

**Empresa Portuaria Arica**  
**Estudio de agitación e ingeniería conceptual de medidas de mitigación, Puerto Arica**

**INFORME FINAL**  
**FGMi-RHDHV-EPA-2104-INF-01**

PREPARADO PARA:

Empresa Portuaria Arica (EPA)



PREPARADO POR:



Revisión	Fecha	Descripción	Estado
FGMi - RHDHV	28/10/2021	Para Aprobación	Preliminar

DOCUMENTOS RELACIONADOS	

NÚMERO TOTAL DE PÁGINAS:

62

COPYRIGHT

Este documento, incluyendo todos los diseños e información proporcionada, es propiedad intelectual del autor. La propiedad intelectual está reservada para el autor. Este documento puede ser utilizado sólo para el propósito definido. Plantilla IDD-01-RB



Puertos, Turismo e Industria  
contacto@fgmi.cl  
www.fgmi.cl



## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>2. DEFINICIONES.....</b>	<b>4</b>
<b>3. ACTIVIDAD 1 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE AGITACIÓN Y ONDAS LARGAS .....</b>	<b>6</b>
3.1 CONDICIONES AMBIENTALES.....	6
3.2 TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE DESDE AGUAS PROFUNDAS HACIA LA ZONA COSTERA .....	13
3.3 ESTUDIO DE PENETRACIÓN DEL OLEAJE.....	19
3.4 COEFICIENTES DE TRANSFORMACIÓN DE OLEAJE DESDE EL PUNTO ZEP.....	32
3.5 CLIMA DE OLEAJE SWELL E INACTIVIDAD EN SITIOS DE ATRAQUE .....	33
3.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	34
<b>4. ACTIVIDAD 2 ALTERNATIVA DE OBRAS DE MITIGACIÓN.....</b>	<b>36</b>
4.1 DISPOSICIÓN GENERAL DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA.....	36
4.2 ESPIGÓN SUR.....	37
4.3 ESPIGÓN NORTE.....	40
4.4 CUBICACIÓN Y COSTO.....	42
4.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	45
<b>5. ACTIVIDAD 3 PUERTO NORTE .....</b>	<b>47</b>
5.1 BASES DE DISEÑO .....	47
5.2 DISEÑO PROPUESTO.....	53
5.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	58
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>58</b>
<b>7. REFERENCIAS .....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO A: Figuras</b>	
<b>ANEXO B: Planos</b>	
<b>ANEXO C: Cubicaciones y costos</b>	

## HISTORIAL DE CAMBIOS

Revisión	Sección	Cambios

## REGISTRO DEL DOCUMENTO

Revisión	Preparó	Revisó	Aprobó
A	JdB/DMO	FGM	FGM

FGM Ingeniería y Servicios SpA (FGMi). Santiago, Chile.

Contacto: Felipe Guerrero M.

+56 9 4457 4167

[felipe.guerrero@fgmi.cl](mailto:felipe.guerrero@fgmi.cl)

[www.fgmi.cl](http://www.fgmi.cl)

Royal HaskoningDHV (RHDHV). Lima, Perú

Contacto: Jan de Bont

[jan.de.bont@rhdhv.com](mailto:jan.de.bont@rhdhv.com)

<https://www.royalhaskoningdhv.com/es-es/latin-america>

## 1. INTRODUCCIÓN

Empresa Portuaria Arica (EPA) licitó y adjudicó a FGMi un estudio de agitación e ingeniería conceptual de medidas de mitigación del efecto de agitación y resonancia de oleaje en la dársena del puerto de Arica. A su vez, FGMi asignó algunas actividades a la firma Holandesa Royal Haskoning RHV con Oficina en Lima, Perú.

El Puerto de Arica se encuentra ubicado en la ciudad de Arica, y es uno de los principales terminales portuarios del Norte de Chile, sirviendo de tránsito de mercaderías desde y hacia el Sur de Perú y Bolivia, entre otros puntos importantes de la Macro región Andina.

El objeto de este estudio es comprender el fenómeno de resonancia de oleaje y proponer alternativas de obras que permitan mitigar el movimiento de las naves atracadas, y en consecuencia mejorar las condiciones marítimas para la transferencia de carga. En el último tiempo el puerto ha notado que el cierre de sus sitios es cada vez más frecuente, incrementando el *downtime* operacional del puerto. Junto a esto, se requiere de asesoría de una alternativa de un posible puerto posicionado en el sector norte de la ciudad de Arica.

Los objetivos principales del estudio son:

- Actividad 1. Analizar la situación actual del puerto respecto de la agitación y el efecto de las ondas larga en el puerto, con énfasis en los sitios 2B, 3 y 4-5, y evaluar obras de mitigación tales como extender el rompeolas principal;
- Actividad 2. Desarrollar la ingeniería conceptual de la alternativa preferida para reducir la resonancia y agitación del puerto; y
- Actividad 3. Proponer una alternativa portuaria al norte de Arica, denominada desde aquí en adelante Puerto Norte, considerando la efectividad de las obras de abrigo, agitación y costos.

## 2. DEFINICIONES

Para un mejor entendimiento de este informe técnico, en este informe se utilizan los siguientes términos y abreviaciones:

### SIMBOLOGÍA

- 1) **Hs.** Altura de oleaje significativo. Corresponde al promedio del 33% de las mayores alturas de oleaje en un estado de mar.
- 2) **Hdir.** Dirección cardinal desde donde viene el oleaje incidente, en grados. e.g.: SO (Sur-Oeste o desde el 225°N)
- 3) **LOA (*Lenght OverAll*)**. Longitud o eslora de una nave entre los puntos más alejados de su centro.
- 4) **NMM (Nivel Medio del Mar)**. Datum vertical topográfico.
- 5) **NRS (Nivel de Reducción de Sondas)**. Datum vertical de referencia de cartas náuticas, que corresponde al nivel mínimo del mar en bajamar de sicigias con la Luna en su perigeo.
- 6) **Tp.** Periodo pico (o *peak*) del espectro de oleaje. Corresponde al período del oleaje con mayor energía de un estado de mar.

### GLOSARIO

- 1) **Altura de oleaje.** Distancia vertical entre el valle y la cresta de una ola.
- 2) **Agitación (por oleaje).** Movimiento de la superficie libre del mar, típicamente en un puerto, debido al oleaje de viento y mar de fondo.
- 3) **Decaimiento del oleaje.** El oleaje, una vez desarrollado por viento en un centro de alta o baja presión, alcanza periodos (T) que le permiten alcanzar mayor celeridad que la de desplazamiento del centro de presión que lo generó. Con esto, se escapa de su zona de generación y aumenta su período con la distancia.
- 4) **Downtime.** Período de tiempo en que un puerto o sitio de atraque no está disponible para cargar o descargar naves por efectos de visibilidad, viento, corrientes, oleaje, disponibilidad de muelles, equipos y accesorios. Es el antónimo de disponibilidad.
- 5) **Eslora.** Longitud de una nave o embarcación.
- 6) **Espectro de oleaje.** Diagrama que caracteriza el oleaje de un estado de mar asignando energía a sus distintas frecuencias (o períodos) y direcciones.
- 7) **Estado de mar.** Condición de la superficie libre del mar con respecto al oleaje en un lugar y momento determinado. Se caracteriza por estadígrafos como altura significativa (Hs), periodo pico (Tp) y dirección (Hdir).
- 8) **Manga.** Ancho de una nave o embarcación.
- 9) **Mar de viento u oleaje *Sea*.** Oleaje generado por viento que se encuentra dentro de su zona de generación (centro de una zona de alta o baja presión). En las costas de Chile, típicamente tiene períodos hasta 10 s.
- 10) **Onda larga.** Oleaje de periodos mayores a 30 s, que típicamente generan movimientos excesivos de naves atracadas.
- 11) **Resonancia.** Aumento de la energía del oleaje producto de reflexiones y baja disipación. Efecto producto de la superposición de oleaje incidente con oleaje reflejado, notorio y problemático al interior de dársenas (puertos).
- 12) **Mar de fondo u oleaje *swell*.** Oleaje generado por viento que salió de su zona de generación. En las costas de Chile, típicamente tiene períodos entre 10 s y 20 s.
- 13) **Avance o *Surge*.** Desplazamiento de avance o retroceso de una nave (e.g. a lo largo de un muelle).
- 14) **Deriva o *sway*.** Desplazamiento horizontal hacia los costados de una nave. e.g. desplazamiento de una nave atracada separándose del muelle.
- 15) **Arfada o *heave*.** Desplazamiento vertical de una nave.
- 16) **Cabeceo o *pitch*.** Rotación vertical de una nave respecto de su eje transversal.
- 17) **Balance o *Roll*.** Rotación lateral respecto de su eje longitudinal de babor a estribor y viceversa.
- 18) **Guiñada o *Yaw*.** Rotación en un plano horizontal de la proa o popa de una nave.

### 3. ACTIVIDAD 1 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE AGITACIÓN Y ONDAS LARGAS

En ese capítulo se caracterizan las condiciones ambientales relevantes para el estudio, que incluyen oleaje, viento, mareas, corrientes, y batimetría del fondo marino. Se describe el trabajo de transformación de oleaje desde aguas profundas hasta el puerto, necesarios para determinar la línea base o situación actual de agitación por oleaje dentro de la poza.

Una vez determinada la línea base, se presentan y evalúan alternativas de mitigación para reducir la agitación por oleaje *swell* y por onda larga. Se analizan alternativas de obras exteriores, como la extensión del rompeolas, e interiores para modificar la respuesta de la dársena a las ondas largas.

Finalmente se presentan coeficientes de transformación del oleaje entre la Zona de Espera de Prácticos (punto ZEP), lo que podrá ser utilizado para extender el pronóstico operacional de oleaje hacia los sitios de atraque. Se evaluó el clima de oleaje operacional dentro de la poza para determinar posibles mejoras en el *downtime* a la vista de las soluciones propuestas. Se presentan conclusiones y recomendaciones.

#### 3.1 CONDICIONES AMBIENTALES

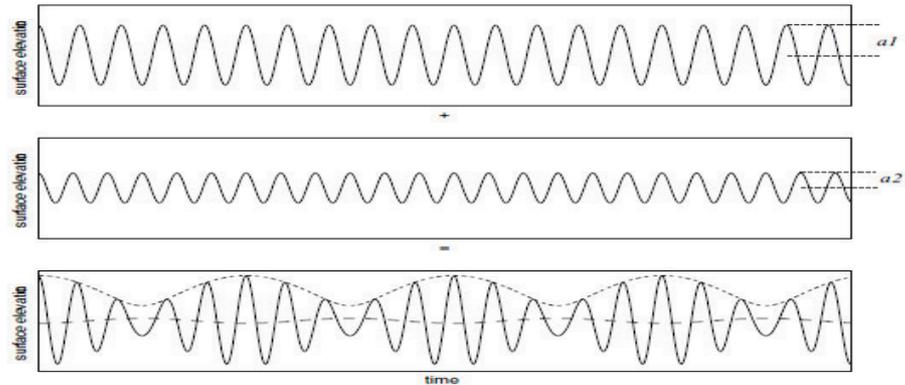
##### 3.1.1 DATOS DE OLAJE

###### a) Descripción general de las condiciones del oleaje en Arica

El clima del oleaje en la costa de Chile se caracteriza por oleajes del tipo *swell* de períodos largos (14s-20s) provenientes del suroeste. Durante el invierno (mayo-agosto) y debido a centros de baja presión locales. El clima de oleaje es más severo que durante el verano.

El Molo de abrigo del puerto provee protección contra el oleaje proveniente del suroeste. Sin embargo, la energía del oleaje penetra en la dársena debido a la difracción del oleaje alrededor del cabezo del rompeolas principal, para luego reflejarse en las estructuras verticales dentro de la poza.

Adicionalmente al oleaje *swell*, las olas secundarias (ondas largas) desempeñan un rol en el clima de oleaje local. Estas ondas se relacionan con el agrupamiento del oleaje, y se caracterizan por tener un período característico en el rango de 60 s a 120 s. La altura de este oleaje de infra gravedad depende de la altura y período del oleaje *swell*.



**Figura 3-1** Los dos primeros paneles muestran ondas primarias (líneas continuas), el último panel muestra la superposición de las dos ondas primarias y la envolvente de amplitud. La línea de puntos y trazos representa la onda larga (límite) o la onda de infra gravedad.

Estas ondas se caracterizan por tener una longitud de onda ( $L$ ) significativa (orden de un kilómetro o más) y también por tener una baja altura ( $H$ ) del orden de 5-20 cm, de modo que es difícil detectarlas a simple vista. Debido a que tienen baja pendiente ( $H/L$ ), prácticamente toda su energía se refleja en contornos terrestres. Además, están en el rango del período natural de barcos atracados, lo cual hace que sea relevante incluir estas ondas en una simulación de barcos atracados en el puerto de Arica.

Debido a la energía del oleaje que penetra en la dársena del puerto, los barcos atracados responden con un movimiento que corresponde al período de la energía del oleaje incidente. Usualmente, el período natural de un barco amarrado está en el rango de 60-120 s, lo cual hace que su comportamiento sea especialmente sensible a las ondas largas.

**b) Datos ECMWF en aguas profundas**

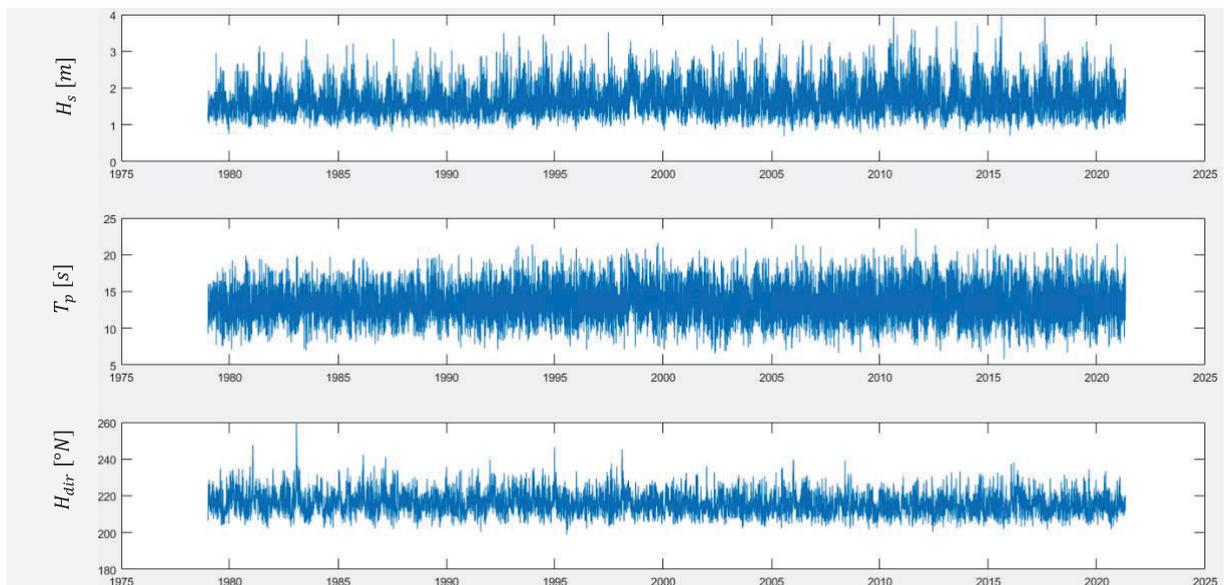
Se usaron los datos de re-análisis del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), del modelo ERA5 en aguas profundas. El modelo global provee información en océanos y es la fuente de datos de entrada para modelos de oleaje regionales alrededor del mundo. Además, provee series temporales de 3 horas del espectro del oleaje, parámetros del viento y oleaje, teniendo una base de datos de aproximadamente 41.5 años (01-Ene-1979 hasta 01-Jul-2021).

La información ha sido extraída de la base de datos ECMWF para la ubicación que se muestra en la Figura 3-2, a 18 km del puerto en  $-18.5^\circ$  Lat,  $-70.5^\circ$  Lon. Los datos contienen la dirección y velocidad del viento y la altura del oleaje ( $H_s$ ), período pico del oleaje ( $T_p$ ) y dirección pico del oleaje ( $D_p$ ).

