

MEMORANDUM

To: IFC

From: Benjamin Hernandez
Kélian Auboiroux
Shiromal Fernando

Date: Julio 2024

Subject: Estudio de Condiciones Normales de Oleaje Puerto Caldera, Costa Rica

M&N Job No.: 220095

1 Introducción

El International Finance Corporation (IFC) ha instruido a Moffatt & Nichol (M&N) realizar un estudio de las condiciones de oleaje para apoyar el desarrollo de las alternativas de expansión del Puerto de Caldera, Costa Rica, específicamente para los sitios que podrían potencialmente estar afectados a *downtime* por oleaje. El objetivo del estudio corresponde a apoyar el desarrollo de las opciones de expansión del terminal, específicamente para el terminal de graneles.

Las potenciales alternativas de expansión se pretenden ubicar en torno al terminal existente de graneles o puesto número cuatro. Como se muestra en la Figura 1-1, se observa la configuración en planta del puerto, y del terminal de graneles abrigados por un rompeolas ubicado al oeste del puerto.

Para lograr el objetivo anteriormente definido, el estudio se divide en los siguientes capítulos:

1. El presente apartado presenta el objetivo del estudio además de la metodología empleada
2. El capítulo 2 presenta la revisión de los antecedentes provistos por el cliente. La cual comprende campañas de medición de oleaje, levantamientos batimétricos y niveles de mareas.
3. En el capítulo 3, se encuentra los resultados del clima normal de oleaje fuera del rompeolas de abrigo, y la descripción del modelo espectral de oleaje utilizado. Esta sección incluye las comparaciones entre los resultados de modelo espectral y las mediciones disponibles.
4. El estudio de la agitación dentro de la dársena del puerto se presenta en el capítulo 4, donde se encuentra los resultados del clima normal de oleaje en el sitio de atraque del terminal de graneles y la descripción del modelo de propagación utilizado. Esta sección incluye además un apartado con un análisis para las potenciales opciones de expansión para un nuevo sitio de atraque de graneles.
5. Finalmente, el capítulo 5 reúne las conclusiones y recomendaciones del estudio.



Figura 1-1: Sitio de estudio

1.1 Metodología

Para la obtención de las condiciones de oleaje dentro del puerto, específicamente en el sitio de atraque de graneles, M&N utilizó la metodología resumida en la figura a continuación, la cual muestra cómo se relacionan los componentes principales del estudio:

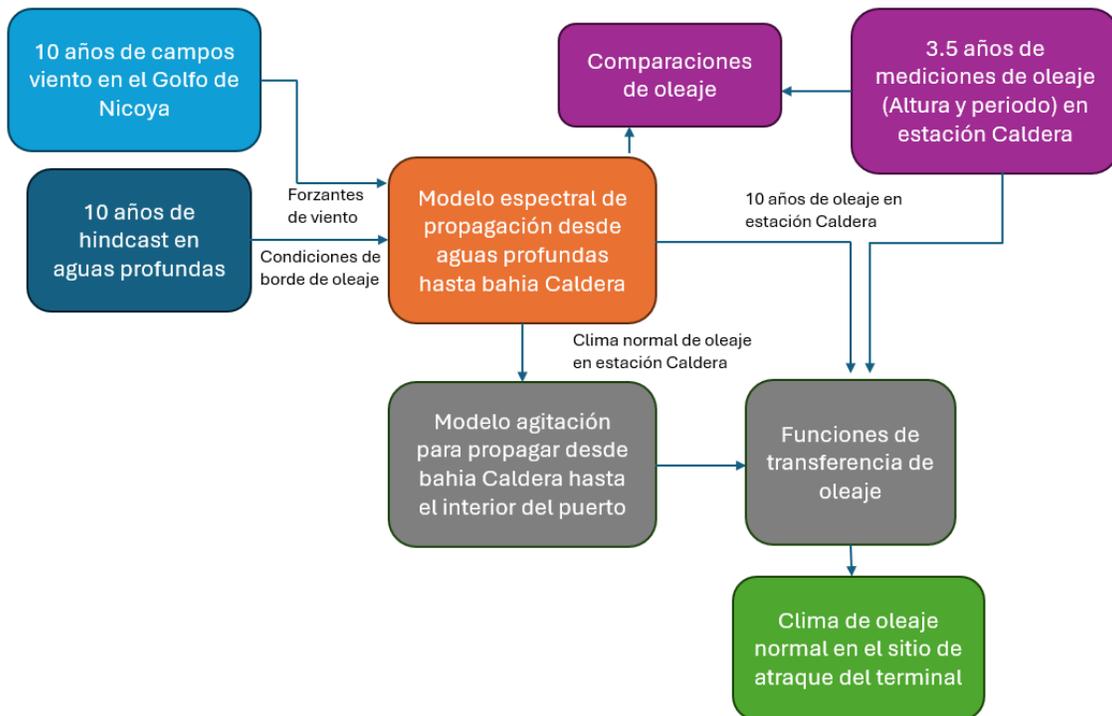


Figura 1-2 Esquema de la metodología empleada

2 Revisión de antecedentes

Este capítulo presenta la información proporcionada por cliente que M&N utilizó para el desarrollo del presente estudio, las cuales incluyen lo siguiente:

1. Mediciones de oleaje,
2. Levantamientos batimétricos y, finalmente,
3. Datum de marea

Los apartados a continuación detallan la información revisada.

2.1 Mediciones de oleaje

M&N recibió por parte del cliente un conjunto de campañas de mediciones de oleaje (ver Ref. 1) para dos ubicaciones (ver Figura 2-1);

1. Medición de oleaje mediante un ADCP fuera del Golfo de Nicoya, en Cabo Blanco desde 2014 hasta 2022 (alrededor de 9 años de registros). La información recibida corresponde a archivos de texto que contienen series de tiempo de parámetros de resumen de oleaje, incluyendo altura significativa, periodo peak y dirección media.
2. Mediciones de oleaje dentro del Golfo de Nicoya en Bahía Caldera desde 2014 hasta mediados de 2017 (alrededor de 3.5 años de registros). Estas corresponden en su mayoría a registros medidos con una boya. De igual manera que en el caso anterior, solo se cuenta con series de tiempo de parámetros de resumen, en este caso altura significativa y periodo peak. Estos registros no contienen direcciones de oleaje.

La tabla a continuación muestra las coordenadas de los sectores donde se instalaron los equipos, los parámetros proporcionados, duración de los estados de mar medidos y los intervalos de tiempo de las distintas campañas. Adicionalmente la Figura 2-2 muestra la cobertura temporal de los datos disponibles.

Tabla 2-1: Resumen de las campañas de medición disponibles

Base de datos	Cabo Blanco		Bahía Caldera	
	Lat	Lon	Lat	Lon
Coordenadas (EPSG 4326, WGS 84)	9.5527°	-85.1300°	9.9088°	-84.7333°
Parámetros disponibles	Hs, Tp, Hm0, Hmean, J10, Hmax, Tm02, Tz, T3, T10, Tmax, Dir		Hs, Tp, Hmax, H1/10, Hm0, Tm02	
Intervalo de los registros	1-3h		1-3h	
Periodos de las distintas campañas de medición	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nov 2014 – Nov 2022 2. Nov 2018 – Nov 2019 3. Nov 2019 – Nov 2020 4. Nov 2020 – Nov 2021 		<ol style="list-style-type: none"> 1. Jan 2014 – Nov 2014 2. Mar 2015 – Abr 2015 3. Abr 2015 – Nov 2015 4. Nov 2015 – Abr 2016 5. Abr 2016 – Nov 2016 6. Nov 2016 – Mar 2017 7. Abr 2017 – Nov 2017 	



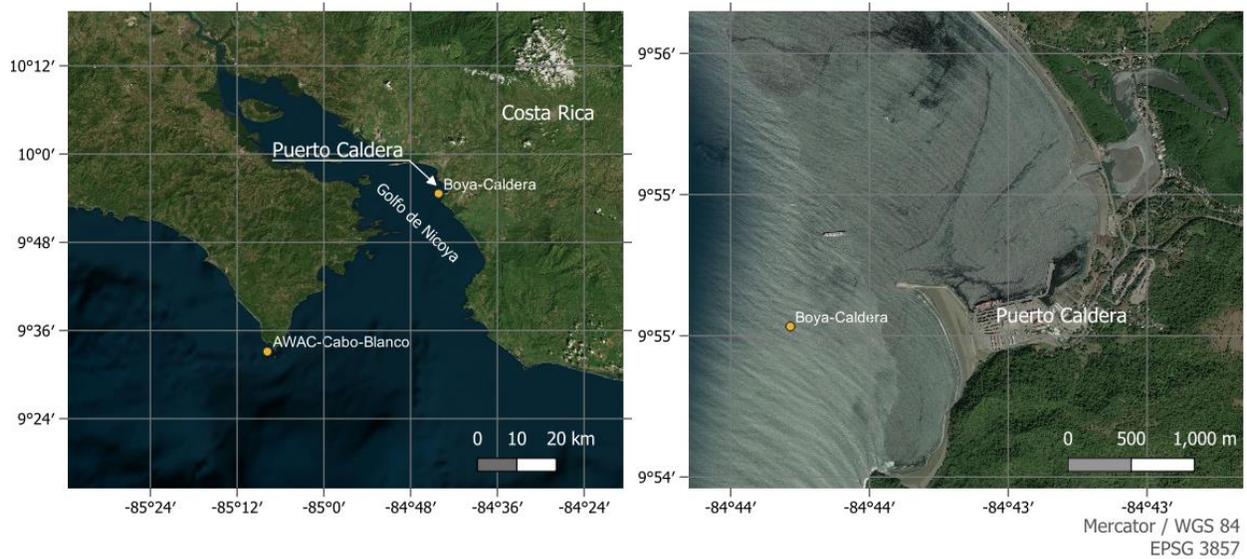


Figura 2-1: Ubicación de las mediciones de oleaje

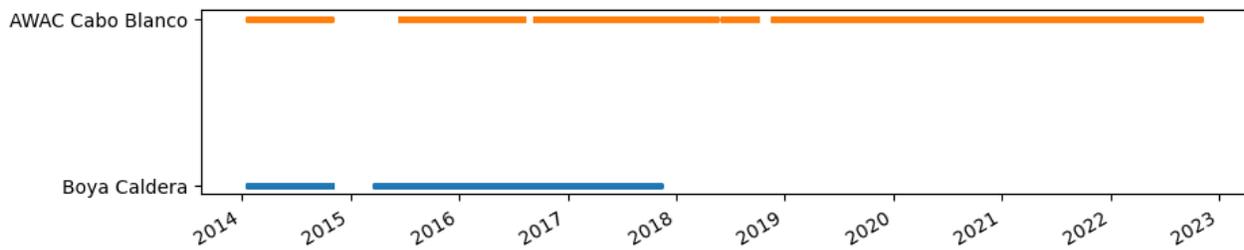


Figura 2-2: Cobertura temporal de los registros de oleaje para ambas ubicaciones

Los parámetros proporcionados de las distintas campañas fueron combinados e inspeccionados. Se logro identificar varios valores atípicos, específicamente cuando los parámetros presentan variaciones que son físicamente imposibles. Al contrastar las mediciones coincidentes en tiempo fuera y dentro del golfo, se observan inconsistencias entre las distintas campañas de medición, especialmente para el año 2014 donde las alturas fuera del golfo son mayores comparadas con el resto de los registros, mientras que los periodos son menores.

