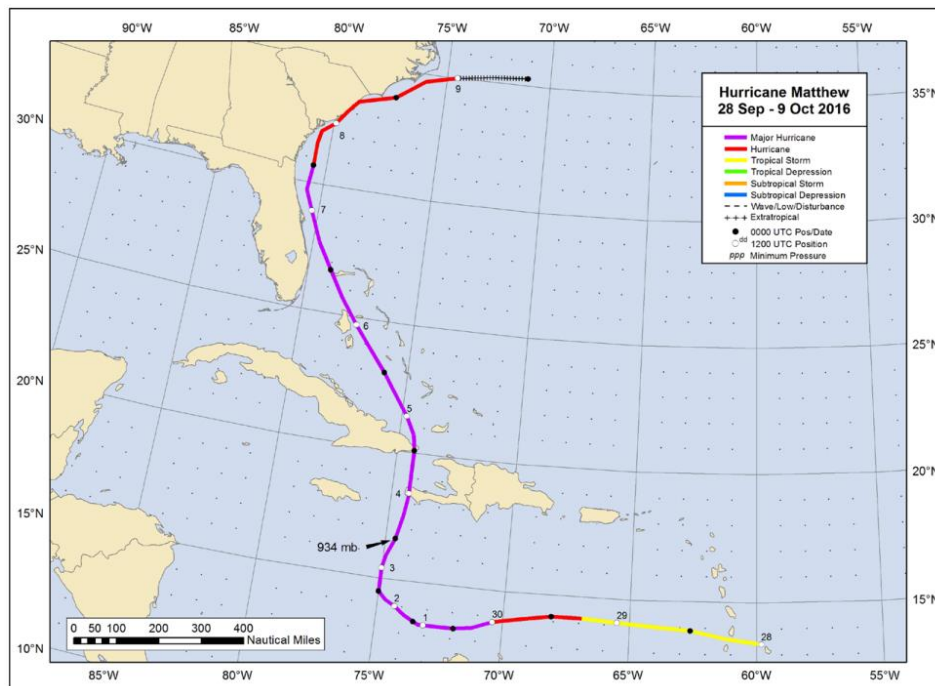


Ilustración 3-25 – Desarrollo temporal del huracán Matthew (National Hurricane Center, 2017)

La presencia de este fenómeno atmosférico justificaría la falta de precisión de un modelo matemático como el WAVERYS, tomando más peso en este escenario la medición de la boya, lo que no permitiría caracterizar los eventos extremales en el emplazamiento sin la consideración mixta del análisis realizado. Por lo que serán considerados los valores de este análisis mixto para considerar toda la información de manera integral.

3.2 Batimetría

La batimetría de la zona tendrá dos momentos, siendo el primero la batimetría natural que existía antes de las actuaciones y un segundo que tendrá en consideración los trabajos costeros y marítimos desarrollados en el emplazamiento. Como fuente principal de información se extrae una malla de puntos del GEBCO, abarcando una amplia zona que engloba tanto el proyecto como la boya 42059 que se ha usado se referencia, los maros de extracción que se consideran son:

- Norte: 19° N
- Sur: 17° N
- Este: 67.5 W°
- Oeste 71.5 W

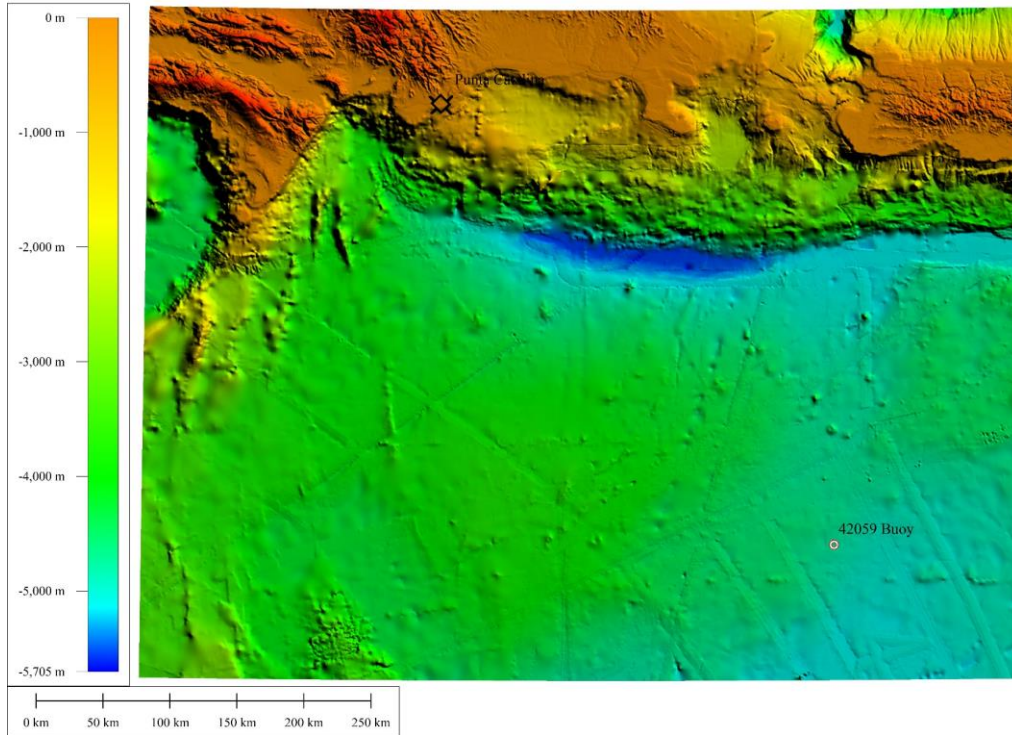


Ilustración 3-26 – Representación de la batimetría extraída (General Bathymetric Chart of the Oceans, 2020)

Adicional a esta información, para este estudio fue posible conseguir una batimetría específica del emplazamiento la que permitirá tener un conocimiento del fondo marítimo mucho más preciso para la zona evaluada. Ya que esta batimetría considera el estado natural de la zona, será considerada de esta manera para la primera evaluación y será representado el estado posterior, con la ejecución del dragado en el muelle y los rompeolas realizados. Esta información será anidada en un único archivo de elevaciones que permita su consideración en cada uno de los escenarios.

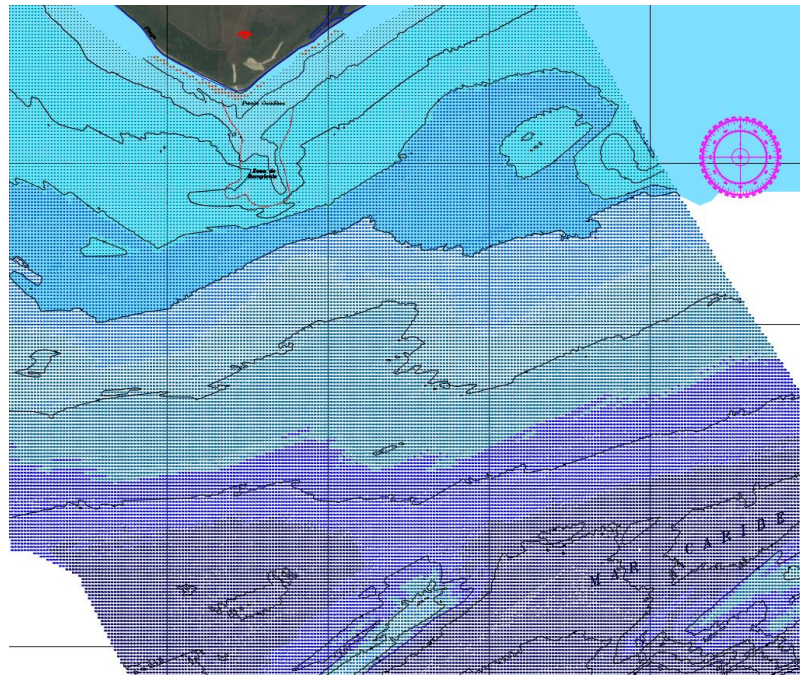


Ilustración 3-27 – Representación de la batimetría natural del emplazamiento

3.3 Condiciones de contorno

Similar a las consideraciones de las batimetrías, los diferentes escenarios tendrán condiciones de contorno alteradas en el emplazamiento, donde las condiciones naturales se registrarán por el perfil natural del emplazamiento mientras la condición modificada del emplazamiento representará las actuaciones desarrolladas en el proyecto.

3.3.1 Condición natural

Para la condición natural del emplazamiento antes de las actuaciones se caracteriza la costa según su composición y su perfil longitudinal.

Sobre su composición, tal como describe la memoria del Mapa Geológico Nacional, se muestra en las imágenes del emplazamiento una composición de arenas medias negras y concantos que se caracterizarán por una curva granulométrica próxima al emplazamiento que fue posible consultar de manera física, donde se identifica un diámetro representativo del 50% de la muestra en 3 mm aproximadamente.

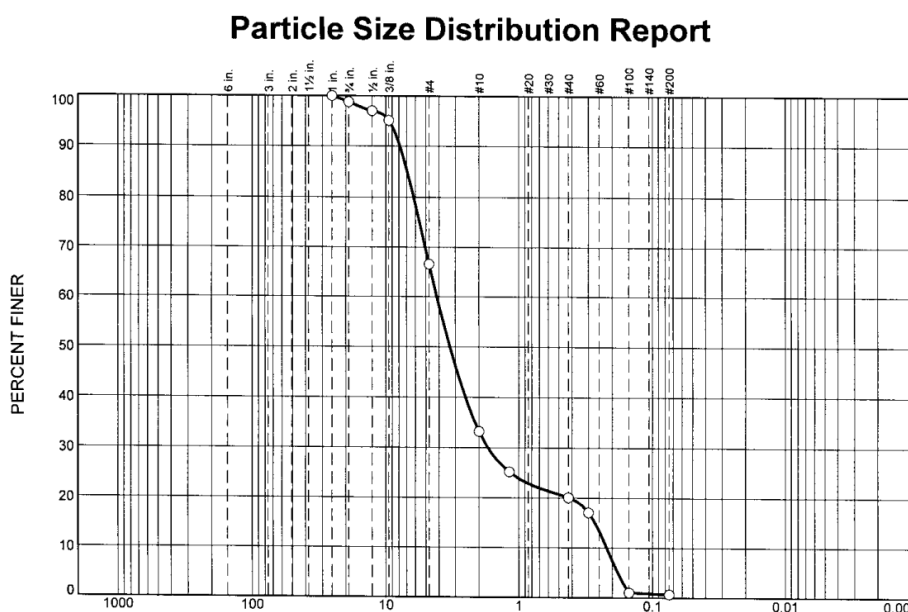


Ilustración 3-28 – Distribución granulométrica del material próximo al emplazamiento

Para la estimación del coeficiente de refracción que correspondería a esta playa de arenas gruesas, Seelig (1981) sugiere las consideraciones de Chesnutt y Galvin (1974) y de Chestnutt (1978), cuyos datos sugieren el siguiente cálculo:

$$K_r = \frac{\alpha \xi^2}{\xi^2 + \beta}$$

Ecuación 1 – Coeficiente de reflexión en playas arenosas (Seelig & Ahrens, 1981)

Donde:

- ξ = Número de Iribarren
- $\alpha = 1,0$ para valores conservadores o $0,5$ para predicciones de reflexión promedio
- $\beta = 5,5$

Esta determinación podrá ser considerada para toda la costa evaluada, al no identificarse visualmente ninguna consideración adicional a esta.

3.3.2 Condición modificada

Para la condición modificada, se tomará en consideración las alteraciones realizadas en el proyecto, manteniendo la misma línea de playa que considerada en su condición natural:



Ilustración 3-29 – Representación de contornos en estructuras

Para el caso de la protección costera y los rompeolas, Seelig (1981) sugiere el uso de la misma ecuación variando los parámetros para permitir una mejor aproximación a las estructuras:

Rompeolas:

$$K_r = \frac{\alpha \xi^2}{\xi^2 + \beta}$$

Donde:

- ξ = Número de Iribarren
- $\alpha = 0,6$ para predicciones de reflexión conservadoras
- $\beta = 6,6$

Protección costera:

$$K_r = \min \left(\frac{\alpha \xi^2}{\xi^2 + \beta}, \alpha \tanh(0,1 \xi^2) \right)$$

Ecuación 2 – Coeficiente de reflexión en revestimientos (Seelig & Ahrens, 1981)

Donde:

- ξ = Número de Iribarren
- $\alpha = \alpha' \exp \left[-1,7 \sqrt{\frac{d}{L}} \cot \theta - 0,5 \left(\frac{H_i}{H_b} \right)^{1,3} \right]$
- $\alpha' = 1,0$ para valores conservadores
- $\beta = 5,5$

Como puede observarse, todas las estimaciones dependen directamente del número de onda a ser considerado, por lo que el uso de de estas constantes conllevaría una iteración de los valores de onda obtenidos en cada punto. Al tratarse de un ejercicio académico, se adoptarán los valores promedio para estas estructuras.

En el caso del puente de acceso y el muelle, esto presentan una condición de refracción diferente al tener una interacción discontinua con las olas será necesario estimar su influencia. Al ser pilas de pequeño diámetro con relación a la escala a la que serán tratados datos, no es representativa su modelización como el objeto rígido que representaría, por lo que se opta por su consideración como un rompeolas discontinuo de pilas a poca separación. (Hayashi, Hattori, Kano, & Shirai, 1966)

La formulación Hayashi et al. (1966) establece que la reflexión se puede formular con la relación entre el diámetro de pila (D) y el espacio entre pilas (b) y la relación entre la profundidad (h) y la altura de onda (H1).

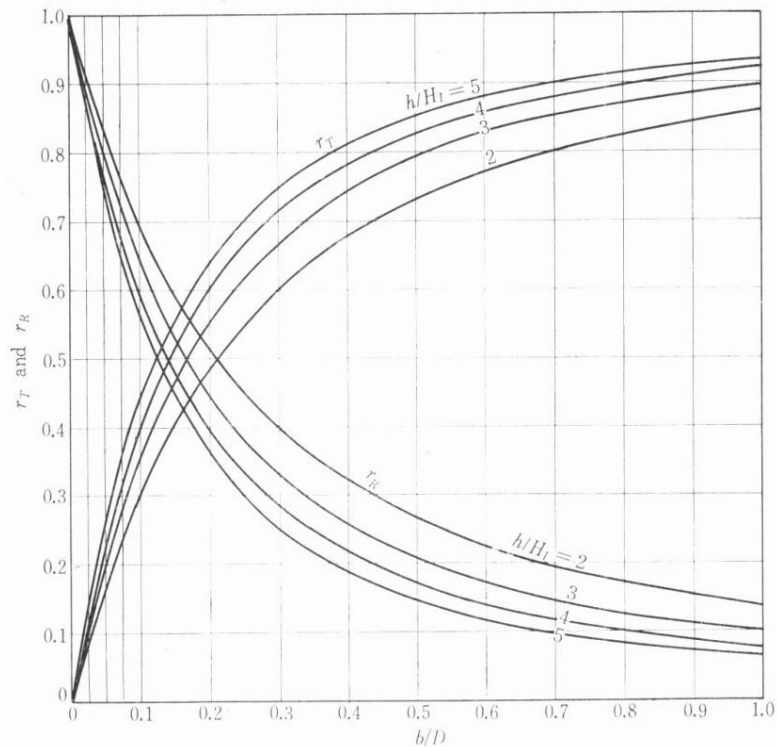


Ilustración 3-30 – Representación del comportamiento de Kr (Hayashi, Hattori, Kano, & Shirai, 1966)

$$K_r = 1 - \left[4 \left(\frac{h}{H_1} \right) \varepsilon \left[-\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + \left(\frac{H_1}{2h} \right)^2} \right] \right]$$

Ecuación 3 – Coeficiente de reflexión rompeolas de pilas separadas (Hayashi, Hattori, Kano, & Shirai, 1966)

Donde:

$$\varepsilon = \frac{C \frac{b}{D+b}}{\sqrt{1 - \left(\frac{b}{D+b} \right)^2}}$$

Ecuación 4 – Coeficiente de forma rompeolas de pilas separadas (Hayashi, Hattori, Kano, & Shirai, 1966)

En esta formulación se hace especial énfasis al importante aumento de la transmisibilidad en función de la separación de las pilas, donde en el estudio en cuestión se muestran relaciones de hasta b/D=1 matemáticamente.