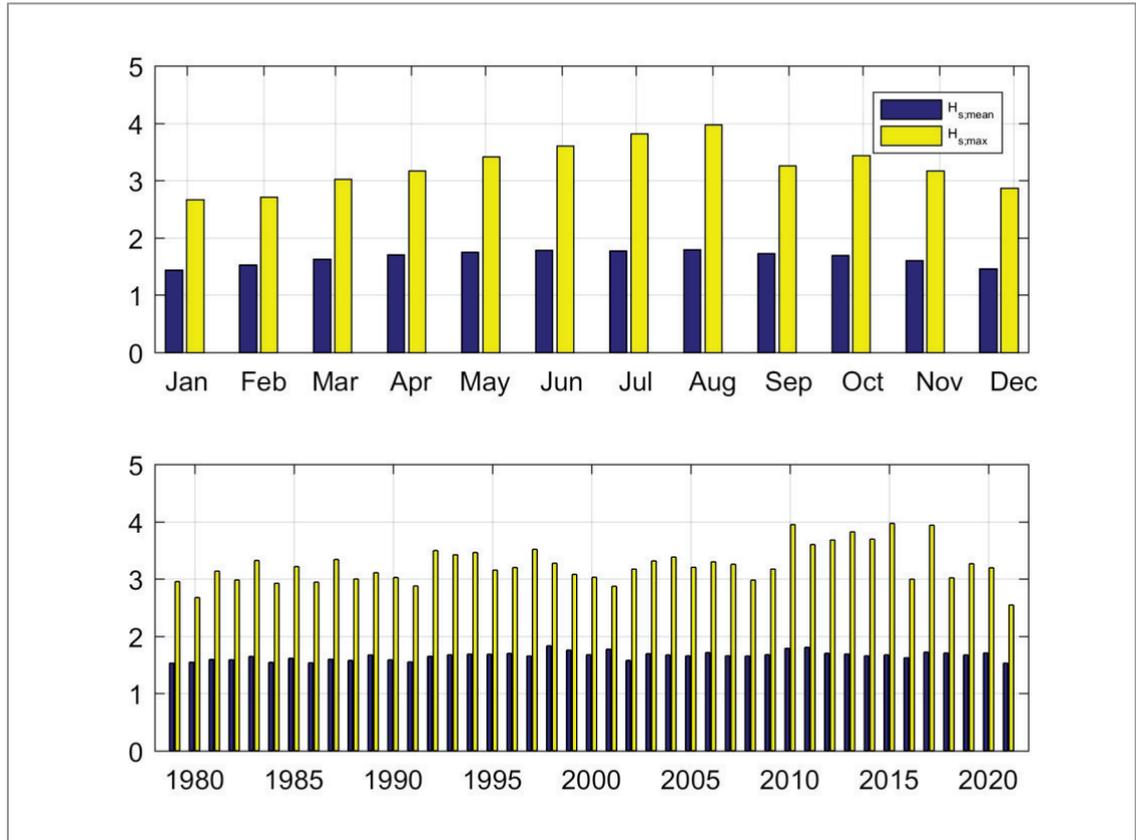


*Figura 3-2 Ubicación del punto de datos ECMWF en aguas profundas.*

La serie temporal de la altura ( $H_s$ ), el periodo ( $T_p$ ) y dirección ( $H_{dir}$ ) del oleaje se presenta en la Figura 3-3. Se observa claramente el efecto de las estaciones del año (invierno y verano) en la altura del oleaje. Además, se observa un incremento de las alturas de oleaje máximos entre 2010 y 2018. Los histogramas de la Figura 3-4 muestran el valor promedio y máximo del oleaje por mes y por año.



*Figura 3-3 Serie de tiempo de la altura ( $H_s$ ), el periodo ( $T_p$ ) y dirección ( $H_{dir}$ ) del oleaje.*



**Figura 3-4 Histogramas con valores promedio y máximo del oleaje por mes y por año.**

Los datos de oleaje presentan una dirección del oleaje dominante desde 200 - 225 °N (SSO-SO), como se observa en la rosa de oleaje de la Figura 3-5.

La base de datos fue reorganizada y dividida según dirección, período y altura del oleaje, tal como se muestra en la Tabla 3-1. Esta indica la frecuencia de ocurrencia de un determinado rango de condiciones de oleaje, definidas por  $H_s$ ,  $T_p$  y  $H_{dir}$ . De esta tabla se observa, por ejemplo, que un 22,19 % del tiempo el oleaje presenta una altura entre 1.5 m y 2.0 m con período entre 12 s y 14 s. Asimismo, el 14,12 % del tiempo ese rango de altura de oleaje proviene del 210°N-215°N.

De la misma tabla se desprende que gran porcentaje del oleaje proviene desde 190-250°N, con una altura de oleaje incidente entre 1.0 m y 3.0 m y de 10 s y 18 s de periodo peak.

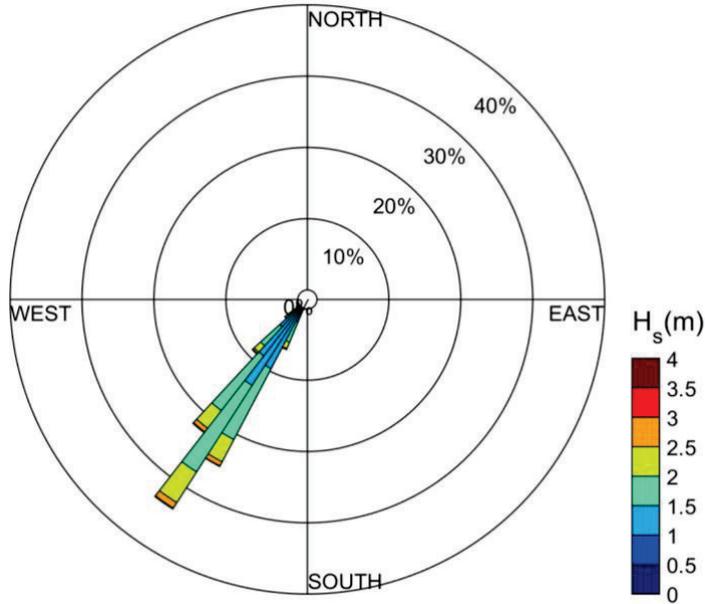


Figura 3-5: Rosa de altura del  $H_s$ , 1979-2021. Datos ECMWF

Tabla 3-1 Ocurrencia de condiciones de oleaje en aguas profundas, 1979-2021 (datos ECMWF)

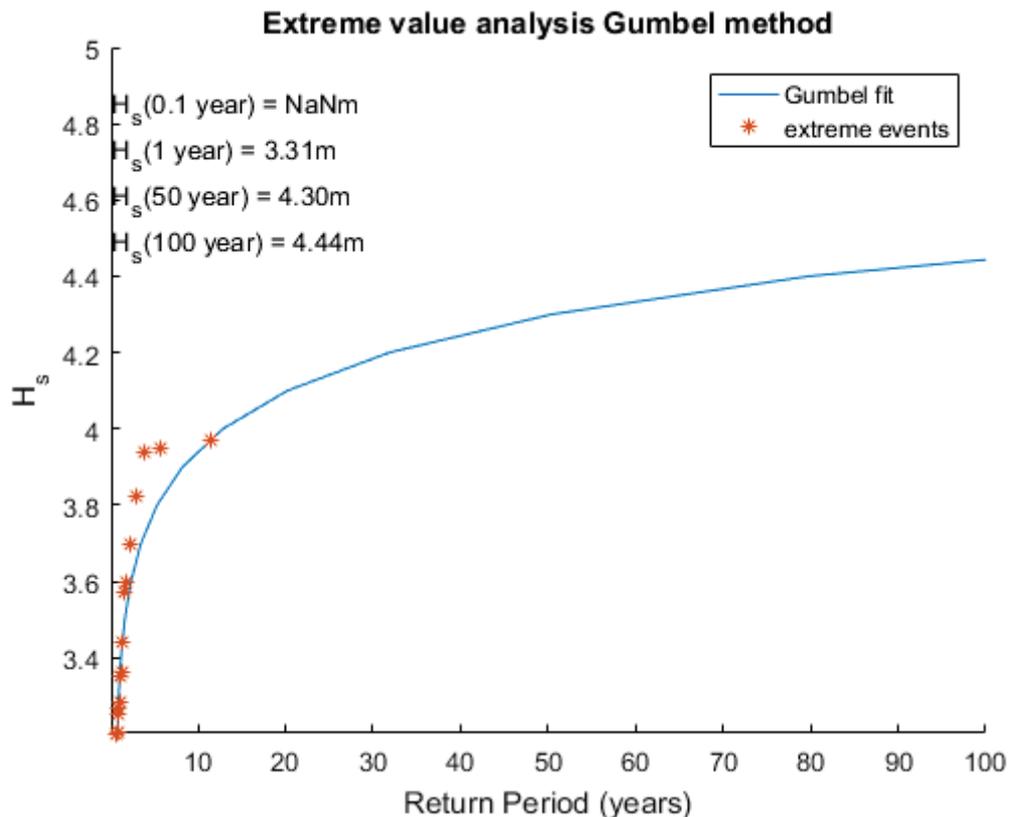
$H_s$ nearshore (m)	$T_p$ (s)									
	6	8	10	12	14	16	18	20		>20
>4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.00%</b>
4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.03%	0.01%	0.00%		<b>0.04%</b>
3.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.12%	0.23%	0.02%	0.00%		<b>0.38%</b>
3	0.00%	0.00%	0.01%	0.24%	1.67%	0.77%	0.10%	0.01%		<b>2.80%</b>
2.5	0.00%	0.01%	0.53%	4.19%	7.77%	1.57%	0.22%	0.02%		<b>14.31%</b>
2	0.01%	1.03%	6.62%	22.19%	10.63%	2.58%	0.42%	0.04%		<b>43.52%</b>
1.5	0.24%	3.61%	12.65%	13.96%	5.35%	1.43%	0.22%	0.02%		<b>37.49%</b>
1	0.09%	0.27%	0.33%	0.22%	0.11%	0.03%	0.00%	0.00%		<b>1.06%</b>
0.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%		<b>0.00%</b>
0	<b>0.34%</b>	<b>4.92%</b>	<b>20.15%</b>	<b>40.80%</b>	<b>25.67%</b>	<b>6.64%</b>	<b>0.99%</b>	<b>0.09%</b>		<b>99.60%</b>

$H_s$ nearshore (m)	$H_{dir}$ (°N)														
	195	200	205	210	215	220	225	230	235	240	245	250	255		>255
>4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.00%</b>
4	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.04%</b>
3.5	0.00%	0.00%	0.03%	0.09%	0.13%	0.07%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.38%</b>
3	0.00%	0.04%	0.37%	0.88%	0.87%	0.45%	0.16%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>2.80%</b>
2.5	0.00%	0.18%	2.16%	4.81%	4.22%	2.14%	0.62%	0.18%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>14.31%</b>
2	0.01%	0.79%	6.91%	14.12%	12.80%	6.04%	2.18%	0.56%	0.06%	0.02%	0.02%	0.01%	0.01%	0.01%	<b>43.52%</b>
1.5	0.00%	0.31%	5.37%	12.08%	11.19%	5.80%	2.13%	0.43%	0.12%	0.05%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>37.49%</b>
1	0.00%	0.00%	0.14%	0.37%	0.30%	0.18%	0.05%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>1.06%</b>
0.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.00%</b>
0	<b>0.01%</b>	<b>1.32%</b>	<b>14.97%</b>	<b>32.36%</b>	<b>29.51%</b>	<b>14.69%</b>	<b>5.21%</b>	<b>1.23%</b>	<b>0.19%</b>	<b>0.06%</b>	<b>0.02%</b>	<b>0.01%</b>	<b>0.01%</b>		<b>99.60%</b>

c) Análisis de condiciones extremas del oleaje

Para caracterizar los valores extremos de oleaje en aguas profundas, se ha realizado un análisis de valor extremo sobre la base de eventos extremos de la serie de tiempo. La predicción de eventos extremos se obtuvo adaptando una distribución Gumbel. Mientras que, para los parámetros relacionados como el período del oleaje, velocidad del viento y altura del oleaje, se usaron las correlaciones estadísticas de los datos.

Se han encontrado eventos individuales introduciendo un valor de umbral (método de máximos sobre umbral) sobre la altura significativa y el periodo pico. Los valores de los datos por encima del valor de umbral son considerados como un evento si los eventos individuales ocurren al menos 48 horas después del evento previo. El número de eventos usados en la predicción de valores extremos es importante ya que determina la precisión del ajuste de la distribución Gumbel. Se han utilizado diferentes valores de umbral para configurar el número de eventos equivalentes para coincidir con el promedio de aproximadamente 7.5 eventos por año, que se considera es un número representativo de eventos por año para realizar mejores métodos de ajuste en los datos del viento y del oleaje.



**Figura 3-6 Ajuste Gumbel y período de retorno para eventos de altura del oleaje para el valor de umbral de 4.44 m. Los eventos individuales están 48 horas aparte.**

La altura de oleaje significativo extremo ( $H_s$ ) para la ubicación ECMWF en aguas profundas se presenta en la Tabla 3-2. La dirección típica para estas alturas del oleaje son 215°N, con un periodo de  $T_p = 15$  s.

**Tabla 3-2 Condiciones extremas del oleaje en aguas profundas**

Periodo de retorno	$H_s$ (m)
1:1	3.31
1:50	4.31
1:100	4.44

La Tabla 3-3 muestra la altura del oleaje significativo extremo ( $H_s$ ) determinado para eventos con un periodo  $T_p$  mayor a 18s. La dirección típica para estas alturas del oleaje es 225°N, con un periodo de  $T_p=19s$ .

**Tabla 3-3 Condiciones extremas del oleaje en aguas profundas para oleaje con periodo superior a 18 s.**

Periodo de retorno	$H_s$ (m)
1:1	2.98
1:50	3.85
1:100	4.01

En este estudio conceptual, se ha evaluado solamente una fuente de datos. Para efectos de diseño para construcción, se recomienda evaluar diferentes fuentes de datos. De forma conservadora, se ha considerado un 10% adicional a los valores calculados. La Tabla 3-4 muestra las condiciones extremas, que se utilizan en este estudio para el modelo de transformación del oleaje de aguas profundas hacia el área del puerto.

**Tabla 3-4 Condiciones de oleaje de condición extremas simuladas en el modelo de transformación de oleaje de aguas profundas hacia el área del puerto.**

Condiciones extremas en aguas profundas para diseños conceptuales	Considerando Altura extrema	Considerando Periodo extremo
$H_s$ (m)	5.0	4.4
$T_p$ (s)	15	19
$H_d$ (°N)	215	225

Para efectos de diseño preliminar de obras marítimas típicamente se utiliza el período de retorno 1:100. Los mayores eventos de oleaje en los datos no están influenciados por el viento local, de modo que la velocidad del viento no se incluye en las transformaciones del oleaje en aguas profundas a la zona costera para las condiciones del oleaje extremo.

### 3.1.2 VIENTO, MAREAS Y CORRIENTES

#### a) Condiciones del viento

GSM (2021) establece:

*"Los vientos predominantes en esta zona son del SW, con magnitudes entre 8 a 16 nudos, los cuales soplan casi todo el año, alcanzando sus máximas intensidades a partir del mes de septiembre hasta marzo, con un máximo de 28 nudos. Lo hacen con fuerza regular desde el mediodía hasta el atardecer, dando origen a un período de calma hasta las 04:00 hrs. en que sopla levemente una brisa de tierra a mar conocido como puelche o terral, el que desaparece*

*a las 09:00 hrs. restableciéndose los vientos de dirección SW. En invierno existen cortos periodos de calma y vientos del norte."*

Estas condiciones de viento son limitadas y no se consideran críticas para las condiciones de oleaje en el puerto, por lo tanto, no se ha considerado el viento en las simulaciones.

b) Marea astronómica

GSM (2021) establece:

*"Régimen de mareas es mixto y semidiurno. El rango de la marea en sicigias es de 1,77 m".*

Estas condiciones de marea son limitadas, y no se consideran críticas para las condiciones del oleaje en el puerto. Por lo tanto, las distintas alturas de marea no se han considerado en las simulaciones.

c) Corrientes marinas

GSM (2021) establece:

*"Como consecuencia de los vientos predominantes del SW, se forma en la rada una corriente marina constante hacia el NE, cuya intensidad varía con la fuerza del viento manteniéndose hasta 3 nudos cuando el viento alcanza fuerza 4".*

Estas condiciones no se consideran críticas para el alcance del estudio.