En base a lo anterior, se decidió no considerar las mediciones en Cabo Blanco, debido que no parecen consistentes entre campañas. La utilización de esta información podría aportar valor en definir el clima de oleaje al largo plazo, especialmente para eventos extremos, pero su utilización requiere una revisión más exhaustiva incluyendo al menos los movimientos del ADPC y los datos crudos provenientes del instrumento para valorar la calidad de las mediciones.

El estudio en adelante empleará solo las mediciones en Bahía Caldera, dichas mediciones también presentan algunos valores atípicos que fueron eliminados de los registros, y aparentes diferencias entre distintas campañas de medición. A pesar de que tampoco se dispone de más información para valorar la calidad de estas mediciones, estas se aceptan debido a que no existen datos disponibles de mejor calidad.

Finalmente se recomienda en etapas posteriores proporcionar más información respecto de las campañas de medición, con el objetivo de valorar la calidad de estas y también del postproceso de los datos crudos.

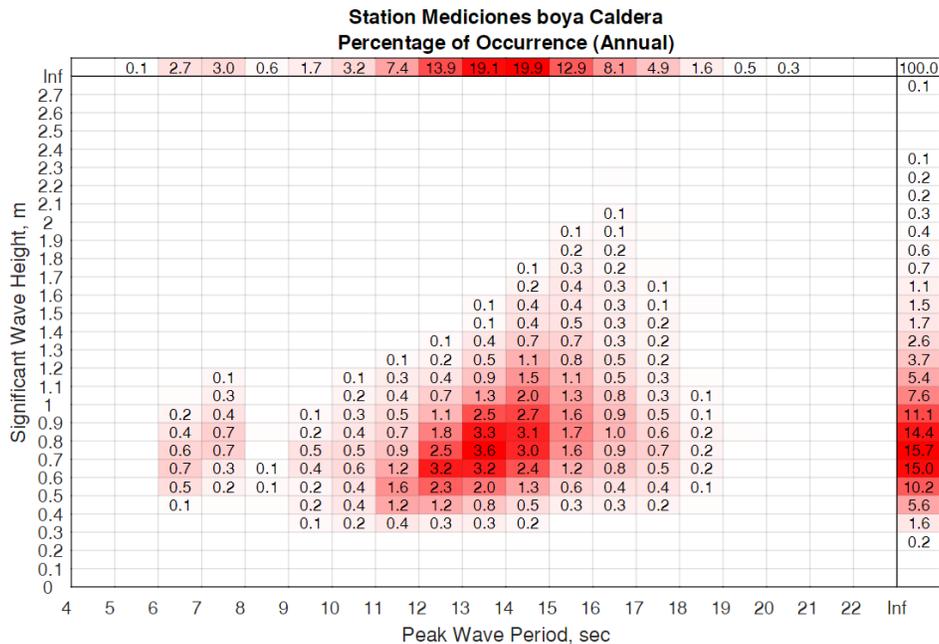


2.1.1 Análisis de las mediciones en Bahía Caldera

El apartado anterior presenta una discusión respecto de la incertidumbre en la calidad de las mediciones efectuadas mediante una boya instalada a las afueras de la dársena del Puerto de Caldera. Sin embargo, debido a que este corresponde al mejor registro y más cercano al puerto, se procede a emplear los datos para su análisis y definición del clima preliminar de oleaje fuera del Puerto de Caldera, dentro del Golfo de Nicoya (ver Figura 2-1).

La Tabla 2-2 muestra los porcentajes de ocurrencia de altura significativa en metros versus periodo peak en segundos. Los porcentajes de ocurrencia menores a 0.1 han sido ocultados. De la tabla es posible apreciar la mayor parte del tiempo las olas penetran hasta fuera de la bahía con alturas en un rango de 0.6 y 0.9 m, mientras que para los periodos las condiciones más frecuentes se encuentran en un rango de entre 12 y 15 s. De la tabla es posible apreciar que las olas de mar de fondo (*swells*) logran penetrar hasta esta parte de golfo y que además alturas mayores a 2.0 m presentan periodos largos de más de 16 s. Adicionalmente se observa un sistema de oleaje local con alturas de hasta 1.2 m con periodos peak de entre 6-8 s de periodo.

Tabla 2-2: Tabla de Incidencia de altura significativa versus periodo peak para las mediciones en Bahía Caldera



Adicionalmente, la distribución de porcentajes de ocurrencia puede ser acumulada para determinar las curvas de excedencia. Estas pueden ser interpretadas como el porcentaje de tiempo que se exceden los valores de la curva. Para Altura significativa se observa que el 10% del tiempo las olas exceden 1.28 m mientras que también un 10 % del tiempo se observan oleaje de más de 16.5 s.



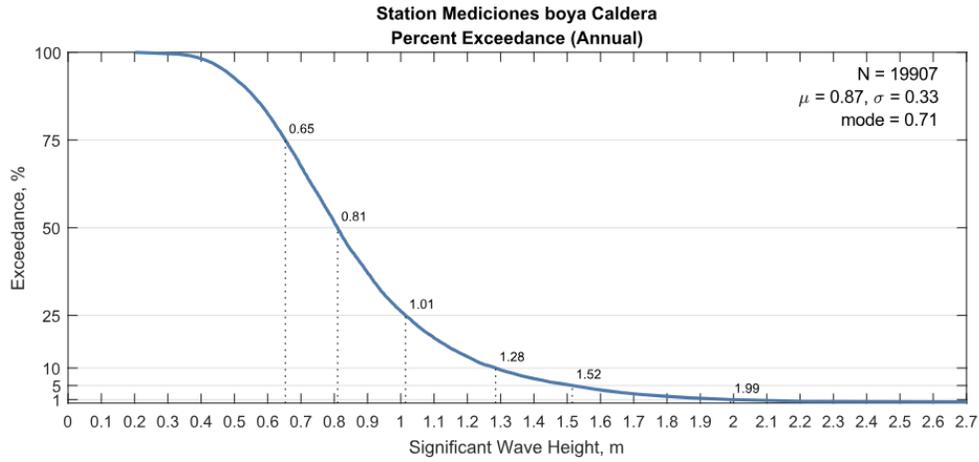


Figura 2-3: Curva de excedencia de altura significativa para las mediciones en Bahía Caldera

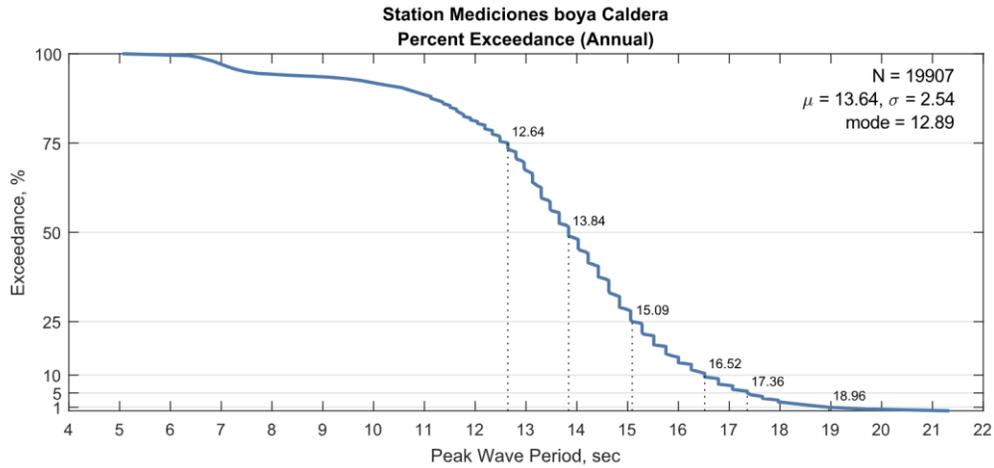


Figura 2-4: Curva de excedencia de periodo peak para las mediciones en Bahía Caldera



2.2 Levantamientos batimétricos

El cliente proporcionó un conjunto de levantamientos batimétricos para el desarrollo de los inputs de los modelos de oleaje, los cuales fueron revisados y se resumen en la tabla a continuación. Existen batimetrías procesadas por año desde 1999 cuando ocurrió un dragado en la dársena del puerto. La extensión y resolución de los levantamientos varía año a año, además del formato de la información.

Tabla 2-3: Resumen de los datos batimétricos disponibles en el Puerto Caldera

Conjuntos de datos separados por periodos	Año del levantamiento e indicación de cambios en el lugar de estudio
Batimetrías 1973-2012	1973, 1976, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1989, 1990, 1995, 1999 – pre dragado, 1999- post dragado, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012
Batimetrías 2012-2018	2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018
Batimetrías 2019-2022	2019, 2020, 2021, 2022

Para la confección de los modelos batimétricos necesarios para los modelos de oleaje, se utilizó la de batimetría de febrero de 2022 y la de diciembre 2021 cuyas sondas están referidas al Nivel Medio de Bajamares de Sicigias (NMBS). La figura a continuación muestra los en rojo las sondas disponibles y los contornos interpolados a partir de los puntos, donde se puede apreciar para la batimetría de 2022 los taludes del dragado además de la profundidad de la dársena, la cual corresponde a 12 m. Mientras que, en el sitio de atraque del terminal de graneles, algunos sectores alcanzan los 13 m de profundidad. El levantamiento de 2021 en cambio comprende toda la bahía.