Estas consideraciones matemáticas fueron modeladas en un laboratorio para verificar su efectividad, en estos ensayos se muestra que la formulación sugerida presenta valores conservadores que crecen significativamente al aumentar la relación b/D, llegando a modelar solo valores con una relación b/D de 0,222 los que presentan diferencias de hasta el 50% del coeficiente de refracción. Mientras la relación en el emplazamiento supera

significativamente la unidad con relaciones de 7,67 para el puente de acceso y 3,75 para el muelle.

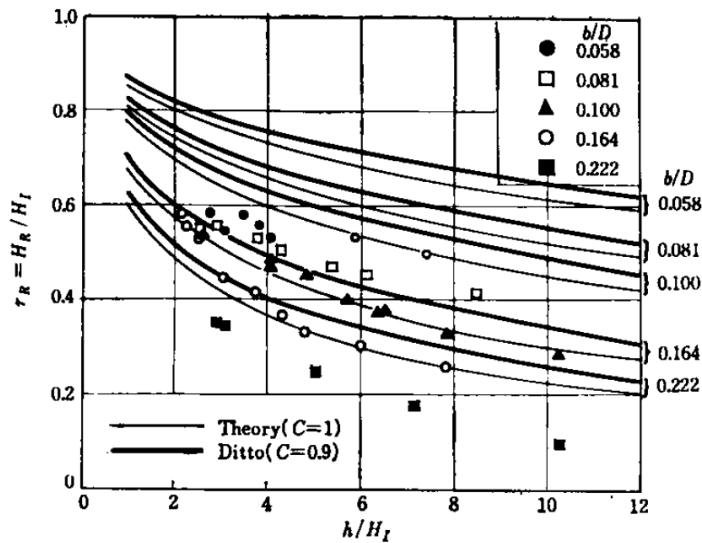


Fig. 10 Coefficients of wave reflection.

Ilustración 3-31 – Representación del comportamiento de K_r modelado (Hayashi, Hattori, Kano, & Shirai, 1966)

Partiendo de estos valores, sería considerable asumir que el impacto de las cimentaciones del muelle y el puente no alteraría la propagación del oleaje en el emplazamiento. Pero, independiente de estas consideraciones, no prever ningún obstáculo ante estas actuaciones no reflejaría ninguna posibilidad de cambio en nuestro modelo.

La manera definitiva de conocer si se ha alterado la propagación del oleaje sería solo experimental, haciendo un reconocimiento en el emplazamiento para determinar esto. Pero al tratarse de un ejercicio académico, se entiende que la aproximación más prudente sería la de solo considerar la estructura del muelle que tiene las pilas más concentradas, desconsiderando las pilas del puente de acceso, que están tan separadas.

Con esto visto, considerando la altura máxima observada, se calcula un coeficiente de reflexión de 0,035, valor que será considerado en cada uno de los 40 ejes que componen el muelle. Para el caso del puente de acceso, la importante separación entre los pilotes, tanto longitudinal como transversalmente en conjunto con el pequeño diámetro de las pilas con relación al dominio estudiado, nos lleva a desconsiderar su impacto en la propagación del oleaje en la zona.

4 METODOLOGÍA

Conocidos los aspectos fundamentales del emplazamiento, tanto en su condición natural como en su condición modificada, se describe a continuación los diferentes pasos que se llevan a cabo para la representación matemática y la interpretación de los resultados. De manera paralela se presentarán los pasos para la consideración de las condiciones naturales y modificada.

4.1 Propagación del oleaje

Para simular la propagación del oleaje desde el punto donde se conoce el estado de mar, se hace uso de la herramienta informática DELFT 3D, un simulador numérico que implementa un modelo de simulación de ondas en zonas costeras (“Simulating WAVes Nearshore” (SWAN)) basado en la ecuación de balance de acción espectral discreta y es totalmente espectral, abarcando el conjunto de todas las frecuencias (σ) y direcciones (θ) de las que se compone el oleaje. Esto permite calcular la evolución de al azar, de cresta corta olas en regiones costeras con aguas profundas, intermedias y someras y corrientes ambientales. (Deltares, 2022)

La formulación espectral usada en el modelo es bidimensional, basándose en una función de densidad de acción $N(\sigma, \theta)$ y describiendo la evolución de la energía del oleaje a partir de un balance de las acciones en la ecuación espectral a partir de condiciones arbitrarias que afecten al oleaje. Este modelo relaciona la densidad espectral de acción de onda (N) con la densidad espectral de la energía (E) mediante la función $N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$ y realiza la modelación numérica resolviendo la siguiente ecuación:

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

Ecuación 5 – Ecuación de evolución de espectro de acción

Donde:

- $\frac{\partial N}{\partial t}$ representa la variación local
- $\frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y}$ representa la propagación espacial con la velocidad
- $\frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma}$ representa la variación de frecuencia del espectro debido a las variaciones de profundidad
- $\frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta}$ representa la refracción
- $\frac{S}{\sigma}$ engloba los términos de generación y disipación de oleaje (viento, rotura, fricción de fondo, etc)

La resolución de esta ecuación se hace de forma discreta, mediante la discretización del área de estudio mediante mallas que permitan caracterizar una zona de influencia. Los nodos de esta malla serán los puntos de resolución considerados en el sistema, aplicándose las mallas con una resolución que permita la representación nodal de las características del fondo marino del área de influencia.

Para la creación de estas mallas se usa la herramienta RFGRID integrada en la suite de DELFT, la que permite la creación de una malla homogénea a partir de una geometría de entrada. Para permitir la optimización de las diferentes resoluciones según el espacio a ser modelado, el programa WAVE permite la consideración de mallas anidadas, función que será aprovechada debido a la importante extensión del espacio a ser evaluado.

4.1.1 Dominio de estudio

Partiendo de los datos obtenidos del modelo oceanográfico del GEBCO y el levantamiento batimétrico del emplazamiento se determina el dominio de estudio, el cual abarcará un área más extensa que el emplazamiento para evitar la influencia de las imprecisiones numéricas en estas zonas donde se impondrá el oleaje de entrada. Al representar el área mencionada anteriormente, se muestra un área a evaluar de 106.161,9 km² lo que sería una carga computacional muy importante, que no podría ser soportada por un ordenador común.

Con el fin de reducir el tamaño del dominio a ser evaluado, el límite sureste es desplazado a una zona con una profundidad importante, donde no haya influencia del fondo marino en el modelo matemático. Con el área de dominio total reducida a 1.296 km², donde el dominio llega a una profundidad en el límite sureste de 700 metros, la creación de una malla de evaluación única no permitiría la evaluación con una resolución deseada, por lo que se creará una serie de mallas anidadas que permitan obtener una resolución ideal mientras nos acercamos al emplazamiento:

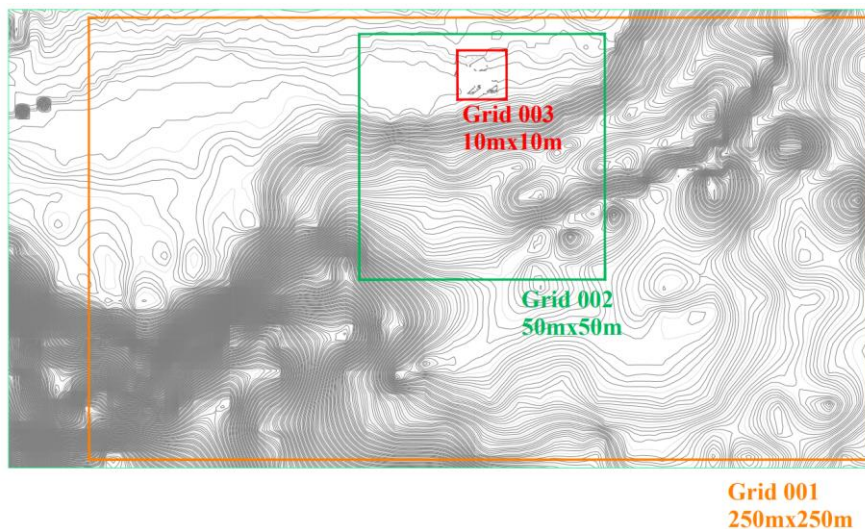


Ilustración 4-1 – Representación del dominio y las mallas

Las batimetrías consideradas variarán exclusivamente en la zona del muelle, pues, en vista de que los rompeolas y la protección costera se considerarán como una condición de contorno impuesta en el modelo numérico, la profundidad establecida en el punto será indiferente en la modelación. Este cambio se verá exclusivamente en las profundidades establecidas para la malla “Grid 003”, pues es la que se desarrolla en el área del emplazamiento.

4.1.2 Condiciones de contorno

4.1.2.1 Estados de mar

El modelo partirá del estado de mar conocido en los límites del dominio, para lo que nos referimos a las observaciones de la caracterización del clima marítimo realizado partiendo de las condiciones mixtas del oleaje. En este análisis se refleja que las direcciones del oleaje son predominantemente provenientes del este, con muy poca incidencia de oleaje proveniente de otras direcciones en situaciones medias ni extremas, pero marcado por una condición registrada con dirección proveniente del Oeste.

Al tener como objeto de estudio la determinación del transporte de sedimentos en el emplazamiento, se analizarán tres escenarios, considerando un comportamiento normal y dos comportamientos extremos que reflejen los escenarios extremos de cada una de las direcciones de oleaje:

- **Regimen normal**
 - **Altura significativa (H_s)** **1,40 metros**
 - **Período pico (T_p)** **6,70 segundos**
 - **Dirección predominante(Θ)** **91°**

- **Regimen extremal Este**
 - **Altura significativa (H_s)** **9,25 metros**
 - **Período pico (T_p)** **12,12 segundos**
 - **Dirección predominante(Θ)** **93°**
- **Regimen extremal Oeste**
 - **Altura significativa (H_s)** **8,07 metros**
 - **Período pico (T_p)** **11,30 segundos**
 - **Dirección predominante(Θ)** **248°**

En ninguno de estos escenarios se considerará la incidencia del viento en la propagación del oleaje.

4.1.2.2 Contorno de estructuras

Para la consideración de las estructuras construidas en el emplazamiento, el modulo WAVE permite la consideración de obstáculos con un coeficiente de refracción constante. Entre las opciones disponibles en DELFT se incluyen la inclusión de pantallas (“Sheet”) que consideran un coeficiente de transmisión constante y los diques (“Dam”), que consideran un coeficiente de transmisión que dependerá de las condiciones del oleaje en el obstáculo y de su altura.

En el caso de la protección costera y los rompeolas, su representación como dique es ideal, pues permite la determinación de un coeficiente en función del oleaje. Mientras en el caso de las pilas del muelle, su consideración constante es la más adecuada para representar lo calculado en la caracterización de esta condición de contorno.

Rompeolas:

- **Altura de estructura** **6,30 metros**
- **Coficiente β** **0,15**
- **Coficiente α** **2,6**

Protección costera:

- **Altura de estructura** **4,50 metros**
- **Coficiente β** **0,15**
- **Coficiente α** **2,6**

Estos coeficientes seleccionados son los sugeridas por Seelig (1979) para la utilización de la formulación de Goda para coeficientes de transmisión de onda:

$$K_t = 0,5 \left[1 - \sin \left(\frac{\pi}{2\alpha} \left(\frac{F}{H_i} + \beta \right) \right) \right] \text{ para } -\beta - \alpha < \frac{F}{H_i} < \alpha - \beta$$

Ecuación 6 – Ecuación para determinación del coeficiente de transmisión

donde $F = h - d$ es la parte libre sobre el nivel del mar de la estructura y H_i es la altura de la ola incidente (significativa), h es el nivel de referencia del tope de la estructura desde fondo y d el nivel medio del agua relativo al nivel de referencia.

Para el caso de las pilas del puente de acceso, como se menciona en el apartado 3.3.2, la teoría desarrollada por Hayashi sugiere que a tan importante separación su impacto sería despreciable por lo que no serán consideradas en el modelo. En el caso del muelle, al tener una mayor concentración de obstáculos, se considerarán como pilas con poca separación con el coeficiente de refracción de 0,035 calculado.

Eje de pilas

- **Coficiente de transmisión** **0,965**
- **Coficiente de transmisión conjunto** **$(0,965)^5 = 0,837$**

4.1.3 Resultados

4.1.3.1 Regimen Normal

4.1.3.1.1 Condición natural

Para la verificación del modelado en la condición natural, donde no consideramos la existencia de las estructuras ni el dragado realizado en el área de muelle, se analizan las alturas de ola significativas y las direcciones del oleaje en estas condiciones extremales:

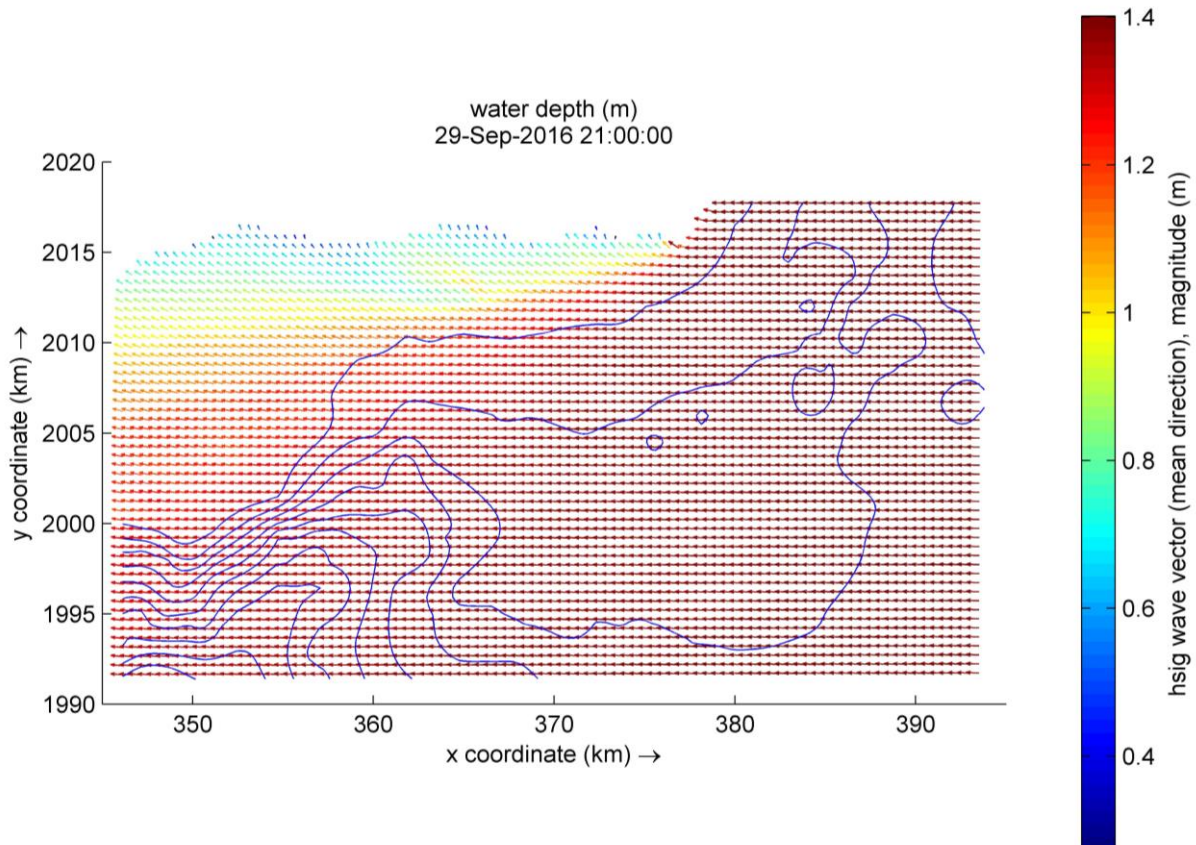


Ilustración 4-2 – Altura de ola significativa en la malla “GRID001”

En este gráfico, que presenta tanto la altura significativa como la dirección del oleaje se muestran las condiciones de contorno impuestas de manera adecuada, con alturas de ola significativas en el límite sureste correspondientes al valor impuesto de la condición normal del análisis mixto. En el caso de la dirección del oleaje, el comportamiento del modelo respeta el fenómeno de refracción esperado, donde el oleaje a medida que llega a zonas más someras de la batimetría cambia su ángulo, tornándose el frente del oleaje paralelo a la línea de costa.