### 3.1.3 BATIMETRÍA

La información batimétrica se ha obtenido de dos fuentes:

- Para el área del puerto: Batimetría proyecto escollera de protección, Proyecto Quedades E.P.A. (2015)
- Proyecto profundización sitio 4-5 y protección sitio 1. Especificaciones técnicas y planos *as-built* Belfi-TPA (2020).
- Navionics (<http://webapp.navionics.com/>) líneas de contorno batimétrico para los datos en aguas profundas.

En las áreas superpuestas entre las fuentes se han encontrado muy buenas similitudes, de modo que esto ofrece seguridad y confiabilidad de los datos.

## 3.2 TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE DESDE AGUAS PROFUNDAS HACIA LA ZONA COSTERA

### 3.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE TRANSFORMACIÓN DE OLAJE SWAN

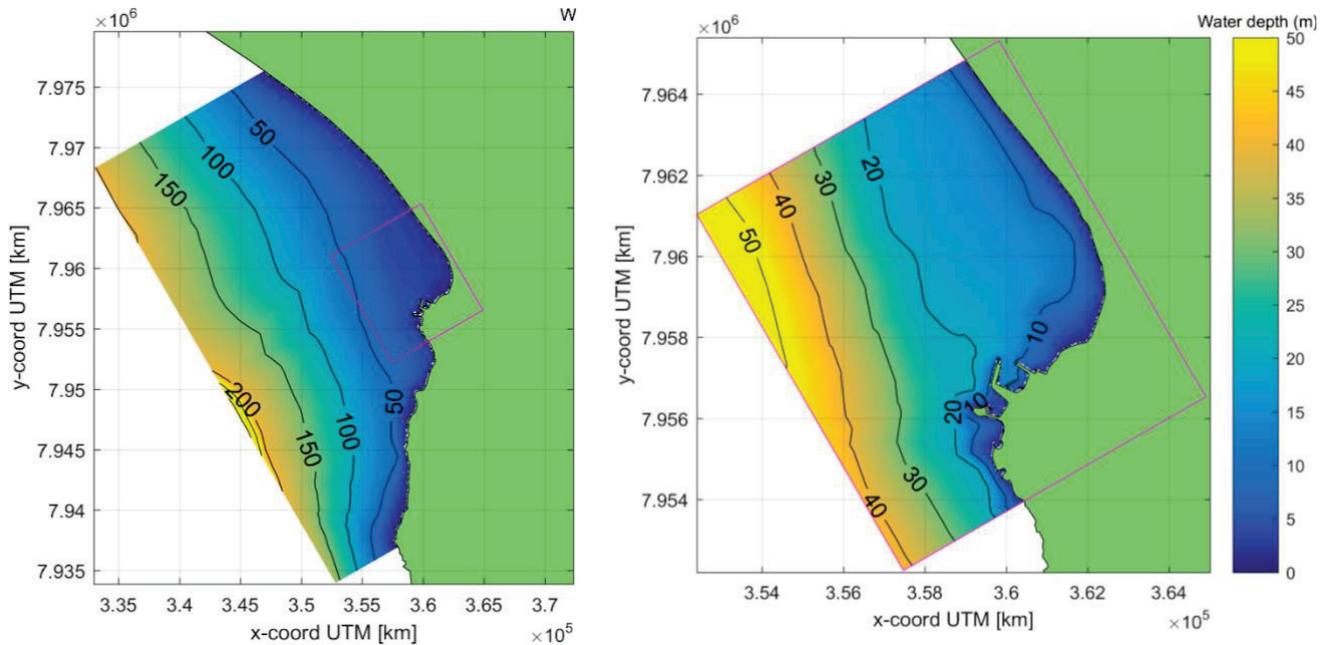
Puesto que la información de larga duración está disponible en aguas profundas (Sección 2.1.1), es necesario transformar esta información hacia aguas someras y cercanas al puerto. En este estudio se ha empleado el programa computacional SWAN (Delft) para transformar el oleaje desde aguas profundas hacia la proximidad del puerto. Las condiciones del oleaje dentro del puerto requieren la aplicación de un programa computacional diferente, en el dominio del tiempo, como lo es MIKE 21 BW (DHI) utilizado.

SWAN es un modelo de última generación utilizado para la transformación del oleaje desde aguas profundas hacia la zona costera. Al ser espectral es adecuado para la transformación del oleaje en áreas en donde la difracción y las reflexiones no desempeñan un rol dominante. Se puede encontrar información más detallada acerca del modelo en <http://www.swan.tudelft.nl/>.

### 3.2.2 CONFIGURACIÓN DEL MODELO

El área de interés de las simulaciones con SWAN es el área alrededor del Puerto de Arica.

En el borde del modelo se ubica el punto de datos ECMWF de aguas profundas. La cuadrícula grande (A) consiste en celdas rectangulares de 200 m x 200 m. Se preparó una cuadrícula más fina para el área de interés (B) con tamaño de celda de 50 m x 50 m. La Figura 3-7 muestra las cuadrículas A y B del modelo SWAN usadas en este estudio.



*Figura 3-7 Cuadrículas A (izq.) y B (der.) del modelo de transformación de oleaje SWAN.*

### 3.2.3 RESULTADOS DEL MODELO

#### a) Condición típica

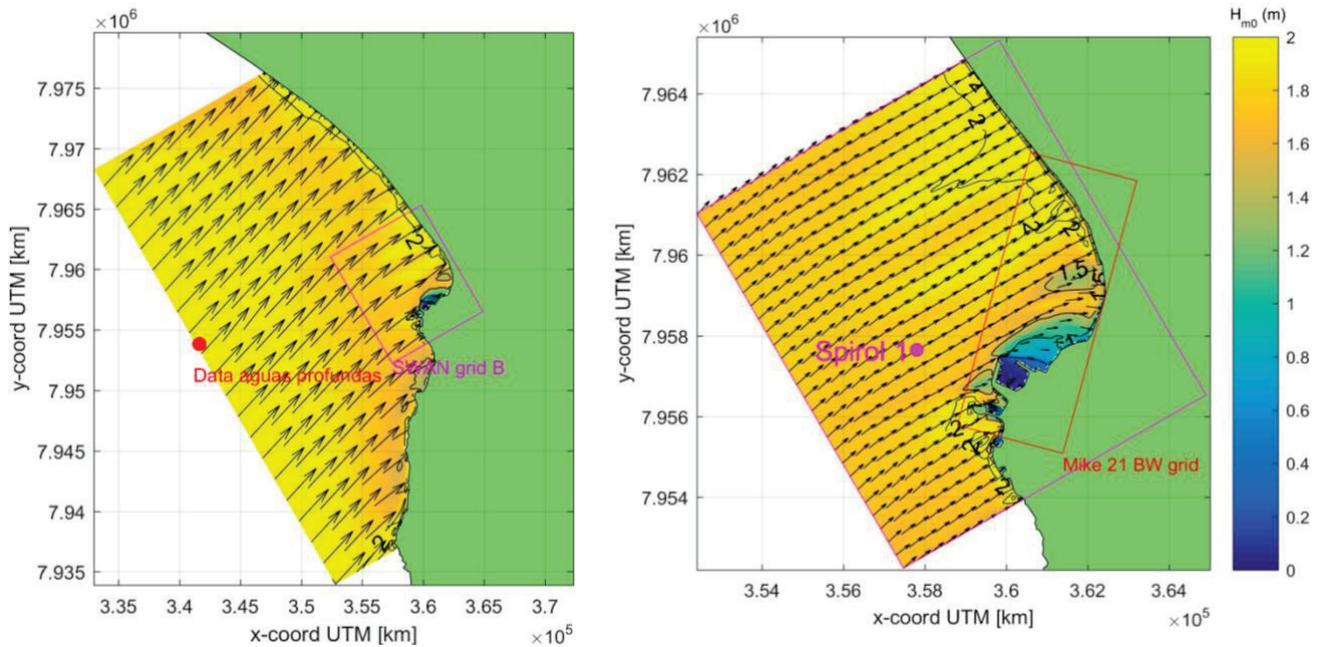
La Figura 3-8 muestra un resultado típico de una simulación SWAN para la siguiente condición del oleaje en aguas profundas:

- $H_s = 2.0 \text{ m}$
- $T_p = 16 \text{ s}$
- $H_{dir} = 220^\circ N$

La condición resultante del oleaje en la ubicación del punto de espera de prácticos (ZEP o Siprol-1) es:

- $H_s = 1.77\text{ m}$
- $T_p = 15.9\text{ s}$
- $H_{dir} = 235^\circ\text{N}$

La reducción en la altura del oleaje (en un 11%) y el cambio de dirección (+15°) es causada por la geometría de la costa y batimetría del fondo marino alrededor de Arica.



**Figura 3-8 Resultado típico de la transformación del oleaje SWAN; condiciones en aguas profundas:  $H_s = 2.0\text{m}$ ,  $T_p = 16\text{s}$ ,  $H_{dir} = 220^\circ\text{N}$**

b) Condiciones (operacionales) normales

Las simulaciones SWAN fueron hechas para todo el rango de condiciones en aguas profundas, que cubren las condiciones anuales:

- $T_p = 8s, 12s, 16s$  y  $20s$
- $H_{dir} = 200^\circ N, 210^\circ N$  y  $230^\circ N$

Las series temporales ECMWF en aguas profundas fueron transformadas a series temporales a los puntos:

- ZEP (Siprol 1)
- Borde modelo MIKE 21 BW
- Ubicación Puerto Norte

Las Tabla 3-5, Tabla 3-6 y Tabla 3-7 muestra el clima anual del oleaje en las 3 ubicaciones. Se nota una diferencia en la altura del oleaje en las 3 ubicaciones. Por ejemplo, el porcentaje anual de excedencia de considerando un umbral de  $H_s = 2.0 m$  es:

- ZEP (Siprol-1): 4.10%
- Borde modelo MIKE 21 BW: 1.23%
- Puerto Norte: 6.94%

Con esto se observa que la zona cercana al Puerto Norte está más expuesta al oleaje.

**Tabla 3-5 Ocurrencia de condiciones del oleaje en el punto 'ZEP-Siprol 1', durante todo el año (datos periodo 1979-2020).**

		$T_p$ (s)													
		2	6	10	14	18	22	>22							
$H_{mo}$ nearshore (m)	>4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.00%</b>						
	4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.00%</b>						
	3.5	0.00%	0.00%	0.01%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.03%</b>						
	3	0.00%	0.00%	0.23%	0.14%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.37%</b>						
	2.5	0.00%	0.01%	2.28%	1.41%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>3.70%</b>						
	2	0.00%	0.25%	13.44%	7.80%	0.04%	0.00%	0.00%	<b>21.53%</b>						
	1.5	0.00%	2.57%	32.82%	17.59%	0.06%	0.00%	0.00%	<b>53.05%</b>						
	1	0.09%	7.72%	6.77%	2.40%	0.01%	0.00%	0.00%	<b>16.99%</b>						
0.5	1.74%	1.45%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>3.20%</b>							
0	<b>1.83%</b>	<b>12.01%</b>	<b>55.57%</b>	<b>29.35%</b>	<b>0.12%</b>	<b>0.00%</b>	<b>0.00%</b>	<b>98.87%</b>							
		$H_{dir}$ ( $^\circ N$ )													
		190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	>300	
$H_{mo}$ nearshore (m)	>4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.00%</b>
	4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.00%</b>
	3.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.03%</b>
	3	0.00%	0.00%	0.00%	0.10%	0.27%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.37%</b>
	2.5	0.00%	0.00%	0.02%	1.17%	2.46%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>3.70%</b>
	2	0.00%	0.01%	0.46%	7.26%	13.59%	0.21%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>21.53%</b>
	1.5	0.00%	0.43%	3.59%	20.79%	27.94%	0.29%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>53.05%</b>
	1	0.78%	3.74%	4.71%	4.58%	3.16%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>16.99%</b>
0.5	1.97%	0.47%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>2.46%</b>	
0	<b>2.75%</b>	<b>4.66%</b>	<b>8.79%</b>	<b>33.91%</b>	<b>47.45%</b>	<b>0.57%</b>	<b>0.00%</b>	<b>0.00%</b>	<b>0.00%</b>	<b>0.00%</b>	<b>0.00%</b>	<b>0.00%</b>	<b>0.00%</b>	<b>98.12%</b>	

**Tabla 3-6 Ocurrencia de condiciones del oleaje en el borde del modelo MIKE 21 BW, durante todo el año (datos periodo 1979-2020).**

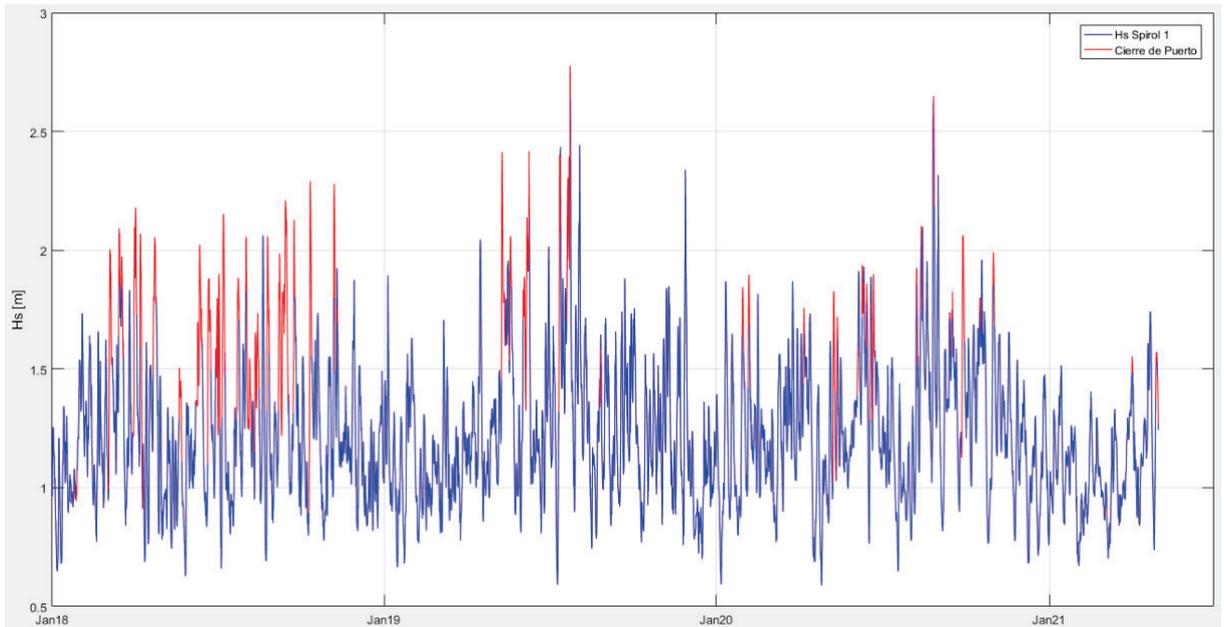
		$T_p$ (s)						$H_{dir}$ (°N)														
		2	6	10	14	18	22	>22	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	>300	
$H_{nearshore}$ (m)	>4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	3.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	3	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.08%
	2.5	0.00%	0.00%	0.60%	0.54%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.66%	0.49%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.15%
	2	0.00%	0.00%	7.18%	4.71%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	8.47%	3.43%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	11.92%
	1.5	0.00%	0.11%	32.85%	18.76%	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.03%	39.37%	11.39%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	51.80%
1	0.00%	2.67%	21.07%	6.35%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.20%	7.53%	20.15%	2.24%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	30.12%	
0.5	0.00%	3.59%	0.35%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.28%	1.65%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.94%	
0		0.00%	6.37%	62.11%	30.40%	0.13%	0.00%	0.00%	0.00%	2.48%	10.23%	68.72%	17.58%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	99.01%	

**Tabla 3-7 Ocurrencia de condiciones del oleaje en el Puerto Norte, durante todo el año (datos periodo 1979-2020).**

		$T_p$ (s)						$H_{dir}$ (°N)														
		2	6	10	14	18	22	>22	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	>300	
$H_{nearshore}$ (m)	>4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
	4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
	3.5	0.00%	0.00%	0.02%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	
	3	0.00%	0.03%	0.38%	0.29%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.72%	
	2.5	0.00%	0.32%	3.43%	2.25%	0.17%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	4.17%	1.94%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	6.17%	
	2	0.00%	1.59%	17.35%	10.12%	0.35%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.55%	20.86%	7.99%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	29.41%	
	1.5	0.00%	3.49%	35.73%	16.92%	0.41%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.45%	42.60%	12.51%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	56.56%	
1	0.00%	0.53%	4.27%	1.47%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.30%	5.14%	0.85%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	6.30%		
0.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
0		0.00%	5.97%	61.18%	31.07%	0.98%	0.00%	0.00%	0.00%	2.35%	73.26%	23.59%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	99.20%	

c) Comparación con registro de cierre de puerto

La Figura 3-9 presenta la altura del oleaje  $H_s$  en el punto ‘ZEP-Siprol 1’, línea azul, y en rojo se destacan los registros de cierre del puerto. No se observa un límite de altura de oleaje completamente consistente en los cierres de puerto, por lo que el periodo del oleaje y las ondas largas pueden tener un rol. De la visita y reunión con EPA y prácticos el 14 Septiembre 2021, se comentó que la reducción de los cierres de puerto a partir de mediados de 2019 puede estar correlacionado con el comienzo del uso de los dispositivos *Shore-Tension* en el puerto de Arica.



**Figura 3-9 Relación entre Altura de oleaje en el punto Siprol 1 (azul) y registros de cierre del puerto.**

d) Condiciones extremas

Las condiciones extremas se utilizan para el diseño de estructuras, tales como la extensión del Molo o un nuevo rompeolas en el Puerto Norte. Usualmente, para dichos diseños se utiliza un periodo de retorno de 100 años. La Tabla 3-8 muestra las condiciones extremas en las tres ubicaciones.

**Tabla 3-8 Condiciones de oleaje extremo 1:100 años en aguas someras.**

Ubicación	Condición 1 (altura extrema)			Condición 2 (periodo extremo)		
	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_{dir}$ (°N)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_{dir}$ (°N)
Aguas Profundas (Tabla 3-4)	5.0	15	215	4.4	19	225
Borde MIKE 21 BW	3.8	15	239	3.9	18.8	244
Puerto Norte	4.4	15	229	4.4	18.9	234

### 3.3 ESTUDIO DE PENETRACIÓN DEL OLEAJE

#### 3.3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL MODELO MIKE 21 BW

El programa computacional MIKE 21 BW (Boussinesq Waves), desarrollado por el Instituto Hidráulico Danés (DHI), es un modelo numérico de oleaje que se utiliza para simular áreas en donde los fenómenos de reflexiones, difracción y resonancia desempeñan un rol importante. En este estudio se usó un modelo MIKE 21 BW para calcular la penetración del oleaje y la agitación en la dársena del Puerto de Arica.

MIKE 21 BW calcula condiciones de oleaje en el dominio del tiempo, tomando en consideración todos los fenómenos del oleaje importantes y de interés en el puerto. En el límite del modelo se ubica una línea de generación de oleaje. La propagación del oleaje se determina en una malla computacional rectangular en donde los flujos y las elevaciones superficiales del oleaje se calculan en cada celda numérica. Sobre la base de las series tiempo de las elevaciones superficiales calculadas, se pueden calcular los patrones del oleaje estacionario (resonancia) y la energía de la onda larga aplicando un filtro para olas de baja frecuencias (*low-pass filter*).

A continuación, se muestra una lista de los fenómenos físicos que se incluyen en el modelo:

- Refracción.
- Difracción.
- Rotura del oleaje.
- Fricción del fondo.
- Cambios en la ubicación de la línea de costa.
- Transmisión y reflexión parcial.
- Interacción ola-ola no lineal.
- Frecuencia de difusión.
- Difusión direccional.

#### 3.3.2 CONFIGURACIÓN DEL MODELO

##### a) Batimetría

El modelo numérico utiliza una cuadrícula o malla computacional que consiste en celdas cuadradas de un tamaño constante. En esta cuadrícula se proyecta un mapa batimétrico y los valores del mapa son interpolados para formar una capa de cuadrícula batimétrica. En este modelo la resolución de la cuadrícula es  $dx=10$  m. El área de dominio del modelo se escoge de tal manera que los efectos de borde del modelo no influyan en los resultados de las ondas largas en el área de interés (el puerto). Por consiguiente, el dominio computacional tiene un tamaño de 2.1 km x 4.4 km.

##### b) Período de simulación y paso de tiempo computacional

Se utilizó un periodo de simulación total de una hora, y se toma en cuenta 15 minutos de tiempo de inicialización que se descartan del proceso de análisis. Luego el análisis para determinar la altura de la onda larga en el puerto se realiza en los 45 minutos restantes.

El paso de tiempo computacional se relaciona directamente con la estabilidad numérica del modelo. Un paso de tiempo de  $dt=0.2$  s es suficientemente pequeño para modelar el oleaje más corto (alta frecuencia).

c) Esquema numérico

La diferencia central con el esquema de alimentación lateral es el esquema numérico más estable para este propósito.

d) Fricción del fondo

Se incluye la fricción del fondo con el fin de modelar el oleaje y las corrientes (debidas al oleaje) de manera precisa.

e) Capas de porosidad

Las características de las condiciones de borde terrestres se pueden incluir en una capa de porosidad. Valores diferentes para la porosidad resultarán en reflexiones de oleaje diferentes. Esto se utiliza para hacer una distinción entre por ejemplo las pendientes de la playa, pendientes de escollera y muros de muelle o rompeolas verticales.

f) Capas de esponja

Estas capas actúan como amortiguador del oleaje y están implementadas en los bordes del modelo. Las capas de esponja tienen una reflexión igual a cero y son utilizadas fuera del área principal de interés.

g) Parámetros de salida

Los parámetros de salida pueden relacionarse con el análisis dinámico de barco amarrado. Éste requiere un determinado paso de tiempo mínimo para asegurar precisión.

h) Condiciones de borde del oleaje

Las condiciones de borde del oleaje se basan en el clima del oleaje ubicado en el borde Oeste del área del modelo. El clima de oleaje en esta ubicación fue obtenido por la transformación del oleaje desde aguas profundas a la zona costera (SWAN).

Para la evaluación y comparación de alternativas de mitigación de las condiciones de oleaje en el puerto se consideró una condición de oleaje operacional con porcentaje de excedencia de aproximadamente 10 %, esto es, que en un año solo sea superado un 10 % de las veces. De la Tabla 3-6:

- $H_s = 1,5$  m;
- $T_p = 16$  s;
- $H_{dir} = 250$  °N.

Después de haber escogido la mejor alternativa de mitigación, se simula una serie de condiciones para la situación actual y para la mejor alternativa, para las siguientes condiciones:

- $H_s = 1,5$  m;

- $T_p = 12 s, 16 s \text{ y } 18 s;$
- $H_{dir} = 230^\circ N, 240^\circ N, \text{ y } 250^\circ N.$

Esto produce una matriz con nueve combinaciones típicas. Con esta serie de condiciones, se puede hacer una estimación de la mejora de las condiciones del oleaje durante todo el año.

### 3.3.3 ALTERNATIVAS MODELADAS

En el presente estudio se comprometió el análisis de tres alternativas. Sin embargo, el desarrollo del estudio obligó a proponer y analizar más alternativas para así proponer una solución atractiva.

Además del caso base o situación actual, se modelaron 15 alternativas las cuales se describen en la Tabla 3-9. Las alternativas consideradas se presentan en conjunto con los resultados de su simulación en el Anexo A y se detallan a continuación. Consisten en medidas exteriores, interiores y combinaciones de éstas.

*Tabla 3-9 Alternativas de obras de abrigo simuladas.*

Alternativa N°	Corrida	Descripción
00	9	Situación actual del Puerto de Arica
01	10	Extensión del rompeolas exterior hacia el Noroeste
02	11	Extensión del rompeolas exterior en la misma dirección actual
03	12	Extensión del rompeolas paralelo a enfilamiento (343°N) y extensión del contra molo
04	13	Extensión del rompeolas paralelo a enfilamiento (343°N)
05	14	Espigón al interior del puerto en la esquina noreste de la dársena, dirección paralela al sitio 7
06	15	Espigón al interior del puerto en la esquina sur de la dársena, dirección Norte-Sur
07	16	Extensión doble del rompeolas, en “V”, direcciones noreste y noroeste
08	17	Espigón en el contra molo
09	18	Alternativa 06 + Alternativa 08. Espigón Sur y extensión del contra molo.
10	19	Alternativa 09 + segundo espigón sur.
11	20	Espigón interior en el sector norte de la dársena con dirección suroeste.
12	21	Alternativa 02 + Alternativa 06. Extensión rompeolas con espigón Sur
13	22	Alternativa 06 + Alternativa 11. Espigones Sur y Norte.
14	23	Dársena al norte de la actual.
15	24	Pared impermeable en puente acceso muelle sitio 2.

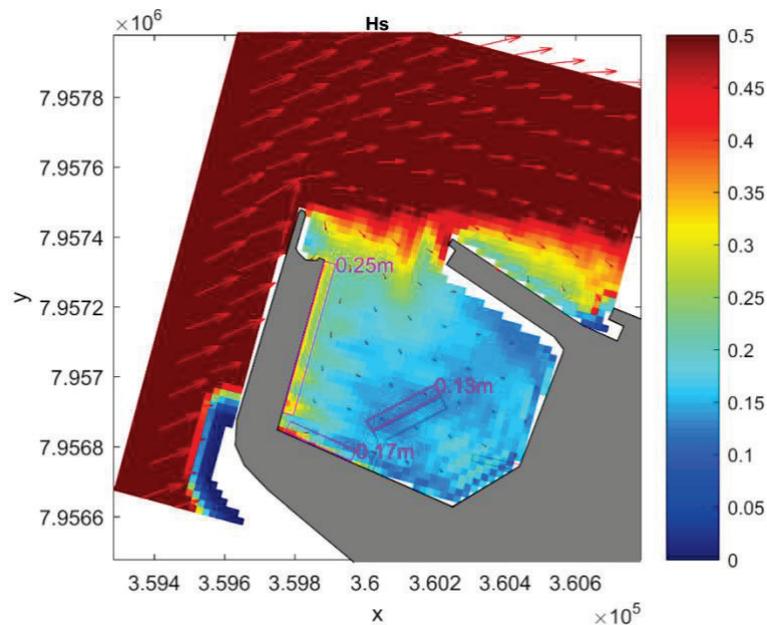
### 3.3.4 DIAGNÓSTICO DE SITUACIÓN EXISTENTE

a) Oleaje swell

La Figura 3-10 muestra la altura del oleaje swell, para la condición  $H_s = 1.5 m$ ,  $T_p = 16 s$ ,  $H_{dir} = 250^\circ N$ . Los rectángulos en color magenta muestran la altura promedio en los puestos de atraque 2B, 3 y 4-5.

Aparte de las alturas del oleaje, es importante considerar la dirección de incidencia del oleaje swell con respecto a la orientación de los barcos amarrados:

- Longitudinal en el sitio 4-5.
- Perpendicular en los sitios 2B y 3.



**Figura 3-10 Resultado del oleaje del modelo MIKE 21 BW: espectro completo, para la condición de borde  $H_s=1.5 m$ ,  $T_p=16 s$ ,  $H_{dir}=250^\circ N$**

La relación entre las condiciones del oleaje y las condiciones de amarre no dependen solamente de la altura significativa del oleaje, pero también de:

- Características del barco, sus dimensiones principales (eslora, manga, calado) y su tonelaje.
- Sistema de amarre (tipo de líneas de amarre, ángulos de las espías de amarre).
- Altura de las ondas largas en la dársena, que pueden entrar en una resonancia dependiendo de la configuración de la dársena.
- Tipo de muelle. Muro gravitacional que refleja el oleaje, o muelle sobre pilotes con ola pasante.

Debido a estos factores, no existen fórmulas o criterios básicos (confiables) que relacionen simplemente la altura del oleaje a las condiciones de amarre. Para evaluar las condiciones de amarre es necesario realizar un análisis de nave amarrada.

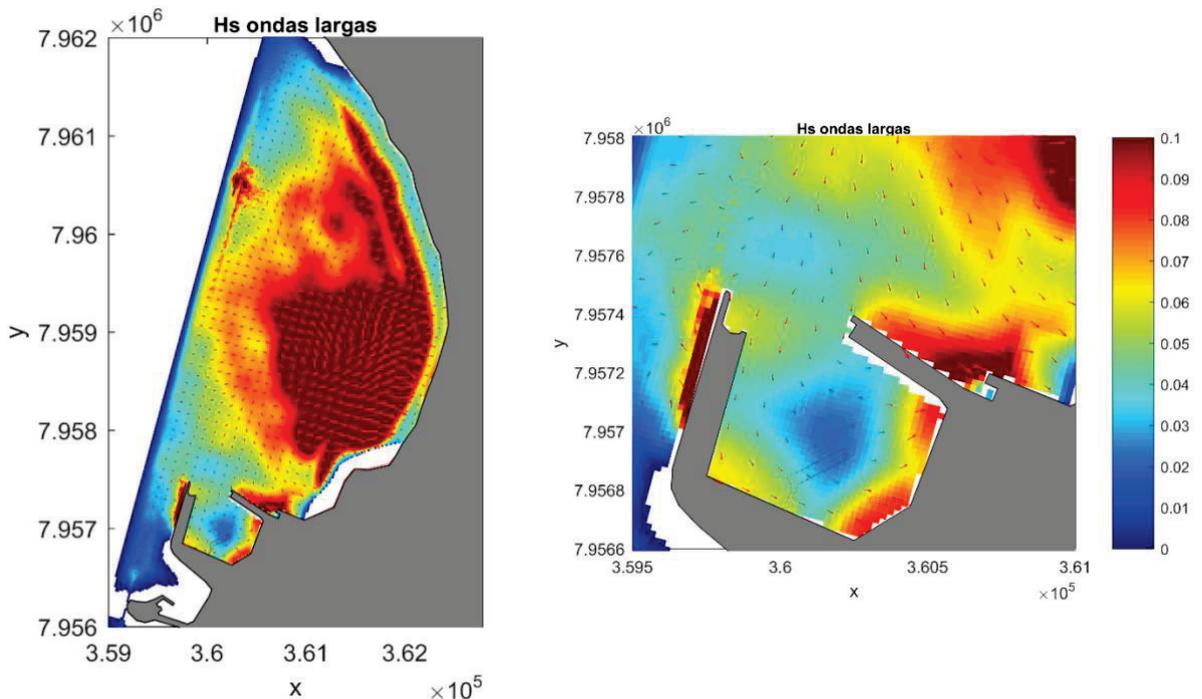
Sin embargo, dentro del modelo de penetración de oleaje (MIKE 21 BW) también se puede analizar la altura de la onda larga que es un factor indicativo del movimiento de naves.

b) Ondas largas

La onda larga es un fenómeno que se debe evaluar a una escala espacial mayor para entender su origen. En el caso del puerto de Arica, la onda larga se forma en la bahía de Arica, al lado norte del puerto. Debido a la reflexión del oleaje en la orilla de la bahía, la onda larga se dirige hacia la bocana del puerto para luego generar resonancia en el puerto. Se forma un patrón de nodos y antinodos en la dársena:

- Nodos: Centro de la dársena y al norte de la bocana (Figura 3-11), en azul. En un nodo la altura de la onda larga es mínima, pero las corrientes debidas al oleaje son máximas.
- Antinodos: Esquinas de la dársena. En un antinodo la altura de la onda larga es máxima y la corriente es mínima, típicamente en esquinas o paredes verticales donde la velocidad orbital del oleaje es nula. Tonos anaranjados en la Figura 3-11.

La Figura 3-11 muestra el modelo completo de MIKE 21 BW, donde se observa la dirección y altura ( $H_s$ ) de la onda larga para un instante dado. Puesto se trata de una onda de presión infra gravitacional, las corrientes son periódicas.



**Figura 3-11 Modelo completo de MIKE 21BW. Máximo instantáneo donde se observa dirección y altura ( $H_s$ ) de la onda larga.**

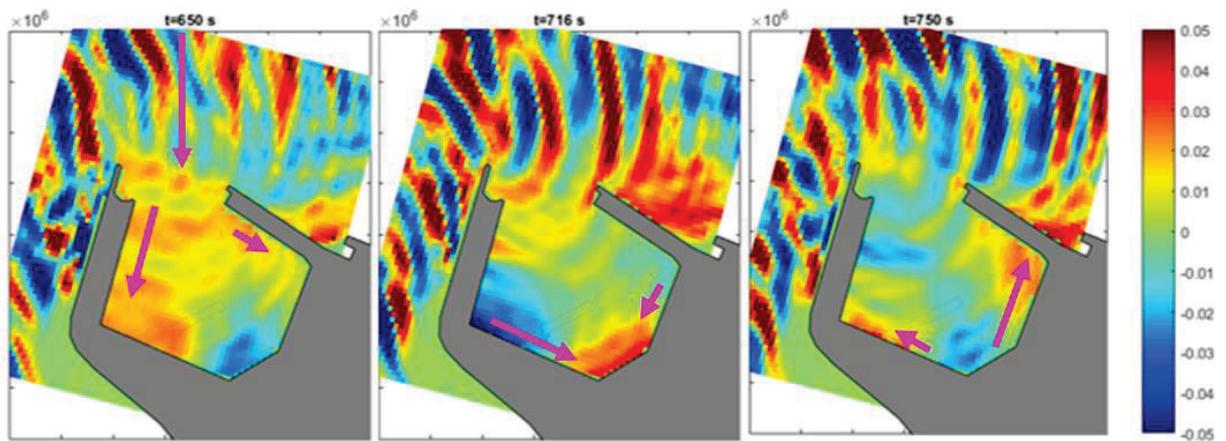
La Figura 3-12 muestran algunos instantes de la simulación, donde se observa típicamente la resonancia de la onda larga en la dársena (Figura 3-12) donde:

- Imagen izquierda: Debido a la dirección de la onda larga y la mayor profundidad de la dársena, la mayor parte de la energía entra por la bocana hacia el sitio 3. También se

traslada una fracción menor de la energía de la onda hacia la esquina Este de la dársena, que es menos profunda y viaja a menor velocidad.

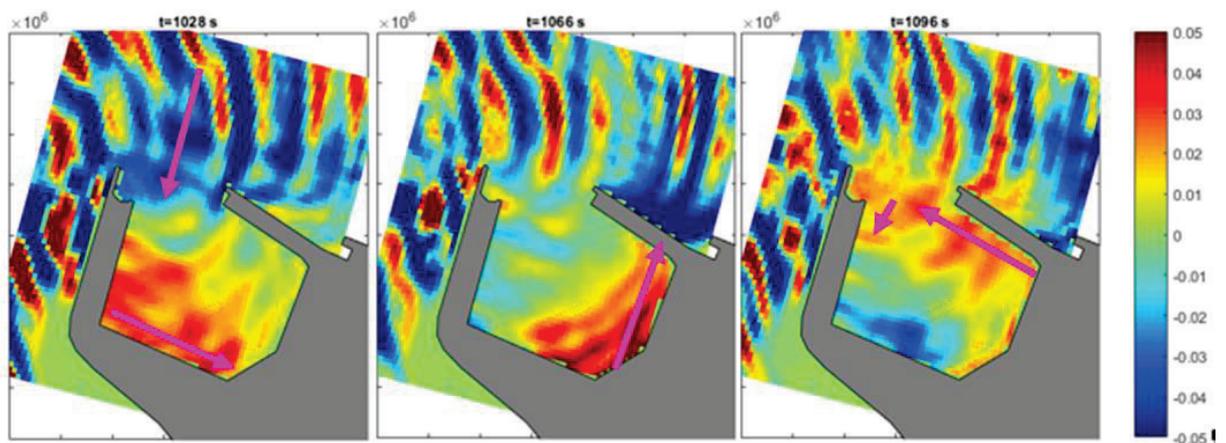
- Imagen centro: Ambas ondas se trasladan hacia la esquina Sur de la dársena.
- Imagen derecha: Las ondas se trasladan hacia las esquinas Este y Oeste, luego una parte de la energía sale por la bocana y un remanente se suma a la energía entrante en el siguiente período o ciclo de oleaje, lo que da origen a la resonancia de la dársena.

Entonces hay un giro dominante en el ‘sentido contra el reloj o antihorario’ y un giro secundario en el ‘sentido del reloj u horario’. Esto se trata del movimiento de la onda larga, que en la práctica se traduce en corrientes periódicas con velocidades máximas a lo largo de las paredes de la dársena y velocidades mínimas en su centro.



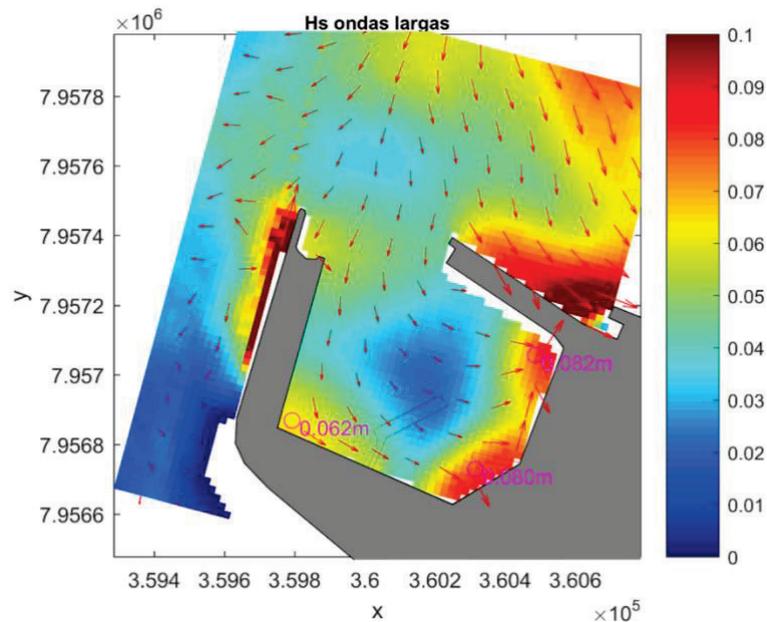
*Figura 3-12 Instantáneas para ilustrar giro primario y secundario.*

La Figura 3-13 muestran un caso donde el ‘sentido antihorario’ es dominante. Inclusive se observa que al final del ciclo una parte de la energía vuelve a entrar en el giro. Entonces, realmente es un efecto de ‘autorrefuerzo’ que da origen a la resonancia de la dársena.



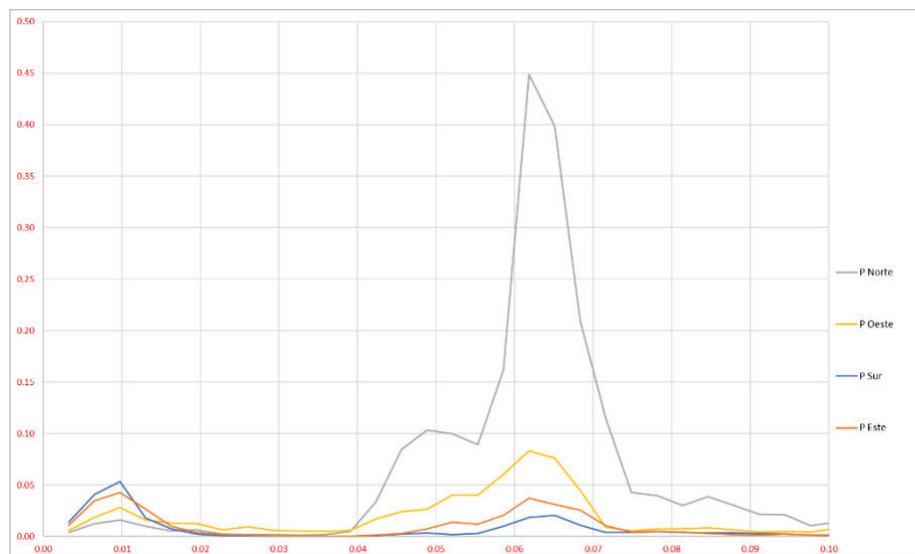
**Figura 3-13 Instantáneas para ilustrar giro antihorario.**

La Figura 3-14 muestra la altura significativa de la onda larga en la dársena, incluyendo valores en puntos específicos en sus esquinas, y las direcciones predominantes en una instantánea del ciclo del oleaje. Naturalmente, y a diferencia de una corriente continua, en la siguiente mitad del periodo de la onda la dirección de la velocidad de corriente se invierte.



**Figura 3-14 Resultado del oleaje del modelo MIKE 21 BW: onda larga ( $T > 60s$ ), para la condición de borde  $H_s = 1.5 m$ ,  $T_p = 16 s$ ,  $H_{dir} = 250^\circ N$ .**

La Figura 3-15 muestra el espectro de puntos en la bocana (PNorte) y tres esquinas de la dársena (PEste, PSur y POeste). Se observan claramente máximos en el orden de  $f = 0.01 Hz$  ( $T = 100s$ ) y  $f = 0.0625 Hz$  ( $T = 16s$ ) y que corresponden al oleaje *swell* y a la onda larga.



**Figura 3-15 Espectro de energía en 4 puntos en la dársena, para la condición de borde  $H_s=1.5$  m,  $T_p=16$  s,  $H_{dir}=250^\circ N$ .**

La onda larga genera constantemente flujos debidos a corrientes oscilatorias, y gradientes o pendientes en el espejo de agua, lo que induce el movimiento de naves amarradas.

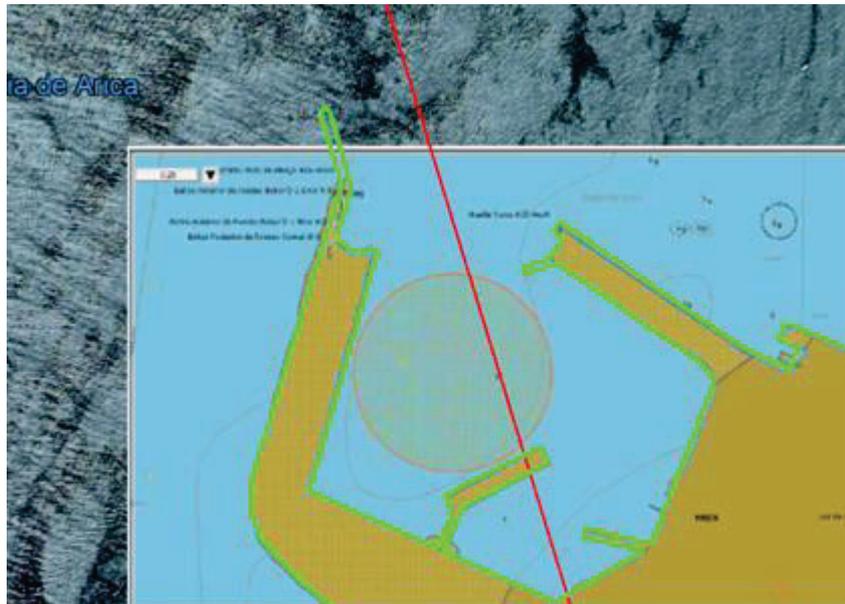
Generalmente el periodo natural de los movimientos de un barco atracado está en el orden de  $T=60-120$ s de periodo, lo cual justo coincide con el rango de periodos de la onda larga.

En el Anexo A se presentan los resultados del modelo MIKE 21 BW para las condiciones simuladas.

### 3.3.5 MEDIDAS EXTERIORES DE MITIGACIÓN

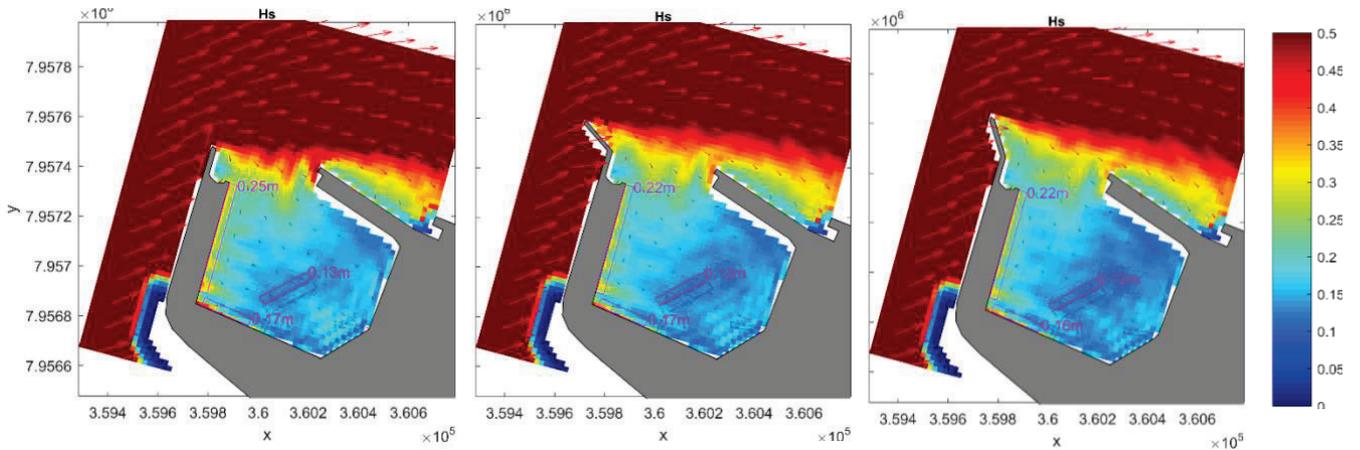
Las imágenes en esta sección muestran la altura significativa en la dársena del oleaje *swell* para varias alternativas de mitigación al exterior de la dársena. Consideran la extensión del Molo rompeolas o del contra Molo. En la definición de las alternativas, se ha considerado lo siguiente:

- Por razones económicas, la extensión debe ser del orden de 150 m.
- La extensión debe considerar la alineación del canal de acceso al puerto. La Figura 3-16 muestra la línea de enfilación existente, que tiene una orientación de  $163^\circ N - 343^\circ N$ .



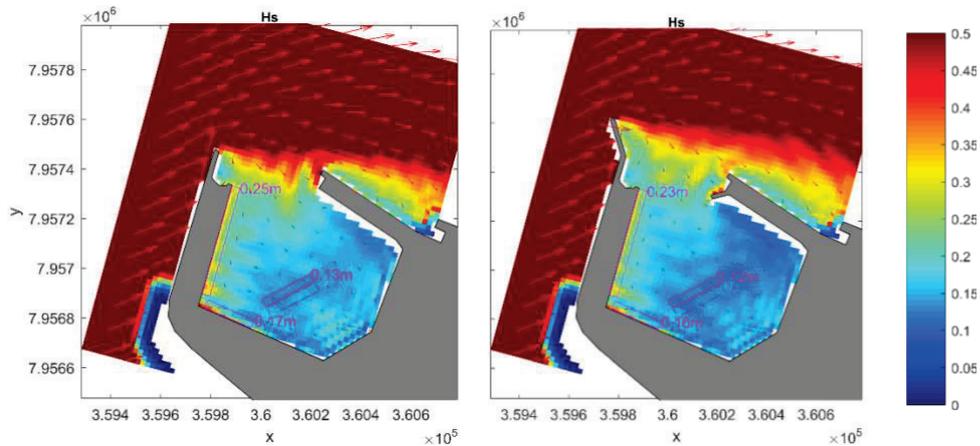
**Figura 3-16: Línea de enfilación con orientación  $163^\circ N$ .**

Las Figura 3-17 presentan la altura significativa del oleaje *swell*, para la situación existente y dos alternativas de extensión del rompeolas con distintas orientaciones. Para ambas alternativas la reducción de la altura del oleaje en los sitios de atraque es del orden del 10%.



**Figura 3-17: Oleaje swell para alternativa 0 (situación existente), alternativa 1, y alternativa 4.**

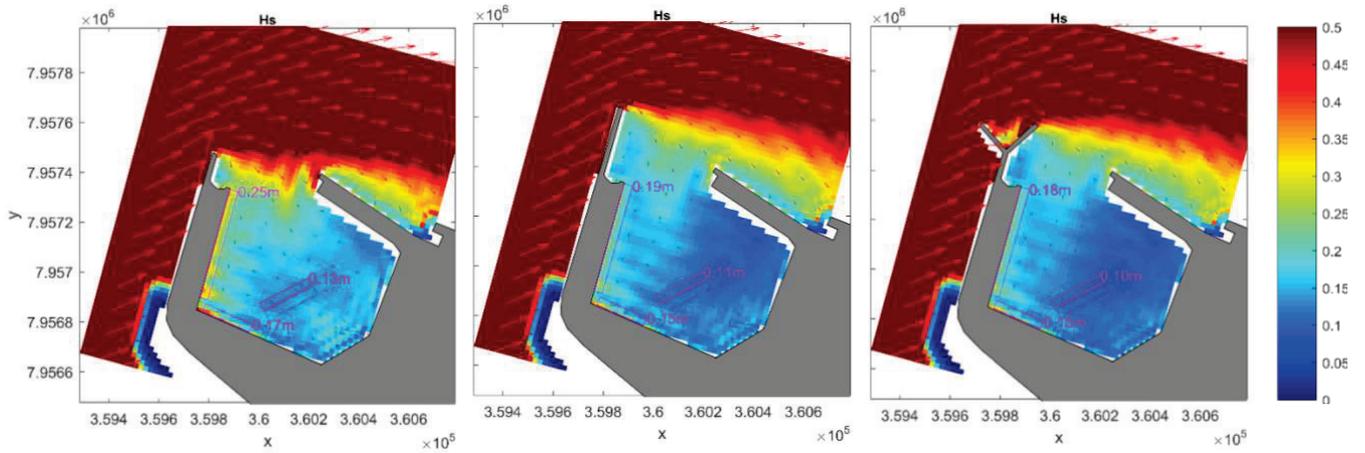
Debido al beneficio relativamente limitado, se evaluó una alternativa con una extensión del contra Molo. Sin embargo, no resulta en una reducción adicional de la altura del oleaje. Figura 3-18 muestra el resultado.



**Figura 3-18: Oleaje swell para alternativa 0 (situación existente) y alternativa 3.**

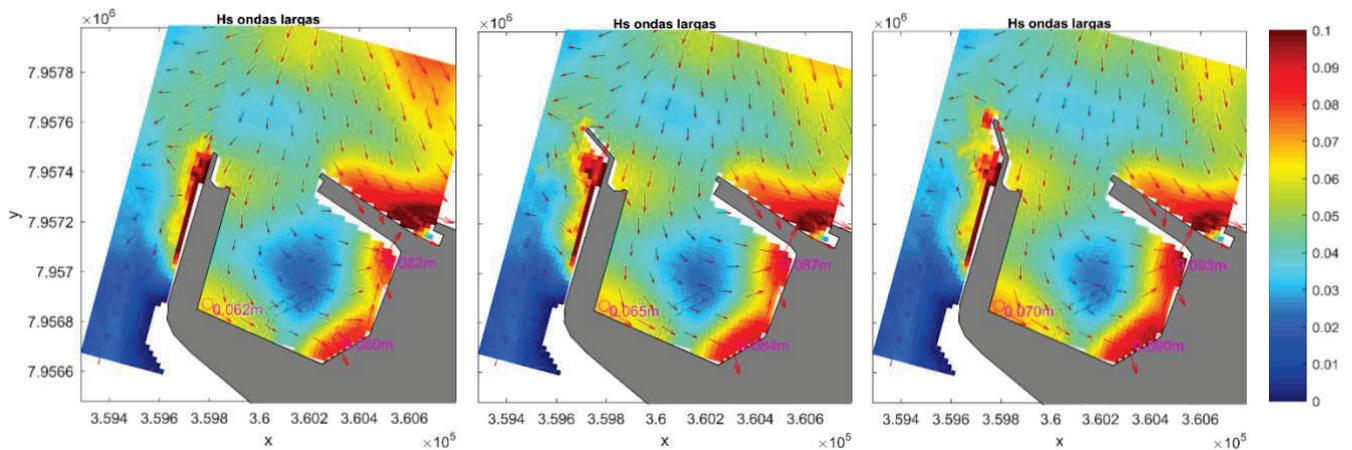
La Figura 3-19 muestra dos alternativas que resultan en una mejora con aproximadamente 20 %. Sin embargo tienen las siguientes desventajas:

- En ambos casos, la extensión del molo interfiere con la línea de enfilamiento.
- En la imagen a la derecha el costo sera mas elevado; en realidad se extiende el Molo en dos tramos de 150 m.



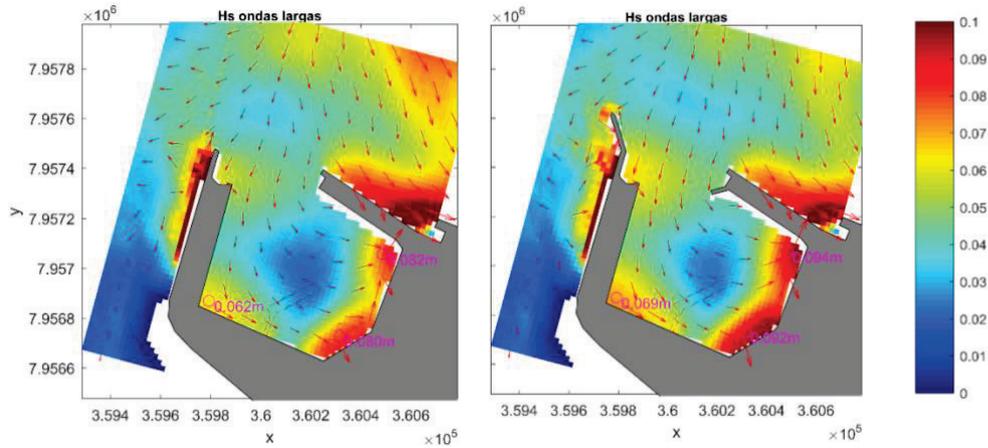
**Figura 3-19: Oleaje swell para alternativa 0 (situación existente), alternativa 2 y alternativa 7.**

La Figura 3-20 muestra la situación existente y dos alternativas, para la altura significativa de la onda larga. Para ambas alternativas, la extensión del Molo capta energía adicional que proviene de la bahía. Por lo tanto, entra más energía de la onda larga en la dársena, lo que aumentaría el problema de resonancia.

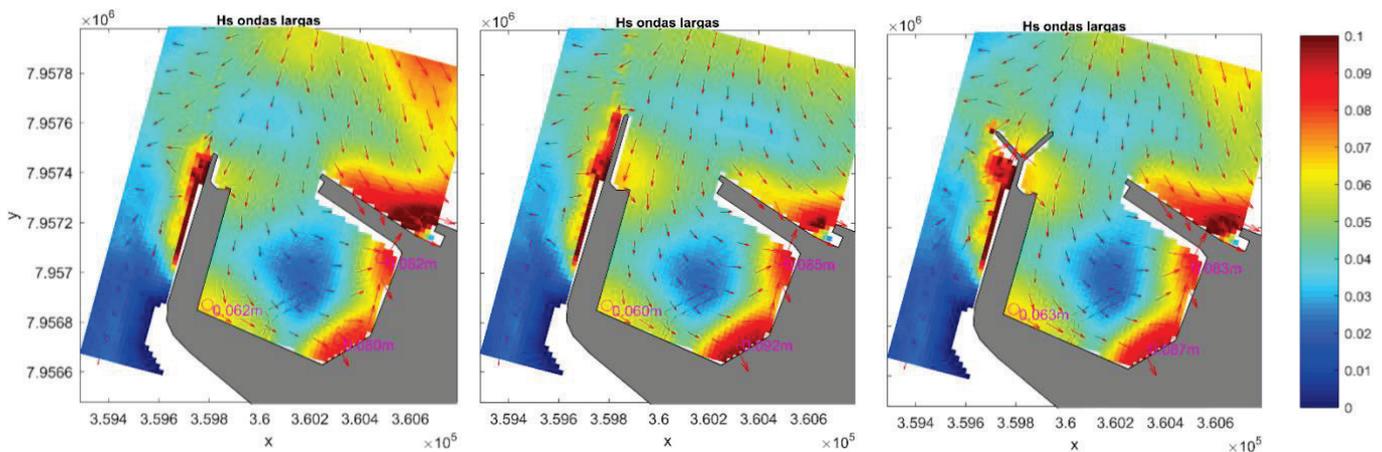


**Figura 3-20: Onda larga para alternativa 0 (situación existente), alternativa 1, y alternativa 4.**

En la Figura 3-21, al igual que las alternativas de la Figura 3-22, se aprecia que la extensión del contra Molo resulta en un leve aumento de la altura significativa de la onda larga en la dársena.

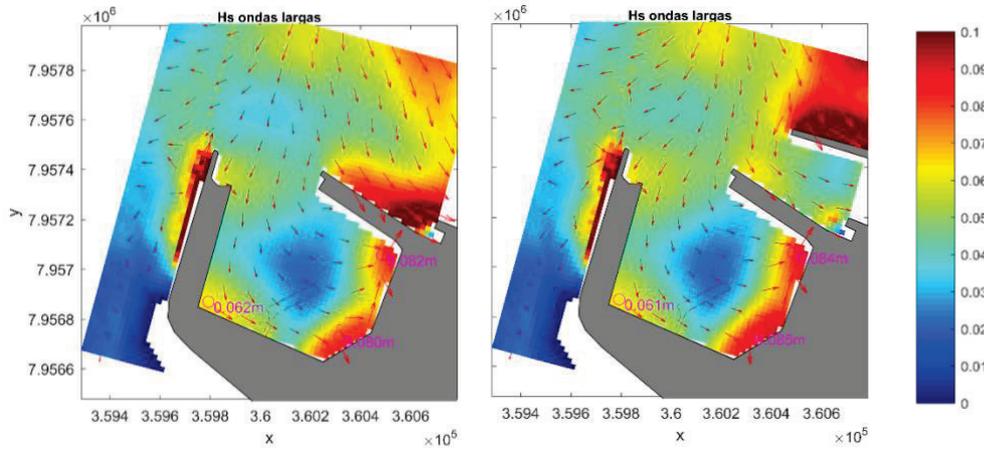


**Figura 3-21: Onda larga para alternativa 0 (situación existente) y alternativa 3.**



**Figura 3-22: Onda larga para alternativa 0 (situación existente), alternativa 2 y alternativa 7.**

Aparte de las alternativas con extensiones del Molo y contra Molo, se ha investigado el efecto de una dársena secundaria al lado Norte del puerto existente. La intensidad de esta dársena es influenciar el patrón de nodos y antinodos inmediatamente afuera de la bocana del puerto. Sin embargo, prácticamente no tiene un efecto en el interior del puerto. Los resultados de esta alternativa se exponen en la Figura 3-23.

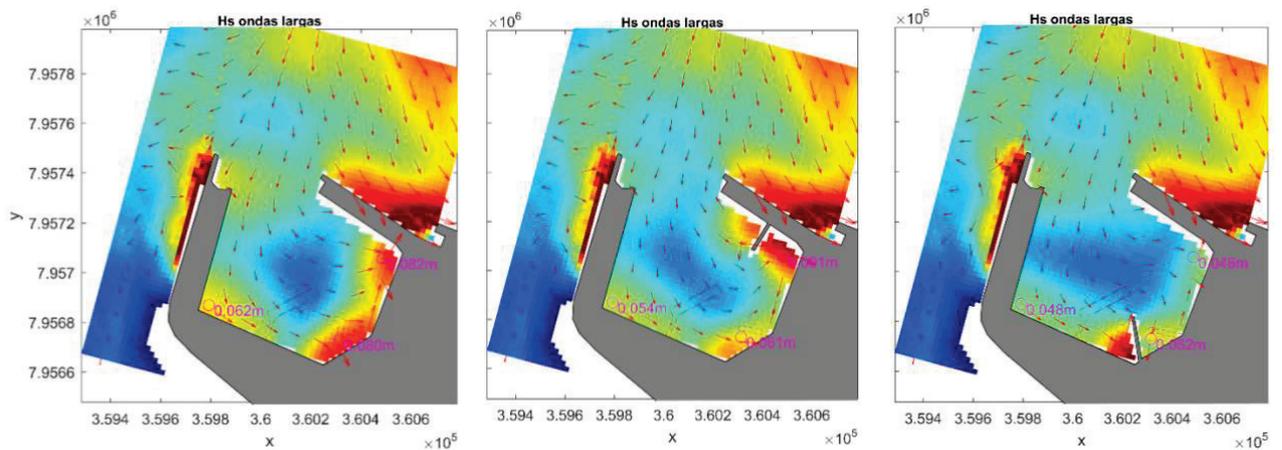


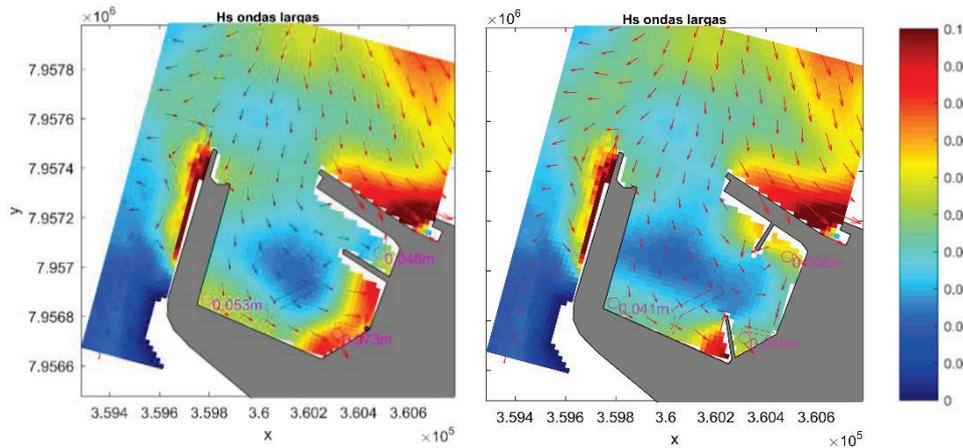
**Figura 3-23: Onda larga para alternativa 0 (situación existente) y alternativa 14.**

Sobre la base de los resultados de la altura significativa del oleaje *swell* y de ondas largas, solamente la alternativa 2 (extensión recta del Molo) resulta en una mejora considerable en la altura del oleaje *swell*, pero no mejora las condiciones de onda larga.

### 3.3.6 MEDIDAS INTERIORES DE MITIGACIÓN

Las medidas interiores tienen únicamente como objetivo el cambio del patrón de la onda larga en la dársena, al interferir con las corrientes oscilatorias de la onda larga. La Figura 3-24 muestran la altura significativa de la onda larga.





**Figura 3-24:** En sentido horario desde arriba a la izquierda: Onda larga para alternativa 0 (situación existente); alternativa 11-Espigón Norte; alternativa 6-Espigón Sur, alternativa 13-Espigones Norte y Sur; y alternativa 5-Espigón paralelo sitio 7.

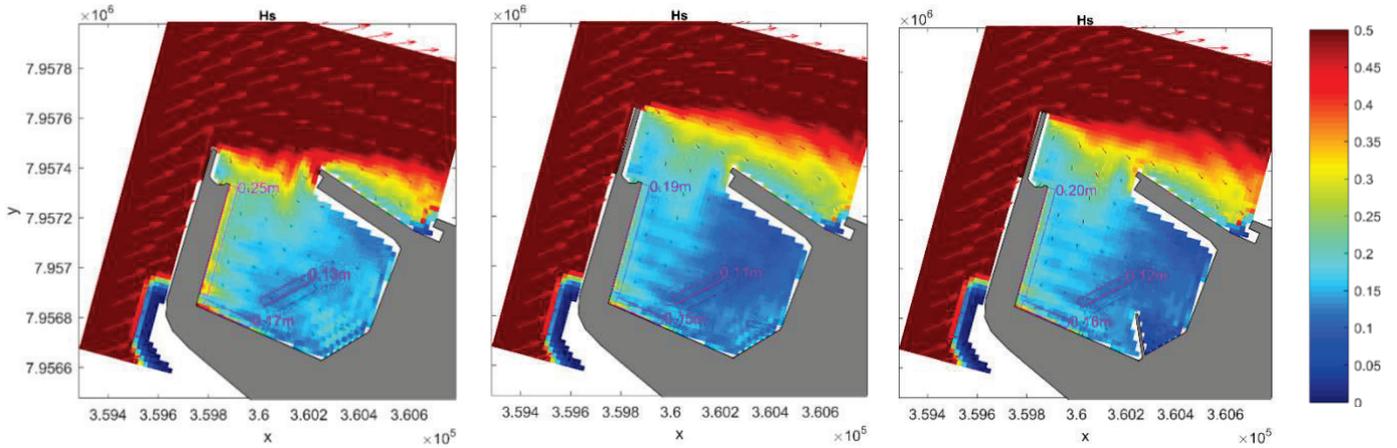
Se observa lo siguiente:

- El resultado de la alternativa 11-Espigón Norte y de la alternativa 5-Espigón paralelo al sitio 7, es que entra menos energía de la onda larga en el ‘sentido del reloj’. Sin embargo, se mantiene principalmente el patrón principal que es ‘contra el sentido del reloj’
- El resultado de la alternativa 6-Espigón Sur es que el espigón corta el flujo de la energía que entra en el sentido antihorario. Entonces, hay dos movimientos que son más independientes:
  - Energía que entra paralelo al sitio 4-5 y refleja en el sitio 3 hacia la bocana.
  - Energía que entra paralelo al contra Molo y luego refleja en el sitio 1 hacia la bocana.
  - El movimiento restante es más bien la entrada y salida de la onda larga en la dirección paralela al sitio 4-5.
- Es la única medida que realmente cambia de una manera el patrón de onda larga.
- El resultado de la alternativa 13- Espigones Sur y Norte, es que los espigones cortan los dos flujos de la energía que entra en la dársena. Entonces, la energía de la onda larga baja más aun en comparación con la alternativa 6-Espigón Sur.

### 3.3.7 COMBINACIÓN MEDIDAS EXTERIORES E INTERIORES

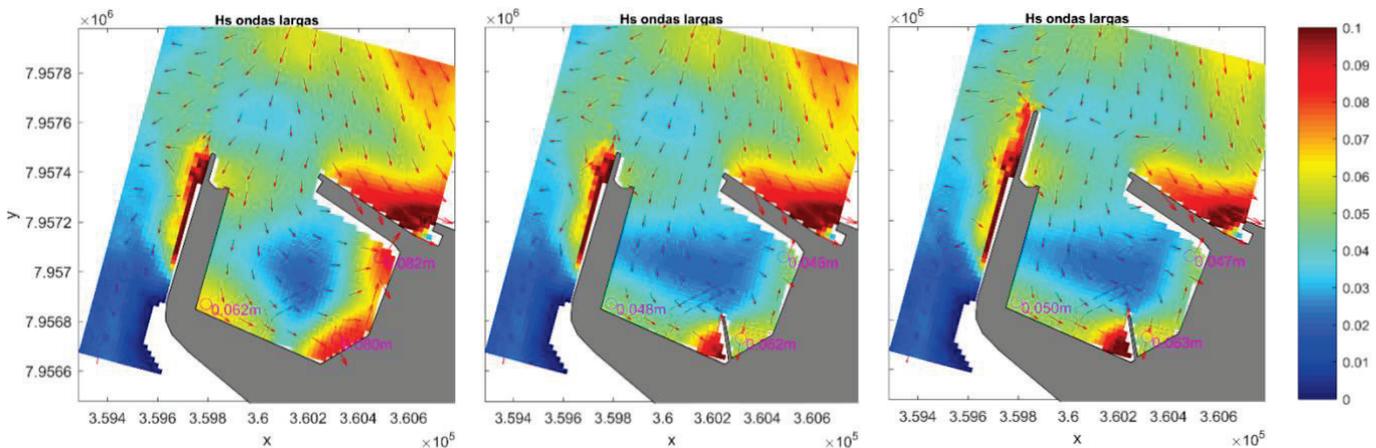
Se ha realizado una simulación de una combinación de la Alternativa 2-Extensión rompeolas y alternativa 6-Espigón Sur, para evaluar la combinación de las dos medidas.

La Figura 3-25 muestra el efecto para el oleaje *swell*. Como es de esperar el efecto adicional del espigón Sur en el interior de la dársena es muy limitado para el oleaje *swell*.



**Figura 3-25: Oleaje swell para alternativa 0 (situación existente), alternativa 1, y alternativa 11.**

Respecto de la altura de la onda larga, el efecto de la extensión del Molo tiene un efecto limitado, y no mejora el resultado del espigón Sur cuando opera solo. En la Figura 3-26 se observa lo anterior.



**Figura 3-26: Onda larga para alternativa 0 (situación existente), alternativa 1, y alternativa 11.**

### 3.4 COEFICIENTES DE TRANSFORMACIÓN DE OLEAJE DESDE EL PUNTO ZEP

Se ha determinado los coeficientes de transformación de oleaje *swell* para unas condiciones típicas desde punto ZEP hacia los sitios de atraque. Las tablas de abajo muestran los coeficientes de transformación del oleaje *swell* para la situación existente.

**Tabla 3-10 Coeficientes de transformación de oleaje ZEP – sitio 2B.**

$H_{dir}$ [°N]	$T_p$ [s]		
	10	14	18
220	0.03	0.04	0.06
230	0.04	0.05	0.07

240	0.05	0.06	0.10
-----	------	------	------

**Tabla 3-11 Coeficientes de transformación de oleaje ZEP – sitio 3.**

$H_{dir}$ [°N]	$T_p$ [s]		
	10	14	18
220	0.04	0.06	0.09
230	0.05	0.08	0.11
240	0.07	0.09	0.16

**Tabla 3-12 Coeficientes de transformación de oleaje ZEP – sitio 4-5.**

$H_{dir}$ [°N]	$T_p$ [s]		
	10	14	18
220	0.04	0.07	0.10
230	0.05	0.09	0.12
240	0.07	0.10	0.17

Para los espigones en el interior de la dársena no cambia la agitación del oleaje *swell* en los sitios de atraque. Entonces, es posible seguir utilizando las mismas tablas de transformación para el oleaje *swell*.

### 3.5 CLIMA DE OLAJE SWELL E INACTIVIDAD EN SITIOS DE ATRAQUE

Se ha utilizado el clima del oleaje en el punto ZEP y los coeficientes de transformación del oleaje *swell* o mar de fondo para calcular las condiciones anuales en los sitios de atraque. La tabla de abajo muestra la ocurrencia anual de la altura significativa  $H_s$ .

**Tabla 3-13 Condiciones anuales (clima) del oleaje Swell**

Rango $H_s$	Sitio 2B	Sitio 3	Sitio 4-5
0.200 - 0.225	0.0%	0.2%	0.2%
0.175 - 0.200	0.0%	0.3%	0.3%
0.150 - 0.175	0.1%	0.6%	0.6%
0.125 - 0.150	0.4%	2.0%	2.0%
0.100 - 0.125	1.7%	5.6%	5.6%
0.075 - 0.100	7.2%	13.9%	13.9%
0.050 - 0.075	25.3%	32.1%	32.1%
0.025 - 0.050	50.8%	37.8%	37.8%
0.000 - 0.025	14.5%	7.6%	7.6%

Según las condiciones de oleaje se puede estimar un porcentaje de tiempo de inactividad anual sobre la base de criterios de condiciones límite de altura de oleaje según tipo de nave. La única guía internacional que menciona algún tipo de relación entre el oleaje y el tiempo de inactividad es la guía ROM.

Para barcos portacontenedores la ROM define un criterio límite de altura de oleaje  $H_s=0.3\text{m}$ . Entonces, según esta relación, no hay *downtime* por oleaje en el Puerto de Arica. Sin embargo,

en el caso del Puerto de Arica, la causa principal del tiempo de inactividad sería la onda larga. Puesto que no existen guías de diseño o recomendaciones para estimar el tiempo de inactividad por onda larga será necesario realizar un cálculo del tiempo de inactividad sobre la base de un estudio de Nave Amarrada del tipo Dinámico.

### 3.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como conclusiones del trabajo realizado en esta actividad, se han realizado las siguientes tareas:

- a) Análisis de condiciones ambientales. El parámetro más importante en el Puerto de Arica es la condición del oleaje. Sobre la base de datos sobre un periodo de unos 40 años, se ha determinado las condiciones normales (tabla de ocurrencia de altura, periodo y dirección del oleaje) y condiciones extremas. Se extrapolaron las condiciones extremas para un periodo de retorno de 100 años para poder determinar condiciones de diseño conceptual de obras marítimas.
- b) Para transformar las condiciones del oleaje a puntos cercanos al puerto, se utilizó el modelo computacional espectral SWAN. Se utilizaron estos resultados para los siguientes propósitos:
  - i. Comparación con información del cierre del puerto en el punto de embarque de prácticos.
  - ii. Condiciones normales y extremas del oleaje para el diseño del Puerto Norte (Actividad 3).
  - iii. Condiciones normales y extremas del oleaje para posibles diseños conceptuales de medidas de mitigación.
  - iv. Condiciones de borde para el modelo de agitación de oleaje (MIKE 21 BW) en la dársena.
- c) Para una condición característica del oleaje operacional (con 10 % de excedencia) se realizó un modelo de agitación, donde se observó que junto al oleaje *swell*, entra una onda larga a la dársena del puerto. La onda larga ingresa a la dársena con flujos oscilatorios y en ambos sentidos. Se observa un patrón de nodos y antinodos, donde los antinodos están en las esquinas y paredes de la dársena, y al lado norte de la bocana. Un nodo se ubica cerca del extremo del muelle del sitio 2B.
- d) Se realizaron simulaciones con el modelo de agitación con 12 medidas de mitigación además de las tres solicitadas por EPA (15 en total). Todas las medidas fueron diferentes e incluyen estructuras en la bocana de la dársena, estructuras interiores, y una combinación de ambas.
- e) Se ha determinado los coeficientes de transformación de oleaje *swell* para unas condiciones típicas desde el punto ZEP hacia los sitios de atraque.
- f) Se ha utilizado el clima del oleaje en el punto ZEP y los coeficientes de transformación del oleaje *swell* o mar de fondo para calcular las condiciones anuales en los sitios de atraque. El criterio límite de altura de oleaje de  $H_s=0.3m$  para naves portacontenedores no es superado en ningún sitio de atraque. Por esto el *downtime* debido a marejadas se debería al periodo del oleaje y no a su altura.

Entre las conclusiones generales de esta actividad, destaca:

- g) Se logró un buen entendimiento del fenómeno de onda larga en el puerto y de cómo se puede reducir su altura.
- h) Las alternativas exteriores son contraproducentes. Las extensiones del rompeolas principal con una longitud de unos 150 m, y diferentes orientaciones, resultan en una reducción en el orden de 10-20% de la altura del oleaje *swell*. Sin embargo, no tiene un efecto de reducción de la onda larga. Inclusive, las alternativas con una orientación de la extensión hacia afuera resultan en un incremento de la energía de la onda larga que entra y se acumula en la dársena.
- i) Alternativas interiores. Algunas de las alternativas con un espigón dentro de la dársena cortan los flujos giratorios oscilatorios de la onda larga, y tienen como efecto una reducción de su altura.
- j) Cambio de respuesta. El hecho de que se puede cambiar el flujo de la onda larga es una conclusión valiosa, y que cambia el patrón de respuesta de la dársena ante el oleaje. Sin embargo, el cambio de flujo también puede modificar direcciones locales de corrientes en los sitios de atraque de barcos comerciales, y de embarcaciones pesqueras en la esquina NorOriente de la dársena. Por esto, un cambio no necesariamente es una mejora de las condiciones de amarre. Por lo tanto, se recomienda ejecutar simulaciones del comportamiento de los barcos amarrados en los principales sitios de atraque del puerto, para verificar que la medida efectivamente tiene un efecto positivo en todos los sitios de atraque.

Para definir la mejor intervención posible y dado su impacto en la respuesta de la dársena, recomendamos lo siguiente:

- a) Realizar campañas de mediciones del movimiento de una muestra de naves amarradas, para determinar cuáles son sus movimientos principales, con qué amplitud, y qué período para así confirmar cuál es la causa de los problemas de amarre en el puerto: si es el mar de fondo de alto periodo u onda larga. Esto se puede realizar mediante el post proceso y análisis espectral de múltiples imágenes de video sincronizadas (tecnología y desarrollo de FGMi).
- b) Realizar una campaña de mediciones de ondas largas en varios puntos de la dársena, en conjunto con la campaña de medición de movimiento de naves, que servirán para validar el resultado del presente estudio.
- c) Cuantificar la mejora operacional del puerto para determinar la factibilidad de la inversión. Para esto sería necesario realizar simulaciones del comportamiento de las naves amarradas en los sitios de atraque del puerto, para verificar que la medida efectivamente tiene un efecto positivo y significativo en todos los sitios de atraque.

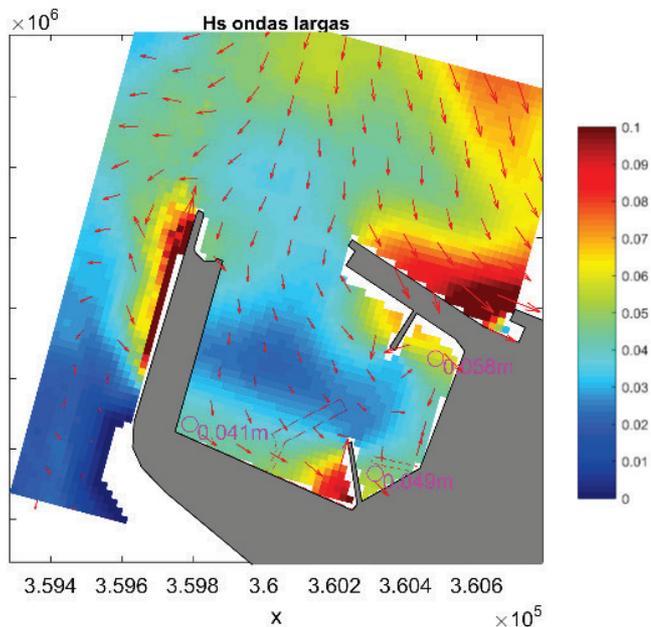
En el capítulo siguiente se presenta el desarrollo de un diseño conceptual de las medidas más prometedoras, el Espigón Sur y/o Espigón Sur y Norte, para evaluar su costo y posibles usos complementarios.

#### 4. ACTIVIDAD 2 ALTERNATIVA DE OBRAS DE MITIGACIÓN

Esta actividad tiene por objeto desarrollar a nivel conceptual la medida de mitigación mejor evaluada en la Actividad 1 (Figura 4-1) para educir la agitación y ondas largas dentro de la dársena.

Esta medida de mitigación considera dos espigones interiores, ubicados al norte y sur de la dársena, cuya funcionalidad es reducir las corrientes oscilatorias de la onda larga presente en el puerto. Para esto los espigones deben ser “opacos”, esto es deben ser capaces de bloquear las corrientes oscilatorias.

En esta etapa de ingeniería conceptual se desarrollan los espigones en la ubicación y longitudes modeladas en la etapa anterior, lo que está sujeto a optimización en una etapa posterior. La materialidad y geometría responderán a economía y facilidad constructiva para cumplir con la función requerida.



*Figura 4-1 Disposición general de Alternativa 13 seleccionada. Espigones Norte y Sur.*

##### 4.1 DISPOSICIÓN GENERAL DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA

Los espigones norte y sur proyectados se presentan en la disposición general de la Figura 4-2. En esta configuración se considera:

- Futura extensión en 80m del muelle de penetración y sitio 2B.
- Navegación de remolcadores y naves pesqueras entre el muelle de penetración sitio 2B y el espigón norte. Se propone una vía de acceso navegable de 110 m de ancho hacia la caleta y muelle Corpesca.
- Navegación de patrulleras y naves pesqueras entre espigón Sur y cabezo de muelle Corpesca. Se propone una vía de navegación de 60 m de ancho.

- Navegación de remolcadores y naves menores hacia poza frente al sitio 1. Se propone una vía de navegación de 75 m de ancho.
- Posibilidad de un uso secundario del espigón Norte para ofrecer servicios a naves pesqueras.



*Figura 4-2 Disposición general de la alternativa de espigón Sur y Norte. Ref: EPA-2104-DIB-010-A Planta General*

#### 4.2 ESPIGÓN SUR

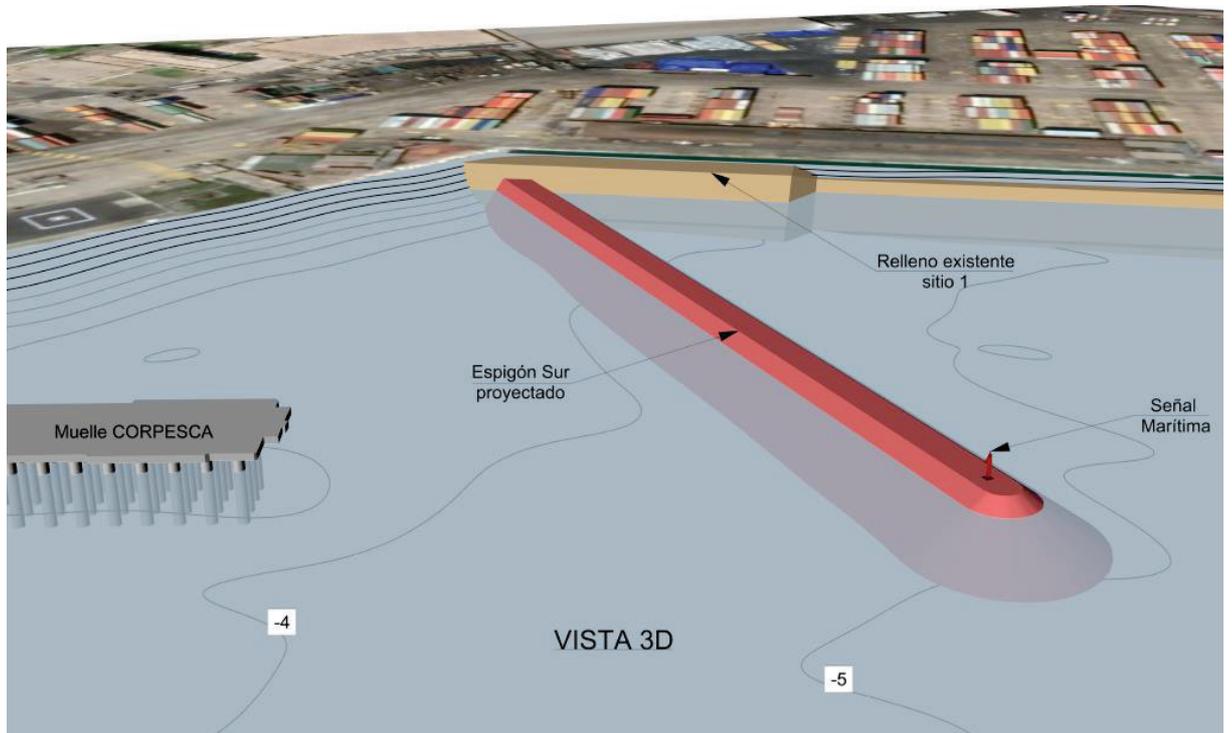
El Espigón Sur es diseñado considerando como única función modificar el patrón de resonancia que existe dentro de la dársena. Por esto no se considera proporcionar servicios de atención a naves, lo que podría ser implementado en una segunda etapa de ser requerido.

Este espigón presenta las siguientes características:

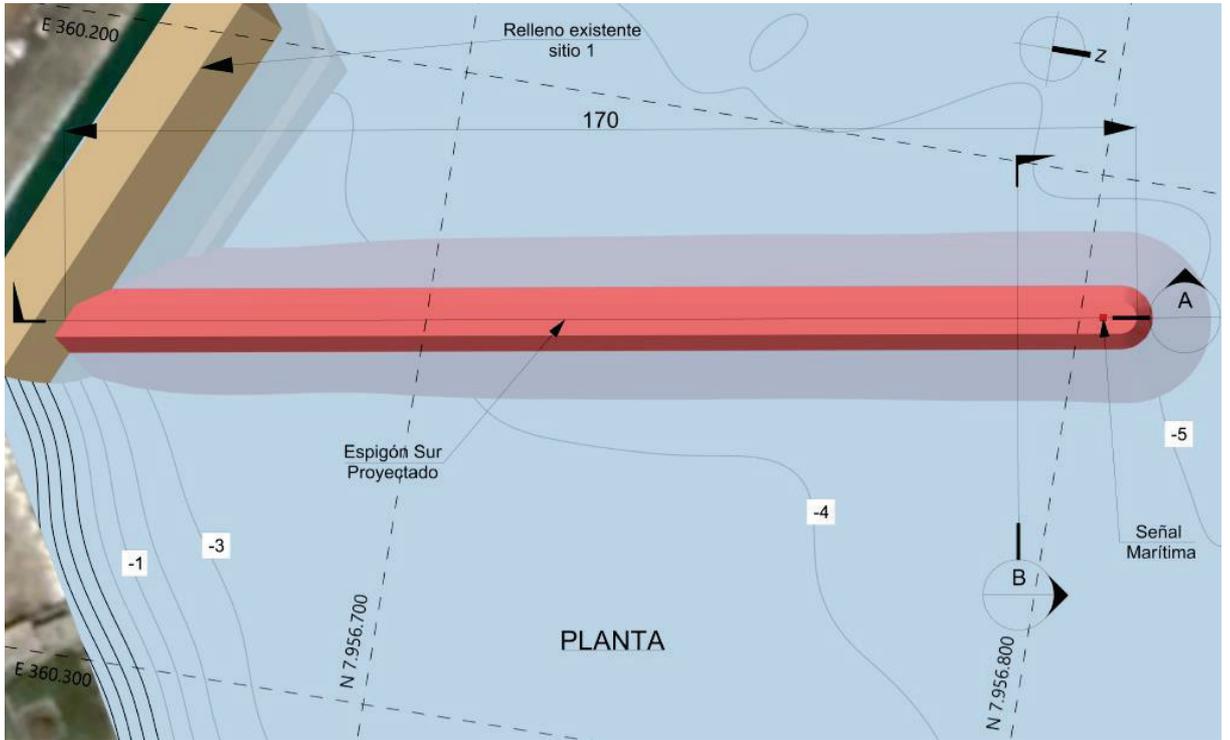
- Estructura de 170 m de longitud y coronamiento en +2.5 m NRS.

- Taludes de 1:1.5 (V:H).
- Se extiende entre el relleno del sitio 1 (-2m NRS) y el veril - 5 m NRS.
- Construcción con roca de cantera del tipo “todo en uno” por volteo de camiones y perfilado con equipo liviano (excavadora) por su baja profundidad.
- Señal marítima en su cabezo.

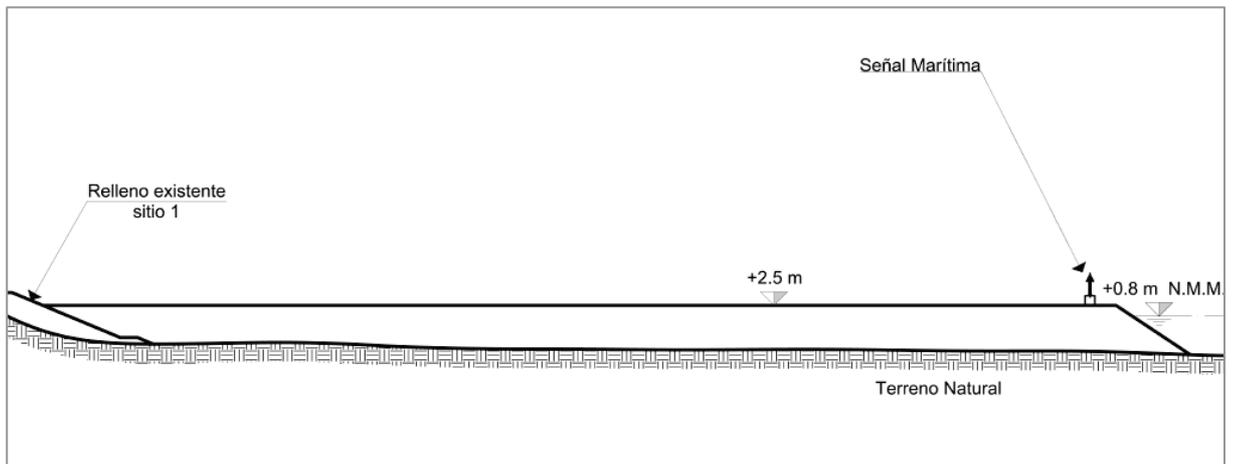
En las Figura 4-3 y Figura 4-4 se incluyen vistas del Espigón Sur y en las Figura 4-5 y Figura 4-6 se presenta el perfil longitudinal y transversal del espigón. Los planos se incluyen en el Anexo B.



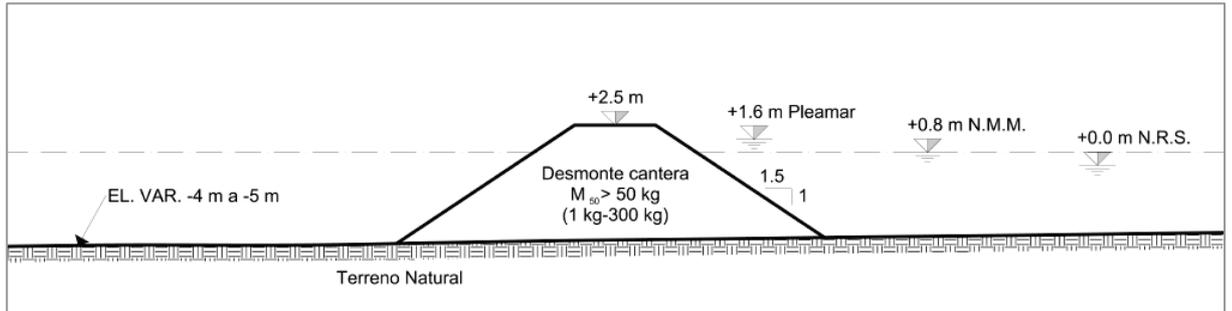
*Figura 4-3 Vista 3D del espigón sur. Ref.: EPA-2104-2-DIB-020-A Espigón Sur.*



**Figura 4-4 Vista planta del espigón sur. Ref.: EPA-2104-2-DIB-020-A Espigón Sur.**



**Figura 4-5 Vista perfil longitudinal del espigón sur. Ref.: EPA-2104-2-DIB-020-A Espigón Sur.**



*Figura 4-6 Sección transversal del espigón sur. Ref: EPA-2104-2-DIB-020-A Espigón Sur.*

### 4.3 ESPIGÓN NORTE

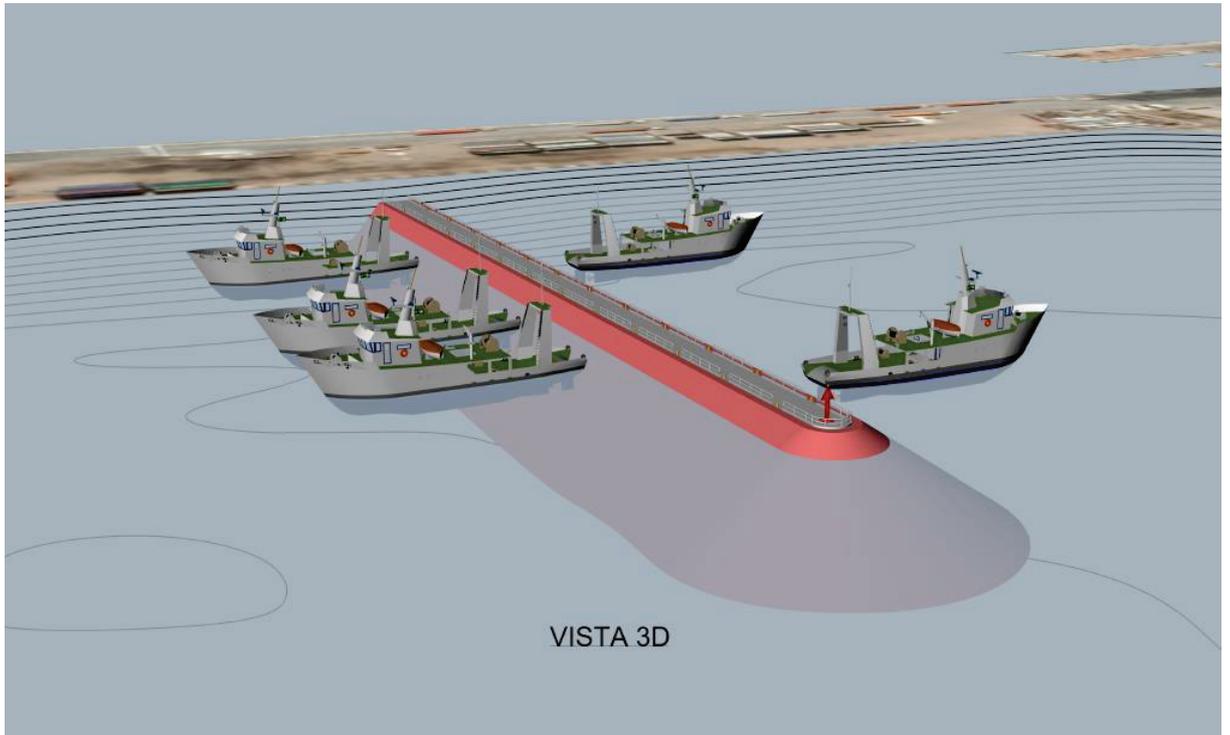
El Espigón Norte se proyecta considerando doble funcionalidad: modificar el patrón de resonancia que existe dentro de la dársena; y proporcionar algunos servicios a embarcaciones pesquera, como de fondeo y acceso.

Este espigón presenta las siguientes características:

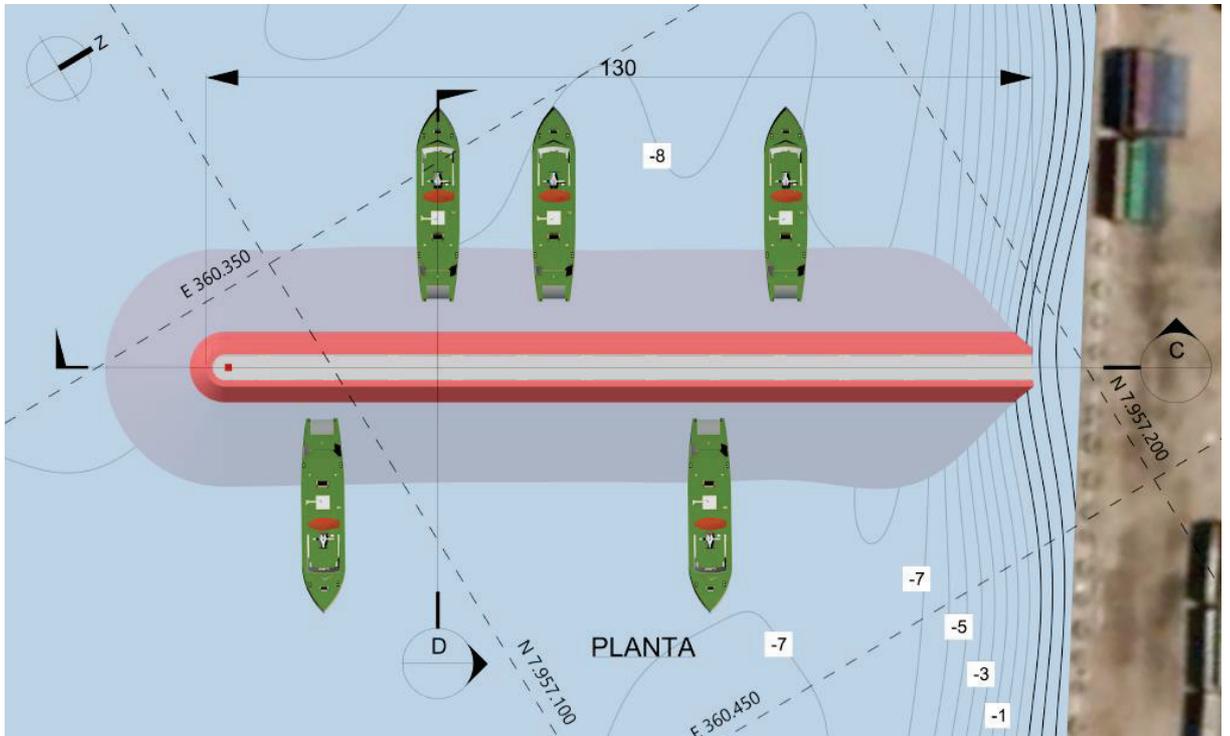
- Estructura de 130 m de longitud y coronamiento en +2.5 m NRS.
- Taludes de 1:1.5 (V:H)
- Se extiende entre el contramolo del puerto (sitio 7) hasta el veril - 8 m NRS.
- Núcleo de roca de cantera del tipo “todo en uno” a colocar por volteo de camiones.
- Coraza de roca con colocación especial con grúa.
- Coronamiento con pavimento, barandas para uso peatonal y equipos livianos.
- Señal marítima en el cabezo.

Una vista aérea y en planta del Espigón Norte se presenta en la Figura 4-7 y Figura 4-8, en las que se incluye en la gráfica el amarre mediterráneo de naves pesqueras. Esto es factible dada la profundidad de su emplazamiento (-7 m NRS).

En las Figura 4-9 y Figura 4-10 se adjuntan el perfil longitudinal y transversal del espigón norte, respectivamente. Los planos se incluyen en el Anexo B.



*Figura 4-7 Vista 3D del espigón norte. Ref.: EPA-2104-2-DIB-030-A Espigón Norte.*



*Figura 4-8 Vista planta del espigón norte. Ref.: EPA-2104-2-DIB-030-A Espigón Norte.*