Figura 2-5: Batimetrías Caldera 2022 (izquierda) y 2021 (derecha), profundidades referidas al NMBS

2.3 Datum vertical de mareas

Se ha tomado de la Referencia 2, valores de datum verticales de marea. Estos valores se emplean para corregir las profundidades del modelo al Nivel Medio del Mar (*Mean Sea Level, MSL*), donde se utilizó la diferencia entre el LWOST (*Low Water Ordinary Spring Tides, LWOST*) equivalente al Nivel Medio de Bajamares de Sicigias (NMBS) y el MSL que corresponde a 1.025 m.

Tabla 2-4: Datum vertical de marea

Datum	Elevación respecto del MSL, m
NHHWL	1.427
NWOST	1.295
MHHW	1.118
MHW	1.025
HWONT	0.755
MSL	0
LWONT	-0.755
MLW	-1.025
MLLW	-1.118
LWOST	-1.295
MLLWL	-1.427

3 Propagación espectral hasta Bahía Caldera

Para analizar las condiciones normales de oleaje en los sitios de atraque, primero de se deben definir las condiciones de oleaje en dentro del Golfo de Nicoya en Bahía Caldera. Para este estudio resulta conveniente propagar la base estadística o hindcast de oleaje desde aguas profundas hasta la ubicación de la boya de medición de oleaje (ver sección 2.1 Mediciones de oleaje). La tabla a continuación presenta las coordenadas de la estación donde se definirá el clima de oleaje operacional o normal.

Tabla 3-1: Ubicación de la estación Caldera

Estación Caldera - Boya Caldera	Coordenadas (EPSG 4326, WGS 84)	
	Latitud	Longitud
	9.9088°	-84.7333°

Durante una fase inicial del estudio se compararon las bases de datos de la NOAA y ERA5, ambas utilizan vientos reanalizados y poseen resoluciones similares, correspondientes a celdas de tamaño igual a 0.25° y salidas del modelo cada 1 hora. Se encontró que ambas presentan valores de altura significativa, periodo y direcciones equivalentes, por lo que se procedió a emplear la base de datos de la NOAA para realizar el presente análisis. Cabe destacar que se reconoce que las características del oleaje en aguas profundas corresponden a oleaje bimodal, es decir, en un estado de mar puede encontrarse más un sistema de oleaje, los cuales tendrán direcciones periodos y alturas distintas entre sí, y penetrarán de manera distinta en el golfo. Por este motivo se utilizó datos espectrales en los bordes del modelo.



Los apartados a continuación presentan una descripción de las siguientes tareas:

- Configuración del modelo espectral de propagación de oleaje
- Resultados de las comparaciones entre el modelo y las mediciones
- Resultados del clima preliminar de oleaje normal en estación Caldera

3.1 Modelo espectral de oleaje

Para la propagación espectral desde aguas profundas se ha utilizado el modelo Mike21SW desarrollado por DHI. MIKE 21 SW es un modelo espectral de tercera generación basado en mallas no estructuradas. El modelo simula el crecimiento, el decaimiento y la transformación de las olas generadas por el viento y el oleaje en zonas costeras y de alta mar (ver Referencia 3).

La Figura 3-1 muestra la malla flexible desarrollada para propagar y generar el oleaje fuera y dentro del Golfo de Nicoya. La malla discretiza las profundidades combinando elementos triangulares y de cuatro lados. La resolución espacial del modelo corresponde a 5km en aguas profundas y aproximadamente 50m en Bahía Caldera.

Para definir las profundidades en el modelo se han combinado las siguientes fuentes de información batimétrica:

1. En Bahía Caldera se han empleado los datos batimétricos proporcionados por el cliente descritos en la sección 2.2
2. Dentro del Golfo de Nicoya se ha utilizado la base datos CMAP, que consiste en una recopilación de datos batimétricos provenientes de cartas náuticas. Estos datos están referenciados al Chart Datum y han sido corregidos al nivel medio del mar MSL. Se realizó una supresión de valores atípicos y una georreferenciación más precisa de la línea de playa.
3. Para la extensión del modelo fuera de Golfo de Nicoya se utilizó GEBCO 2023, el actual corresponde a un modelo batimétrico modelo global del terreno para el océano y tierra, que proporciona datos de elevación, en metros, en una grilla de intervalos de 15 segundos de arco.

Como se ha mencionado anteriormente, estos datos batimétricos han sido combinados para definir un único conjunto de datos que represente las características del lecho marino en Caldera, dentro y fuera del golfo, cuidando que los veriles tengan sentido y que los gradientes de profundidad sean apropiados para las simulaciones de oleaje. La batimetría resultante se muestra en la Figura 3-2.

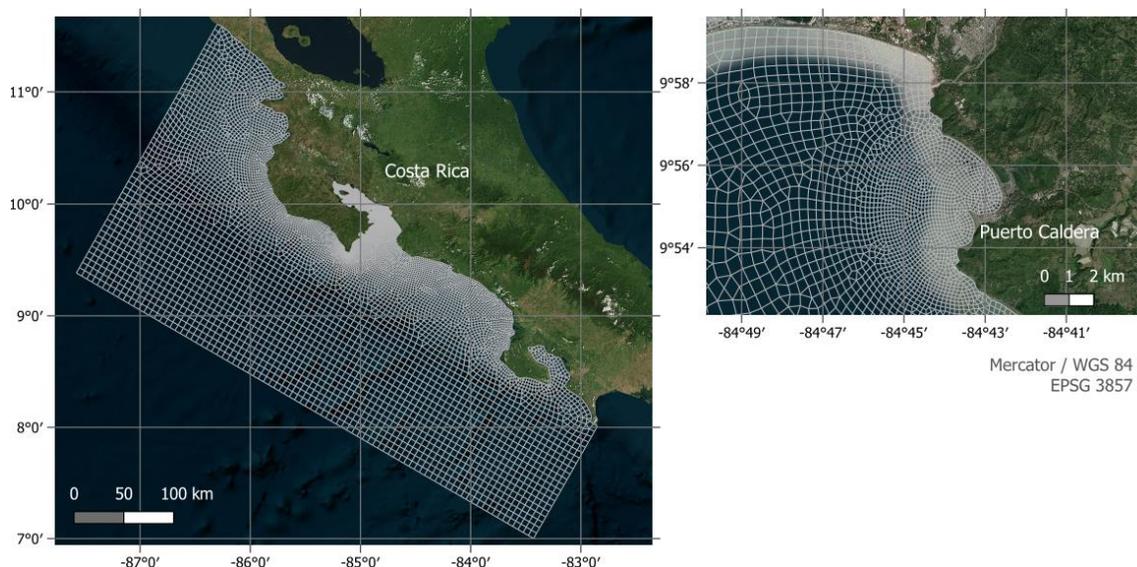


Figura 3-1: Extensión del dominio y malla flexible empleada en Mike21SW

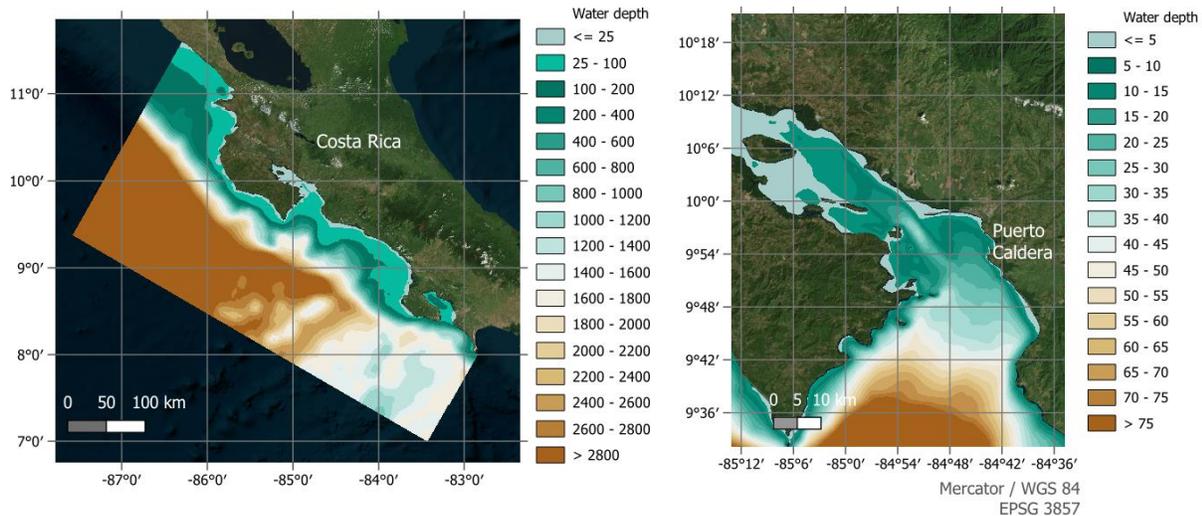


Figura 3-2: Batimetría empleada en el modelo espectral Mike21SW

Como se puede apreciar en la Figura 3-1, el modelo ha sido configurado para tener tres bordes; el borde en aguas profundas orientado al suroeste, y dos bordes laterales que conectan el borde en aguas profundas con la costa. En cada borde se han impuesto los espectros provenientes del hindcast de la NOAA para un total de 10 años desde 2009 hasta 2018.

Adicionalmente el modelo se ha forzado con campos de vientos de reanálisis, variables en el tiempo y el en espacio provenientes del modelo atmosférico ERA5, la resolución espacial corresponde a 0.25 grados con salidas del modelo cada 1 hora. Los vientos utilizados son neutros y están a 10 metros de elevación sobre el nivel del mar.