Observándose en la malla inicial comportamientos y valores adecuados, se verifica que la malla “GRID002” tiene un comportamiento similar. A continuación, se presentan los resultados de los valores en la malla más refinada “GRID003”:

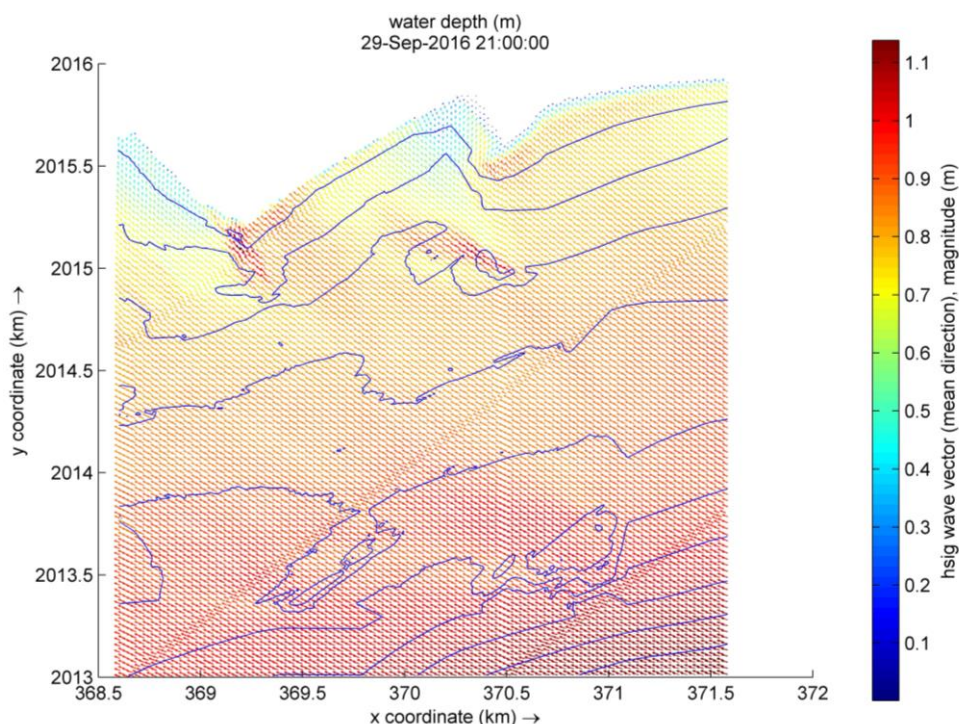


Ilustración 4-3 – Altura de ola significante en la malla “GRID003”

Esta malla ya presenta una variación de la dirección del oleaje menos pronunciada hasta acercarnos a la costa, donde al pasar la punta esta sufrirá mayores cambios. La altura del oleaje en este punto ya se ve considerablemente reducido, alcanzando en este punto valores máximos entorno a un metro de altura significativa, resaltándose la importante influencia de la fricción de fondo al alcanzar profundidades menores más próximo a la costa.

4.1.3.1.2 Condición modificada

Para la condición modificada se aplican las profundidades modificadas debido al dragado y las condiciones de contorno, no se hace evidente alguna modificación al presentar los resultados de la simulación en la malla “GRID001” debido a la falta de resolución que tiene esta malla:

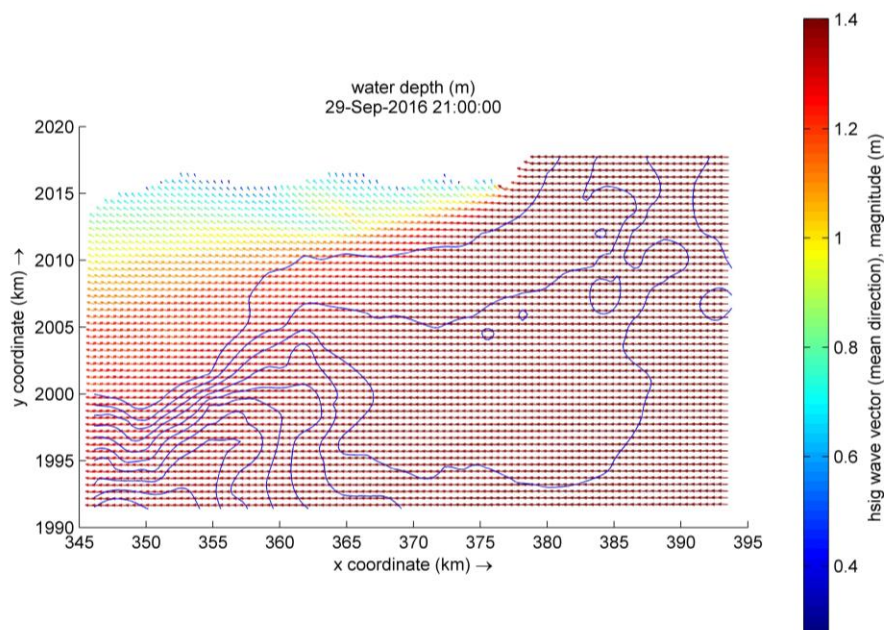


Ilustración 4-4 – Altura de ola significante en la malla “GRID001”

Al representarse la malla de mayor resolución en el emplazamiento “GRID003” se hacen evidente las

condiciones de contorno que se han establecido, donde en la parte central del dominio se observa la influencia de los ejes del muelle y, en la punta se identifican los rompeolas y la protección costera.

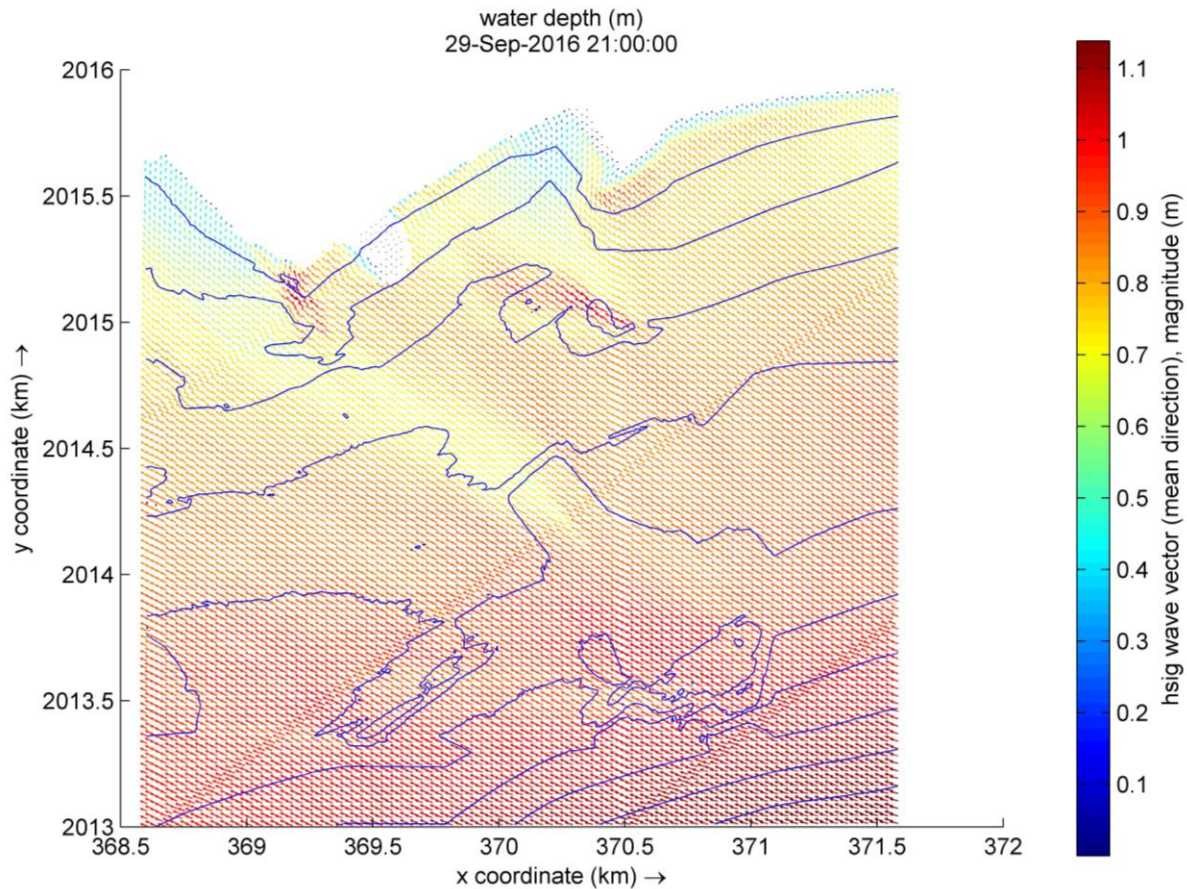


Ilustración 4-5 – Altura de ola significativa en la malla “GRID003”

4.1.3.1.3 Comparativo

Al presentarse ambos resultados sobre la altura significativa de la ola, se hace evidente el impacto de las obras en el muelle en la propagación del oleaje, donde la pequeña influencia de cada uno de los ejes se propaga hasta alcanzar la zona del rompeolas, disipando parte de la energía, reduciéndose así la altura de ola en la proyección del muelle en aproximadamente un 10%.

Adicional a estas alteraciones identificadas, en el límite del dragado se refleja un aumento de aproximadamente un 5% en la altura del oleaje significativo en comparación con el comportamiento en oleaje natural que se entiende que como consecuencia de la refracción debido a la diferencia de altura de profundidad en la batimetría.

En el gráfico a continuación se muestran las diferencias porcentuales de altura del escenario modificado con relación al escenario natural, donde los valores negativos porcentuales muestran una altura de ola reducida después de las actuaciones, mientras los valores positivos reflejan un aumento debido a estas actuaciones.

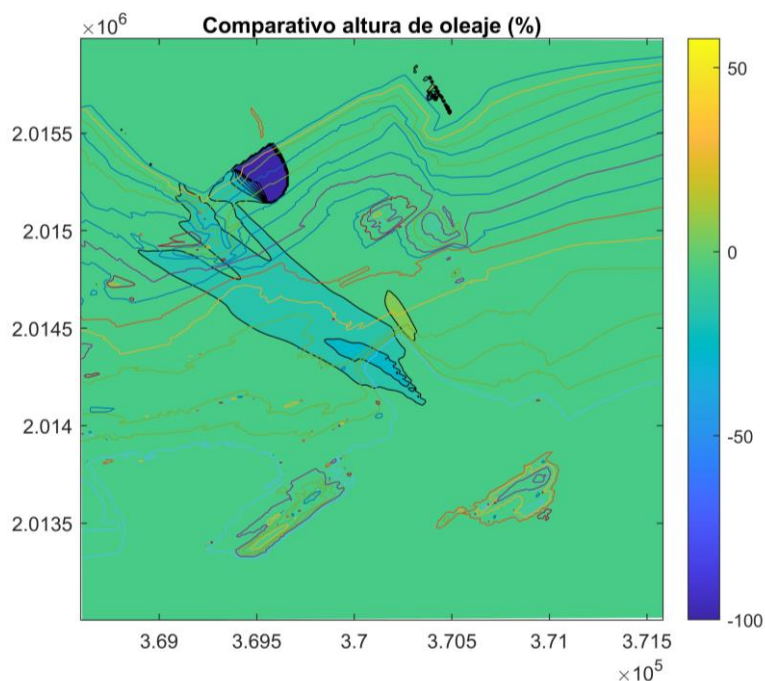


Ilustración 4-6 – Comparativo de alturas de ola significativa en ambos escenarios en la malla “GRID003”

A continuación, se muestran los perfiles transversales 1 y 2 que se trazan en la playa Catalina donde se reflejan las alturas de ola en ambos escenarios resaltándose la similitud entre estos. Mientras los perfiles 3 y 4, que se trazan en la playa Nizao, muestran un perfil fuera del rompeolas, que refleja una ligera diferencia de las alturas de oleaje y una sección dentro del rompeolas que muestra el escenario modificado sin oleaje mientras el natural si presenta oleaje hasta llegar a la costa:

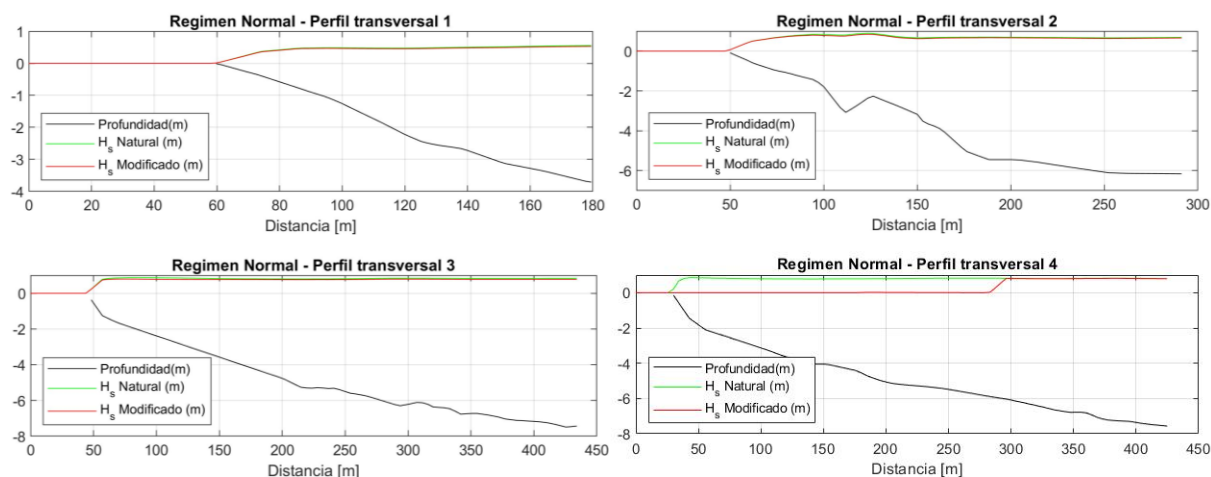


Ilustración 4-7 – Secciones de alturas de ola significativa en ambos escenarios en la malla “GRID003”

Otro parámetro de interés en el dominio será la fracción de rotura del oleaje, pues este representa el mecanismo de disipación de energía principal del sistema, al hacer un comparativo de este parámetro próximo a la línea de costa se observa un importante cambio debido a la implantación del rompeolas, donde en esta área no se hace evidente ninguna rotura en el escenario modificado. En esta misma playa Nizao se refleja un ligero aumento de la zona de rotura del oleaje en el escenario modificado, mientras en la playa Catalina se muestra una ligera reducción del área de rotura con ninguna diferencia importante entre el comportamiento natural y el modificado.

