

PROYECTO DE MODERNIZACIÓN DE INFRAESTRUCTURA Y EQUIPAMIENTO DE PUERTO CALDERA

Sobre justificación de rompeolas

Febrero de 2025

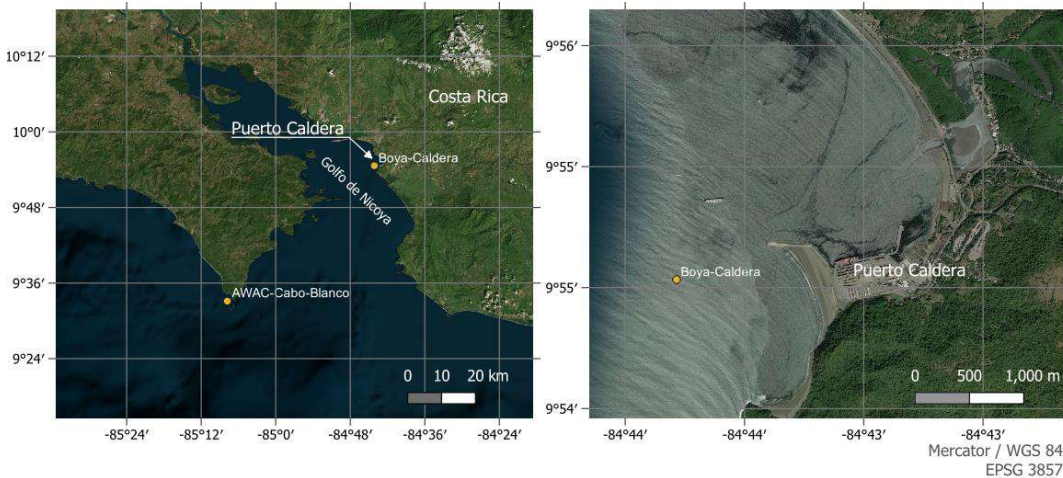
NOTA TÉCNICA JUSTIFICATIVA DE LA NO NECESIDAD DE EXTENDER EL ROMPEOLAS DE PUERTO CALDERA

INTRODUCCIÓN

Esta explicación técnica se basa en la información relativa al oleaje y a la agitación incluida en el estudio de Factibilidad y en el documento “Estudio de las condiciones normales de oleaje en Puerto Caldera” elaborado por Moffatt and Nichol y que forma parte del expediente del proyecto, en este último estudio se analizaron las condiciones de oleaje para apoyar el desarrollo de las alternativas de expansión del Puerto de Caldera, específicamente para los sitios que podrían potencialmente estar afectados a *downtime* por oleaje, específicamente para el terminal de graneles.

SITUACIÓN RELATIVA DEL ROMPEOLAS RESPECTO DE LA DÁRSENA Y AMARRADEROS DE PUERTO CALDERA

El rompeolas ubicado al sur de Puerto Caldera cumple una doble función: proteger los sitios de atraque del oleaje proveniente del SW, y contener el sedimento que proviene del S evitando su ingreso dentro de la zona de operación del terminal. Cabe destacar que las sucesivas extensiones del rompeolas siempre se han realizado para aumentar la capacidad de retención de sedimentos, y no para aumentar la protección del puerto frente al oleaje.



En el año 2021 se realizó una reparación significativa del avanzado estado de deterioro que presentaba el rompeolas, como se muestra en la siguiente figura:

Estado del rompeolas antes de la reparación de 2021



La reparación consistió en reconstruir el morro colocando cubos de hormigón, y realizar una mínima extensión de la longitud del rompeolas, en consecuencia, la reparación del rompeolas es meramente estructural, por lo cual no se espera un aumento en su capacidad de retener sedimentos ni en su capacidad de reducir la agitación en el interior de la dársena.

Estado del rompeolas después de la reparación de 2021



Seguidamente se incluye un análisis de las mejoras que la extensión del rompeolas supondría, bien para aumentar la retención de sedimentos o bien para disminuir el down time de los amarraderos, para posteriormente estimar si es recomendable la inversión requerida para su extensión.

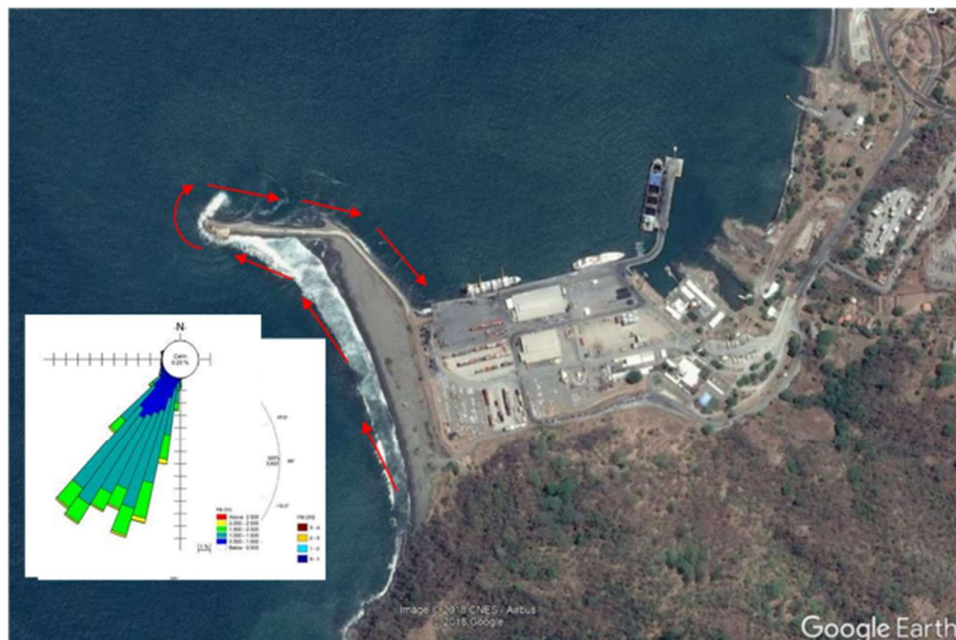
ANÁLISIS DE LA NECESIDAD DE EXTENDER EL ROMPEOLAS PARA AMPLIAR SU CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS

Desde la construcción del rompeolas de puerto Caldera ha provocado la acumulación de sedimentos al sur del mismo, provocando la creación de una playa y luego la acumulación de sedimentos a sotavento del rompeolas.



La consecuencia principal de la acumulación de sedimentos es el desarrollo de un perfil de arena sumergida con una suave pendiente cerca de la cabeza del rompeolas, provocando que el área disponible para retener arena se vuelva menos profunda con el paso del tiempo, y las ondas incidentes generan un transporte local de sedimentos alrededor de la cabeza del rompeolas, ingresando a la parte interna del puerto (la dársena).

Dirección de sedimentos en el la cabeza del rompeolas



Como se ha expuesto anteriormente, la solución que históricamente se ha considerado para evitar que los sedimentos ingresasen en la dársena ha sido extender el rompeolas para aumentar su capacidad de retención, sin embargo, tal como se indicaba en el Plan maestro, resulta evidente que cualquier obra de extensión del rompeolas sin dragado de mantenimiento o bypass de sedimentos solo retendrá los sedimentos por algunos años hasta que se colmate el volumen adicional generado.

Por otra parte, el rompeolas es una barrera para el transporte litoral que no solo provoca la acumulación de sedimentos a sotavento del rompeolas, si no que impide la llegada de esos sedimentos a las playas situadas al NE del puerto, provocando la erosión de la costa.

En definitiva, a efectos de solucionar los problemas de sedimentación de la dársena y de erosión costera, no se considera necesario ni conveniente extender el rompeolas existente, optándose en el Estudio de Factibilidad por la siguiente solución alternativa:

- Dragado de capital (trampa de arena) al sur del rompeolas, aumentando la capacidad de almacenamiento en aproximadamente 800,000 m³. Este volumen se estima a partir de los volúmenes históricos de dragado equivalentes a alrededor de 500,000 m³ en un periodo de cuatro años. Considerando que el rompeolas ha llegado a su máxima capacidad de retención, se estima una capacidad mayor para la trampa de arena amplificando el promedio histórico de dragado en un 60%.
- Dragado de mantenimiento de la trampa de arena cada 4 años o más.

ANÁLISIS DE LA NECESIDAD DE EXTENDER EL ROMPEOLAS PARA DISMINUIR EL DOWN TIME EN LOS AMARRADEROS

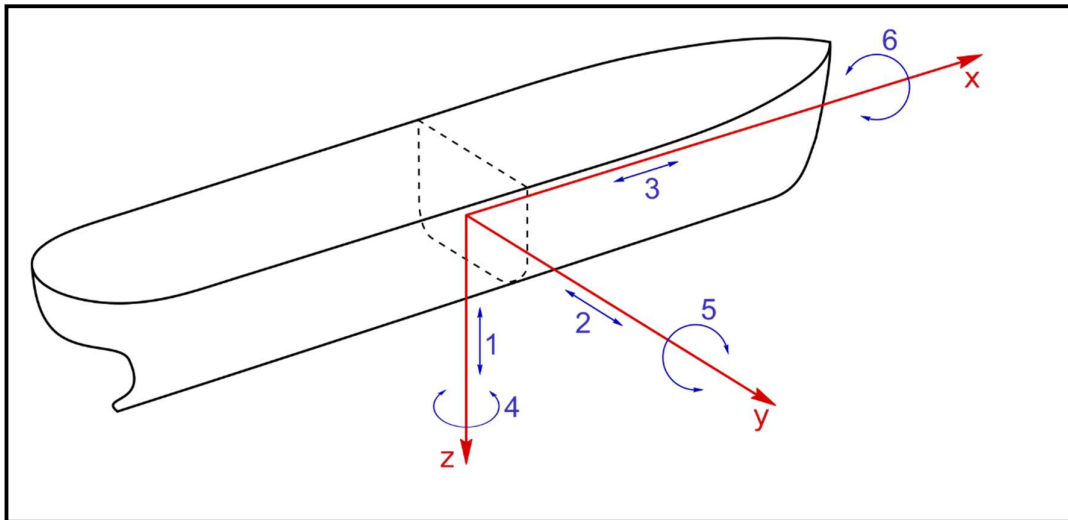
Para este análisis se ha revisado la siguiente documentación:

- Recomendaciones del PIANC relativas a los movimientos máximos permitidos en los buques para carga y descarga
- Estudio de agitación incluido en el Plan Maestro Portuario del litoral del Pacífico, redactado por ARCADIS en enero de 2020.
- Estudio de las condiciones normales de oleaje en Puerto Caldera elaborado por Moffatt and Nichol en julio de 2024.
- Tiempo de demora por lluvias en puerto Caldera.