3.2 Comparaciones modelo espectral versus mediciones

En una etapa inicial del estudio se realizaron comparaciones de las mediciones de oleaje en la Boya en Caldera descritas en el apartado 2.1.1 contra los resultados del modelo de propagación espectral Mike21SW, el cual propaga las condiciones de oleaje desde aguas profundas hasta la ubicación de la boya, además de generar oleaje local dentro del Golfo de Nicoya a partir de las forzantes de vientos utilizados en las simulaciones, la confección del modelo ha sido descrita en la sección anterior 3.1.

La figura a continuación muestra las diferencias entre las observaciones y el modelo espectral para altura significativa y periodo peak. Cada punto en el gráfico corresponde a un estado de mar donde el eje “x” muestra los valores observados o medidos y el eje “y” los resultados del modelo. Los colores muestran la densidad de puntos para indicar donde se concentran los valores comparados, mientras que los puntos color celeste muestran las comparaciones entre los cuantiles de ambas muestras.

Adicionalmente, la tabla anexa muestra un conjunto de métricas comúnmente utilizadas para valorar el desempeño de los modelos y las diferencias entre conjuntos de datos.

Los resultados de las comparaciones indican que estadísticamente existe correlación entre el modelo y las mediciones de la boya. Respecto de las alturas de oleaje se observa que el modelo tiende a sobrestimar las alturas menores a 0.5 m, mientras que no es capaz de captar los eventos extremos en torno o superiores a 2.0 m. Para el periodo se observa que el modelo tiende a sobrestimar ligeramente los periodos largos, mientras que es posible observar que captura suficientemente bien los periodos asociados a oleaje de generación local.

Para fases posteriores de diseño los resultados deberán ser calibrados para suplir las diferencias descritas anteriormente, especialmente las asociadas a los eventos más severos de oleaje comúnmente



categorizados como oleaje extremo. Como se describió anteriormente en el apartado 2.1.1 estos eventos presentan periodos largos de más de 16 s registrándose incluso mayores a 20 s según las observaciones de la boya, lo que resulta relevante para definir las condiciones de diseño de los distintos componentes del puerto.

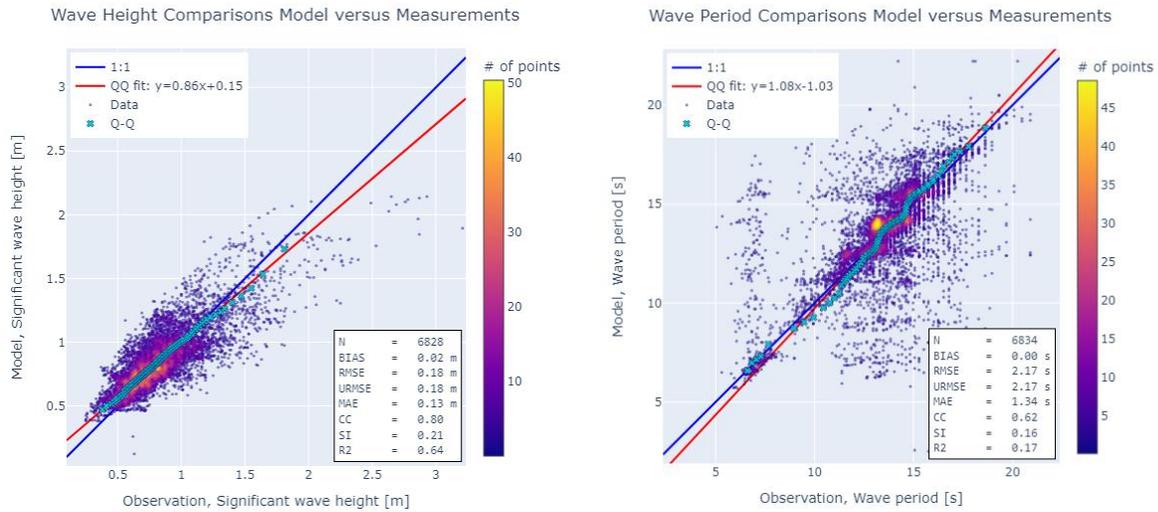


Figura 3-3 Comparaciones entre las mediciones y el modelo espectral de oleaje en Caldera para altura significativa (Izquierda) y periodo peak (derecha)

3.3 Clima preliminar de oleaje normal en estación Caldera

Tal como se ha descrito en la sección 3.1, el modelo espectral se ha empleado para establecer una serie de tiempo continua de parámetros de oleaje de altura significativa, periodo peak y dirección peak y media en la ubicación de la boya en Bahía Caldera (ver Tabla 3-1) de 10 años de duración desde enero de 2009 hasta diciembre de 2018, donde se han extraído datos cada 1 hora. La figura a continuación muestra un ejemplo de campo de altura significativa mientras que el campo vectorial muestra la dirección de propagación para un estado de mar (2017-12-26 00:00 UTC).

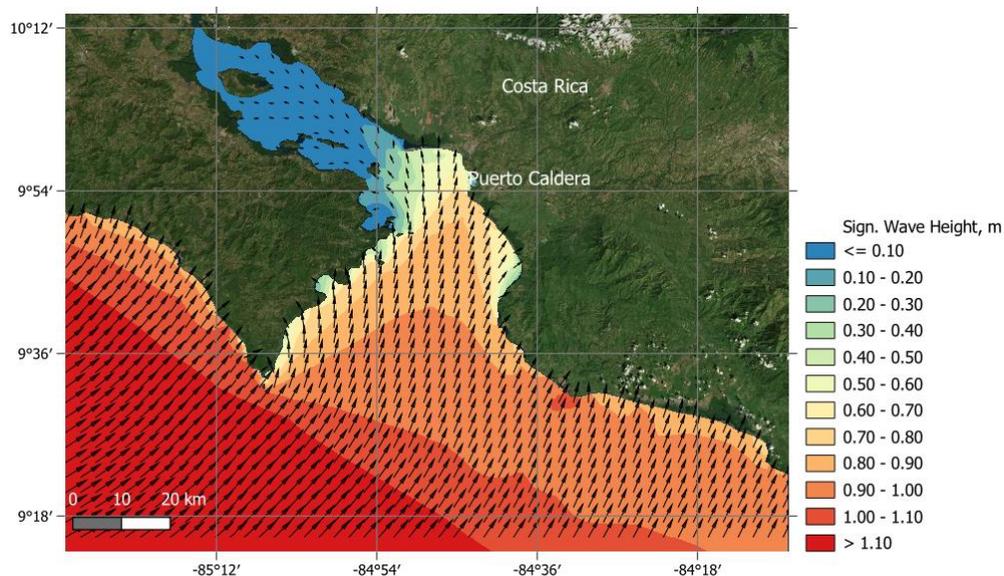
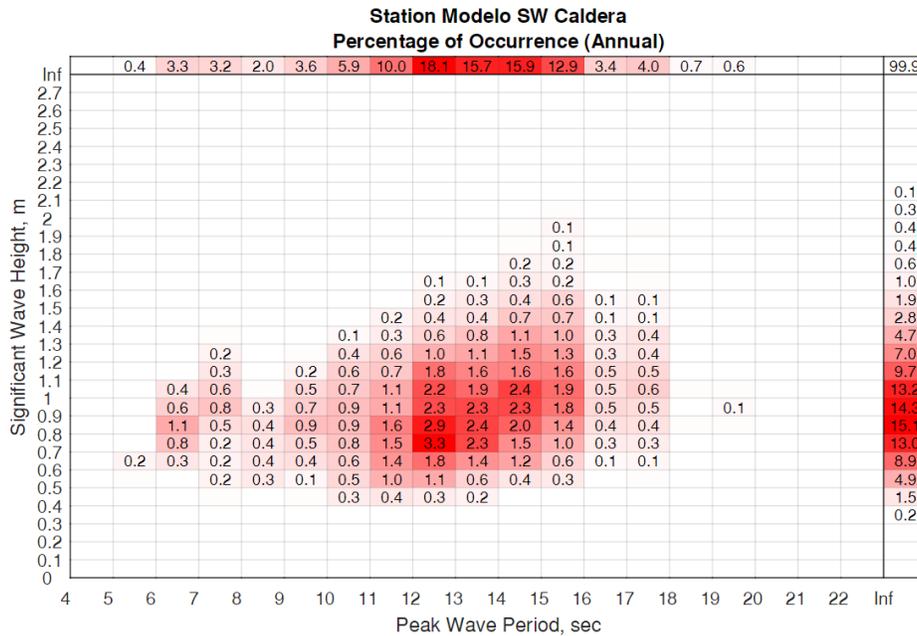


Figura 3-4 Ejemplo de propagación de oleaje del modelo Mike21SW



El análisis de las condiciones de oleaje obtenidas se presenta a continuación. La Tabla 3-2 muestra los porcentajes de ocurrencia de altura significativa en metros versus periodo peak en segundos. Los porcentajes de ocurrencia menores a 0.1 han sido ocultados. De la tabla es posible apreciar que la mayor parte del tiempo el modelo muestra alturas entre 0.7 y 1.1 m, mientras que para los periodos las condiciones más frecuentes se encuentran en un rango de entre 12 y 15 s.

Tabla 3-2: Tabla de Incidencia de altura significativa versus periodo peak para los resultados del modelo en Bahía Caldera



La



Tabla 3-3 y Tabla 3-4 muestran las ocurrencias de altura significativa y periodo peak versus Dirección media respectivamente. Las tablas muestran que las olas al ingresar al golfo se alinean debido a la morfología del sector, este efecto se incrementa debido a los altos periodos. En consecuencia, la dispersión direccional en la ubicación de la boya es baja, encontrando que el 80 % del oleaje estaría concentrado en la banda entre 210° a 220°. Cabe señalar que el promedio de las direcciones es cercano a 210°.

De manera equivalente la Figura 3-5 presenta una rosa de oleaje que muestra la frecuencia para distintos intervalos de altura significativa para distintas direcciones desde donde proviene el oleaje.



Tabla 3-3: Tabla de incidencia de altura significativa vs dirección media para los resultados del modelo en Caldera

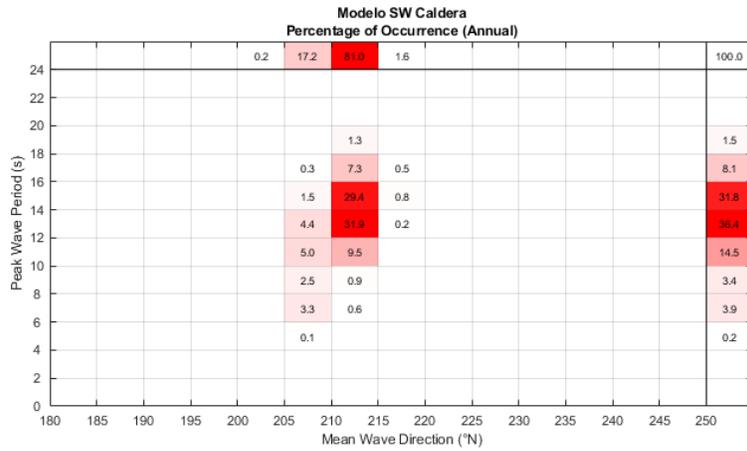


Tabla 3-4 Tabla de incidencia de periodo peak vs dirección media para los resultados del modelo en Caldera

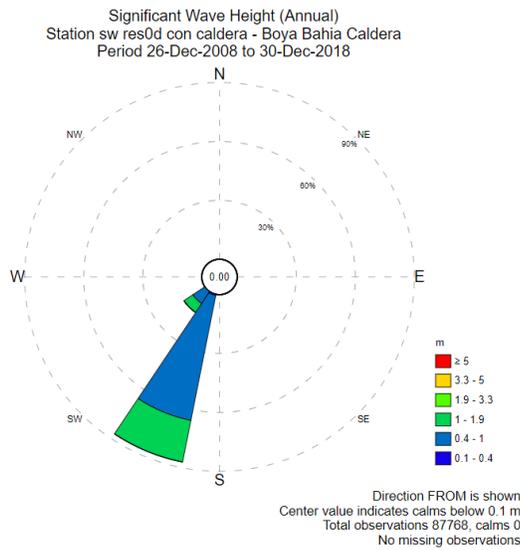
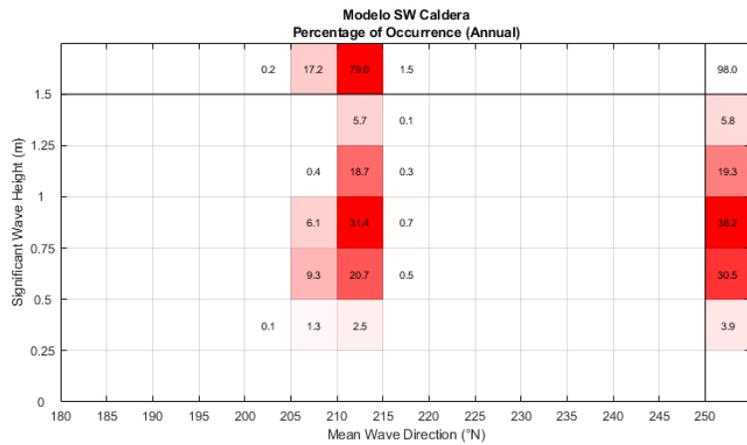


Figura 3-5: Rosa de altura significativa y dirección media para los resultados del modelo en Caldera



Finalmente, se construyeron curvas de excedencia para altura significativa y periodo peak, donde se observa que los resultados indican que el 10% del tiempo las olas son mayores que 1.34m, mientras que para los periodos el 10% del tiempo las olas exceden los 15.9 s.

Cabe destacar que, aunque se espera que estos resultados sean similares a los obtenidos a partir del análisis de las mediciones, estos resultados consideran 3 veces más estados de mar, por lo que sería posible esperar que las excedencias varíen levemente.

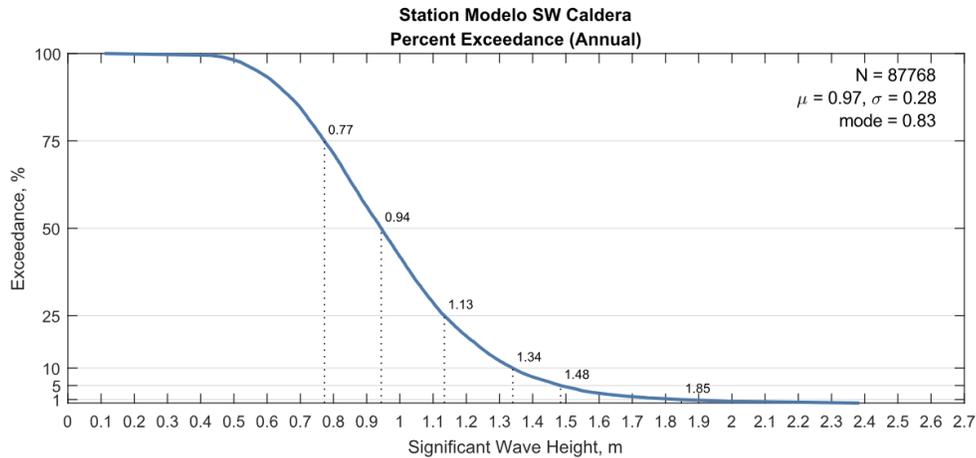


Figura 3-6 Curva de excedencia de altura significativa para los resultados del modelo en Caldera

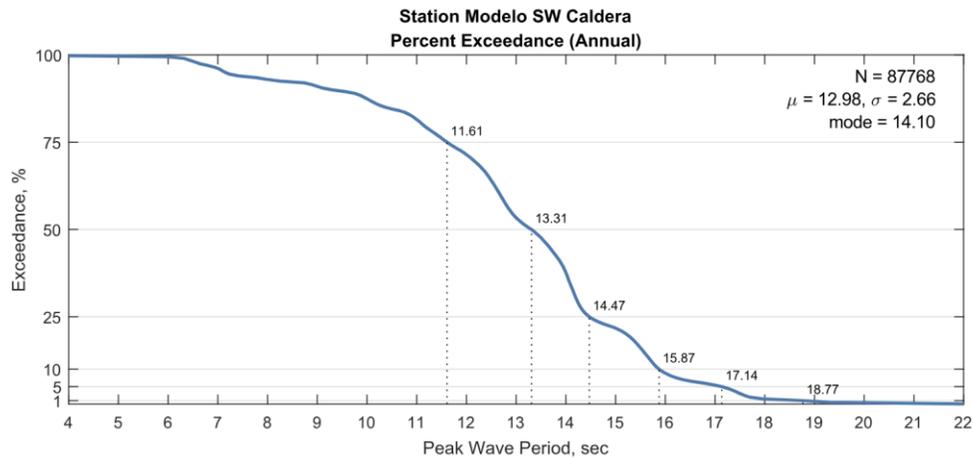


Figura 3-7 Curva de excedencia de periodo peak para los resultados del modelo en Caldera

4 Propagación de oleaje hasta los sitios de atraque

El sitio de atraque del terminal de graneles se encuentra en el interior de la dársena del puerto, como se muestra en la Figura 1-1. Para que las olas arriben hasta donde se encuentra la nave atracada, estas deben transformarse sufriendo los efectos de la difracción producidas por el rompeolas de abrigo. Debido a esto M&N propuso emplear un modelo que resuelve la fase del oleaje de manera estimar apropiadamente los fenómenos dominantes de propagación dentro de la dársena, como lo son la difracción y reflexiones. El objetivo de este esfuerzo es determinar coeficientes de agitación que luego serán aplicados al oleaje definido a partir de los resultados del modelo espectral, y las mediciones de



oleaje. Consecuentemente será posible determinar una curva de excedencia de oleaje en el sitio de atraque del terminal de graneles.

El presente capítulo se subdivide en las siguientes secciones:

1. Descripción del desarrollo del modelo de agitación Mike21BW
2. Resultados del modelo de agitación y propagación del clima de oleaje operacional
3. Análisis y recomendaciones para las alternativas de expansión del nuevo sitio de atraque del terminal de graneles

4.1 Modelo de Agitación

Para cuantificar la transformación de olas desde fuera de puerto hasta el interior de la dársena, se utilizó el modelo Mike21BW desarrollado por DHI, el cual se basa en las ecuaciones de Boussinesq para resolver la propagación del oleaje débilmente no lineal tomando en cuenta las características de reflexión y transmisión de estructuras porosas como rompeolas.

A partir del análisis del oleaje en la estación Caldera (ver Tabla 3-1 y Figura 2-1) se determinó que el oleaje está concentrado direccionalmente, siendo 210° la dirección promedio, con dispersiones menores a 10° , mientras que más del 90% de los estados de mar presentan periodos entre 8 y 18 s.

Considerando estas combinaciones de oleaje, se configuró una malla regular de resolución igual a 5 m para todo el dominio del modelo. En este caso el dominio queda comprendido en la batimetría de detalle proporcionada por el cliente y descrita en la sección 2.2. La figura a continuación muestra la batimetría interpolada sobre la grilla, donde se aprecia la presencia del rompeolas y el dragado de la dársena. La profundidad máxima del modelo corresponde a 16 m MSL, mientras que la profundidad mínima se ha configurado igual a -5 m MSL.

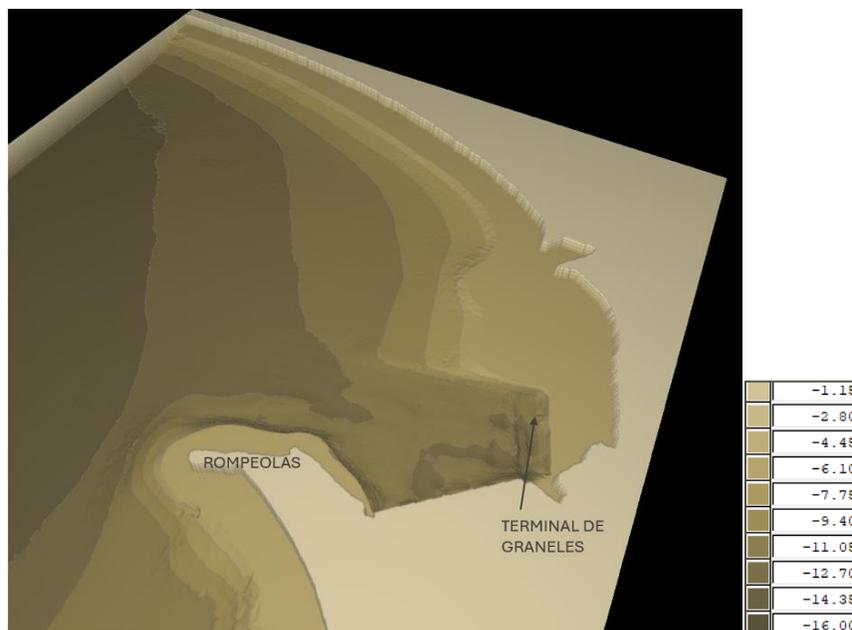


Figura 4-1: Batimetría empleada en el modelo de agitación Mike21BW

Como se indicó anteriormente, en este modelo se deben definir las estructuras y tipos de línea de costa, de manera de incorporar en el modelo la cantidad de energía que se disipa y refleja, o transmite si corresponde. La Figura 4-2 muestra los sectores con distintas características que fueron identificados y caracterizados para las simulaciones, los corresponden a los siguientes:

- Tramos de enrocados: Se consideraron con una reflexión del 50%
- Sectores de playas. La playa cercana a la paleta de generación de oleaje, se configuro con una capa que absorbe la totalidad de la energía, mientras las playas al norte consideran con reflexiones menores al 20%
- La línea de atraque del muelle principal del puerto está conformada por tablaestacas (pared vertical) con una reflexión del 100% de la energía.

Además, en la figura se muestra de forma esquemática desde donde en el modelo proviene el oleaje.

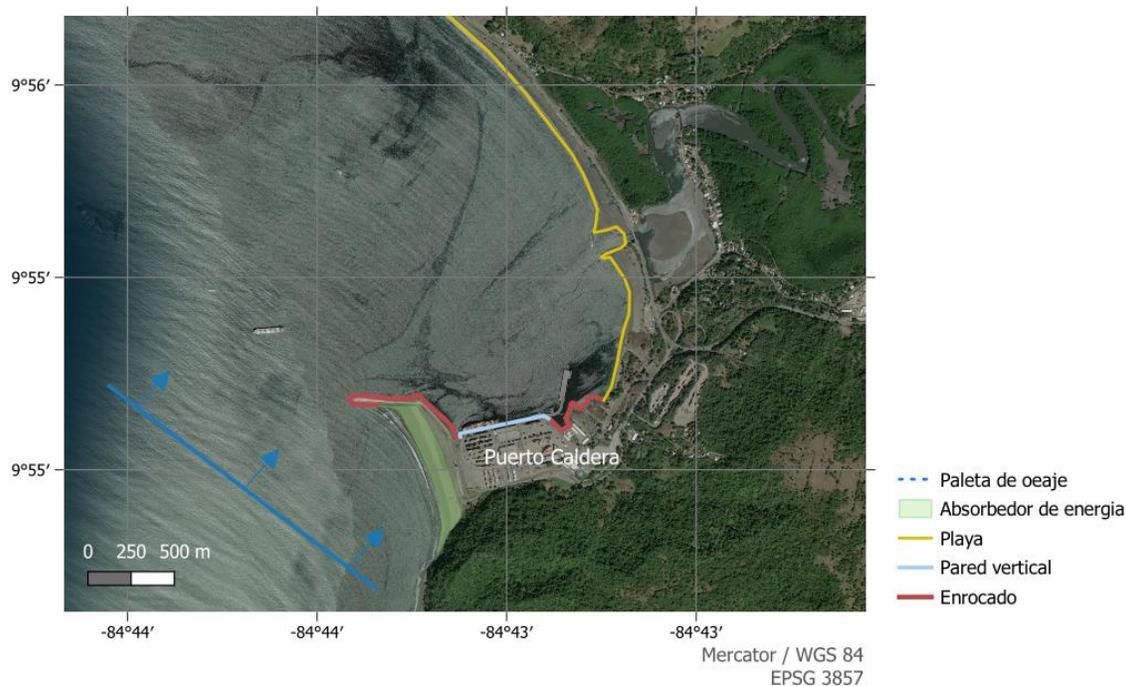


Figura 4-2: Definición de las zonas incluidas en el modelo de agitación

Se configuraron un total de seis combinaciones de oleaje, todas con alturas unitarias, periodos desde 8 a 18 s y dirección 210°. El tiempo de simulación en el modelo fue de 40 minutos con un paso de tiempo de 0.1s, de los cuales los primeros 10 minutos corresponden a precalentamiento.

4.2 Clima preliminar de oleaje en el sitio de atraque del terminal de graneles

Los resultados de Mike21BW corresponden a series de tiempo de superficie libre y flujos. Estas variables son procesadas para obtener espectros, desde los cuales es posible estimar parámetros de resumen tales como altura significativa y dirección del oleaje. Para estas simulaciones, se espera que el periodo peak se mantenga constante entre la línea de generación fuera del puerto, y el interior de la dársena. La Figura 4-3 muestra un ejemplo de los resultados de Mike21BW para superficie libre, donde se puede ver como ingresa el oleaje en la dársena del puerto.

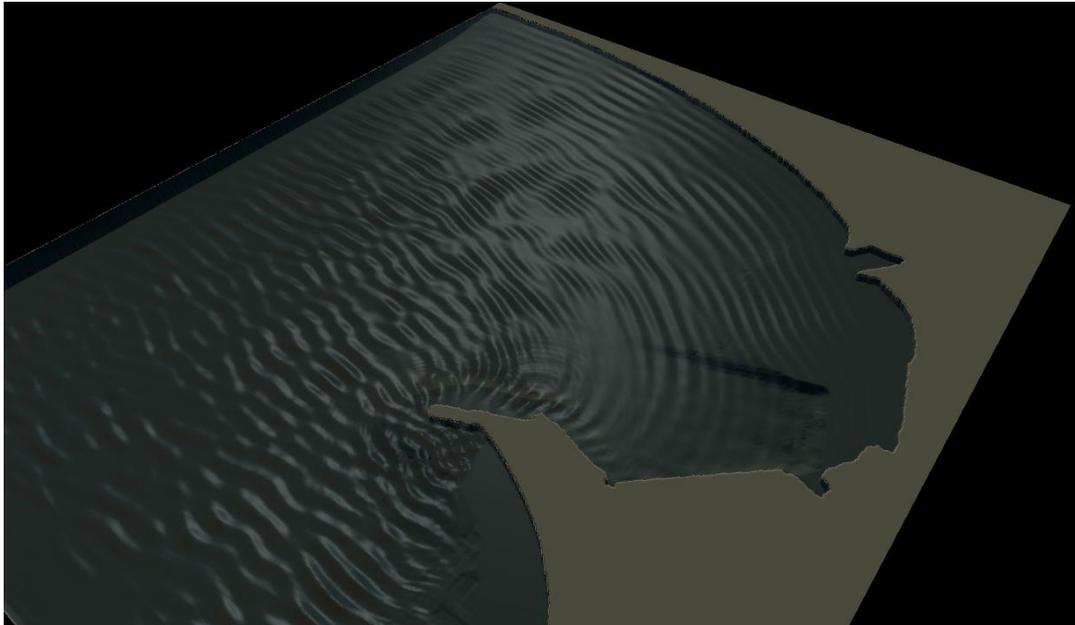


Figura 4-3 Ejemplo de los resultados de Mike21BW tren de olas propagándose dentro del puerto de Caldera

A partir de los resultados se crearon funciones de transferencia para propagar el oleaje en la estación Caldera hasta el sitio de atraque del terminal de graneles. Se observó que los resultados del modelo indican en general un decaimiento de las alturas de ola en un rango 70% - 80%.

A continuación, se muestran los análisis de los estados de mar propagados hasta un punto ubicado aproximadamente en el centro de gravedad de la nave atracada en el terminal de graneles existente. Para contrastar los resultados del modelo y verificar los porcentajes de excedencia, se han considerado además de los 10 años de oleaje provenientes del modelo espectral, los 3.5 años de mediciones de la boya fuera del rompeolas.

La Tabla 4-1 muestra los porcentajes de incidencia de altura significativa versus periodo peak considerando los 10 años de oleaje propagados hasta el terminal de graneles, mientras que la Figura 4-4 muestra la curva de excedencia de altura significativa.

Tabla 4-1: Tabla de Incidencia de altura significativa vs periodo peak para los resultados del modelo en el terminal existente de graneles

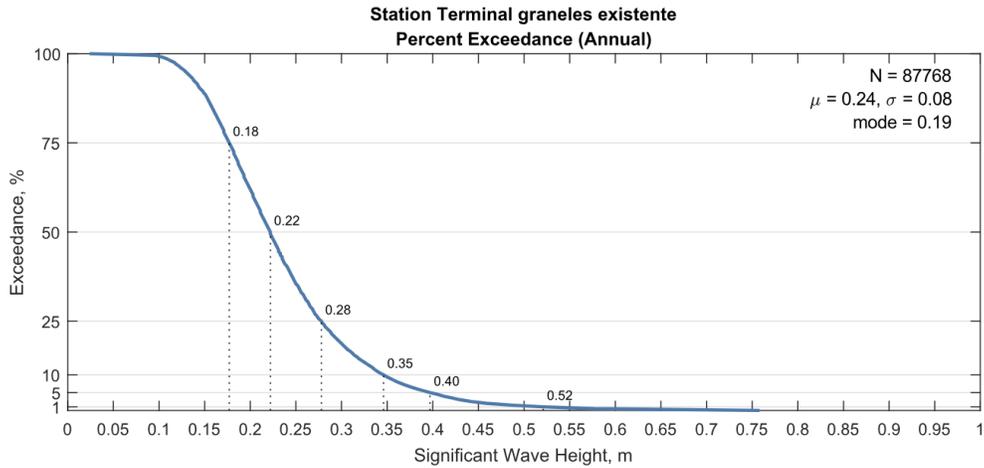
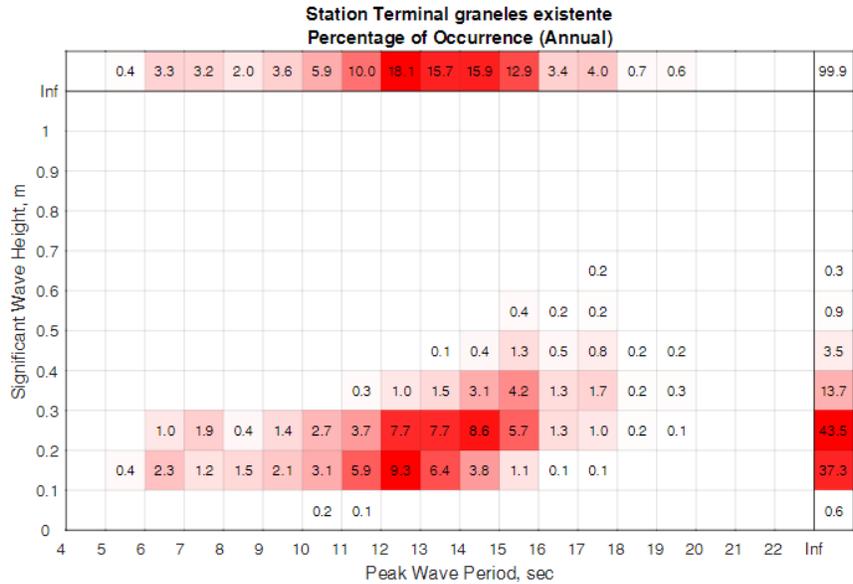


Figura 4-4: Curva de excedencia de altura significativa para los resultados del modelo en el terminal existente de graneles

Como se mencionó anteriormente, se utilizaron los datos medidos por la boya para propagarlos empleando las funciones de transferencia determinadas a partir de los resultados del modelo Mike21BW, a fin de comparar los resultados anteriormente presentados.



Tabla 4-2: Tabla de Incidencia de altura significativa vs periodo peak para las mediciones propagadas al terminal existente de graneles

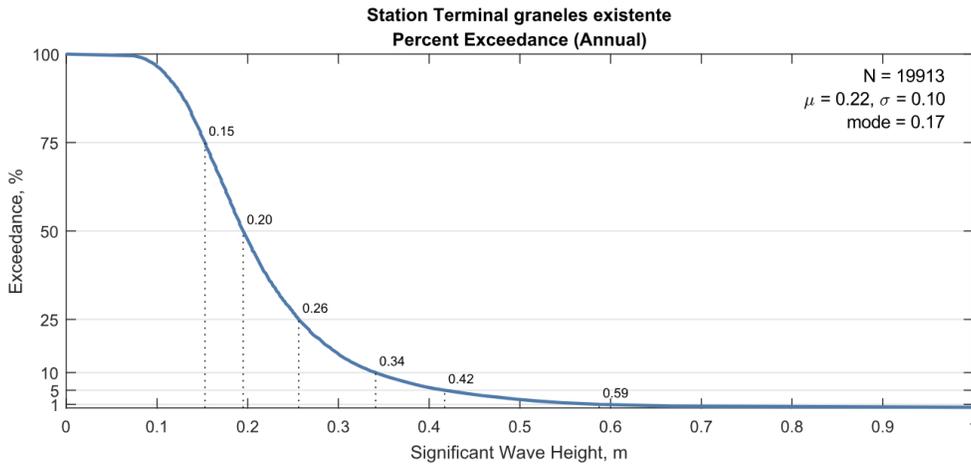
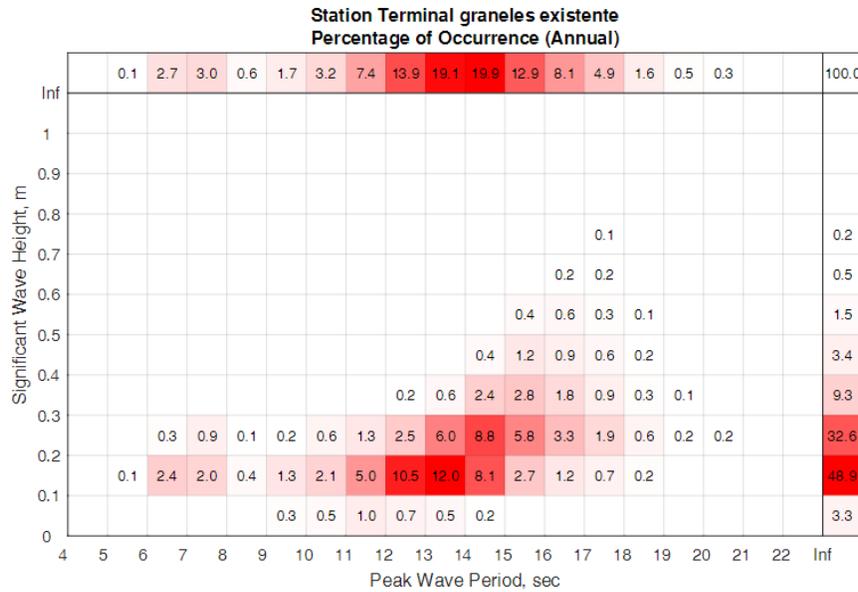


Figura 4-5: Curva de excedencia de altura significativa para los resultados del modelo en el terminal existente de graneles

Se observa que ambos; mediciones (3.5 años) y hindcast (10 años) presentan excedencias similares. Los resultados muestran que alrededor del 10% del tiempo las olas exceden 0.35 m aproximadamente, no obstante, alrededor de 25 % de los estados presenta periodos peak de más de 15 segundos.



4.3 Análisis y recomendaciones para las alternativas de expansión del nuevo sitio de atraque del terminal de graneles

Se ha realizado un esfuerzo de modelado para estudiar las condiciones normales u operacionales de oleaje en el puerto de Caldera, específicamente para el terminal de graneles.

Los resultados indican que el rompeolas y la morfología del sector abrigan a la dársena del puerto, reduciendo de manera importante el oleaje de mar de fondo (swells) provenientes del Océano Pacífico. Este oleaje es capaz de penetrar en el Golfo de Nicoya con altura y periodos importantes. Se han estimado porcentajes de excedencia de estas variables frente al rompeolas y al interior de la dársena en el sitio de atraque del terminal existente de graneles.

Usualmente, los umbrales ambientales para la operación segura son menos restrictivos para carga y descarga de graneles que para otros tipos de cargas como contenedores. Por consiguiente, estos terminales pueden admitir operar en lugares más expuestos al oleaje. Sin embargo, el comportamiento de las naves atracadas no depende únicamente de las características del oleaje incidente, viento y corrientes, sino también de las características del terminal, específicamente la orientación del sitio de atraque y la configuración de amarre y los elementos que dar soporte a la permanencia de la nave en el sitio de atraque.

Considerando lo anterior, aun cuando las condiciones ambientales son favorables, los terminales pueden experimentar tiempos muertos indeseados producto de una orientación desfavorable o un esquema de amarre deficiente. Por consiguiente, los estudios de factibilidad suelen considerar un estudio de nave atracada, el cual consiste en calcular los movimientos y fuerzas máximas de las naves atracadas para distintas combinaciones de oleaje, viento y corrientes. De esta manera, se determinan los valores umbrales de oleaje donde la operación es segura y consecuentemente el porcentaje de tiempo muerto o downtime esperado del terminal.

Cabe destacar que, en el caso de Caldera, existe presencia de oleaje de periodos altos. Estas olas son importantes de analizar porque incluso a menores alturas de oleaje, pueden excitar a las naves atracada y producir efectos indeseados que impliquen que la operación no sea posible o incidentes tales como cortes de espías o deterioro y trabajo incorrecto de las defensas del terminal.

M&N ha analizado distintas opciones de expansión del terminal de graneles. Dentro de todos los factores a ser considerados para el desarrollo de las alternativas, es imprescindible considerar el oleaje en el sitio de atraque y los potenciales efectos que este podría tener sobre las naves amarradas.

Consecuentemente, se ha empleado algunos de los resultados del estudio de agitación para analizar dos potenciales opciones para un nuevo sitio de atraque de graneles (Opción A y B).

Las figuras a continuación muestran las opciones de expansión donde se ha superpuesto la propagación de las olas de periodo de 14 s, las cuales son las más frecuentes según los resultados del estudio de las condiciones normales. Se observa que el terminal existente de graneles y la opción B, que mantiene la orientación de la línea de atraque, presentan orientaciones distintas a la dirección del oleaje incidente, mientras que la Opción A muestra una orientación favorable a la incidencia del oleaje.



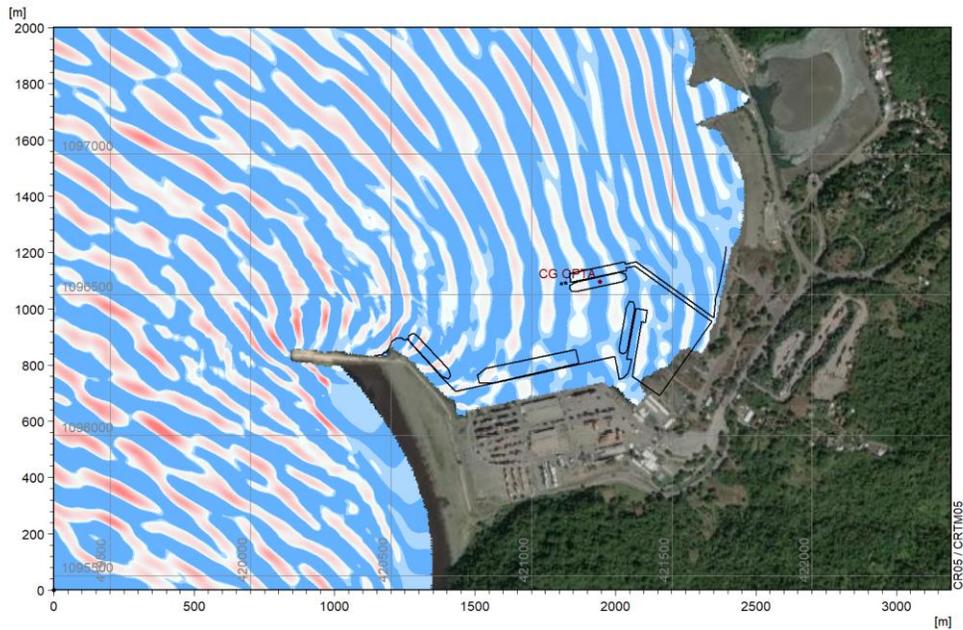


Figura 4-6: Resultados Mike21BW superpuestos con Opción A

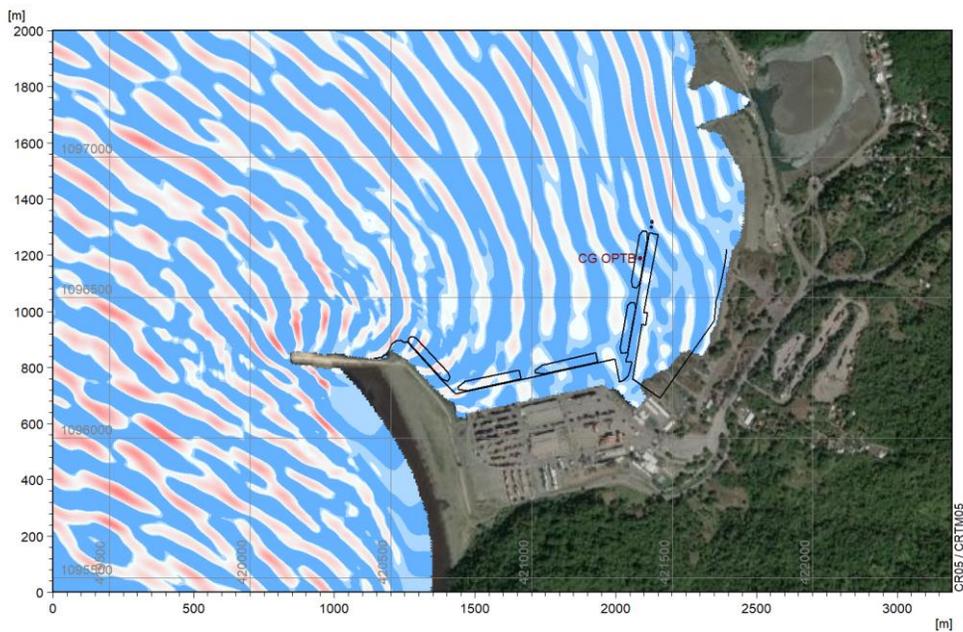


Figura 4-7: Resultados Mike21BW superpuestos con Opción B

La opción A, presenta una mejor orientación y por consiguiente se espera que el terminal tenga mejor desempeño ante las mismas condiciones de oleaje. De manera similar, las figuras a continuación muestran los coeficientes de transformación para la combinación de oleaje más frecuente (210° fuera del rompeolas y 14s de periodo peak). Se puede observar que la opción B tiene un extremo de la nave cercana al sector menos abrigado de la dársena. Sin embargo, el terminal parece estar dentro de la zona de mayor abrigo para esta combinación de oleaje.



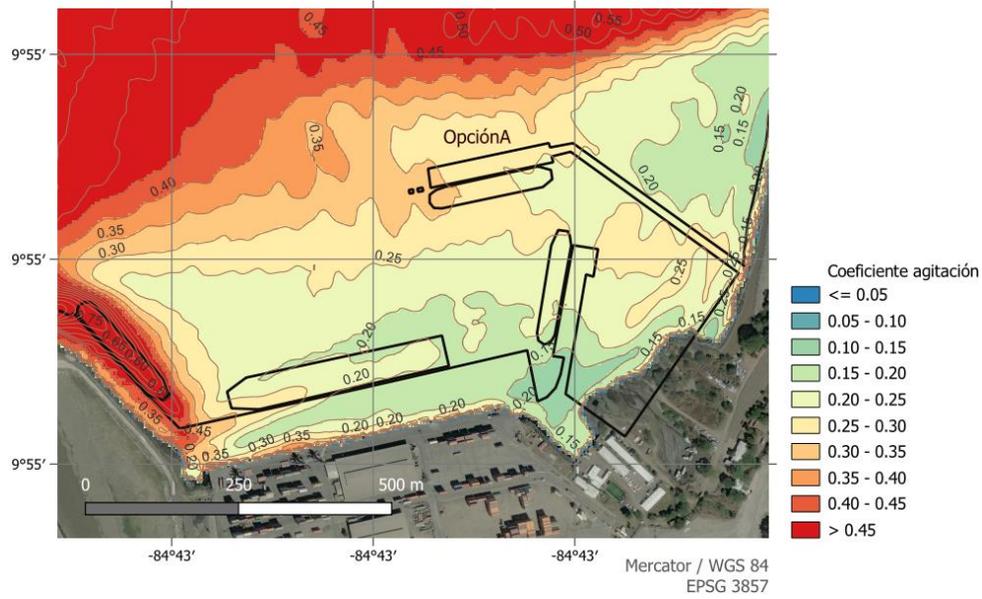


Figura 4-8: Variación del coeficiente de transferencia para las condiciones de oleaje más frecuentes superpuestas con la opción A

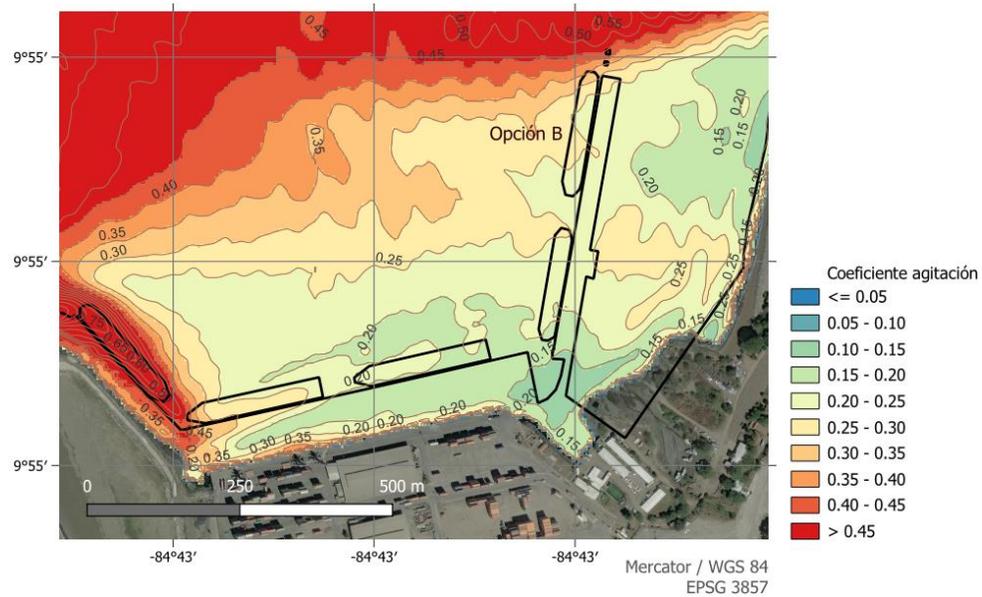


Figura 4-9: Variación del coeficiente de transferencia para las condiciones de oleaje más frecuentes superpuestas con la opción B

Cabe destacar que, la ubicación de estas alternativas ha sido contrastada con el oleaje que se ha resuelto considerando la situación actual de batimetría, mientras que de ser ejecutadas, se espera que estas impliquen dragado y consecuentemente cambios en la batimetría que podrían afectar el oleaje.



5 Conclusiones y recomendaciones

A continuación, se presentan las principales conclusiones del estudio.

- El terminal cuenta con mediciones disponibles, las cuales son de gran valor para entender las condiciones de oleaje en el puerto. Sin embargo, solo se cuenta con información previamente procesada, sin datos crudos o la suficiente información para entender la calidad de las observaciones. Lo anterior respecto a algunas diferencias encontradas entre campañas de medición.
- 10 años de hindcast espectral de oleaje provenientes del modelo WWIII global desarrollado por la NOAA, fueron propagados desde aguas profundas hasta dentro del Golfo de Nicoya en un punto denominado estación Caldera que coincide con la ubicación de la boya de medición de oleaje. Si bien las comparaciones del modelo versus las observaciones se muestran suficientes para los objetivos del presente estudio, la calibración del modelo debe ser mejorada en etapas posteriores, especialmente para representar los eventos extremos. Además, para establecer condiciones de diseño, la cantidad de datos debe extenderse suficientemente para cubrir los periodos de retorno que se establezcan para el diseño de los componentes del puerto (por ejemplo, más de 30 años para determinar condiciones asociadas a 100 años de periodo de retorno).
- Respecto de la agitación dentro del puerto, se observa que la dársena se encuentra abrigada ante los swells provenientes del Pacífico los cuales logran penetrar dentro el Golfo de Nicoya. Cabe destacar que existe una cantidad importante del tiempo (25% aproximadamente) donde se observan periodos peak mayores a 15 s, los cuales típicamente pueden causar comportamientos no deseados en las naves amarradas.
- Finalmente, se contrastaron los resultados del estudio de agitación y las opciones de expansión de manera de apoyar su desarrollo de manera preliminar. Desde la perspectiva del oleaje, la opción A es la mejor elección. Considerando los resultados la orientación preliminar sugerida corresponde a 265°.

6 Referencias

1. Informe de calibración final plurianual de los datos de oleaje de la NOAA con datos medidos en sitio. Licitación Abreviada 2018 la-000017-0012400001, iMARES-INII-UCR [2021]
2. Study on the maintenance Project of the port of Caldera in the Republic of Costa Rica, [1986]
3. MIKE 21 Spectral Waves FM Scientific documentation manuals.mikepoweredbydhi.help/2023/Coast_and_Sea/M21SW_Scientific_Doc.pdf [2024]
4. MIKE 21 Boussinesq Waves Scientific documentation manuals.mikepoweredbydhi.help/2023/Coast_and_Sea/MIKE21BW.pdf [2024]