En el gráfico a continuación se muestran las diferencias porcentuales de la proporción del oleaje que rompe del escenario modificado con relación al escenario natural, donde los valores negativos porcentuales muestran una menor proporción del oleaje rompiendo después de las actuaciones, mientras los valores positivos reflejan un aumento en esta proporción debido a estas actuaciones.

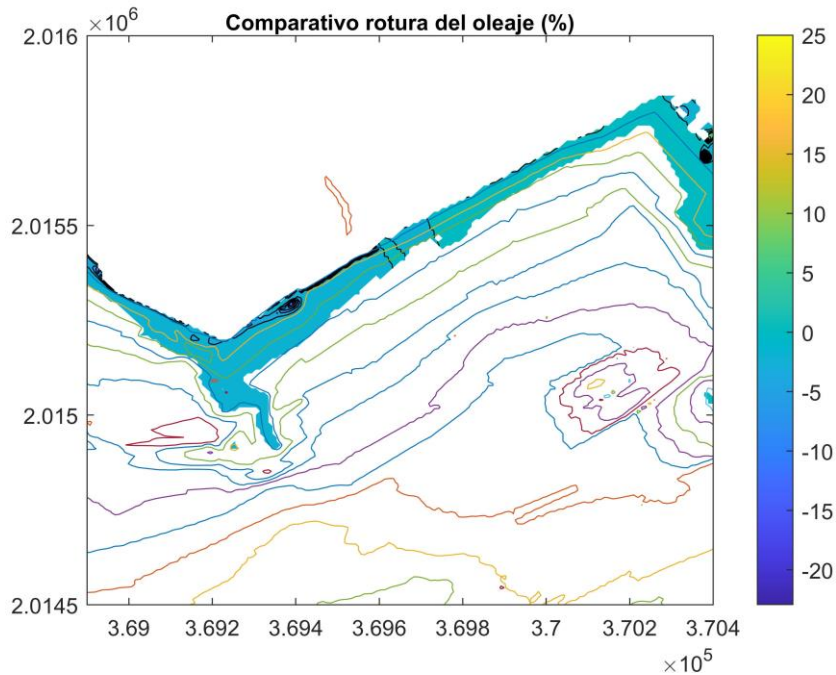


Ilustración 4-8 – Porcentaje de rotura en ambos escenarios en la malla “GRID003”

Otro parámetro que se ve afectado en el dominio será la dirección del oleaje, que se muestran en los siguientes gráficos con el vector azul representando la dirección en su condición natural y el vector rojo la dirección en la condición alterada. Se enfocan las capturas a las áreas del muelle y la punta, donde las modificaciones tomarán lugar, en estos se reflejan las direcciones ligeramente alterado en el área del muelle y en el área próxima a los rompeolas.

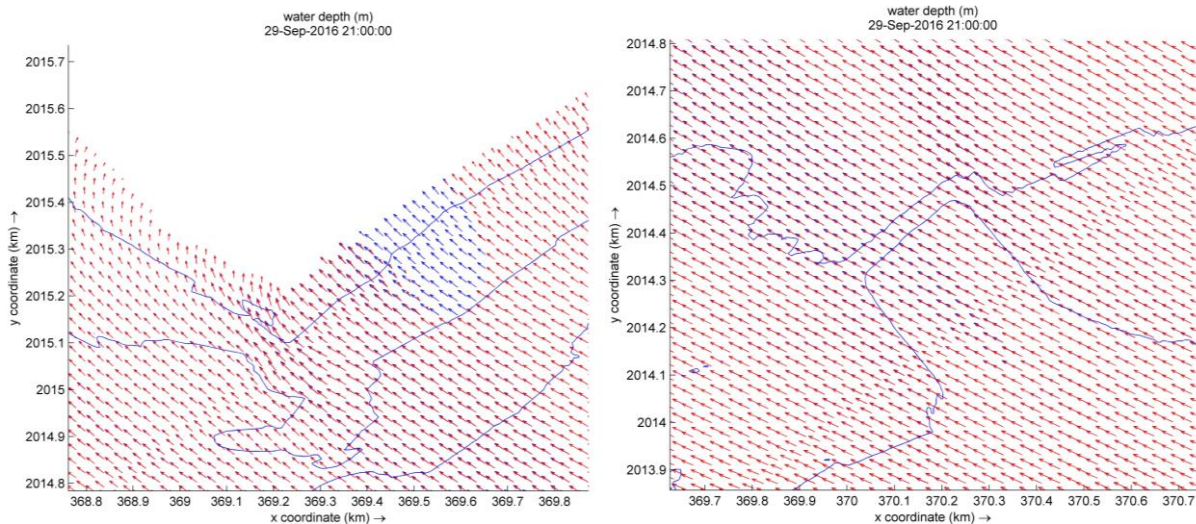


Ilustración 4-9 – Dirección media de oleaje en ambos escenarios en la malla “GRID003”

En los diferentes aspectos estudiados, el comportamiento general del dominio no se ve importantemente alterado fuera del área abrigada por los rompeolas. Al haberse realizado las obras principales en la costa, siendo el muelle realizado sobre pilas que tendrían menos interacción con el oleaje, no sería consecuente que se presentasen importantes cambios en la hidrodinámica de la zona.

Aunque estas diferencias no se muestren de gran magnitud entre ambos escenarios, el efecto en la hidrodinámica de la zona de rompiente puede verse ligeramente alterada por el ligero desplazamiento de las zonas de rotura, modificando así el balance natural que se presentaba en la zona.

4.1.3.2 Regimen Extremal Este

4.1.3.2.1 Condición natural

Similar al caso anterior, para la verificación del modelado en la condición natural, se analizan las alturas de ola significativas y las direcciones del oleaje en esta condición extremal:

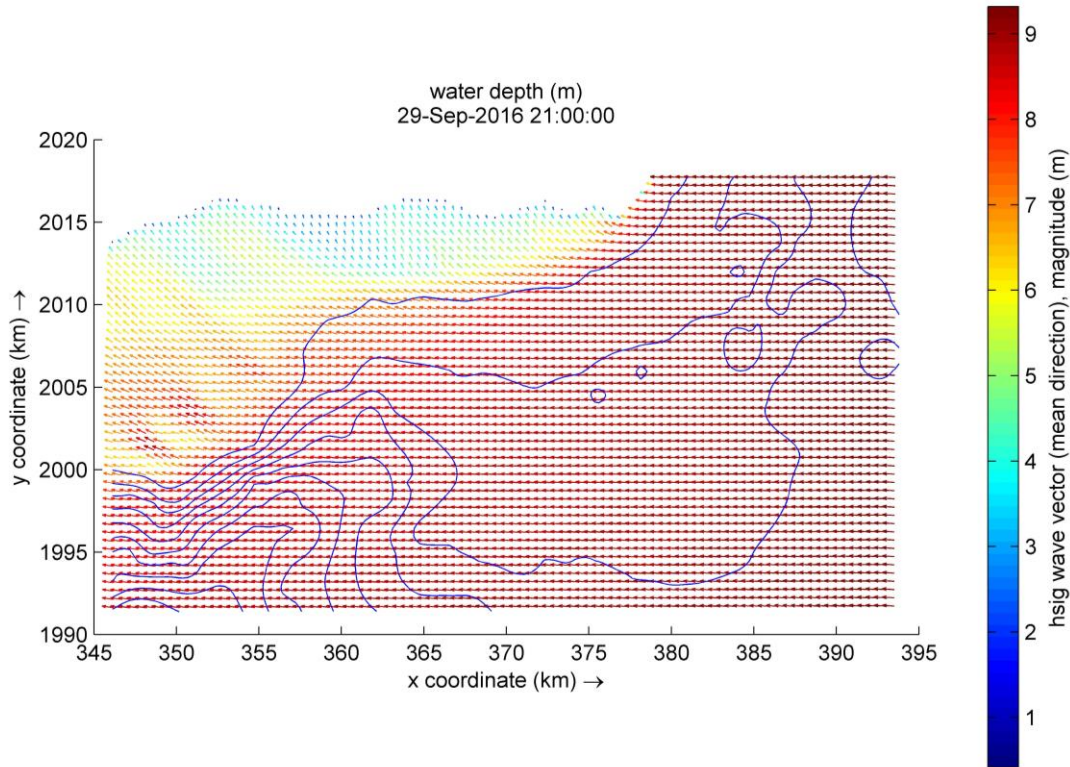


Ilustración 4-10 – Altura de ola significativa en la malla “GRID001”

En este gráfico, que presenta tanto la altura significativa como la dirección del oleaje se muestran las condiciones de contorno impuestas de manera adecuada, con alturas de ola significativas en el límite sureste correspondientes al valor impuesto de la condición extremal registrada en la boya. En el caso de la dirección del oleaje, el comportamiento del modelo respeta el fenómeno de refracción esperado, donde el oleaje a medida que llega a zonas más someras de la batimetría cambia su ángulo, tornándose el frente del oleaje paralelo a la línea de costa.

Observándose en la malla inicial comportamientos y valores adecuados, se verifica que la malla “GRID002” tiene un comportamiento similar. A continuación, se presentan los resultados de los valores en la malla más refinada “GRID003”:

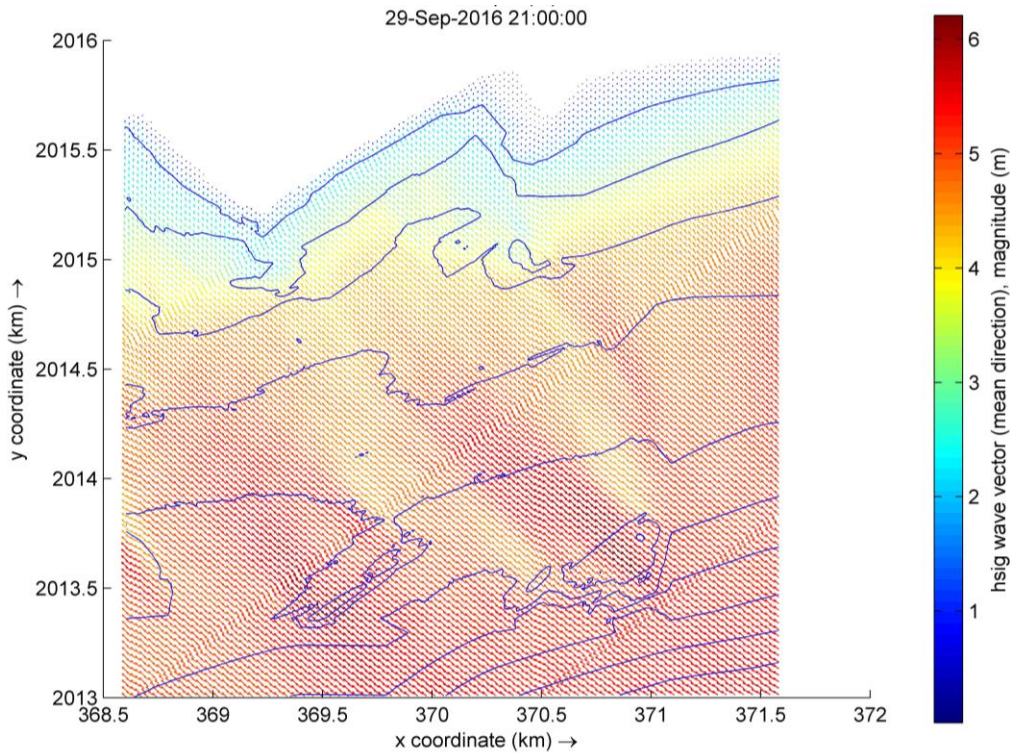


Ilustración 4-11 – Altura de ola significativa en la malla “GRID003”

Esta malla presenta un comportamiento en similar al escenario normal en términos de la refracción del oleaje, reflejando menor variación de la dirección del oleaje hasta acercarnos a la costa, donde al pasar la punta esta sufrirá mayores cambios. En cambio, la altura del oleaje ya se muestra un 65% reducida al acercarnos al emplazamiento.

4.1.3.2.2 Condición modificada

Para la condición modificada se aplican las profundidades modificadas debido al dragado y las condiciones de contorno, no se hace evidente alguna modificación al presentar los resultados de la simulación en la malla “GRID001” debido a la falta de resolución que tiene esta malla:

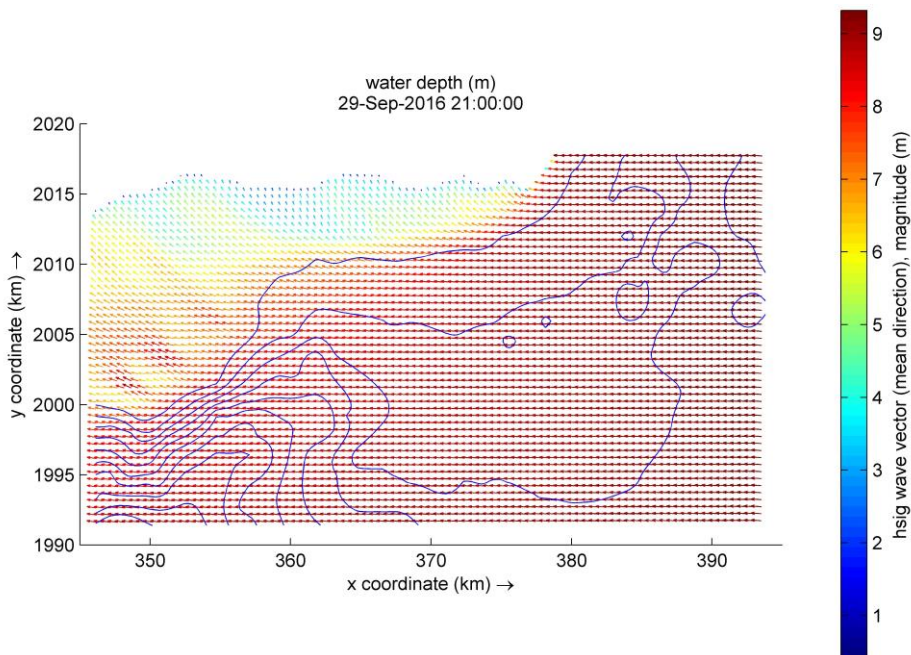


Ilustración 4-12 – Altura de ola significativa en la malla “GRID001”

El comportamiento de la propagación del oleaje se muestra de manera similar con relación al escenario normal en el emplazamiento “GRID003”, haciéndose evidentes las condiciones de contorno que se han establecido, donde en la parte central del dominio se observa la influencia de los ejes del muelle y, en la punta se identifican los rompeolas y la protección costera.