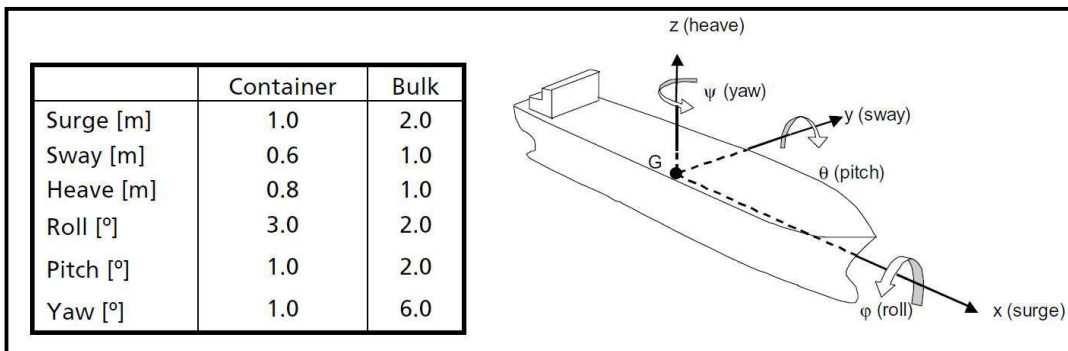
RECOMENDACIONES PIANC

Los movimientos u oscilaciones de un buque tienen seis grados de libertad, tres de traslación y tres de rotación:

- (1) ascenso y descenso o vaivén vertical (heave)
- (2) ronza o deriva (sway)
- (3) avance o retroceso (surge)
- (4) virada o guiñada (yaw)
- (5) cabeceo (pitch)
- (6) escora o balance (roll)



El PIANC establece unos criterios para estimar los movimientos máximos permitidos para la carga y descarga segura de los diferentes tipos de buques, en función de los seis grados de libertad de dichos movimientos:

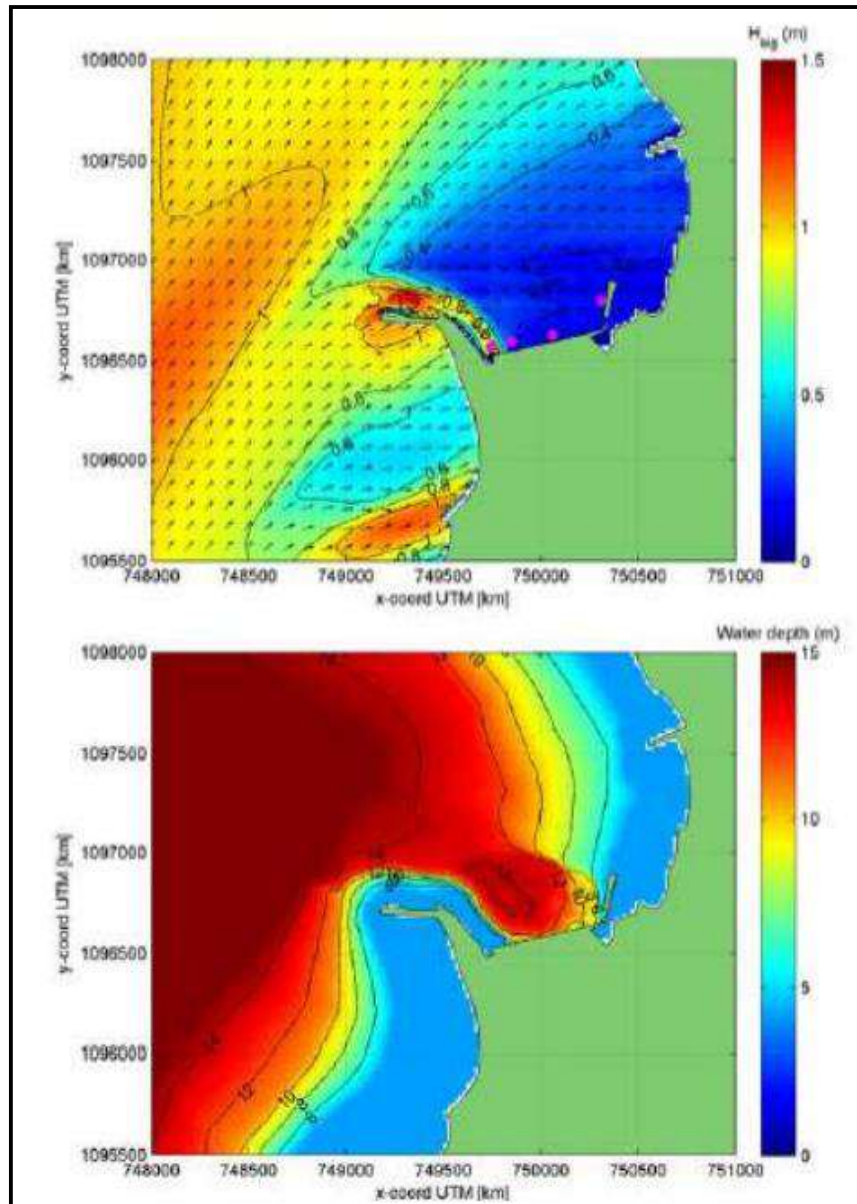


Como puede verse en la tabla anterior, para las operaciones seguras de carga y descarga el PIANC establece una altura de ola máxima en el atraque de 0.60m para operación de contenedores y de 1.0m para graneles.

PLAN MAESTRO PORTUARIO DEL LITORAL DEL PACÍFICO

En el Plan Maestro Portuario del litoral del Pacífico se obtuvieron alturas de oleaje para determinadas condiciones *offshore*, y así poder analizar la reducción de agitación en el puerto. En la siguiente figura se presenta la distribución espacial de H_s y H_{dir} para la simulación de la condición límite costa afuera $H_s=2,0$ m, $T_p=14,0$ s, $H_{dir}=210^\circ N$.

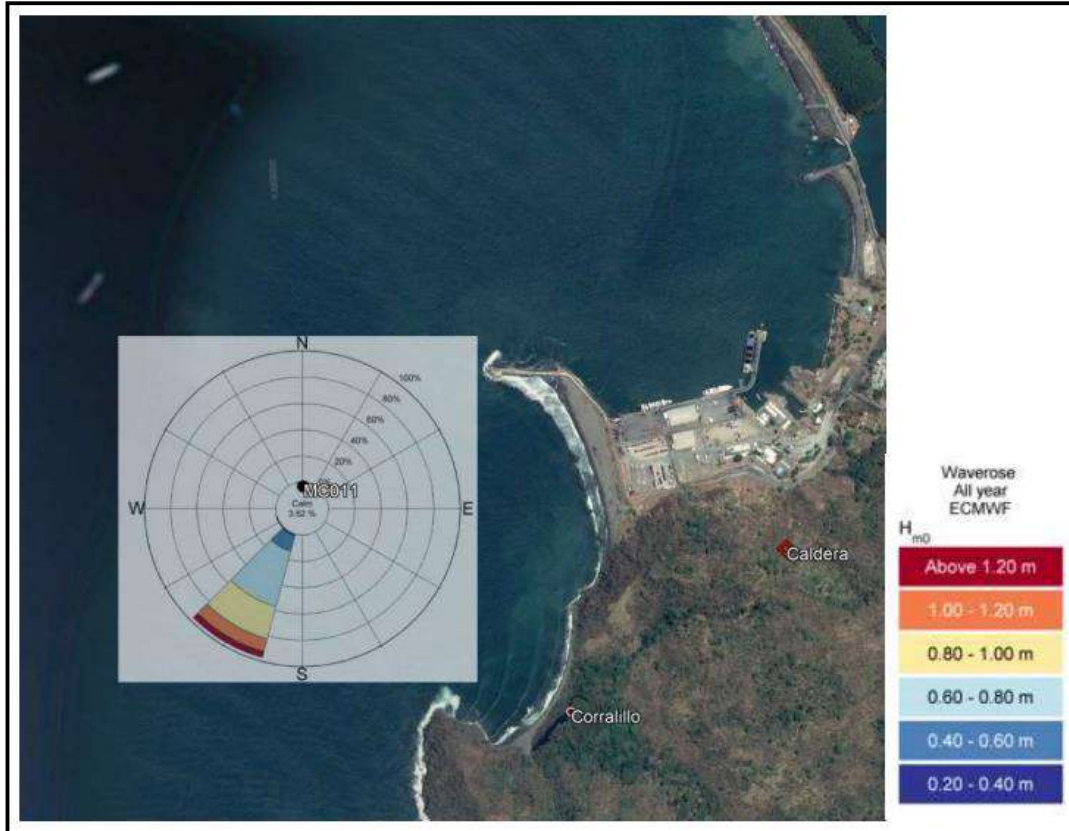
Distribución Espacial H_s y H_{dir}



En las siguientes figuras se ha representado las condiciones en la ubicación frente al Puerto Caldera mediante la propagación de SWAN (en el modelo de ARCADIS) para oleaje de viento, de fondo y total. Los resultados han arrojado que las olas se aproximan

desde 210°N. El 85 % del oleaje se encuentra por debajo de 1 m. El 95 % de los periodos medios se hallan entre 6 y 12 segundos.

Localización de resultados en agua somera en Caldera



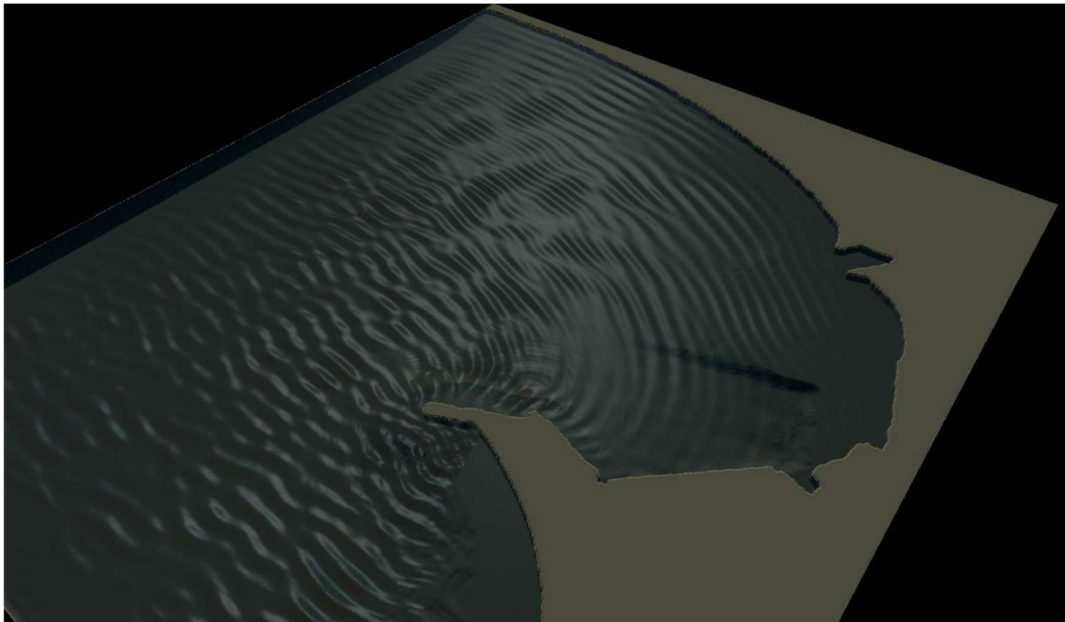
ESTUDIO DE LAS CONDICIONES NORMALES DE OLEAJE EN PUERTO CALDERA

En el capítulo 4 del Estudio de Oleaje elaborado por Moffatt and Nichol, mencionado en la introducción de esta nota técnica, se incluye un estudio de la agitación dentro de la dársena del puerto de Caldera, en el que se presentan 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.

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 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.

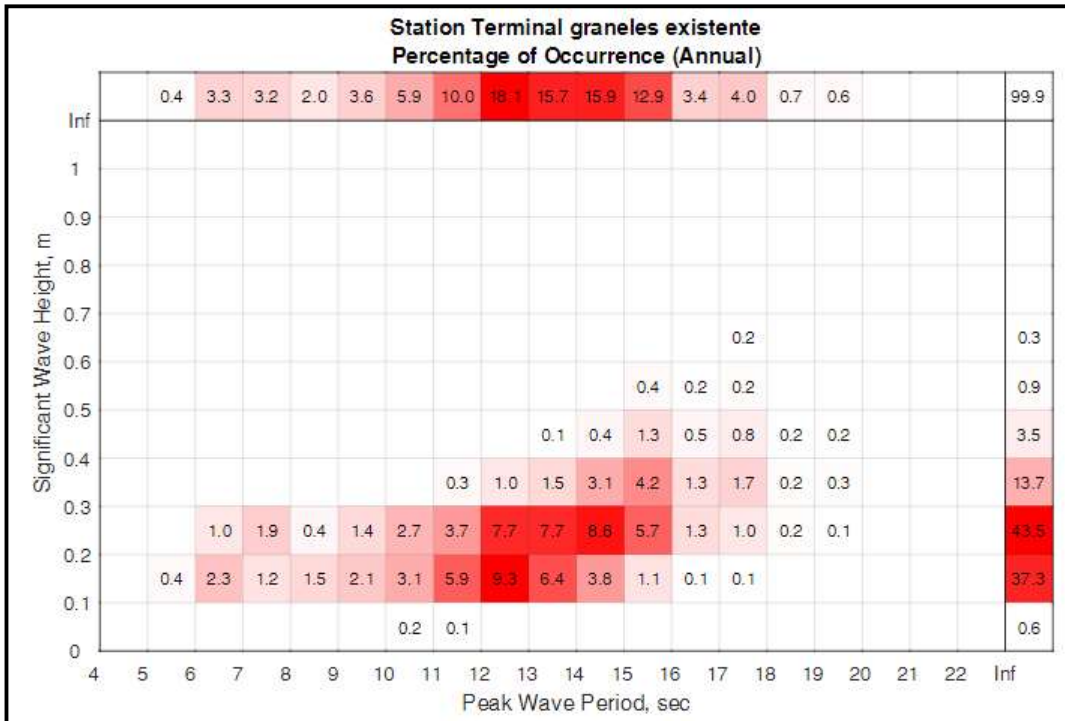
Considerando estas combinaciones de oleaje, se configuró una malla regular de resolución igual a 5 m para todo el dominio del modelo. La siguiente figura muestra un ejemplo de los resultados de Mike21BW para superficie libre, donde se puede ver como ingresa el oleaje en la dársena del puerto.



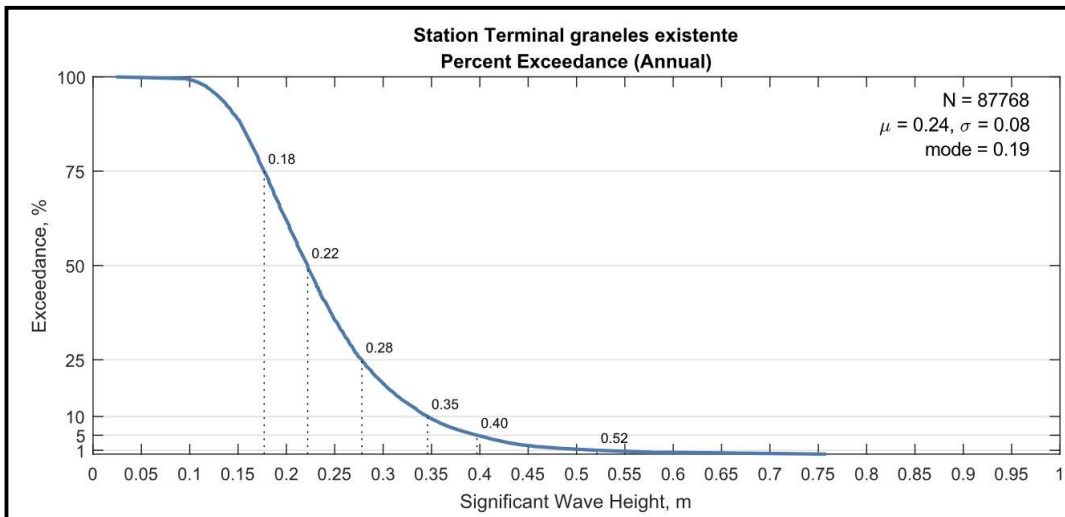
A partir de los resultados se crearon funciones de transferencia para propagar el oleaje en la estación Caldera hasta el sitio de atraque del terminal de graneles. Se observó que los resultados del modelo indican en general un decaimiento de las alturas de ola en un rango 70% - 80%.

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 consideró, además de los 10 años de oleaje provenientes del modelo espectral, los 3.5 años de mediciones de la boya fuera del rompeolas, presentando ambos períodos 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 de pico de más de 15 segundos.

Tabla de Incidencia de altura significativa vs periodo de pico para las mediciones propagadas al terminal existente de graneles



Curva de excedencia de altura significativa para los resultados del modelo en el terminal existente de graneles



Se realizó un 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.

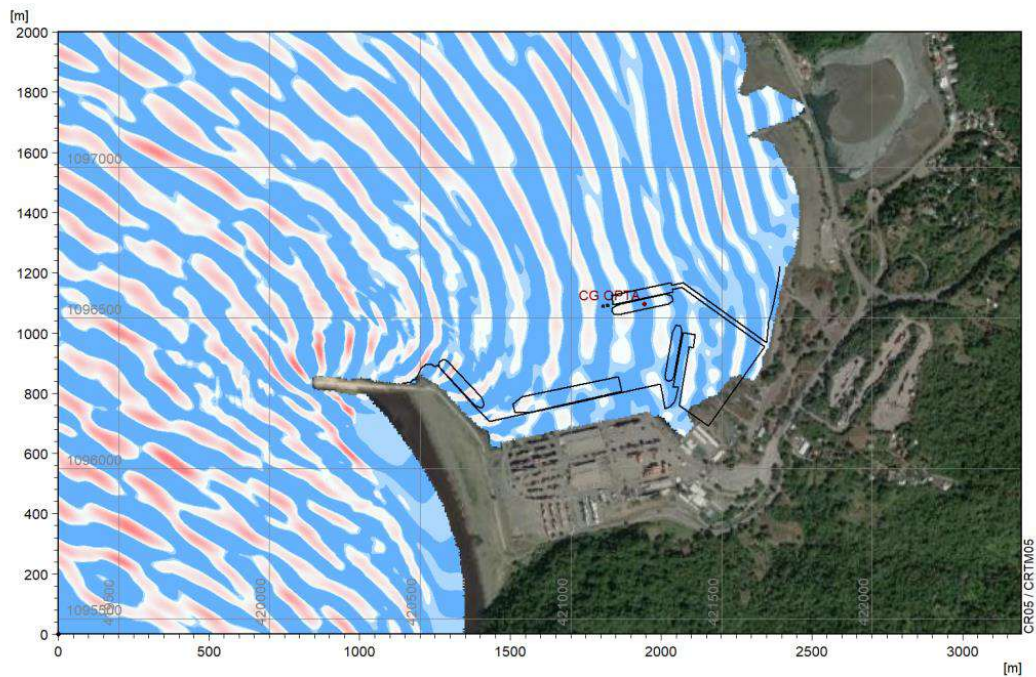
Cabe destacar que, en el caso de Caldera, existe presencia de oleaje de periodos altos. Estas olas son importantes de analizar porque incluso a menores alturas de oleaje, pueden excitar a las naves atracada y producir efectos indeseados que impliquen que la operación no sea posible o incidentes tales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

M&N analizó 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.

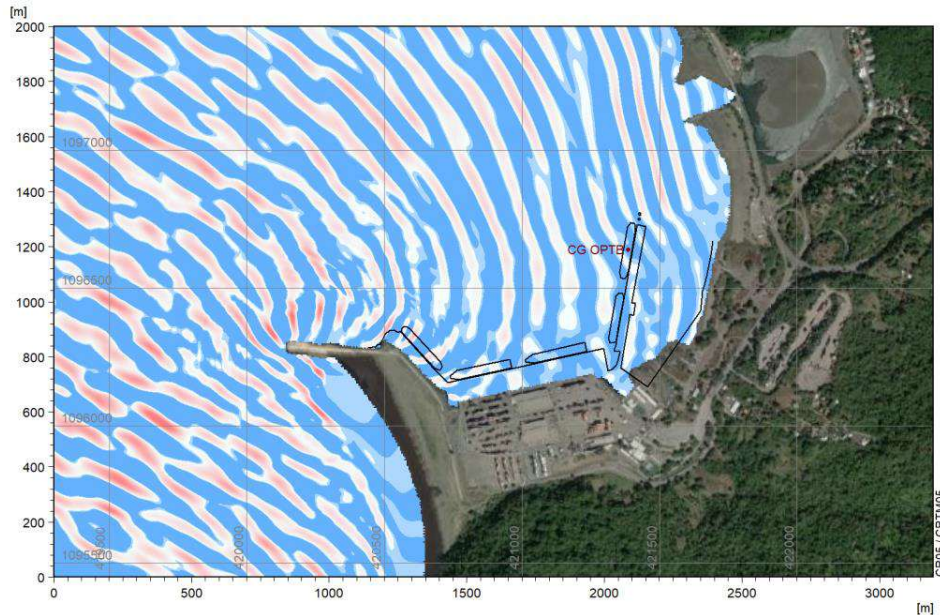
Consecuentemente, se ha empleado algunos de los resultados del estudio de agitación para analizar dos potenciales opciones para un nuevo sitio de atraque de graneles (Opción A y B).

Las siguientes figuras 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.

Resultados Mike21BW superpuestos para la Opción A

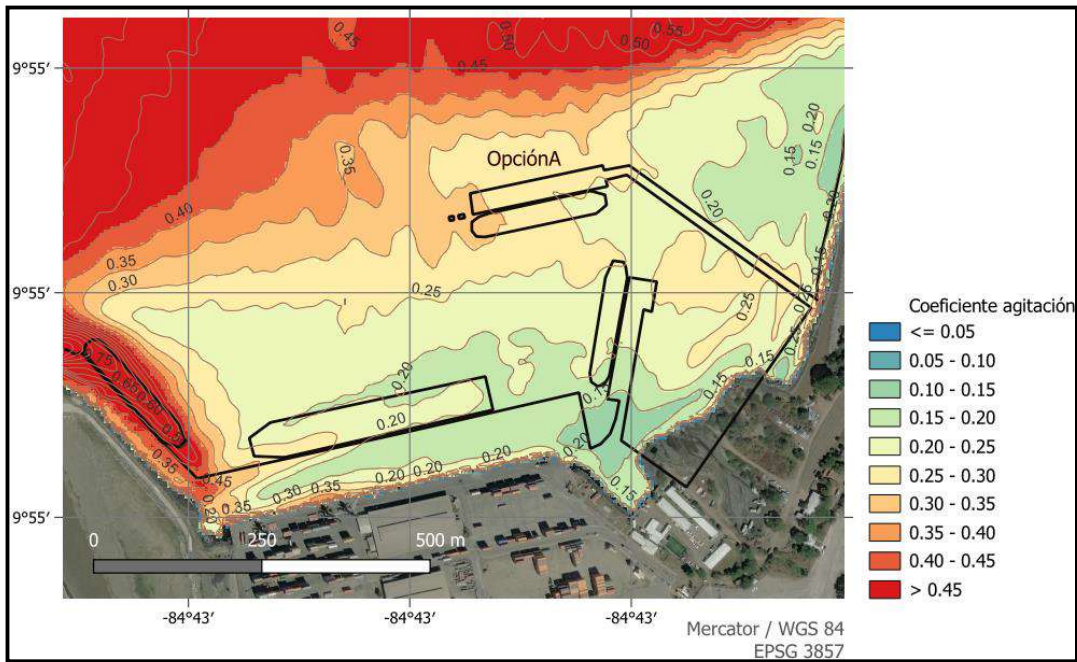


Resultados Mike21BW superpuestos para la Opción B

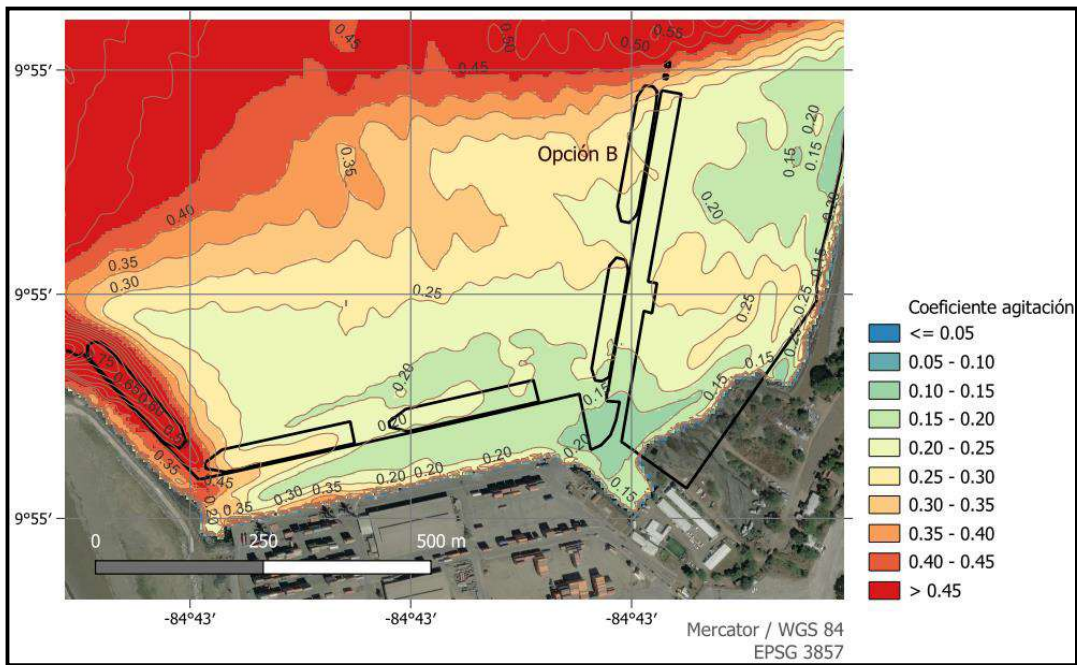


La opción A presenta una mejor orientación y por consiguiente se espera que el terminal tenga mejor desempeño ante las mismas condiciones de oleaje. Las siguientes figuras muestran los coeficientes de transformación para la combinación de oleaje más frecuente (210° fuera del rompeolas y 14s de periodo de pico). 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.

Variación del coeficiente de transferencia para las condiciones de oleaje más frecuentes superpuestas con la opción A



Variación del coeficiente de transferencia para las condiciones de oleaje más frecuentes superpuestas con la opción B



El nuevo puesto de carga general adyacente al rompeolas podría tener niveles de agitación similares o levemente superiores a los niveles de agitación del Puesto 4. Sin embargo, en el Puesto 4 el oleaje incide por la banda del buque, generando mayores movimientos. En el caso del puesto de carga general, el buque estaría mejor alineado con el oleaje. En caso de que los niveles estimados de downtime fueran mayores a los niveles aceptables, una alternativa más económica que la intervención del rompeolas

sería la extensión de la escollera del muelle de carga general para reducir la agitación, o la optimización de la configuración de amarras. Esto deberá ser verificado y confirmado por los potenciales concesionarios del terminal a través de los estudios de agitación y de nave amarrada para obtener resultados refinados del downtime estimado y las tensiones en las líneas de amarre.

TIEMPO DE DEMORA POR LLUVIAS EN PUERTO CALDERA

Es importante destacar que el downtime predominante en los muelles graneleros (puesto 4 y su extensión prevista) no solamente es debido al oleaje, sino que también se debe a las precipitaciones, ya que no es posible efectuar la descarga de cereales cuando llueve, y Caldera presenta un elevado índice de lluvias. De hecho las estadísticas de tiempo de demora de las operaciones de descarga en el puesto 4 de Puerto caldera entre los años 2020 y 2023 presenta las siguientes cifras:

Tiempo de Demoras por lluvia en Horas					
	2020	2021	2022	2023	Total
Enero	0	21	0	7	28
Febrero	23	0	0	0	23
Marzo	3	10	2	76	91
Abril	53	245	201	1	500
Mayo	266	187	485	94	1032
Junio	512	302	492	359	1665
Julio	115	0	361	147	623
Agosto	423	393	270	284	1370
Septiembre	341	129	394	243	1107
Octubre	264	0	317	0	581
Noviembre	364	154	313	0	831
Diciembre	75	5	10	0	90
Totales	2439	1446	2845	1211	7941

Como puede apreciarse en 2020 supuso un 27.8% del total de horas anuales, siendo el promedio de los cuatro años de un 22.7%

CONCLUSIONES

La altura de ola establecida por el PIANC para la operación segura de buques graneleros es de 1.0m, altura que según el Plan Maestro de 2020 se presenta un 15% del tiempo, mientras que el estudio de Moffatt & Nichols indica que alrededor del 10% del tiempo las olas exceden 0.35 m aproximadamente, pero que alrededor de 25 % de los estados presenta periodos de pico de más de 15 segundos.

Es importante recalcar que el downtime por oleaje en el puesto n.º4 también tiene su origen en la mala orientación del sitio respecto a la dirección de incidencia del oleaje

Se aprecia que son muchos más los días de down time motivados por la lluvia (22.7%) que los provocados por elevado oleaje y que muchos de éstos coinciden con lluvias, por lo que la ampliación del rompeolas apenas supondría una mejora del 5% en el down time del muelle granelero.

En cualquier caso, los cálculos de capacidad de los amarraderos en la Factibilidad se han calculado con los siguientes down time conservadores:

- Graneles: 30%
- Contenedores: 10%
- Mercancía general: 10%

Se ha considerado que la mejora conseguida con la extensión del rompeolas no se vería compensada con una mejora de la productividad por la reducción del down time, que por otra parte se podría reducir con una adecuada orientación de los nuevos muelles, la optimización de la configuración de amarras o el potencial uso de dispositivos del tipo shoretension

El problema de sedimentación de la dársena seguirá presente con o sin una extensión del rompeolas. Como alternativa a la extensión, es posible retirar los sedimentos al sur del rompeolas antes de que ingresen a la dársena, lo cual puede ser mediante un plan de dragado periódico al sur del rompeolas, trampas de arena o un by-pass de sedimentos, según se explicará más adelante.

En cualquier caso, en etapas posteriores se recomienda actualizar el análisis desarrollando un estudio de agitación, oleaje infragravitacional (ondas largas), respuesta dinámica de buque atracado, downtime y simulación dinámica de la operación de graneles que considere el downtime por oleaje y precipitación para evaluar diferentes opciones de longitud de rompeolas versus la optimización de la configuración de amarras y/o el uso de Shoretension, incluyendo además la extensión del puesto de atraque 4, que estará aún más expuesto al oleaje de fondo, pero puede ser orientado de tal forma de reducir el downtime por oleaje. Con este análisis es posible verificar el beneficio en las mejoras en los niveles de servicio (tiempos de espera y demurrage, rendimientos, etc.) versus el costo de cada una de las soluciones.