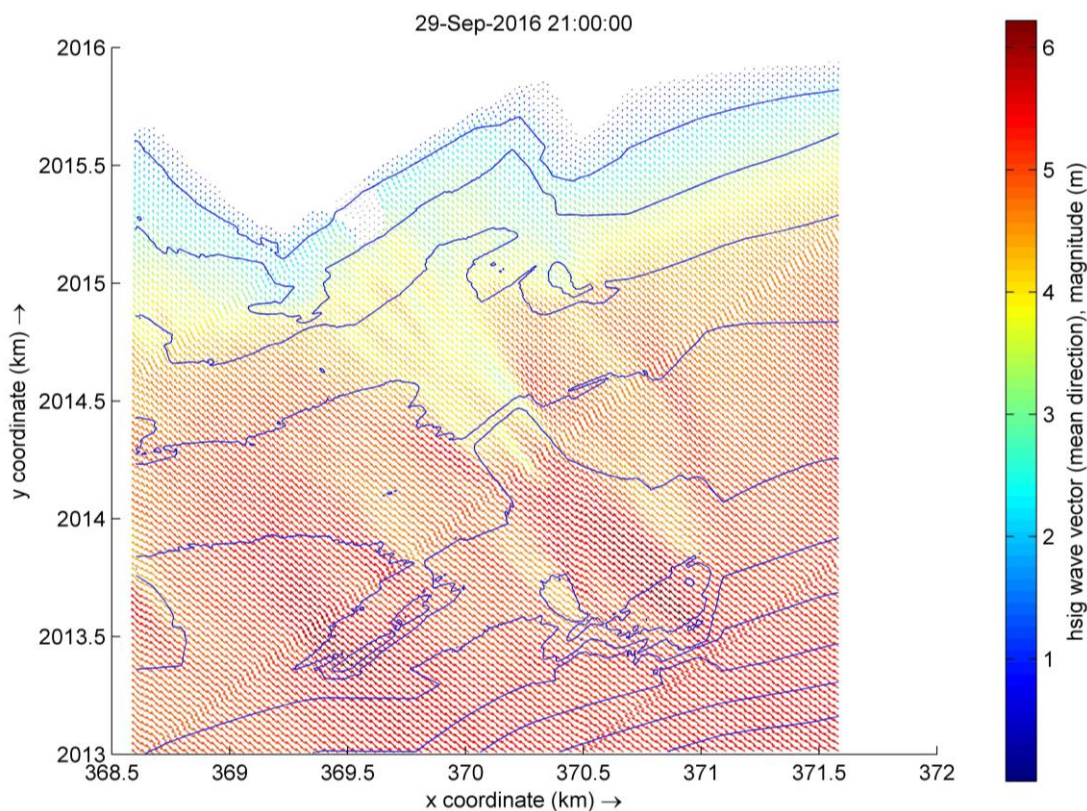


Ilustración 4-13 – Altura de ola significativa en la malla “GRID003”

4.1.3.2.3 Comparativo

Al presentarse ambos resultados sobre la altura significativa de la ola, se hace evidente el impacto de las obras en el muelle en la propagación del oleaje, mostrando un comportamiento bastante alterado con relación a la condición normal debido a la importante diferencia de altura entre ambos escenarios. Debido a la interacción con el fondo de la playa, las diferencias se muestran mayormente en profundidades mayores a los 10 metros.

En la zona del muelle, la energía disipada se refleja con una reducción de la altura de oleaje próximo a un 24% cerca de los ejes pilotados, propagando esta altura disipada que presentaría alturas 15% menores en este mismo alineamiento. Resalta en este análisis que, en el límite noreste del dragado, la altura significativa del oleaje se reduce en un 27% en el caso modificado, siendo una zona que se pueda ver alterada debido al talud del dragado.

Adicional a estas alteraciones identificadas, el comportamiento en el límite del dragado refleja un aumento similar al escenario normal, alcanzando un 5% en la altura del oleaje significativo en comparación con el comportamiento natural que se entiende que como consecuencia de la refracción debido a la diferencia de altura de profundidad en la batimetría.

En el gráfico a continuación se muestran las diferencias porcentuales de altura del escenario modificado con relación al escenario natural, donde los valores negativos porcentuales muestran una altura de ola reducida después de las actuaciones, mientras los valores positivos reflejan un aumento debido a estas actuaciones.

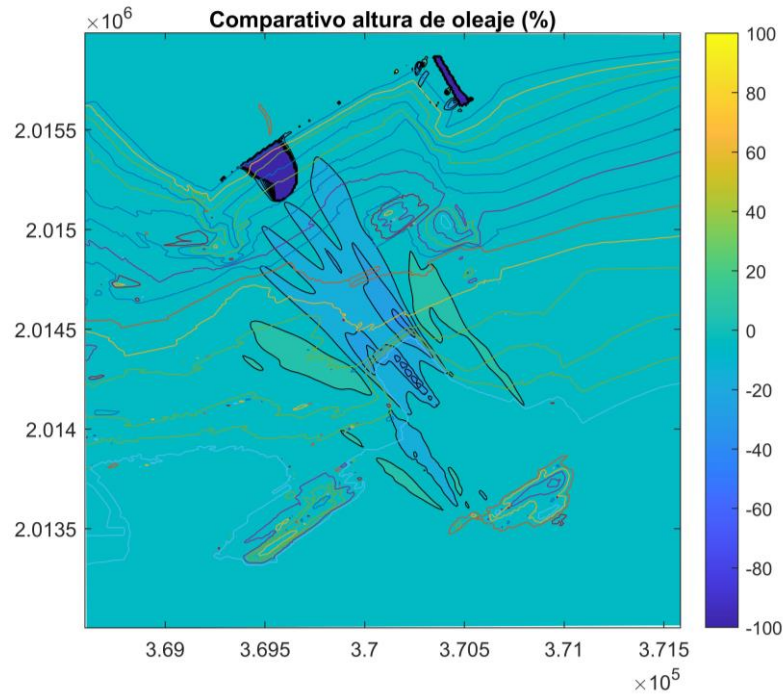


Ilustración 4-14 – Comparativo de alturas de ola significativa en ambos escenarios en la malla “GRID003”

A continuación, se muestran los perfiles transversales 1 y 2 que se trazan en la playa Catalina donde se reflejan las alturas de ola en ambos escenarios resaltándose la similitud entre estos. Mientras los perfiles 3 y 4, que se trazan en la playa Nizao, muestran un perfil fuera del rompeolas, que refleja una ligera diferencia de las alturas de oleaje y una sección dentro del rompeolas que muestra el escenario modificado sin oleaje mientras el natural si presenta oleaje hasta llegar a la costa:

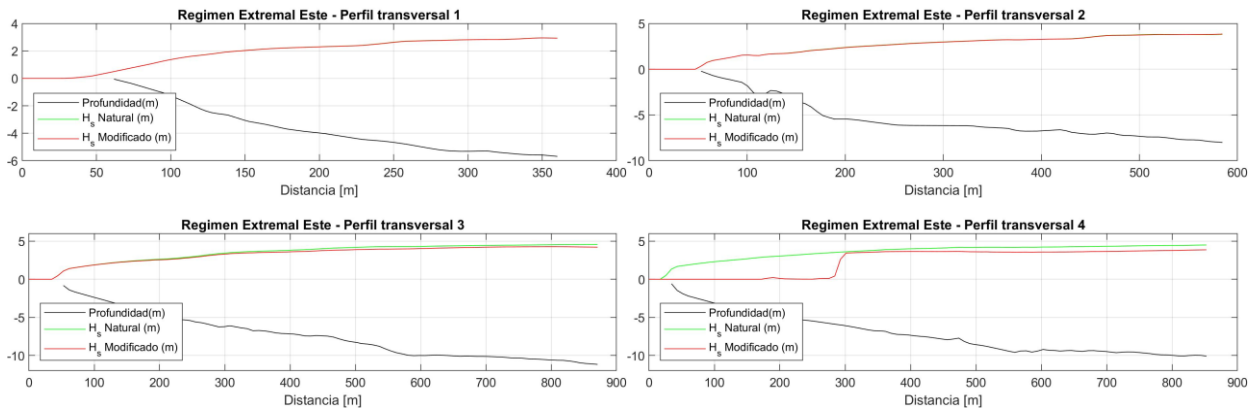


Ilustración 4-15 – Secciones de alturas de ola significativa en ambos escenarios en la malla “GRID003”

La diferencia de altura entre los escenarios modelados también muestra una ligera diferencia en la influencia del oleaje después de las actuaciones en el muelle, donde se muestra que la influencia de las actuaciones en el muelle disipa suficiente energía como para reducir el porcentaje del oleaje que rompería en próximo al rompeolas. Mientras, en las zonas laterales del dragado, se muestran aumentos puntuales del porcentaje de rotura sin propagación de la misma.

En el gráfico a continuación se muestran las diferencias porcentuales de la proporción del oleaje que rompe del escenario modificado con relación al escenario natural, donde los valores negativos porcentuales muestran una menor proporción del oleaje rompiendo después de las actuaciones, mientras los valores positivos reflejan un aumento en esta proporción debido a estas actuaciones.

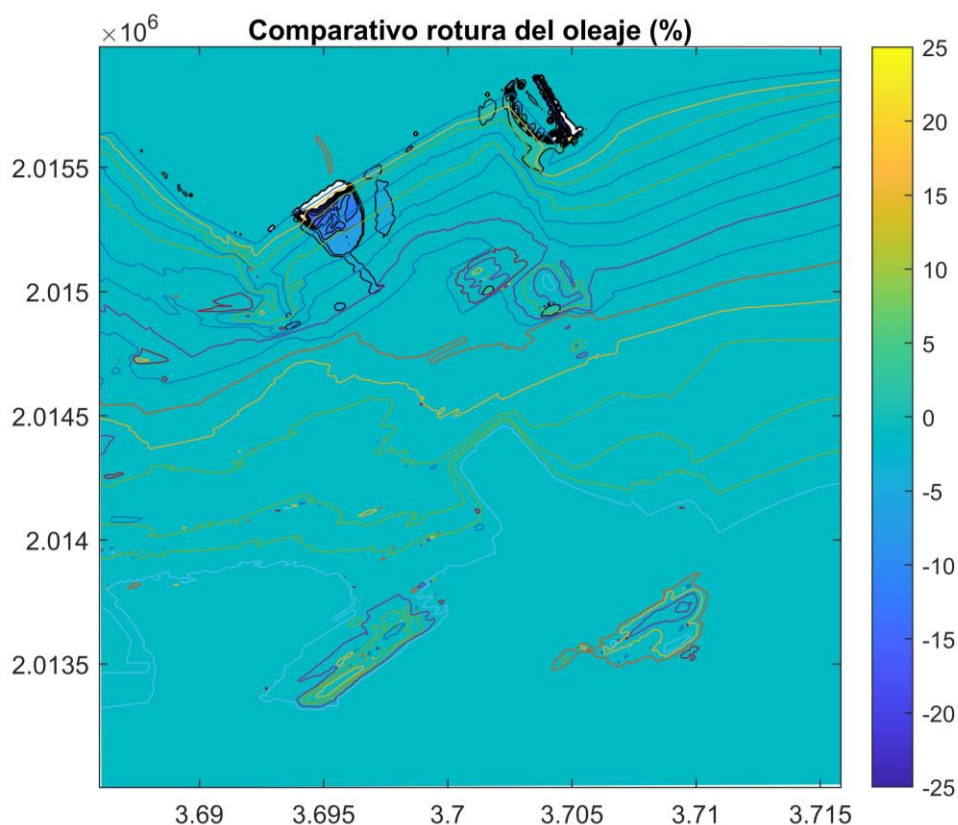


Ilustración 4-16 – Comparativo de porcentaje de rotura en ambos escenarios en la malla “GRID003”

Al analizar la dirección al oleaje de manera similar al escenario normal, donde se muestran en los siguientes gráficos con el vector azul representando la dirección en su condición natural y el vector rojo la dirección en la condición alterada. Se enfocan las capturas a las áreas del muelle y la punta, donde las modificaciones tomarán lugar, en estos se reflejan las direcciones ligeramente alterado en el área del muelle y en el área próxima a los rompeolas.

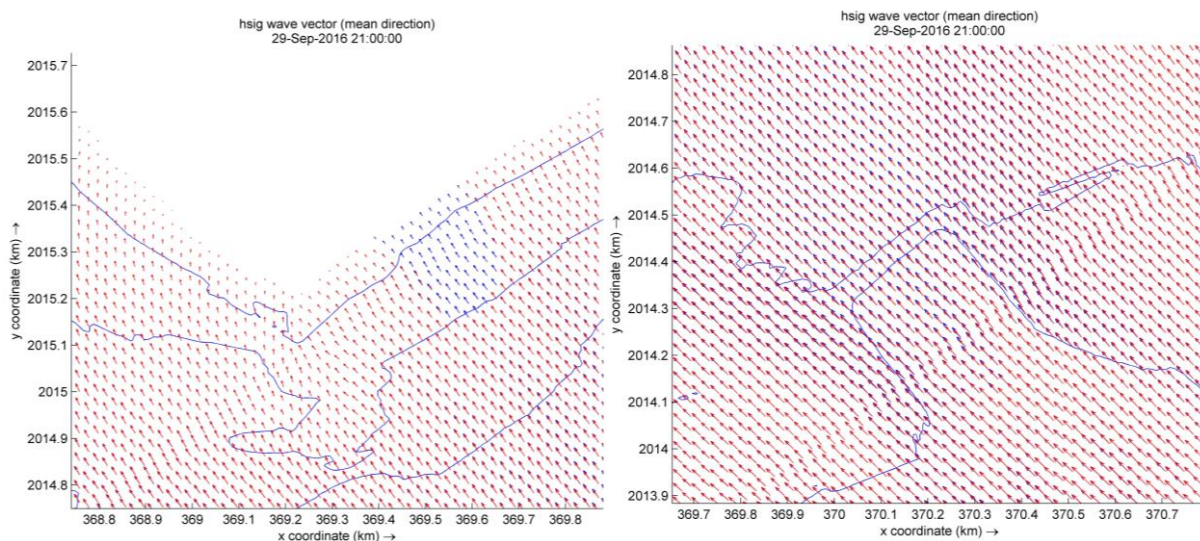


Ilustración 4-17 – Dirección media de oleaje en ambos escenarios en la malla “GRID003”

En los diferentes aspectos estudiados, el comportamiento general del dominio presenta variaciones en la zona de aguas más profundas, siendo impactada esta propagación por el dragado y muelle que está en profundidades de mayor incidencia para el oleaje extremal siendo evaluado.

La variación en la zona de rompiente en la zona próxima al dragado en este escenario sugiere un cambio en la

hidrodinámica que afectaría el transporte de sedimentos en eventos extremales con esta dirección incidente y estas magnitudes.

4.1.3.3 Regimen Extremal Oeste

4.1.3.3.1 Condición natural

Similar a los casos anteriores se analizan las alturas de ola significativas y las direcciones del oleaje en esta condición extremal:

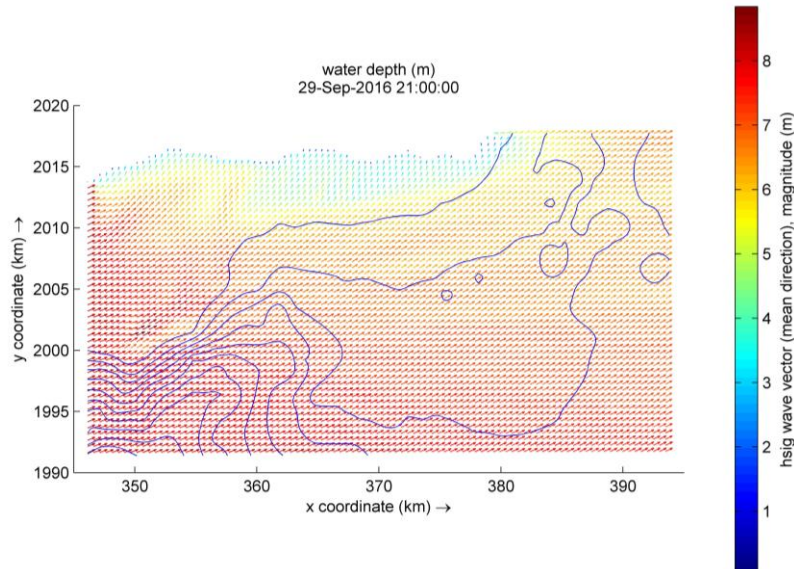


Ilustración 4-18 – Altura de ola significativa en la malla “GRID001”

En este gráfico, que presenta tanto la altura significativa como la dirección del oleaje se muestran las condiciones de contorno impuestas de manera adecuada, con alturas de ola significativas en el límite suroeste correspondientes al valor impuesto de la condición extremal registrada en el reanálisis y calibrado con datos de la boya mediante el análisis mixto. En el caso de la dirección del oleaje, el comportamiento del modelo respeta el fenómeno de refracción esperado, donde el oleaje a medida que llega a zonas más someras de la batimetría cambia su ángulo, tornándose el frente del oleaje paralelo a la línea de costa.

Observándose en la malla inicial comportamientos y valores adecuados, se verifica que la malla “GRID002” tiene un comportamiento similar. A continuación, se presentan los resultados de los valores en la malla más refinada “GRID003”:

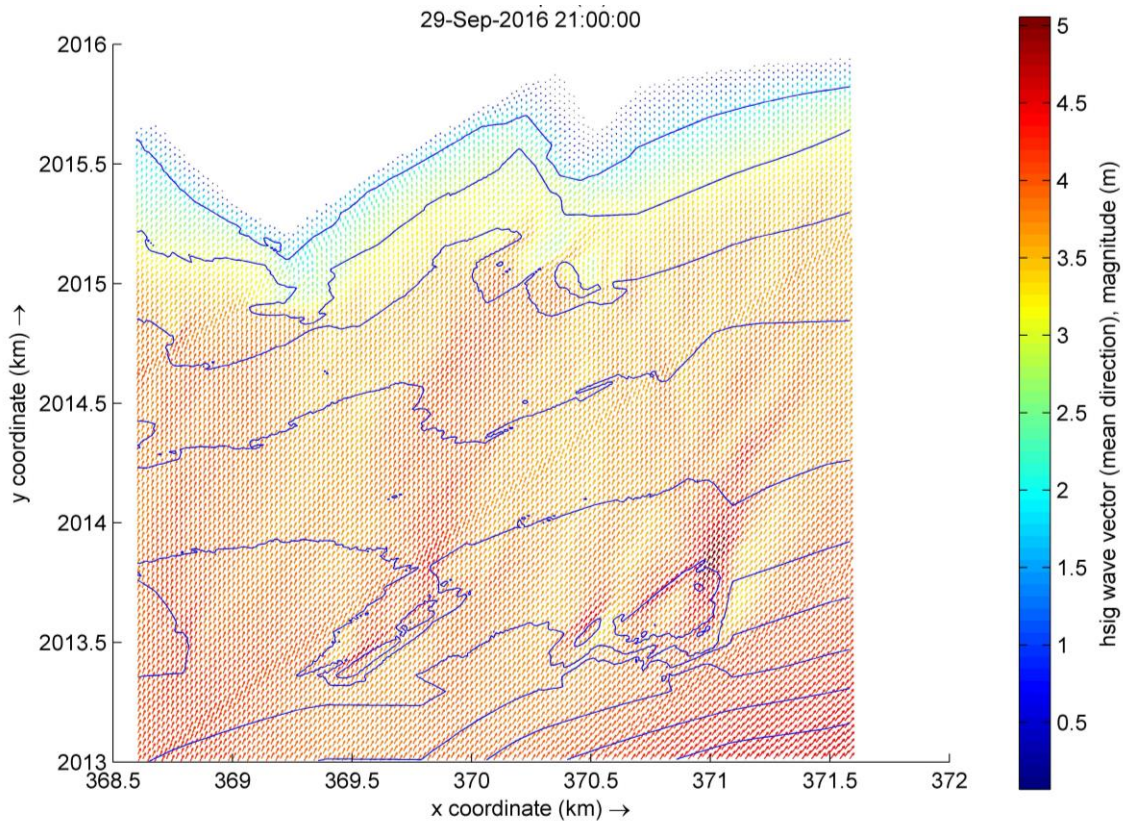


Ilustración 4-19 – Altura de ola significativa en la malla “GRID003”

Esta malla muestra un comportamiento del oleaje diferente a los demás debido a la nueva dirección del oleaje en este estado de mar, haciéndose evidente la refracción del oleaje, pero en el sentido oeste-este, reflejando menor variación de la dirección del oleaje hasta acercarnos a la costa. La altura del oleaje ya se muestra Enel contorno de este dominio un 60% reducido al acercarnos al emplazamiento.

4.1.3.3.2 Condición modificada

Para la condición modificada se aplican las profundidades modificadas debido al dragado y las condiciones de contorno, no se hace evidente alguna modificación al presentar los resultados de la simulación en la malla “GRID001” debido a la falta de resolución que tiene esta malla:

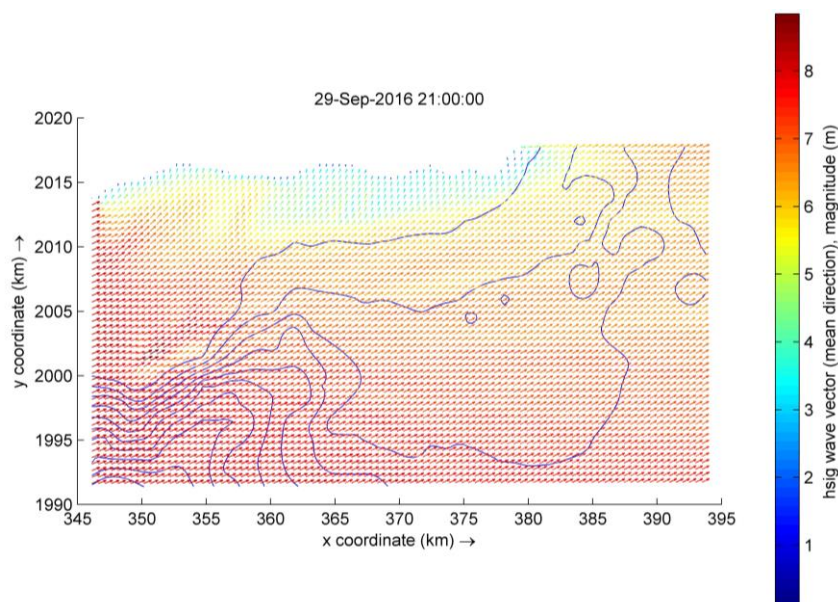


Ilustración 4-20 – Altura de ola significativa en la malla “GRID001”

El comportamiento de la propagación del oleaje se refleja una influencia de las obras en el emplazamiento “GRID003”, mostrando un comportamiento ligeramente alterado en la zona próxima al muelle, percibiéndose ligeramente la influencia de las condiciones de contorno establecida en los pilotes en la parte central del dominio.

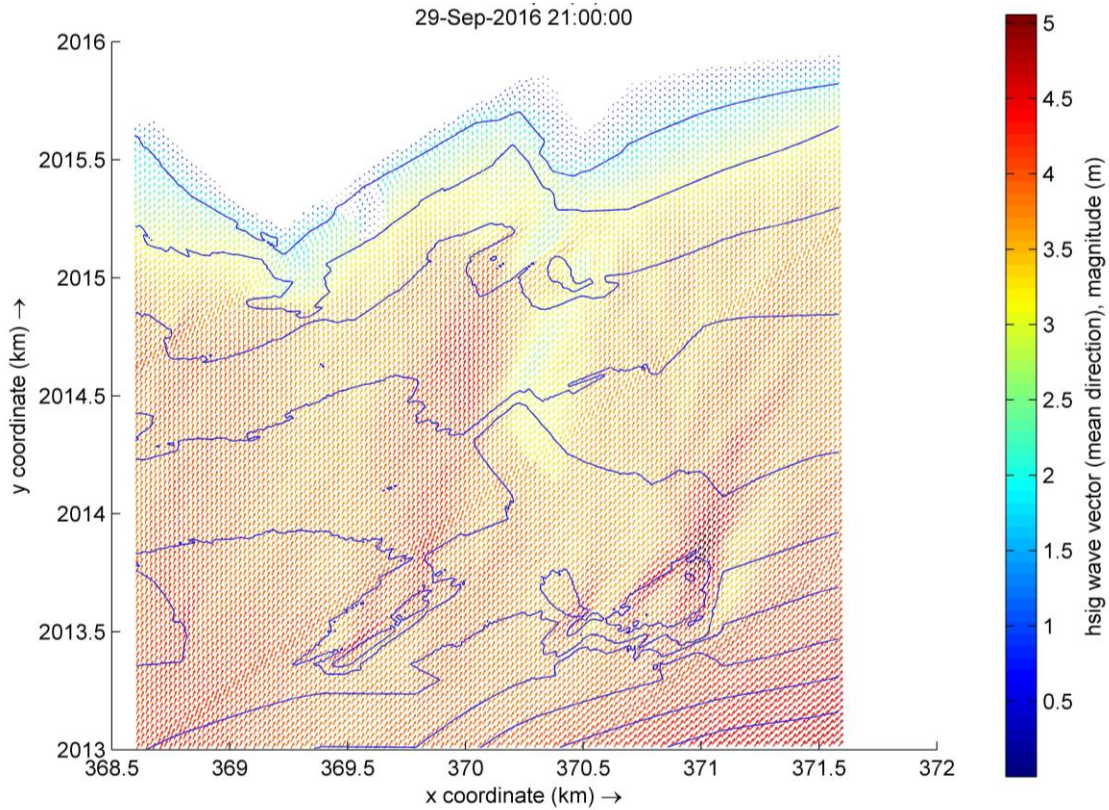


Ilustración 4-21 – Altura de ola significativa en la malla “GRID003”

4.1.3.3 Comparativo

Al presentarse ambos resultados sobre la altura significativa de la ola, similar al escenario extremal este, se hace evidente el impacto de las obras en el muelle en la propagación del oleaje. Dada la diferencia de la dirección del oleaje entre estos escenarios, el sentido de la propagación de la diferencia se presenta en línea con la dirección del oleaje en la zona, llegando a una reducción en el núcleo entorno al 20% de la altura que presenta el escenario natural hasta alcanzar la zona que se muestra alterada debido al ajuste de ambas batimetrías.

Adicional a estas alteraciones identificadas, el comportamiento en el límite del dragado refleja un aumento con relación al al escenario normal, alcanzando un 5% en la altura del oleaje significativo en comparación con el escenario natural que se entiende que como consecuencia de la refracción debido a la diferencia de altura de profundidad en la batimetría.

En el gráfico a continuación se muestran las diferencias porcentuales de altura del escenario modificado con relación al escenario natural, donde los valores negativos porcentuales muestran una altura de ola reducida después de las actuaciones, mientras los valores positivos reflejan un aumento debido a estas actuaciones.

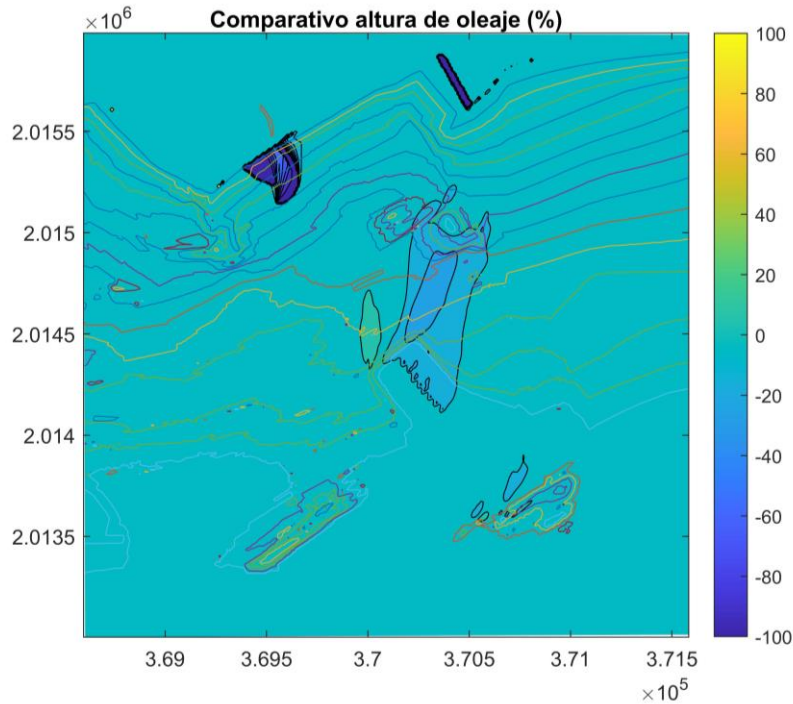


Ilustración 4-22 – Comparativo de alturas de ola significativa en ambos escenarios en la malla “GRID003”

A continuación, se muestran los perfiles transversales 1 y 2 que se trazan en la playa Catalina donde se reflejan las alturas de ola en ambos escenarios resaltándose la similitud entre estos. Mientras los perfiles 3 y 4, que se trazan en la playa Nizao, muestran un perfil fuera del rompeolas donde tampoco se refleja alguna diferencia de las alturas de oleaje y una sección dentro del rompeolas que muestra el escenario modificado con un oleaje significativamente reducido debido al ángulo de incidencia, que logra propagarse hasta dentro de los rompeolas:

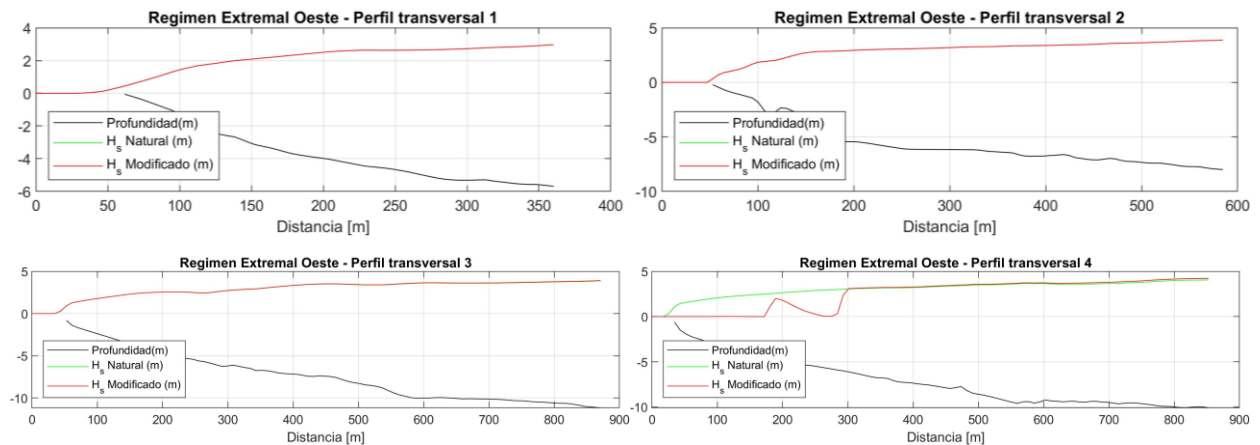


Ilustración 4-23 – Secciones de alturas de ola significativa en ambos escenarios en la malla “GRID003”

La diferencia en la batimetría entre los escenarios modelados también muestra una ligera diferencia en la influencia del oleaje después de las actuaciones en el muelle, donde se muestra que la influencia de las actuaciones en el muelle discipan suficiente energía como para reducir puntualmente el porcentaje del oleaje que rompería en el límite noroeste del dragado.

En el gráfico a continuación se muestran las diferencias porcentuales de la proporción del oleaje que rompe del escenario modificado con relación al escenario natural, donde los valores negativos porcentuales muestran una menor proporción del oleaje rompiendo después de las actuaciones, mientras los valores positivos reflejan un aumento en esta proporción debido a estas actuaciones.

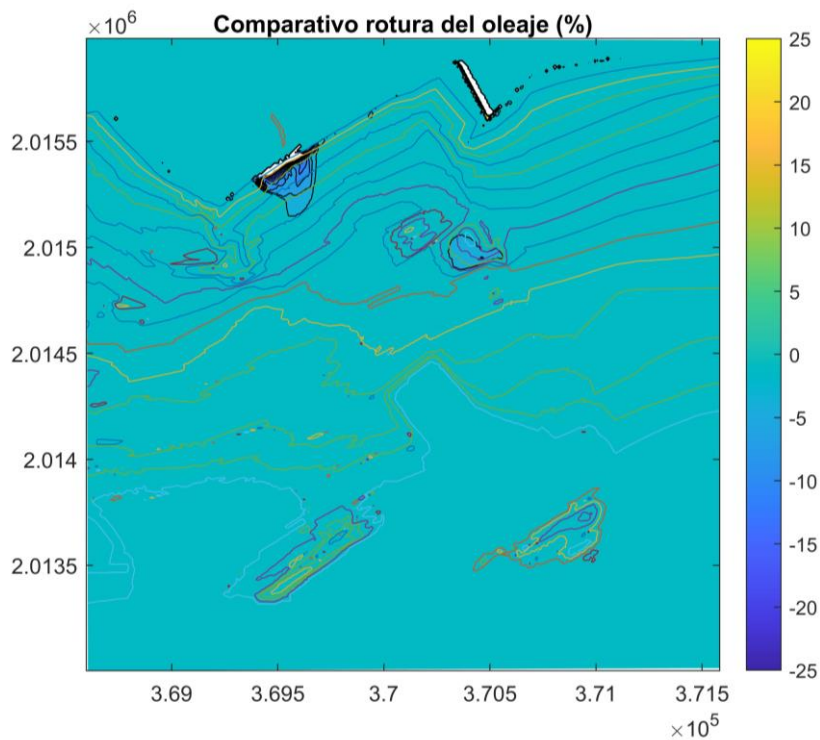


Ilustración 4-24 – Comparativo de porcentaje de rotura en ambos escenarios en la malla “GRID003”

Al analizar la dirección al oleaje de manera similar a los escenarios anteriores, donde se muestran en los siguientes gráficos con el vector azul representando la dirección en su condición natural y el vector rojo la dirección en la condición alterada. Se enfocan las capturas a las áreas del muelle y la punta, donde las modificaciones tomarán lugar, en estos se reflejan las direcciones más alteradas en el limite superior del dragado, mientras la zona del limite costero se presenta sin alteraciones.

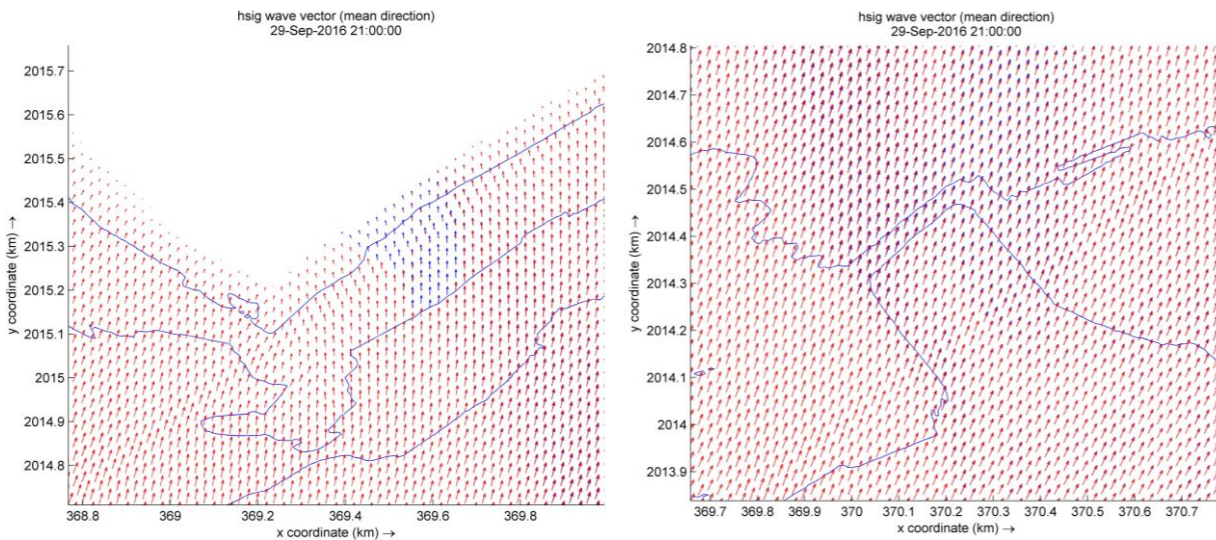


Ilustración 4-25 – Dirección media de oleaje en ambos escenarios en la malla “GRID003”

Al estudiarse los diferentes aspectos de interés para la propagación del oleaje, el hecho de que este evento extremal provenga desde una dirección del oleaje que no este alineada con las obras marítimas realizadas, hace que en el emplazamiento directamente no se vean afectadas las condiciones próximas a la costa. Esto no exime de influencia en las zonas próximas al emplazamiento de interés, que no se puede reflejar la extensión de la influencia debido a la falta de levantamientos de precisión en la zona de propagación del oleaje alterado en este escenario.

4.2 Transporte longitudinal de sedimentos

Para la determinación de las tasas de transporte en el emplazamiento será usada la formulación desarrollada por Coastal Engineering Research Center (CERC), la cual considera el flujo de energía unitario en la línea de costa y tiene la siguiente expresión:

$$Q_L = \frac{\rho K \sqrt{g}}{16 \sqrt{\gamma} (\rho_s - \rho) (1 - p)} H_b^{5/2} \sin(2\alpha_b)$$

Ecuación 7 – Ecuación para determinación del coeficiente de transmisión

Donde:

- ρ Densidad del agua (kg/m³)
- ρ_s Densidad de las partículas (kg/m³)
- γ Índice de rotura
- g Gravedad (m/s²)
- p Porosidad de la partícula
- H_b Altura de onda en rotura (m)
- α_b Ángulo en rotura

Debido a que la formula no considera la influencia de un valor crítico del tamaño de las partículas y de la altura de onda, las tasas obtenidas por este método serán potenciales, describiendo la tendencia de movimiento de las partículas en diferentes secciones a lo largo de la costa siendo evaluada y permitiendo realizar una comparación numérica de los potenciales entre las condiciones consideradas.

En este planteamiento se estudiarán 5 secciones representativas que abarquen el área de estudio, en conjunto con las obras realizadas, siendo la sección 1 la del límite este hasta llegar a la sección 5 en el oeste:

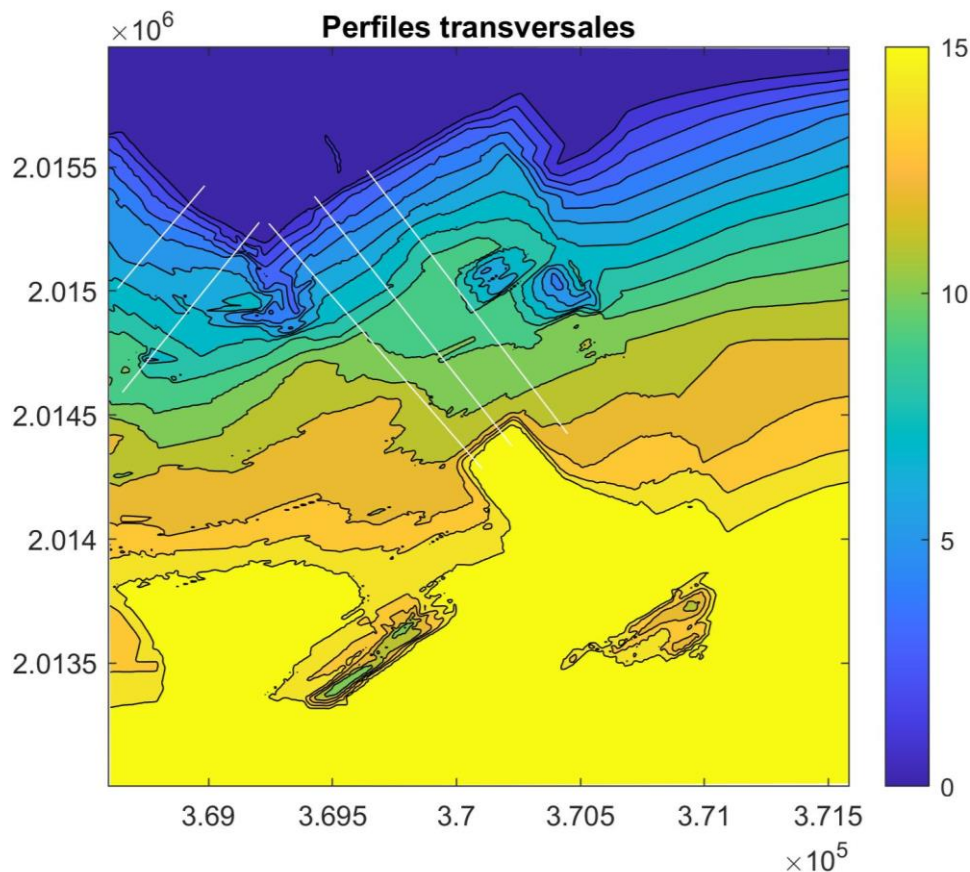


Ilustración 4-26 – Identificación de secciones en la malla “GRID003”

Estas secciones se visualizan mejor en una vista satelital, representando las secciones 1 y 2 en la playa Catalina, y las secciones 3, 4 y 5 en la playa Nizao:

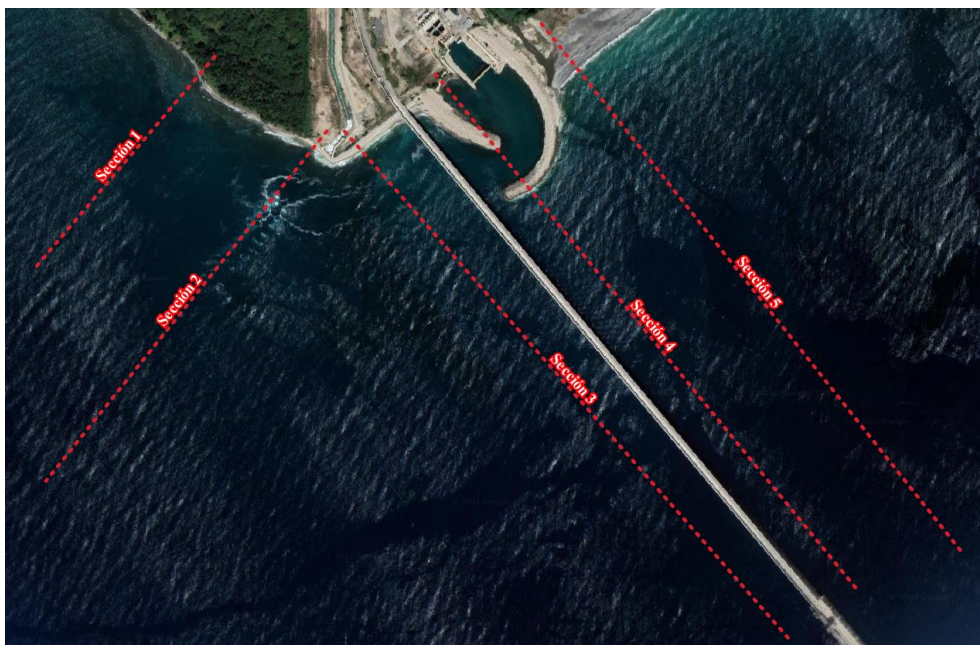


Ilustración 4-27 – Identificación de secciones en vista satelital actual

4.2.1 Determinación de parámetros de rotura

Como indica el CERC, los valores esenciales para la evaluación del transporte de sedimentos serán los parámetros de rotura en cada momento del análisis, debido a la gran influencia que tienen la rotura y el ángulo en este momento, que variará según el ángulo de incidencia del oleaje en ese momento y la altura de onda impuesta en la condición de contorno.

Para conocer el comportamiento en rotura del dominio y las secciones identificadas como representativas se extraen los datos obtenidos de los diferentes análisis que a su vez representarían las condiciones normales y extremas que se han podido observar. Donde la extracción de estos parámetros se consigue mediante una aproximación de la intersección de las líneas que representan los valores de altura de onda en rotura y la representación del perfil de rotura a partir del índice de rotura y la profundidad de la sección será el punto donde inicial la rotura como se representa a continuación para el oleaje incidente en ambas condiciones.

El índice de rotura considerado variará según la sección y la condición para representar mejor el comportamiento, donde la sección 4 que abarca el rompeolas no tendrá rotura en la costa por lo que su variación se presentará mucho más variada:

Tabla 4-1.- Coeficientes de rotura considerados

Regimen	Condición	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4	Sección 5
Extremal Este	Natural	0.57	0.60	0.55	0.78	0.60
	Modificada	0.60	0.60	0.55	0.50	0.60
Extremal Oeste	Natural	0.57	0.62	0.55	0.78	0.60
	Modificada	0.57	0.62	0.48	0.70	0.60
Normal	Natural	0.60	0.62	0.48	0.50	0.70
	Modificada	0.57	0.62	0.48	0.50	0.70

Al identificar el punto del oleaje de rotura, se extraen los datos de altura de rotura y se calcula el ángulo de rotura con relación al alineamiento de la costa para la determinación del potencial de transporte que tendrían las diferentes secciones.

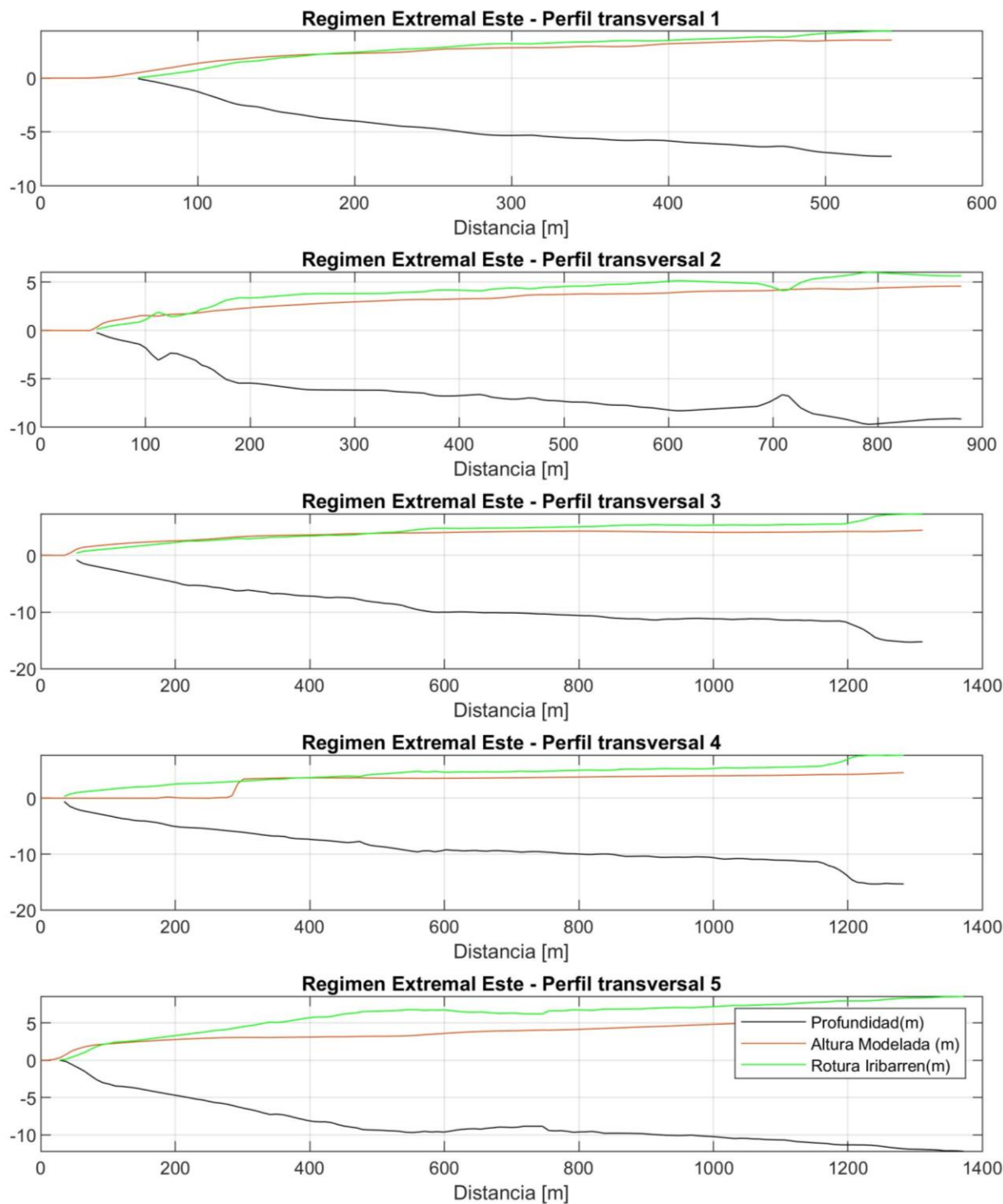


Ilustración 4-28 – Altura de rotura en la condición extremal Este

Esta extracción es realizada análogamente para los diferentes regímenes analizados Condición Modificada del dominio, con el fin de conocer el comportamiento al implementarse las obras en la costa y como este se ha alterado.

4.2.2 Regimen normal

Para el régimen normal se alcanzan los siguientes valores desde la extracción, donde el sentido negativo en las tasas potenciales de extracción sugiere un transporte desde el este al oeste:

Tabla 4-2.- Altura de rotura y tasas potenciales de sedimentación del régimen normal

Régimen Normal						
Regimen	Condición	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4	Sección 5
Hb	Natural	0.48	0.83	0.87	0.85	0.70
	Modificada	0.46	0.77	0.80	0.00	0.70
QI	Natural	-3.17E-05	-1.42E-04	-3.80E-05	-2.79E-05	-5.47E-06
	Modificada	-2.98E-05	-1.18E-04	-1.83E-05	2.03E-16	-6.19E-06

Independiente de la magnitud de los valores alcanzados para las tasas potenciales, lo que más nos interesará será el gradiente entre las secciones comparadas, por lo que su comparación será la que determinará si se ha alterado el comportamiento del transporte de sedimentos en la zona:

Tabla 4-3.- Tendencia del transporte de sedimentos del régimen normal

Régimen Normal					
Regimen	Condición	Sección 1->2	Sección 2 -> 3	Sección 3->4	Sección 4 ->5
ΔQI	Natural	-1.10E-04	1.04E-04	1.01E-05	2.24E-05
	Modificada	-8.82E-05	9.96E-05	1.83E-05	-6.19E-06
Tendencia	Natural	Sedimentación	Erosión	Erosión	Erosión
	Modificada	Sedimentación	Erosión	Erosión	Sedimentación

Como se puede observar en las tendencias calculadas, en el régimen normal se refleja lo que aparenta lógico en visualmente para el comportamiento entre la sección 4 que tendrá el rompeolas y la sección 5, donde hay un cambio de erosión a sedimentación, pues el rompeolas actúa como un abrigo que evita el paso de los sedimentos, que se muestra en la altura del oleaje de rotura en esta zona.

En el caso del tramo 1-2, la tasa potencial de transporte de sedimentos es mayor para la punta (sección 2) que para el tramo recto (sección 1). En vista de que la sección 2 está en la punta y se traza justo después de un cambio de dirección en la costa, el ángulo incidente del oleaje se muestra mucho más elevado lo que hace que este resultado sea coherente, pero no representativo al comportamiento de esta línea de costa.

4.2.3 Régimen extremal este

Para el régimen extremal este se alcanzan los siguientes valores desde la extracción, donde el sentido negativo en las tasas potenciales de extracción sugiere un transporte desde el este al oeste:

Tabla 4-4.- Altura de rotura y tasas potenciales de sedimentación del régimen extremal este

Régimen Extremal Este						
Regimen	Condición	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4	Sección 5
Hb	Natural	2.33	1.51	3.41	2.16	2.61
	Modificada	2.22	1.51	2.53	0.00	2.25
QI	Natural	-1.82E-03	-6.56E-04	1.36E-03	2.22E-04	2.85E-04
	Modificada	-1.64E-03	-6.52E-04	3.44E-04	0.00E+00	1.10E-04

Tabla 4-5.- Tendencia del transporte de sedimentos del régimen extremal este

Régimen Extremal Este					
Regimen	Condición	Sección 1->2	Sección 2 -> 3	Sección 3->4	Sección 4 ->5
ΔQI	Natural	1.17E-03	-7.00E-04	1.13E-03	6.25E-05
	Modificada	9.90E-04	3.09E-04	3.44E-04	1.10E-04
Tendencia	Natural	Erosión	Erosión	Sedimentación	Erosión
	Modificada	Erosión	Erosión	Sedimentación	Erosión

En esta situación extremal se muestran varios cambios con relación al régimen normal, que se atribuyen principalmente a la importante diferencia en la altura del oleaje. En esta situación, ambos escenarios del tramo 1-2 se muestra con tendencia de erosión debido al cambio significativo de la altura de oleaje.

En el caso del tramo 2-3 presenta la particularidad de que ambas secciones muestran sentidos contrarios de transporte de sedimentos, esto es de esperarse debido al cambio de dirección en la costa. Esto sugiere que el transporte de sedimentos va longitudinalmente hacia el norte geográficamente, siendo la punta el punto de inflexión para el transporte de estos sedimentos.

Para el tramo 4-5 no se muestra una variación en las tendencias del transporte de sedimentos, pues este tramo en su condición natural ya presentaba potenciales de transporte menores para la sección 5 en comparación con la 4, por lo que para este escenario si hacemos referencia a su diferencia en la magnitud de la sedimentación, que pasaría a ser 75% mayor casi duplicando su tasa de sedimentación en este escenario.

4.2.4 Régimen extremal oeste

Para el régimen extremal oeste se alcanzan los siguientes valores desde la extracción, donde el sentido negativo en las tasas potenciales de extracción sugiere un transporte desde el este al oeste:

Tabla 4-6.- Altura de rotura y tasas potenciales de sedimentación del régimen extremal oeste

Régimen Extremal Oeste						
Regimen	Condición	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4	Sección 5
Hb	Natural	2.63	2.85	2.53	1.66	2.09
	Modificada	2.63	2.85	3.51	0.00	2.33
QI	Natural	-1.87E-03	-2.48E-03	2.27E-03	5.90E-04	1.21E-03
	Modificada	-1.87E-03	-2.48E-03	6.03E-03	0.00E+00	1.53E-03

Tabla 4-7.- Tendencia del transporte de sedimentos del régimen extremal oeste

Régimen Extremal Oeste					
Regimen	Condición	Sección 1->2	Sección 2 -> 3	Sección 3->4	Sección 4 ->5
ΔQI	Natural	-6.09E-04	4.75E-03	-1.68E-03	6.18E-04
	Modificada	-6.08E-04	8.51E-03	-6.03E-03	1.53E-03
Tendencia	Natural	Sedimentación	Erosión	Sedimentación	Erosión
	Modificada	Sedimentación	Erosión	Sedimentación	Erosión

En esta situación extremal que se presenta con una diferencia de prácticamente 180 grados con relación a la este, consecuentemente presenta cambios en el transporte de sedimentos. Como en el tramo 1-2 se muestra una diferencia con relación a la condición extremal este, donde en este análisis se muestra una sedimentación en este tramo.

Sin embargo, en el tramo 2-3 se muestra un comportamiento similar con relación al escenario extremal este, donde la punta sirve como una línea divisoria en el transporte de sedimentos y haciendo que tanto la playa Catalina como la Nizao presenten transporte longitudinal hacia el oeste y el este respectivamente. Este comportamiento se muestra similar también en los tramos 3-4 y 4-5, que en este régimen presentan potenciales mucho más elevados, pero mantienen el mismo sentido que sedimentaría en el límite del rompeolas oeste y erosionaría en el rompeolas este.

5 CONCLUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Las actuaciones en las costas siempre traerán consecuencias en su entorno, ya sea de manera inmediata como a mediano o largo plazo, por lo que el estudio de estas será siempre imprescindible para evaluar las consecuencias económicas y sociales que conllevaría su ejecución. El responsable de la ponderación del balance de beneficio contra consecuencias de las actuaciones siempre debe ser una entidad imparcial como lo sería el estado, por lo que deben estar siempre sujetas a su estudio y aprobación por el mismo.

Para llevar a cabo este estudio se agotaron todas las fuentes de información conocidas por el autor y que se pudieran recabar a lo largo del desarrollo de este, donde cabe resaltar que la mayoría de las fuentes de información para la modelación no corresponden de fuentes de datos nacionales, si no de fuentes de datos abiertas internacionales. Esto muestra que las fuentes de información nacionales no son suficientes para permitir la evaluación certera de las consecuencias de este tipo de información, siendo dependientes de los levantamientos realizados y presentados por terceros de manera puntual en cada caso.

Partiendo de las fuentes de datos obtenidas, donde los datos de los estados de mar leídos provienen de una boya de otro gobierno considerablemente retirada del emplazamiento y que la batimetría de la zona hasta llegar al emplazamiento proviene de una base de datos macro sin valores fiables próximos a las costas, el modelo desarrollado solo permite dar una idea del comportamiento de los estados de mar en la zona sin tener datos en el emplazamiento que permitan poder llegar a conclusiones.

Con estas limitaciones, en el caso de las actuaciones realizadas en este desarrollo, la implementación del rompeolas incide de manera directa con el transporte longitudinal de sedimentos que resultará en sedimentación en el lado este del rompeolas este y en el lado oeste del rompeolas oeste. Esto, a pesar de ser evidente en la evolución costera realizada con las imágenes satelitales y por el comportamiento normal de la dinámica litoral en la implementación de un rompeolas, permite que los resultados de la modelación se observen como válidos.

Con relación a las otras actuaciones realizadas, no se puede observar una consecuencia importante en la propagación del oleaje en el entorno estudiado. La incidencia del muelle, con la interacción de sus pilotes consideradas y el dragado que fue realizado, refleja una reducción en la altura del oleaje que se transmite en la zona, llegando a presentar alturas hasta un 20% menores en el escenario modificado para el régimen extremal, mientras no presenta variaciones significativas para el régimen normal.

El próximo paso de investigación, partiendo de las condiciones observadas en este estudio y de una batimetría detallada más extensa que la disponible en el momento, sería la determinación de la zona de influencia en los diferentes regímenes, pues las diferentes secciones que se pudieron considerar en este estudio no muestran un punto donde se hagan estables las lecturas entre el escenario natural y el modificado.

Adicional a esto, la premisa con la que se desarrolla este estudio que parte de los datos observados en la boya debe ser contrastada con mediciones en campo para permitir una posible calibración de los datos modelados, y confirmar la fiabilidad de la implementación de los datos provenientes de un punto de lectura tan distante que no son recomendados para la implementación del modelo SWAM usado en este estudio.

REFERENCIAS

- Consorcio IGME-BRGM-INYPSA. (2010). *Memoria Hoja de Nizao (6170-I), Mapa Geológico de la República Dominicana*. Santo Domingo: Servicio Geológico Nacional.
- Copernicus. (30 de Enero de 2022). *Copernicus Marine Service*. Obtenido de <https://marine.copernicus.eu/>
- Deltares. (2022). *Delft3D-WAVE User Manual*. Delft: Deltares.
- General Bathymetric Chart of the Oceans. (2020). *Overview: GEBCO*. Obtenido de GEBCO: https://www.gebco.net/about_us/overview/
- Hayashi, T., Hattori, M., Kano, T., & Shirai, M. (1966). Hydraulic Research on the Closely Spaced Pile Breakwater. *Coastal Engineering in Japan*, 9, 107-117.
- Instituto Cartográfico Militar. (2022). *Cartas Náuticas*. Obtenido de Instituto Cartográfico Militar: <https://icm.mil.do/productos/cartas-nauticas/>
- National Data Buoy Center. (30 de Enero de 2022). *National Data Buoy Center*. Obtenido de National Oceanic and Atmospheric Administration: <https://www.ndbc.noaa.gov/>
- National Hurricane Center. (2017). *Tropical Cyclone Report - Hurricane Matthew (AL142016)*. United States: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).
- Oficina Nacional de Estadística. (2020). *Dominicana en Cifras 2020*. Santo Domingo: ONE.
- Oficina Nacional de Meteorología. (30 de Enero de 2022). *ONAMET*. Obtenido de www.onamet.gob.do
- Seelig, W. (1979). Effects of breakwaters on waves: laboratory tests of wave transmission by overtopping. *Proceedings Conference Coastal Structures*, (págs. 941-961). New York.
- Seelig, W., & Ahrens, J. (1981). *Estimation of Wave Reflection and Energy Dissipation Coefficients for Beaches, Revetments and Breakwaters*. Fort Belvoir, Va: Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineers.