



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**EFFECTOS EN LA AGITACIÓN Y RESONANCIA DE LOS
SITIOS DE ATRAQUE DEBIDO A LA CONSTRUCCIÓN DEL
FRENTE N°3, PUERTO DE IQUIQUE**

Eduardo Andrés Cosío Toledo

Agosto 2016

EFFECTOS EN LA AGITACIÓN Y RESONANCIA DE LOS SITIOS DE ATRAQUE DEBIDO A LA
CONSTRUCCIÓN DEL FRENTE N°3, PUERTO DE IQUIQUE

Eduardo Andrés Cosio Toledo

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Claudio Hernández Toro
Profesor guía

Patricio Winckler Grez
Integrante comisión

Matías Quezada Labra
Integrante comisión

SANTIAGO
Agosto 2016

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

Eduardo Cosío Toledo
Autor

Claudio Hernández Toro
Profesor guía

AGRADECIMIENTOS

Al señor Claudio Hernández y la empresa GHD S.A por permitir mi desarrollo profesional en el área de la ingeniería marítima portuaria.

Al señor Matías Quezada por su amistad, humor y disposición en la elaboración del presente documento.

A los docentes de Ingeniería Civil Oceánica, señores Felipe Caselli, Ernesto Gómez y Álvaro Valdivia por la formación y valores entregados.

A mis pares con quién directa e indirectamente me relacioné, en especial al Señor Gerardo Cárdenas, con quién compartí amistad y enfrentamos los últimos semestres en aula.

A mi familia por el apoyo desinteresado e incondicional durante mi formación personal y académica.

Finalmente agradezco a Bárbara Oyanedel, mi esposa, por el tiempo invertido, comprensión, amor y haber sido fuente de inspiración para mirar el horizonte y finalizar este proceso.

Dedicado a Maritza Toledo y Roberto Fuentes

CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	GENERALIDADES	1
1.2	MOTIVACIÓN	1
2.	OBJETIVOS, LIMITACIONES Y EXCLUSIONES DEL ESTUDIO	2
2.1	OBJETIVOS	2
2.1.1	OBJETIVO GENERAL	2
2.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2.2	LIMITACIONES Y EXCLUSIONES DEL ESTUDIO	2
3.	PUERTO DE IQUIQUE	3
3.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	3
3.2	RESEÑA HISTÓRICA	4
3.2.1	LICITACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y ADMINISTRACIÓN DEL PUERTO	5
3.3	GENERALIDADES OPERATIVAS DEL PUERTO	6
3.3.1	TRANSFERENCIA DE CARGAS	6
3.3.2	ESTUDIO DE DEMANDA	6
3.4	INFRAESTRUCTURA DEL PUERTO DE IQUIQUE	6
3.4.1	SECTOR A: MOLO DE ABRIGO	7
3.4.2	SECTOR B: ESPIGÓN DE ATRAQUE	8
3.4.3	SECTOR C: ASTILLERO Y EX MUELLE CORFO	8
3.4.4	SECTOR D: MOLO DE UNIÓN	8
3.4.5	SECTOR E: EXPLANADA SUR	8
3.5	PROYECCIÓN DEL FRENTE N°3	9
3.5.1	FRENTE N°3 – TIPOLOGÍA ESCOLLERA	10
3.5.2	FRENTE N°3 – TIPOLOGÍA CAJONES DE HORMIGÓN	11
3.5.3	NAVE DE DISEÑO	11
4.	MARCO TEÓRICO	12
4.1	OLEAJE	12
4.1.1	CARACTERIZACIÓN Y GENERACIÓN DE ONDAS	12
4.1.2	TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE	13
4.1.3	ESPECTROS DE OLEAJE	19
4.1.4	ESPECTROS DE OLEAJE SINTÉTICO MÁS EMPLEADOS	20
4.2	MODELOS PARA EL ESTUDIO DE AGITACIÓN PORTUARIA	22
4.2.1	MODELOS FÍSICOS	22
4.2.2	MODELOS NUMÉRICOS	22
4.3	RESONANCIA PORTUARIA	26
4.3.1	GENERALIDADES	26
4.3.2	ONDAS LARGAS	27
4.3.3	SEICHES 29	
4.3.4	ESTIMACIÓN DE LOS MODOS RESONANTES	30
5.	ANÁLISIS DE CONDICIONES NATURALES	33
5.1	BATIMETRÍA	33
5.1.1	CARTA NÁUTICA ELECTRÓNICA SHOA	33
5.1.2	LEVANTAMIENTOS BATIMÉTRICOS	34
5.2	MEDICIONES DE CAMPO DISPONIBLES	35
5.2.1	MEDICIÓN DE OLEAJE	37
5.2.2	MAREA	39

5.3	ESTUDIO ESPECTRAL DE OLEAJE	41
5.3.1	FUNCIONES DE TRANSFERENCIA	42
5.3.2	CLIMA OPERACIONAL DE OLEAJE	44
6.	MODELO NUMÉRICO DE AGITACIÓN Y RESONANCIA	47
6.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO MIKE 21 BW	47
6.1.1	ESQUEMA EN DIFERENCIAS FINITAS	49
6.2	CONFIGURACIÓN DEL MODELO NÚMÉRICO DE AGITACIÓN	50
6.2.1	DOMINIO NUMÉRICO	50
6.2.2	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	50
6.2.3	MODELO BATIMÉTRICO	51
6.2.4	REFLEXIÓN Y POROSIDAD	52
6.2.5	CAPAS DE ESPONJAS	54
6.2.6	CONDICIONES DE BORDE HIDRODINÁMICAS	55
6.2.7	PARÁMETROS FÍSICOS	56
6.2.8	TIEMPO DE SIMULACIÓN Y PASO DEL TIEMPO	56
6.3	RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO DE AGITACIÓN	57
6.3.1	RESULTADOS SITUACIÓN ACTUAL	57
6.3.2	RESULTADOS ESCENARIO DE EXPANSIÓN	66
6.4	MODELO NUMÉRICO DE RESONANCIA	74
6.4.1	ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE LOS PERÍODOS NATURALES	74
6.4.2	SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN ESPECTRO DE RUIDO BLANCO	75
6.5	RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO DE RESONANCIA	76
6.5.1	RESULTADOS DE LA SITUACIÓN ACTUAL	76
6.5.2	RESULTADOS DEL ESCENARIO DE EXPANSIÓN	79
6.5.3	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE RESONANCIA PARA AMBOS ESCENARIOS	81
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
7.1	CONCLUSIONES	83
7.2	RECOMENDACIONES	83
8.	REFERENCIAS	85
9.	ANEXOS	87
9.1	ANEXO A.	87
9.1.1	COEFICIENTES DE AGITACIÓN SITUACIÓN ACTUAL	87
9.1.2	COEFICIENTES DE AGITACIÓN ESCENARIOS DE EXPANSIÓN	88
9.1.3	COMPARACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE AGITACIÓN	89

LISTADO DE FIGURAS

Figura 3.1: Ubicación geográfica del Puerto de Iquique.	3
Figura 3.2: Evolución del Puerto de Iquique. En orden de las agujas del reloj desde la imagen superior izquierda. a) Vista islote “Yquique”, 1861. b) Configuración portuaria de 2004. c) Configuración portuaria de 2006. d) Configuración portuaria de 2016.	5
Figura 3.3: Sectores de la actual configuración del Puerto de Iquique.	7
Figura 3.4: Fororrealismo construcción Frente N°3.	9
Figura 3.5: Secciones Frente N°3, tipología escollera. Sección cabeza (panel superior), sección media (panel inferior).	10
Figura 3.6: Secciones Frente N°3, tipología cajones de hormigón. Sección arranque (panel superior), sección media (panel inferior).	11
Figura 4.1: Clasificación de las ondas generadas en el océano.	12
Figura 4.2: Esquema de refracción para una onda.	15
Figura 4.3: Difracción de oleaje tras un dique semi infinito para oleaje oblicuo.	17
Figura 4.4: Principales formas de rotura del oleaje.	19
Figura 4.5: Ondas largas asociadas a grupos de ondas (bound long waves).	28
Figura 4.6: Registro de superficie libre en dos frecuencias de muestreo diferentes (Figura izquierda) y efecto de aliasing en el espectro de un registro de onda con intervalos de tiempo discretos (Figura derecha).	29
Figura 4.7: Primeros cuatro modos de oscilación de ondas para cuencas cerradas y abiertas.	31
Figura 4.8: Espectro de ruido blanco para determinar las frecuencias naturales.	32
Figura 5.1: Información carta náutica SHOA N°1211 – Bahía Iquique.	33
Figura 5.2: Levantamientos batimétricos consolidados.	34
Figura 5.3: Ubicación de las mediciones de campo disponibles.	35
Figura 5.4: Imágenes de las campañas de campo realizadas en el Puerto de Iquique.	36
Figura 5.5: Comparación entre altura significativa H_s , período significativo T_s y dirección media MWD. Al interior del Puerto (ADCP 1) y Offshore (ADCP 2) – Campaña verano.	37
Figura 5.6: Comparación entre altura significativa H_s , período significativo T_s y dirección media MWD. Al interior del Puerto (ADCP 1) y Offshore (ADCP 2) – Campaña invierno.	38
Figura 5.7: Registro de amplitud de marea (mareógrafo) para campaña verano.	39
Figura 5.8: Comparación del registro con el pronóstico de marea del SHOA.	40
Figura 5.9: Ubicación de los puntos de extracción de resultados.	41
Figura 5.10: Resultados típicos de la propagación de oleaje para $H_{m0}=1.0$ [m], $T_p=14$ [s], MWD=225 [deg] (panel izquierdo) y $H_{m0}=1.0$ [m], $T_p=14$ [s], MWD=315 [deg] (panel derecho).	42
Figura 5.11: Funciones de transferencia de altura de ola (panel superior) y dirección de ola (panel inferior) para Nodo P_0	43
Figura 5.12: Rosas de altura de oleaje (panel superior) y rosas de períodos de oleaje (panel inferior) en Nodo P_0	45
Figura 5.13: Curvas de probabilidad de excedencia para altura de ola (H_{m0}) – Nodo P_0	46
Figura 6.1: Esquema de discretización espacial en una grilla escalonada en x-y.	49
Figura 6.2: Definición del dominio empleado de acuerdo al oleaje incidente en Nodo P_0	50
Figura 6.3: Modelos batimétricos. A) Situación actual y B) Escenario de expansión (Frente N°3).	52
Figura 6.4: Tramos de reflexión en el dominio de modelación. a) Situación actual. b) Escenario de expansión, alternativa 1. c) Escenario de expansión, alternativa 2.	53
Figura 6.5: Curvas de reflexión vs porosidad para distintos períodos y profundidades.	54
Figura 6.6: Capas de esponjas. A) Situación actual. B) Escenario de expansión Alternativas 1 y 2.	55
Figura 6.7: Ejemplo de coeficiente de agitación para $H_{m0}=1.0$, $T_p=14$, MWD=220 [deg], situación actual.	56
Figura 6.8: Ubicación de los sensores numéricos para la situación actual.	57
Figura 6.9: Resultados típicos del modelo numérico para la situación actual. $H_{m0}=1.0$ [m], $T_p=14$ [s], MWD=220 [deg]. Diagrama de agitación de oleaje (panel superior). Diagrama de desnivelación instantánea (panel inferior).	58
Figura 6.10: Funciones de transferencia desde el Nodo P_0 hasta P1, P2, P3, P4 y Pm.	59
Figura 6.11: Curvas de excedencia H_{m0} [m] – Campaña verano.	60

Figura 6.12: Curvas de excedencia H_{m_0} [m] – Campaña invierno.	61
Figura 6.13: Coeficientes de agitación para la situación actual, nodos P1, P2, P3 y P4.	63
Figura 6.14: Curvas de excedencia de altura de ola (H_{m_0} [m]) en nodos P1, P2, P3 y P4.....	65
Figura 6.15: Ubicación de los sensores numéricos para el escenario de expansión.	66
Figura 6.16: Resultados típicos del modelo numérico para escenario de expansión. A) Alternativa 1 (panel izquierdo) y B) Alternativa 2 (panel derecho). $H_{m_0}=1.0$ [m], $T_p=14$ [s], $MWD=220$ [deg].	67
Figura 6.17: Comparación de los coeficientes de agitación obtenidos para el escenario de expansión en el Sitio 5 para alternativas 1 y 2.	69
Figura 6.18: Variación porcentual en la agitación de los sitios de atraque entre la alternativa 1 (panel izquierdo) y alternativa 2 (panel derecho) con respecto a la situación actual para la condición hidrodinámica $MWD=220$ [deg] y $T_p =14$ [s]......	70
Figura 6.19: Curvas de excedencia de altura de ola (H_{m_0} [m]) en nodos P1, P2, P3, P4 y P5.	73
Figura 6.20: Dimensiones en planta de la dársena (panel izquierdo) y bahía (panel derecho) del Puerto de Iquique.	74
Figura 6.21: Ubicación de los nodos de extracción para la situación actual (panel izquierdo) y escenario de expansión (panel derecho).	76
Figura 6.22: Espectros de energía obtenidos de la simulación de ruido blanco en cada sitio de atraque, situación actual.	77
Figura 6.23: Frecuencias naturales de los sitios de atraque en el Puerto de Iquique, situación actual.	78
Figura 6.24: Espectros de energía obtenidos de la simulación de ruido blanco en cada sitio de atraque, alternativa 1.	79
Figura 6.25: Frecuencias naturales de los sitios de atraque en el Puerto de Iquique, escenario expansión, alternativa 1.	80
Figura 6.26: Comparación de los espectros de energía obtenidos en cada sitio de atraque en la situación actual y escenario de expansión.	81
Figura 9.1: Comparación de los coeficientes de agitación en P1 para todos los escenarios simulados.	89
Figura 9.2: Comparación de los coeficientes de agitación en P2 para todos los escenarios simulados.	90
Figura 9.3: Comparación de los coeficientes de agitación en P3 para todos los escenarios simulados.	91
Figura 9.4: Comparación de los coeficientes de agitación en P4 para todos los escenarios simulados.	92

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3.1: Transferencia histórica por tipo de carga del Puerto de Iquique.	6
Tabla 4.1: Clasificación de los tipos de ondas, fuerzas generadoras y restauradoras.....	13
Tabla 4.2: Relación entre la profundidad relativa y los efectos del fondo sobre el oleaje.	14
Tabla 4.3: Clasificación de rotura según el parámetro de Iribarren.	19
Tabla 4.4: Modos fundamentales y armónicos para cuencas rectangulares cerradas y abiertas.	31
Tabla 5.1: Coordenadas de los instrumentos fondeados para las mediciones de campo disponibles.	35
Tabla 5.2: Intervalos de tiempo de las campañas en terreno ejecutadas.....	36
Tabla 5.3: Planos mareales pronosticados para Iquique.	40
Tabla 5.4: Coordenadas del nodo de extracción P_0	41
Tabla 5.5: Tablas bivariadas nodo P_0 de H_{m_0} vs T_P (tabla superior), y MWD vs H_{m_0} (tabla inferior).	44
Tabla 6.1: Coeficientes de reflexión para cada tramo en el dominio de modelación.	53
Tabla 6.2: Coeficientes de porosidad para los diferentes tramos y períodos simulados.....	54
Tabla 6.3: Condiciones de oleaje simuladas.....	55
Tabla 6.4: Coordenadas de los sensores numéricos para situación actual.	57
Tabla 6.5: Parámetros estadísticos de altura de ola (H_{m_0} [m]).	61
Tabla 6.6: Parámetros estadísticos de dirección media de ola (MWD [deg]).	62
Tabla 6.7: Parámetros estadísticos de período peak de ola (T_P [s]).....	62
Tabla 6.8: Tablas bivariadas H_{m_0} v/s T_P para nodos P1, P2 y P3.....	64
Tabla 6.9: Tablas bivariadas H_{m_0} v/s T_P para nodo P4.	65
Tabla 6.10: Coordenadas de los sensores numéricos para el escenario de expansión.	66
Tabla 6.11: Coeficientes de agitación del Sitio 5 obtenidos para las alternativas 1 y 2.	68
Tabla 6.12: Variación porcentual en la agitación de cada escenario con respecto a la situación actual.	71
Tabla 6.13: Tablas bivariadas H_{m_0} v/s T_P para Nodos P1, P2 y P3.	72
Tabla 6.14: Tablas bivariadas H_{m_0} v/s T_P para Nodos P4 y P5.....	73
Tabla 6.15: Períodos naturales de oscilación obtenidos mediante formulaciones paramétricas.	75
Tabla 6.16: Coordenadas de los nodos de extracción para las simulaciones numéricas mediante espectro de ruido blanco.	76
Tabla 6.17: Modos resonantes del Puerto de Iquique , situación actual.	78
Tabla 6.18: Modos resonantes del Puerto de Iquique , escenario expansión, alternativa 1.	80
Tabla 6.19: Frecuencias peaks para ambos escenarios.	82
Tabla 9.1: Coeficientes de agitación de los nodos de extracción para la situación actual.	87
Tabla 9.2: Coeficientes de agitación de los nodos de extracción para el escenario de expansión.....	88

RESUMEN

El Puerto de Iquique está situado en la Región de Tarapacá, Chile, su ubicación geográfica lo posiciona como una puerta natural de exportación e importación para productos manufacturados y materias primas, producidas en el Cono Central de Sudamérica hacia los mercados internacionales y viceversa. El año 2014 el recinto portuario transfirió 2.2 millones de toneladas y se proyecta hacia el año 2030 en un escenario conservador y otro favorable 5.5 y 7.0 millones de toneladas respectivamente, donde el 75% corresponderán a contenedores. Por lo anterior, la Empresa Portuaria de Iquique (en adelante EPI) proyecta la construcción de un nuevo terminal marítimo denominado Frente N°3 con capacidad de atender una nave tipo New Panamax.

Para verificar los efectos de la construcción del Frente N°3 en la agitación de oleaje y resonancia del recinto portuario se utilizó el modelo numérico MIKE 21 BW, desarrollado por Danish Hydraulic Institute (DHI) el cual está basado en las ecuaciones de Boussinesq desarrolladas por Madsen et al. (1991) y modificadas por Madsen & Sørensen (1992). La herramienta fue validada de acuerdo a lo indicado en el instructivo SHOA, Pub. N°3201, empleando mediciones de campo para verano e invierno de 2015. Posteriormente el modelo se explotó para dos escenarios de simulación. El primero correspondió a la situación actual y el segundo a la construcción del Frente N°3, este último analizado para la denominada Alternativa 1 (tipología de escolleras de protección) y Alternativa 2 (tipología de cajones de hormigón armado). Se determinó que actualmente todos los sitios de atraque presentan excedencias de olas menores a 0.75 [m] y que para la construcción del Frente N°3, la Alternativa 1 genera mejores condiciones de agitación, donde las alturas no excederían los 0.30 [m] para todos los sitios de atraque.

Con relación a la resonancia se obtuvieron las frecuencias naturales de los sitios de atraque mediante la implementación de espectros sintéticos de ruido blanco (*white noise*). La metodología está contenida en el estado del arte (Giervelvse et al. (2001) y Koef-Hansen et al. (2005)) con lo cual se determinó que para la situación actual y escenario de expansión, los períodos de oscilación están contenidos entre 0.5 y 4 minutos. El modo de oscilación más bajo (Helmholtz) se encuentra asociado a una longitud de onda de 6780 [m], el cual provocaría un movimiento vertical de la superficie del agua de pocos centímetros. En general, los períodos que podrían hacer resonar el Puerto de Iquique se encuentran entre 33 y 81 [s] (0.030 a 0.0127 [Hz]), sin embargo se desconoce si forzantes de dichas características (grupos de ondas u ondas largas libres) se presentan en la zona de estudio ni la forma en que podrían ingresar al recinto portuario.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

La operatividad de cualquier puerto se encuentra sujeta a las condiciones de agitación en el interior del mismo. Las condiciones de operación de las naves -para realizar carga y descarga- cantidad de abrigo, esfuerzos sobre amarras y estructuras que componen el recinto portuario están sujetas a la acción de las oscilaciones y corrientes existentes tanto al interior como exterior del puerto.

Es evidente que a la hora de realizar la proyección, diseño o expansión de un puerto resulta esencial contar con el conocimiento de las oscilaciones en las proximidades del puerto y al interior del mismo. En general, la agitación al interior de un emplazamiento portuario puede amplificarse bajo eventos de resonancia. El fenómeno se debe, fundamentalmente, a la coincidencia entre las frecuencias de oscilación natural del cuerpo de agua con las ondas externas que se propagan e inciden hacia el puerto, actuando como forzante.

Losada et al. (2000) indicó que aunque un puerto esté bien abrigado al oleaje comprendido entre 6 a 30 [s] las dársenas pueden oscilar con un período de varias veces el período del oleaje incidente. En general, el régimen oscilatorio de largo período está relacionado con las variaciones del nivel del mar vinculadas a grupos de olas como también variaciones meteorológicas importantes. No obstante, existen otros mecanismos que son capaces de inducir agitación de largo período al interior de los puertos, tales como tsunamis, transferencia no lineal de energía de las componentes de corto período hacia las de largo período, entre otros.

El presente estudio se enfocará en el Puerto de Iquique y la construcción de un nuevo frente de atraque denominado "Frente N°3", con capacidad de recibir una nave tipo New Panamax. Sin embargo, las modificaciones estructurales del recinto portuario pueden aumentar o disminuir la capacidad de abrigo, variando la operatividad del mismo. Por lo anterior, se analizarán las actuales y futuras condiciones de agitación y frecuencias naturales en cada sitio existente y proyectado.

1.2 MOTIVACIÓN

Al momento de proyectar, diseñar, remodelar o expandir un recinto portuario es esencial contar con la caracterización de las oscilaciones en el interior de las dársenas y en las proximidades del puerto. El estudio de estas condiciones se realiza mediante modelos físicos y numéricos; sin embargo, los métodos numéricos han ganado terreno por sobre los modelos físicos debido al bajo costo de implementación, versatilidad y explotación de diferentes escenarios.

Una incorrecta caracterización de las condiciones de agitación que se presentarán al exterior e interior de un recinto portuario proyectado, traerá consigo una baja operatividad y dificultad de maniobras de las embarcaciones que atracarán en los diferentes sitios. Por lo anterior, se empleará una herramienta numérica y la implementación de un espectro de ruido blanco para estimar los efectos de la construcción del Frente N°3 en las condiciones de agitación y resonancia de los sitios de atraque del Puerto de Iquique.

2. OBJETIVOS, LIMITACIONES Y EXCLUSIONES DEL ESTUDIO

2.1 OBJETIVOS

2.1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la variación de la agitación y resonancia en los sitios de atraque del Puerto de Iquique debido a la construcción del Frente N°3.

2.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las condiciones oceanográficas del sector en estudio.
- Obtener los coeficientes de agitación de todos los sitios de atraque existentes.
- Validar los resultados del modelo numérico con los registros de oleaje in situ existentes.
- Obtener los coeficientes de agitación del Frente N°3 proyectado y determinar posibles variaciones de agitación en los sitios existentes.
- Determinar mediante la metodología de espectro de ruido blanco los modos resonantes de los sitios existentes y proyectados.

2.2 LIMITACIONES Y EXCLUSIONES DEL ESTUDIO

Para el desarrollo del estudio no se obtuvo autorización para emplear alguna base de oleaje (hindcast) validada en aguas profundas y representativa del área de estudio, por lo cual se utilizó el Estudio Espectral de Oleaje (Ref.5) como condición de borde del modelo de agitación.

Con relación al análisis de resonancia, el fenómeno está asociado al ingreso de un forzante externo, cuya frecuencia coincide con el período natural de la dársena. Sin embargo, el estudio se enfocó en la obtención de las frecuencias naturales mediante un espectro sintético de ruido blanco, de acuerdo al estado del arte. La metodología no permite conocer el mecanismo en que ondas largas (reales) ingresan al puerto. Se debe enfatizar que los resultados obtenidos son un primer paso para caracterizar los eventos de bajas frecuencias en el recinto.

El estudio no consideró simulaciones de ondas largas reales debido a la no existencia de campañas de campo al exterior o interior del puerto, por lo cual, no se empleó el fenómeno de rotura para identificar cómo se generarían ondas largas libres ni la transmisión de energía entre frecuencias.

3. PUERTO DE IQUIQUE

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El Puerto de Iquique está ubicado en la Región de Tarapacá, provincia, comuna y ciudad del mismo nombre. La provincia de Iquique limita al norte con la de Arica, al este con la de Tamarugal -límitrofe con Bolivia- al sur con la de Tocopilla y al oeste con el Océano Pacífico.

El recinto portuario se encuentra a 316 [km] al sur de la ciudad de Arica y 1845 [km] al norte de Santiago. La ubicación se ilustra en la Figura 3.1 y las coordenadas geográficas referenciales se indican a continuación.

Latitud : 20° 11'59" S

Longitud : 70° 09' 25" W

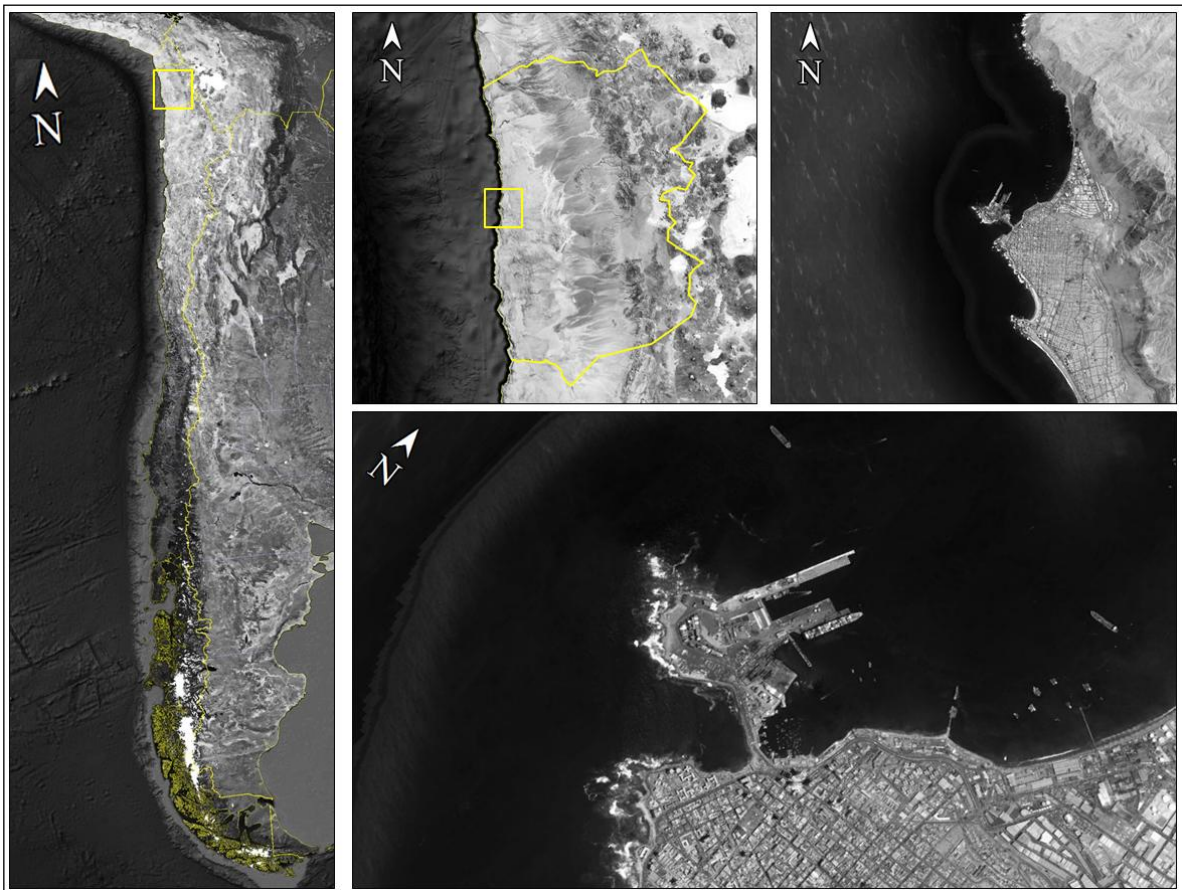


Figura 3.1: Ubicación geográfica del Puerto de Iquique.
(Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth).

Su ubicación geográfica lo posiciona como una puerta natural de exportación e importación para productos manufacturados y materias primas, producidas en el Cono Central de Sudamérica hacia los mercados internacionales, principalmente del Asia – Pacífico, y viceversa.

3.2 RESEÑA HISTÓRICA

De acuerdo a (Ref.6). El Puerto de Iquique ha tenido cuatro diferentes nombres a través del tiempo. En el siglo XVI se llamó Puerto de Tarapacá, mientras que durante el siguiente siglo pasó a llamarse Nuestra Señora de la Concepción de Iquey. Finalmente, durante la época salitrera (Siglo XIX), recibió su actual nombre.

El nombre Ique proviene del aimará y significa sueño y cama, debido a que los habitantes del altiplano y de la pre-cordillera experimentaban un incontenible deseo de dormir al sufrir el cambio de altitud entre las aldeas y el puerto.

En su inicio Iquique fue una caleta pesquera, habitada por los changos, que explotaba las guaneras de aves marinas en la antigua Isleta de Iquique. El movimiento portuario de la época estaba reducido al embarque de este guano en pequeños veleros. Posteriormente, empezaron a recalar embarcaciones provenientes de Chile, con productos tales como cebada, charqui, harina, frutas y otros para la región del interior. En 1830 se empezó a producir lentamente el desarrollo de la industria salitrera en el Cantón de la Noria, zona ubicada a 40 [km] al interior de Iquique, con lo que aumentó la actividad portuaria, cobrando vigor con la adopción de la maquinaria a vapor para la explotación del salitre. Iquique dejó de ser una caleta de pescadores para transformarse en un pequeño puerto. En 1848 el gobierno peruano autorizó las exportaciones de salitre a través del Puerto de Iquique, pero los buques debían recalar en Arica para ser despachados desde allí a sus puertos de destino. Dicha limitación fue levantada dos años más tarde y las naves zarpaban directamente desde Iquique. Posteriormente entre los sectores de La Puntilla y El Morro se construyeron 19 muelles para el embarque del salitre.

Con el inicio de la Guerra del Pacífico, la escuadra chilena sometió a bloqueo a los puertos de Arica e Iquique. El 21 de mayo de 1879 se produjo en la bahía de Iquique, frente de la isleta, un combate naval entre fuerzas acorazadas de la armada peruana (monitor Huáscar y fragata acorazada Independencia) y fuerzas chilenas (corbeta Esmeralda y goleta Covadonga), combate que -pese a la pérdida de la Esmeralda- significó el triunfo de las armas chilenas al ser hundida también la Independencia, acabando con ello la posibilidad que Perú dominase el mar. Posterior a la campaña militar de Tarapacá –que terminó con el éxito de las fuerzas chilenas– el 22 de noviembre de 1879 las fuerzas peruanas de guarnición, ubicadas en Iquique, hicieron abandono de la plaza. A partir de esa fecha la isleta de Iquique se nombró Isla Serrano en recuerdo del oficial de la Esmeralda, Ignacio Serrano Montaner. Con la ocupación chilena de Tarapacá se normalizaron las faenas mineras en las salitreras y el gobierno fomentó la iniciativa privada, transformando a Iquique en la capital del salitre. En la última década del siglo XIX, el gobierno intentó el desarrollo de obras portuarias en Iquique, con el objetivo de facilitar la actividad del puerto. Construyó un malecón y el molo de unión entre la Isla Serrano y el continente.

En 1912 Iquique fue un importante puerto debido a la actividad salitrera que alcanzó 1.300.000 [t] al año. La transferencia de carga se realizaba a través de numerosos muelles existentes.

Con la Primera Guerra Mundial comenzó la decadencia del salitre -debido al salitre sintético- empezando a desplazar definitivamente al nitrato natural, lo que repercutió en la actividad portuaria de Iquique.

3.2.1 LICITACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y ADMINISTRACIÓN DEL PUERTO

En 1927 la Comisión de Puertos llamó a propuesta pública para la ejecución de las obras del terminal portuario de Iquique, iniciándose en 1928 la construcción y finalizando en 1932. Las obras consideraron un molo de unión entre el continente y la Isla Serrano, y otro molo de abrigo de 864 [m] de longitud con un malecón de atraque y la construcción de un espigón de atraque de 330 [m] de longitud y 100 [m] de ancho.

El nuevo terminal marítimo fue administrado por el Estado a través del Servicio de Explotación de Puertos, entidad creada para administrar en forma centralizada los diferentes puertos públicos. En 1960 fue creada la Empresa Portuaria de Chile (EMPORCHI) a cuya administración pasaron las instalaciones. La Ley N°19.542¹ estableció la creación de empresas portuarias autónomas; en Abril de 1998 se creó la Empresa Portuaria Iquique (EPI), continuadora legal de la ex EMPORCHI.

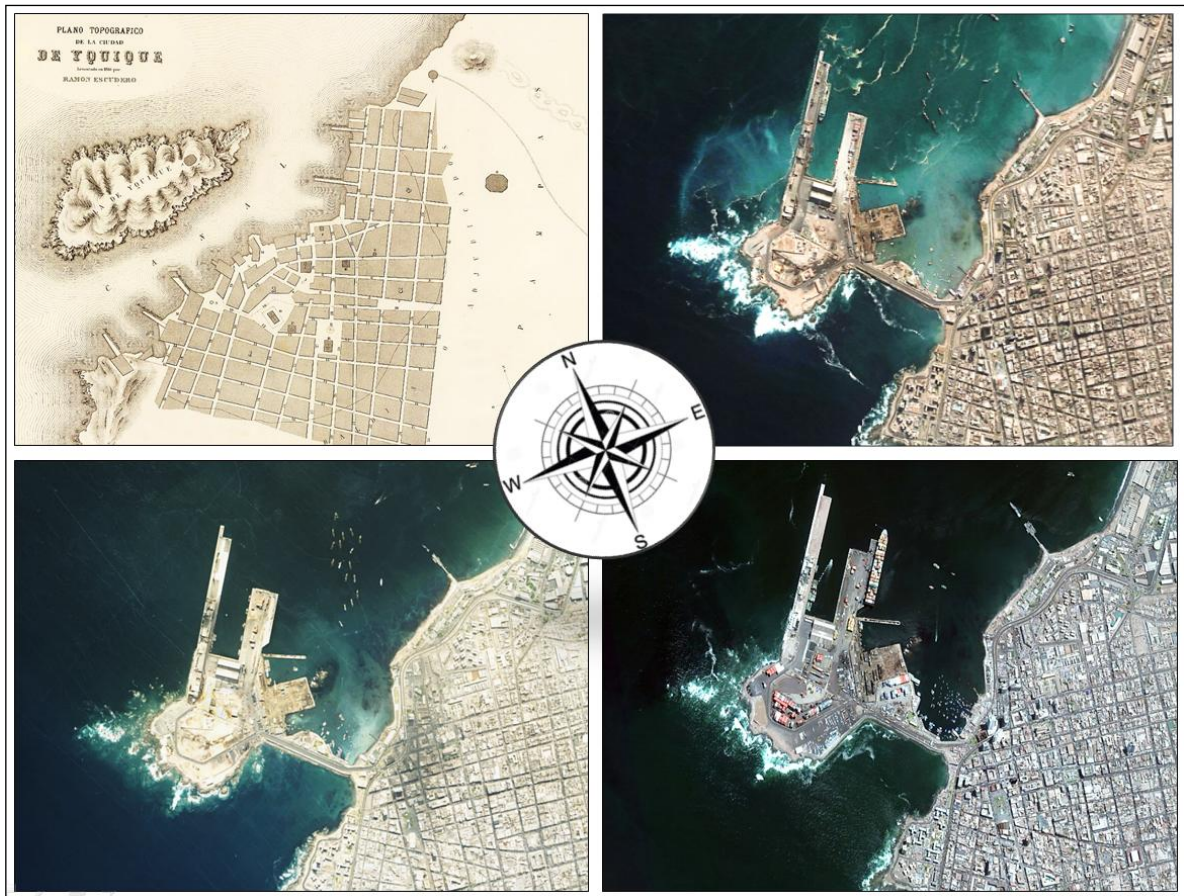


Figura 3.2: Evolución del Puerto de Iquique. En orden de las agujas del reloj desde la imagen superior izquierda. a) Vista islote “Yquique”, 1861. b) Configuración portuaria de 2004. c) Configuración portuaria de 2006. d) Configuración portuaria de 2016. (Fuente: Elaboración propia).

¹ Ley N°19.542: Moderniza el sector portuario estatal, promulgada el 09/12/1997 y publicada el 19/12/1997.

3.3 GENERALIDADES OPERATIVAS DEL PUERTO

3.3.1 TRANSFERENCIA DE CARGAS

El puerto está habilitado para la transferencia de cargas contenedorizadas, graneles sólidos y líquidos, automotoras y fraccionadas, caracterizándose como un terminal multipropósito.

De acuerdo a Ref.6, el Puerto de Iquique movilizó durante el año 2014 un total de 2.185.522 [t]. La transferencia histórica por tipo de carga se presenta en la Tabla 3.1.

TIPO DE CARGA	AÑO				
	2010	2011	2012	2013	2014
Contenedorizada	2.090.634	1.900.917	1.758.322	1.755.419	1.639.281
Fraccionada	273.884	315.959	357.836	344.215	302.792
Granel	160.258	277.843	108.626	78.076	30.920
Automotor	204.495	211.813	223.557	239.666	212.532
TOTAL TONELADAS	2.729.271	2.706.532	2.448.341	2.417.376	2.185.525

Tabla 3.1: Transferencia histórica por tipo de carga del Puerto de Iquique.
 (Fuente: Empresa Portuaria Iquique).

3.3.2 ESTUDIO DE DEMANDA

El Puerto de Iquique transfirió aproximadamente 2.2 millones de toneladas durante el año 2014 (ver Tabla 3.1) y se proyecta para el año 2030 en un escenario conservador (5.5 millones de toneladas) y en un escenario favorable (7.0 millones de toneladas).

El estudio de demanda estima que entre el 73% y 76% de las cargas que se movilizarán corresponderán a contenedores, mientras que el 22% a 24% será graneles y cargas fraccionadas. Finalmente, se proyecta que solamente el 2% a 3% del tonelaje movilizado corresponderá a vehículos.

Los resultados indican que la mayor parte de las cargas que transferirá el terminal corresponderán a contenedores. Por lo anterior, EPI considera que el puerto deberá seguir aumentando la infraestructura, equipos y logística para el manejo eficiente de contenedores.

3.4 INFRAESTRUCTURA DEL PUERTO DE IQUIQUE

El Puerto de Iquique -actualmente- cuenta con dos frentes de atraque. El primero administrado por EPI, en modalidad de multioperador, mientras que el segundo concesionado a Iquique Terminal Internacional S.A (ITI), como monopropósito. Cada uno conformado por dos sitios de atraque distribuidos en un molo de abrigo y un espigón, ambos de penetración al mar. Para realizar la descripción de la infraestructura existente se ha dividido el recinto portuario en seis sectores de interés, según lo indicado en la Figura 3.3.



Figura 3.3: Sectores de la actual configuración del Puerto de Iquique.
(Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth).

3.4.1 SECTOR A: MOLO DE ABRIGO

El denominado Sector A corresponde al Molo de abrigo, Frente N°1, el cual contiene los sitios de atraque 1 y 2.

- a) Muelle de atraque: Corresponde a los sitios 1 y 2, con una longitud de 399 [m] para naves comerciales y 133 [m] para naves pesqueras. El ancho aproximado es de 50 [m], constituido por un muro gravitacional de bloques de hormigón.

El muro gravitacional está apoyado a la cota -10 [mNRS] sobre un prisma de rocas de hasta 60 [kg] de peso, cuya base está fundada en algunos sectores hasta la cota -24 [mNRS].

Los bloques de hormigón alcanzan hasta la cota +1.00 [mNRS], y sobre ellos se construyó un macizo de hormigón in situ de 2 [m] de altura. Detrás del muro de bloques existe un prisma de rocas de 60 [kg] de peso, que recorre las cotas -10 a +1.00 [mNRS]. El talud posterior tiene una pendiente de 4:3 (h:v).

El ancho del delantal para este sector es de 20 [m] y detrás de él se extiende una explanada de aproximadamente 44 [m] de ancho, todo cubierto con pavimentos de adocretos, excepto un sector de hormigón en el Sitio 1.

- b) Obras de protección costera: Las obras de defensa, de 585 [m] de largo, consisten en un muro gravitacional de bloques de hormigón de 60 [t] de peso, apoyados a la cota -9.40 [mNRS] sobre un prisma de enrocado. El coronamiento del muro se encuentra a la cota +4.00 [mNRS] y sobre él se construyó un muro parapeto de hormigón in situ, coronado a la

cota + 8.00 [mNRS] y ancho de 1 [m]. El coronamiento del prisma, a la cota -9.40 [mNRS] tiene un ancho de 32.30 [m] y talud con pendiente 4:3 (h:v).

3.4.2 SECTOR B: ESPIGÓN DE ATRAQUE

El Sector B corresponde al Espigón de atraque, Frente N°2, el cual contiene dos muelles denominados sitios 3 y 4.

- a) Muelle Sitio 3: Posee 355 [m] de largo y 100 [m] de ancho; está formado por un muro de bloques de hormigón prefabricados, dispuesto en capas horizontales que se apoyan sobre un prisma de enrocado cuyo coronamiento está a la cota -10.25 [mNRS]. El muro se encuentra coronado a la cota +4.00 [mNRS]. Detrás del muro de bloques existe un prisma conformado por rocas de 60 [kg] de peso, que alcanza a la cota +1.60 [mNRS].
- b) Muelle Sitio 4: Cuenta con una longitud total de 294 [m] y está constituido por un muelle transparente de 30 [m] de ancho, con pilotes de acero hincados al fondo. Este sitio de atraque posee en la actualidad, una profundidad de -12.50 [mNRS] con capacidad de ser dragado hasta -15 [mNRS].

3.4.3 SECTOR C: ASTILLERO Y EX MUELLE CORFO

Este sector corresponde al astillero, concesionado a Marco Chilena. Las instalaciones cuentan con el denominado Ex Muelle Corfo y Varadero Marco Chilena.

- a) Ex Muelle Corfo: Consiste en una estructura de gaviones de tablestacas planas, hincadas en un relleno de arena confinado por terraplenes de grava de 20 a 200 [kg]. La profundidad máxima alcanza los -5 [mNRS]. La obra de gaviones está coronada por muros de hormigón armado de sección L, que se apoyan directamente sobre el tablestacado. Las dimensiones generales de la obra son 12 [m] de ancho y 220 [m] de longitud. Actualmente el muelle no se encuentra en operación y presenta un avanzado deterioro estructural.
- b) Astillero: Está conformado por terreno ganado al mar, contenido por bloques de hormigón protegidos por una escollera de escombros.

3.4.4 SECTOR D: MOLO DE UNIÓN

El molo de unión cuenta con 500 [m] de largo; une la ex Isla Serrano con el continente y está conformado por un relleno central de desmonte de cantera -protegido por enrocados- sobre los cuales se apoya un muro parapeto de hormigón, por el costado sur, alcanzando la cota +8.50 [mNRS]. El ancho promedio del molo son 34 [m]. En su zona central se construyó un malecón de 153 [m] de largo, en base a bloques de hormigón prefabricados -apoyados sobre un prisma de rocas- el cual forma una explanada de 90 [m] en forma de semicircunferencia, lugar en el cual se emplaza -entre otras instalaciones- el edificio institucional del Puerto de Iquique.

3.4.5 SECTOR E: EXPLANADA SUR

La explanada está compuesta por todas las áreas de respaldo inmediatas al molo de abrigo y espigón, las restantes superficies de la ex Isla Serrano y terrenos ganados al mar están protegidos mediante obras de escolleras costeras.

El límite norte de este sector con la dársena, formado entre los sectores A y B en una longitud de 150 [m], consiste en un enrocado formado por un prisma de rocas de 500 a 2000 [kg] de peso.

El costado oeste del Sector Sur A está protegido del oleaje por una defensa de 265 [m] de largo, que es la continuación de la defensa costera del Sector A, diferenciándose en que el prisma de

rocas tiene un coronamiento a la cota +1.50 [mNRS] y se encuentra protegido por una capa de rocas de 2 [t] sobre la cual se colocó un muro parapeto de bloques prefabricados.

La última defensa del Sector Sur A tiene dos tramos diferentes: el primero, de aproximadamente 140 [m] de largo, tiene un talud protegido -además- por una capa de bloques de hormigón y su muro parapeto alcanza hasta la cota +8.00 [mNRS], mientras que el segundo -de aproximadamente 125 [m] de largo- no tiene protección de bloques para el talud y posee un parapeto de bloques prefabricados que alcanza la cota +8.50 [mNRS].

3.5 PROYECCIÓN DEL FRENTE N°3

La proyección del Frente N°3 se concibe de acuerdo a lo indicado en el punto 3.3.2 y corresponde a la extensión de 526 [m] del molo de abrigo existente, dando abrigo a un nuevo frente de atraque de 476 [m] de largo, donde 442 [m] serán utilizados por la nave de diseño y el resto a la conexión entre el molo existente y su prolongación. Respecto del ancho de la expansión, éste fue ajustado al existente en el molo de abrigo, el cual posee aproximadamente 65 [m] entre el frente de atraque y el borde exterior del molo. La Figura 3.4 ilustra la expansión del molo de abrigo mediante fotorrealismos.

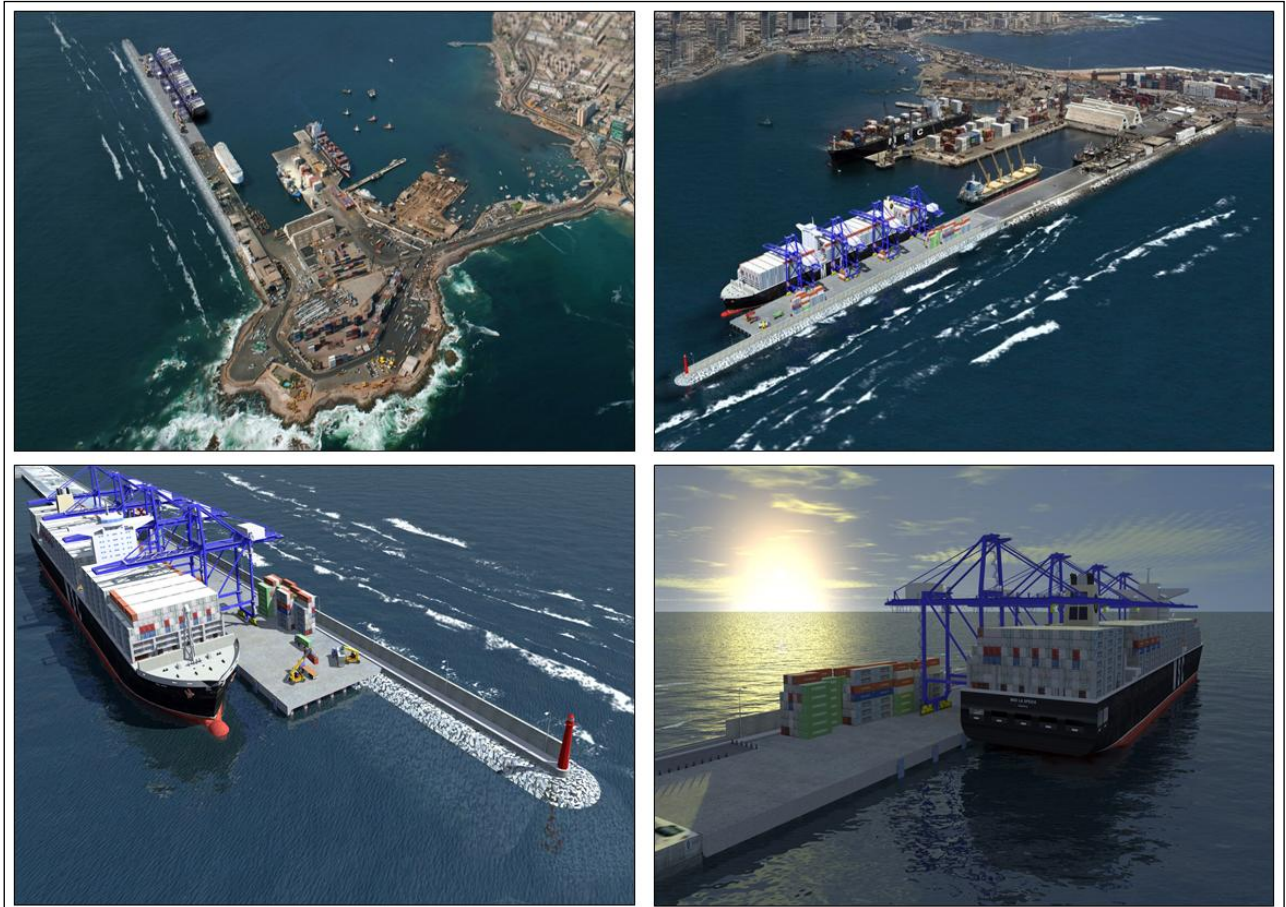


Figura 3.4: Fororrealismo construcción Frente N°3.
(Fuente: Adaptado a partir de Ref.1).

3.5.1 FRENTE N°3 – TIPOLOGÍA ESCOLLERA

Esta alternativa considera un rompeolas compuesto por un talud de pendientes 1.75:1.0 (h:v) con berma a una cota de -7.80 [mNRS], sobre la cual se ubica una coraza monocapa de elementos de protección costero de hormigón tipo Acrópodos, con peso 4.0 y 9.0 [t] en el arranque y cabezo. En el filtro se emplean rocas entre 900 y 1500 [kg] el cual emerge como coraza bajo el nivel de la berma. Toda la estructura se sustenta sobre un núcleo de desmote de cantera cubierto por geotextil y un filtro secundario de rocas. El molo es coronado por un muro de hormigón armado alcanzando una cota de +10.5 [mNRS] para controlar el sobrepaso, lo anterior se presenta en la Figura 3.5.

Al interior del nuevo molo se ubica el frente de atraque construido mediante la tipología de pilotes hincados en el fondo marino, cuyo extremo superior da sustento a vigas de hormigón armado que sostienen un tablero de la misma composición estructural. Con un ancho de 43.75 [m], el tablero se conecta al molo de abrigo mediante una losa de traspaso para luego continuar con pavimentos adocetos hasta el muro de coronamiento del molo.

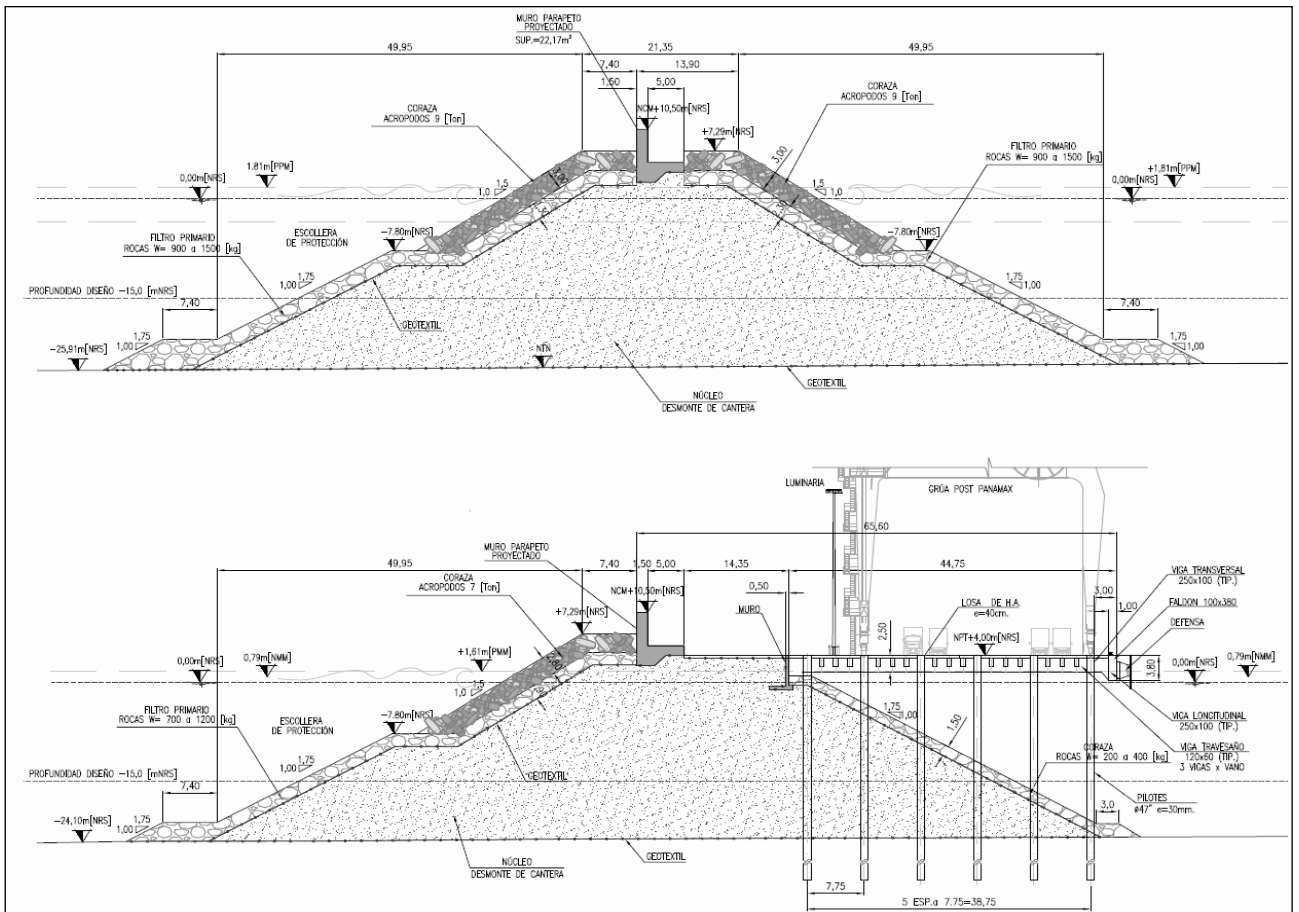


Figura 3.5: Secciones Frente N°3, tipología escollera. Sección cabezo (panel superior), sección media (panel inferior).

(Fuente: Elaboración propia a partir de Ref.1).

3.5.2 FRENTE N°3 – TIPOLOGÍA CAJONES DE HORMIGÓN

Esta alternativa considera la construcción de cajones de hormigón armado en ambos costados del molo de abrigo, unidos por un relleno estructural, todo sobre una base estabilizadora de rocas. En el exterior se encuentra el pie protegido por un talud de rocas sumergidas y el cajón coronado por un muro de hormigón armado. En el interior se encuentra el sitio de atraque con las defensas adosadas al cajón de hormigón armado, lo anterior se presenta en la Figura 3.6.

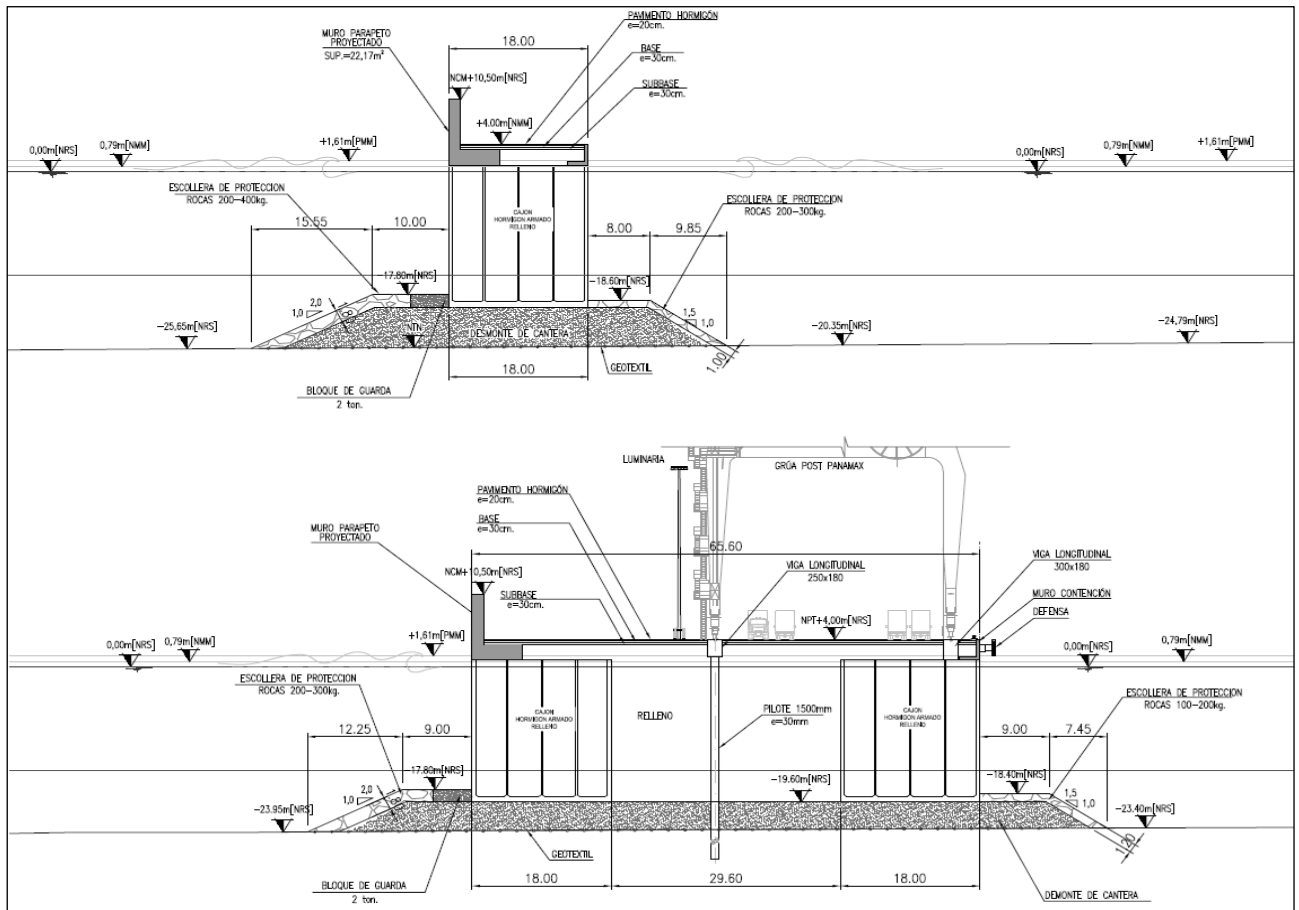


Figura 3.6: Secciones Frente N°3, tipología cajones de hormigón. Sección arranque (panel superior), sección media (panel inferior). (Fuente: Elaboración propia a partir Ref.1).

3.5.3 NAVE DE DISEÑO

El buque de diseño definido para la construcción del Frente N°3 corresponde a un portacontenedores New Panamax y sus principales características son.

- Eslora : 366 [m]
- Manga : 49 [m]
- Calado : 15.2 [m]
- Capacidad : 12.000 [TEU]

4. MARCO TEÓRICO

4.1 OLAJE

4.1.1 CARACTERIZACIÓN Y GENERACIÓN DE ONDAS

En el océano siempre está presente algún tipo de onda que es el resultado de la energía a lo largo de la interfase agua-atmósfera que constituye la superficie del mar. Estos mecanismos que aportan energía al mar tienen diferentes forzadores, entre ellos el viento, terremotos, efectos meteorológicos, atracción planetaria y otros. En las cercanías de la costa, o en mar abierto, es poco frecuente encontrar una masa de agua en contacto con la atmósfera que no posea movimiento en la superficie. La ondulación corresponde a la manifestación de estas fuerzas en contacto sobre el fluido, intentando deformarlo en contra de la acción de gravedad y la tensión superficial. Por lo anterior, se requiere de algún tipo de forzador para generar olas.

Dean & Dalrymple (1991) indican que una vez que las olas son creadas, tensiones gravitacionales y superficiales son activadas de manera tal que permiten que las olas se propaguen. En base a cada una de las perturbaciones y forzantes es que se generan en el mar ondas que difieren tanto en período como longitud. La Figura 4.1 presenta la clasificación de las ondas generadas en el océano.

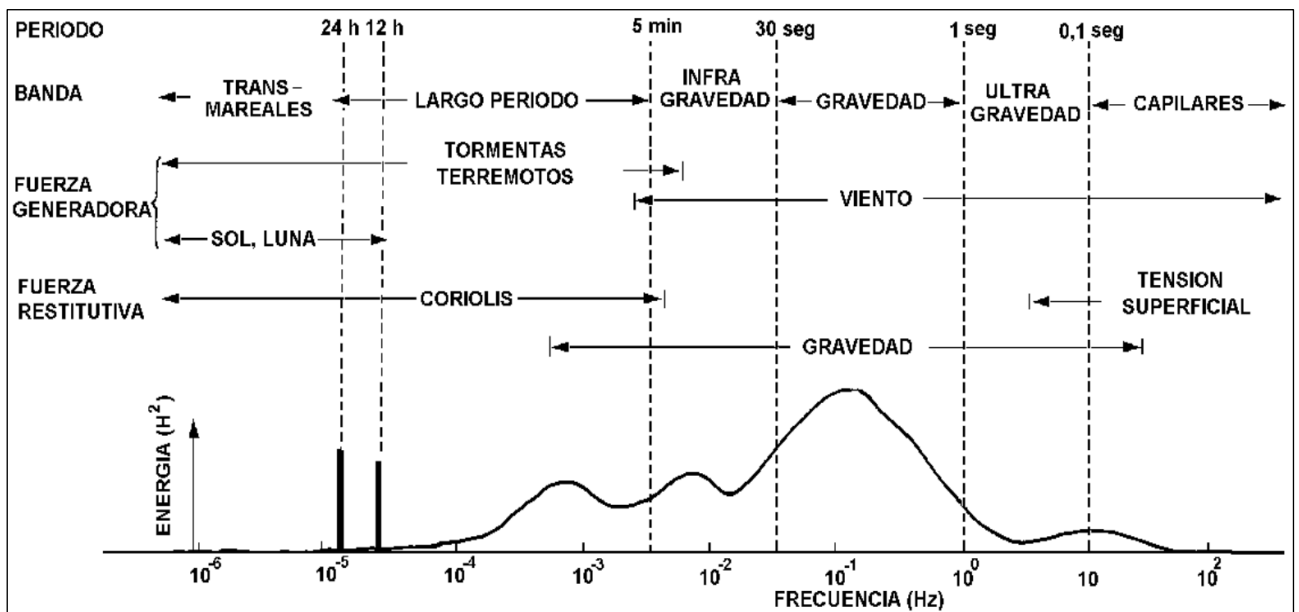


Figura 4.1: Clasificación de las ondas generadas en el océano.
 (Fuente: Adaptado de Kinsman (1965)).

Se observa en la Figura 4.1 que el tipo de ondas superficiales abarca desde ondas capilares, con períodos inferiores a 0.1 [s], hasta oscilaciones inducidas por la marea, con períodos del orden de horas e incluso días.

La Tabla 4.1 presenta los diferentes tipos de ondas clasificadas por la longitud de onda y período junto con la forzante.

TIPO	PERÍODO Y LONGITUD	FUERZA GENERADORA	FUERZA RESTAURADORA	EJEMPLO
Ondas capilares	0.1 [s] 10 ⁻² [m]	Viento	Tensión superficial gravedad	Rizado de viento
Ondas ultragravitacionales	0.1 - 1.0 [s] 100 [m]	Viento	Gravedad	Ondas de viento
Ondas gravitacionales	1.0 - 30 [s] 1 - 10 ³ [m]	Viento y oleaje de viento	Gravedad; fricción	Sea y Swell
Ondas largas	5 minutos 10 ⁵ - 10 ⁶ [m]	Tormentas y terremotos	Gravedad; coriolis; fricción	Tsunami
Ondas de marea astronómica	12.42 - 24.84 horas 10 ⁷ [m]	Rotación de la tierra; atracción Luna, Sol	Gravedad; coriolis; fricción	Marea astronómica
Ondas transmareales	24 horas 10 ⁷ [m]	Orbita solar; gravitación	Gravedad; coriolis; fricción	Marea meteorológica

Tabla 4.1: Clasificación de los tipos de ondas, fuerzas generadoras y restauradoras.
 (Fuente: Adaptado a partir de Ref.11).

La gestación del oleaje debido a la acción del viento genera las fluctuaciones turbulentas de la presión atmosférica que -a su vez- induce olas denominadas ondas capilares. Massel (1996) indica que cuando la velocidad del viento aumenta, las olas crecen de tamaño y las fuerzas de origen gravitacional son suficientes para mantener la propagación del oleaje.

4.1.2 TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE

El oleaje es una de las variables más importante en la caracterización del clima marítimo y uno de los más determinantes para abordar el diseño de una instalación portuaria y de las obras marítimas, tanto desde el punto de vista funcional como estructural. La comprensión de los mecanismos de generación y propagación del oleaje es esencial para un proyecto, construcción y explotación de las obras marítimas.

El oleaje se genera por efecto de la acción del viento sobre la superficie del mar. En el entorno del área en la que sopla el viento, que puede estar situada a distancias mayores (varios kilómetros) de la costa, el oleaje presenta un aspecto caótico denominado mar de viento o sea, pudiéndose observar olas de diferentes alturas y en diferentes direcciones, sin ninguna tendencia ni orden.

A medida que estas ondas se alejan de la zona de generación, se produce un orden progresivo mediante la formación de crestas largas, comenzando a producirse la propagación del oleaje hacia la costa, denominado mar de fondo o *swell*.

Al alcanzar las proximidades de la costa el oleaje comienza a ser afectado por la profundidad, disipando su energía por interacción con el aire, fricción del fondo o por la turbulencia al producirse la rotura del oleaje por efecto del fondo en zonas donde la profundidad es bastante reducida.

La Tabla 4.2 presenta el rango de profundidades que permite identificar el grado de influencia del fondo en la transformación del oleaje, se clasifica en función de la profundidad relativa (d/L), la cual corresponde al cociente entre la profundidad (d) y la longitud de onda (L) asociada a dicho punto.

PROFUNDIDAD	PROFUNDIDAD RELATIVA	EFFECTOS DEL FONDO
Aguas profundas	$d/L > 1/2$	Sin influencia
Aguas intermedias	$1/25 < d < 1/2$	Influencia
Aguas someras	$d/L < 1/25$	Influencia

**Tabla 4.2: Relación entre la profundidad relativa y los efectos del fondo sobre el oleaje.
 (Fuente: Elaboración propia).**

En la condición de aguas profundas el oleaje no experimenta ninguna influencia del fondo y únicamente puede ser afectado por la presencia de algún obstáculo.

Cuando el oleaje se propaga en aguas intermedias comienza a ser afectado por la configuración del fondo, pudiendo alterar su dirección y altura (fenómenos de refracción y shoaling). Debido a la variación que experimenta la velocidad de propagación, éste comenzará a modificar su dirección, provocando que los frentes de olas tiendan a alinearse según la disposición de los veriles batimétricos.

En las proximidades de la línea de costa, cuando se entra en profundidad reducida o somera, los frentes de olas se encuentran aproximadamente paralelos a los veriles batimétricos. Aunque el efecto de la refracción (modificación de dirección y altura) resulta mucho menor o incluso nula, sí continúa produciéndose el efecto de la variación de altura por reducción de la profundidad (efecto de shoaling o asomeramiento).

Finalmente, y también en la zona de aguas someras, se presenta el fenómeno de rotura de oleaje, así como la modificación producida por la interacción del oleaje con la posible presencia de obras marítimas, lo que constituye el fenómeno de difracción. Además, al interactuar el oleaje con obstáculos opacos (que no permiten la continuidad de trayectoria del oleaje) se presencia el efecto de reflexión.

Los fenómenos de transformación de oleaje mencionados anteriormente se describen a continuación de manera general, para mayor información consultar Ref.9 y Ref.10.

4.1.2.1 REFRACCIÓN

Corresponde al cambio de dirección de la ola debido a modificaciones en la velocidad de propagación, producto de variaciones en la profundidad o interacción con corrientes.

Cuando el oleaje alcanza la zona de profundidades intermedias ($d/L < 1/2$), en la que las olas comienzan a notar el efecto del fondo y si la dirección incide de manera oblicua con respecto a la disposición de los veriles batimétricos, se produce el fenómeno de la refracción.

El fenómeno se presenta cuando un tren de ondas viaja oblicuamente sobre la costa y encuentra un cambio de profundidad. En este caso, una parte del frente de la onda viaja en aguas más someras y, por tanto, con menor celeridad que el resto, dando lugar a un cambio de dirección. Análogamente, en presencia de una corriente, puede producirse un retraso de parte del frente con el consiguiente cambio de dirección. Por tanto, el fenómeno de refracción puede ser debido al efecto del fondo o la presencia de una corriente.

El fenómeno será explicado mediante el método de las ortogonales, el cual es comúnmente empleado para determinar el coeficiente de refracción. La Figura 4.2 presenta un esquema explicativo para describir matemáticamente el fenómeno.

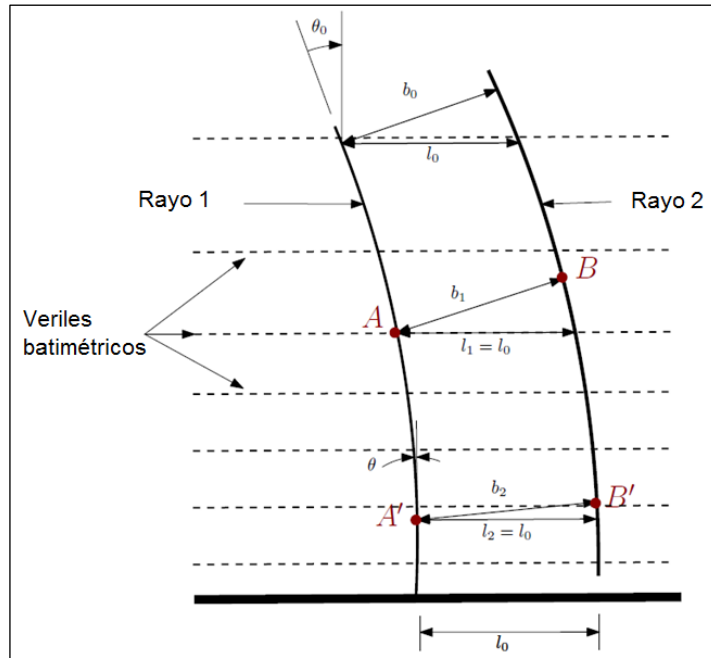


Figura 4.2: Esquema de refracción para una onda.
 (Fuente: Adaptado a partir de Ref.10).

Considerando que el flujo medio total de energía entre dos ortogonales se mantiene constante, se tiene:

$$H^2 \cdot C_g \cdot b = cte. \quad \text{Ecuación (4.1)}$$

Además, considerando la propagación del oleaje entre dos puntos de diferente profundidad y en base a que el período de la ola permanece constante, se obtiene:

$$\frac{H_2}{H_1} = \sqrt{\frac{n_1 \cdot \tanh\left(\frac{2\pi \cdot d_1}{L_1}\right) \cdot b_1}{n_2 \cdot \tanh\left(\frac{2\pi \cdot d_2}{L_2}\right) \cdot b_2}} \quad \text{Ecuación (4.2)}$$

La relación b_1/b_2 son todos los efectos que transforman el oleaje en planta y al emplear raíz cuadrada se obtiene el coeficiente de refracción K_r .

$$K_r = \sqrt{\frac{b_1}{b_2}} \quad \text{Ecuación (4.3)}$$

A través de la ley de Snell se relaciona el ángulo de incidencia del oleaje con el ancho entre ortogonales.

$$\frac{\sin(\theta)}{b} = cte. \quad \text{Ecuación (4.4)}$$

Empleando esta ecuación se obtiene que la relación b_1/b_2 se expresa en términos de la proporción de los senos del ángulo de incidencia; realizado lo anterior, se puede conocer la altura

de oleaje en cualquier punto, que sólo ha sido afectada por refracción en función de la altura de ola en aguas profundas.

$$H = H_0 \cdot K_r \quad \text{Ecuación (4.5)}$$

Donde H_0 es la altura de ola en aguas profundas y K_r el coeficiente de refracción.

4.1.2.2 ASOMERAMIENTO

El asomeramiento o *shoaling*, corresponde al proceso en que el oleaje comienza a deformarse por la interacción con el fondo. Destaca en este proceso la disminución de la longitud y celeridad de la ola a medida que disminuye la profundidad, provocando con ello el peraltamiento de la ola o bien el aumento de altura.

Para plantear el fenómeno de asomeramiento se emplean dos supuestos:

- El flujo de energía en la dirección de la propagación de la ola permanece constante entre las ortogonales.
- El período de la ola no varía en el tiempo-espacio.

Considerando que la presencia de corrientes no es importante, la conservación del flujo energético se puede presentar de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dx}(E \cdot C_g) = 0 \quad \text{Ecuación (4.6)}$$

Considerando que una onda se propaga desde una profundidad d_2 asociada a una altura H_2 y cuando esté en una profundidad d_1 la altura será H_1 .

$$H_1 = H_2 \sqrt{\frac{C_{g2}}{C_{g1}}} \quad \text{Ecuación (4.7)}$$

De lo anterior, el coeficiente de asomeramiento se puede expresar como:

$$K_s = \frac{H_1}{H_2} = \sqrt{\frac{C_{g2}}{C_{g1}}} \quad \text{Ecuación (4.8)}$$

La Ecuación (4.8) también se puede encontrar expresada en relación a la altura de ola en aguas profundas, por lo que el coeficiente de asomeramiento también se puede presentar como:

$$K_s = \frac{H_1}{H_0} = \sqrt{\frac{C_{g0}}{C_{g1}}} = \frac{1}{\sqrt{2n \cdot \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)}} \quad \text{Ecuación (4.9)}$$

Finalmente, considerando el efecto del asomeramiento sobre la altura de ola incidente se puede expresar como:

$$H_1 = H_0 \cdot K_s \quad \text{Ecuación (4.10)}$$

Donde H_0 es la altura de ola en aguas profundas y K_s es el coeficiente de asomeramiento.

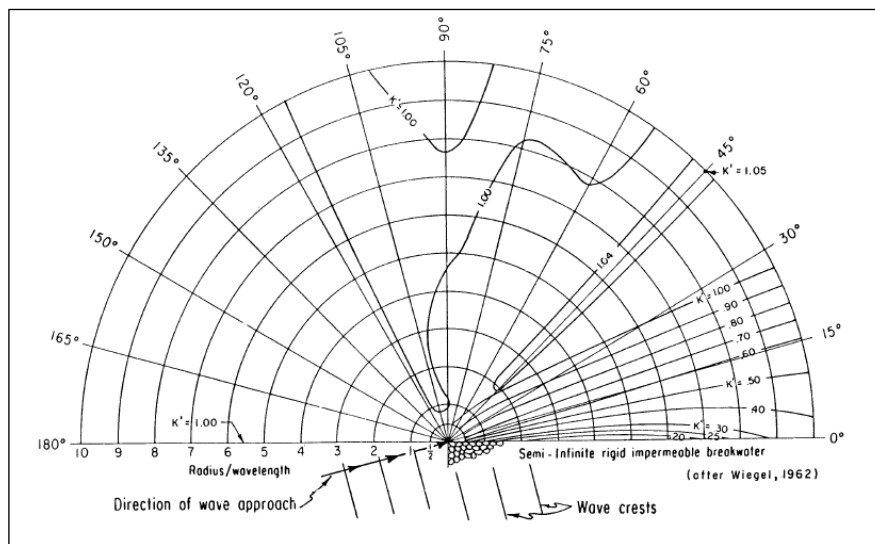
4.1.2.3 DIFRACCIÓN

La difracción es el efecto de una cesión lateral de energía, que se produce tras la propagación por un determinado obstáculo como puede ser una isla, un cabo, presencia de obras marítimas como diques, contradiques, espigones, entre otros. Los efectos que produce la difracción son cambios sustanciales en las alturas de ola y direcciones de propagación en las inmediaciones de la zona de aguas abrigadas tras el obstáculo.

El fenómeno de difracción es de gran importancia en la penetración del oleaje en puertos y zonas abrigadas. La cuantificación de este fenómeno se realiza mediante el coeficiente de difracción K_d , que expresa la relación entre la altura de ola difractada e incidente.

$$K_d = \frac{H_d}{H_i} \quad \text{Ecuación (4.11)}$$

Su cuantificación resulta compleja, por lo que -generalmente- es obtenida mediante modelos numéricos; sin embargo, uno de los casos más empleados es la determinación del coeficiente de difracción para un dique semi infinito e incidencia oblicua mediante los ábacos propuestos por Wiegel (1962), el cual se presenta en la Figura 4.3.



**Figura 4.3: Difracción de oleaje tras un dique semi infinito para oleaje oblicuo.
 (Fuente:Ref.10).**

Finalmente, la Ecuación (4.12) presenta la altura de ola difractada (H_d) expresada en función de la altura de ola incidente (H_i) y el coeficiente de difracción (K_d)

$$H_d = H_i \cdot K_d \quad \text{Ecuación (4.12)}$$

4.1.2.4 REFLEXIÓN

Es la modificación abrupta de dirección en la propagación del oleaje, provocando que la ola cambie de sentido. La reflexión se produce de forma total o parcial cuando la onda incidente encuentra en su propagación obstáculos naturales o artificiales, pendientes fuertes del fondo o

discontinuidades abruptas. La cuantificación del fenómeno se realiza mediante el coeficiente de reflexión K_R , y corresponde al cociente entre la altura reflejada e incidente.

$$K_R = \frac{H_R}{H_i} \quad \text{Ecuación (4.13)}$$

4.1.2.5 ROTURA

El fenómeno implica una importante disipación de la energía asociada al oleaje, dando lugar a corrientes paralelas y perpendiculares a la costa, las cuales son responsables del transporte de sedimentos y de la evolución de las playas.

De acuerdo a lo señalado en el punto 4.1.2.2, para el fenómeno de asomeramiento la velocidad de propagación de las olas va reduciendo al acercarse a la costa y al avanzar en fondos más someros, con lo que -debido a la conservación del flujo de energía- su altura crece progresivamente y llegaría a ser infinita en la costa, lo cual físicamente no es correcto. El fenómeno de rotura limita el aumento de altura, alcanzando condiciones límites de estabilidad del movimiento ondulatorio, a partir de las cuales el oleaje rompe.

Uno de los primeros criterios de rotura fue planteado por McCowan (1891) y establece que la altura de rotura se estima de acuerdo a la Ecuación (4.14), donde γ es el coeficiente de rotura y adopta valores comprendidos entre 0.7 y 1.3. Esta formulación relaciona directamente la profundidad (h_b) de un punto con la altura de rotura (H_b) en ese sitio.

$$H_b = \gamma \cdot h_b \quad \text{Ecuación (4.14)}$$

Para la estimación de la rotura existe un importante número de criterios que varían según los parámetros que emplean, tales como pendiente de fondo y diversos factores obtenidos empíricamente. Sierra & Lo Presti (1998) realizaron un estudio sobre los diversos criterios de rotura, separándolos en dos tipos de expresiones, dependientes de parámetros locales y costa afuera.

Si se considera un oleaje irregular no existe un único punto de rotura, sino que las olas individuales romperán en función de sus propias características; esto puede dar en toda la zona comprendida como *surfzone*.

El tipo de rotura del oleaje depende principalmente de la pendiente del fondo y del peralte de las olas. En función de sus valores se pueden definir cuatro tipos de roturas:

- a) Descrestamiento (*Spilling*): Producida generalmente en pendientes suaves o en aguas profundas, es posible apreciar espuma en la parte superior de la cresta de la ola, que continua propagándose con pequeños cambios de forma y reduciendo progresivamente su altura.
- b) Voluta (*Plunging*): Se produce generalmente en pendientes más pronunciadas que en el caso anterior. El frente de la cresta va avanzando sobre la ola que la precede, hasta caer sobre ésta en forma de chorro, formándose una bolsa de aire bajo la cresta.
- c) Colapso (*Collapsing*): El frente anterior a la cresta se hace vertical y colapsa, sin producir una bolsa de aire.
- d) Surgimiento (*Surging*): La ola asciende y se retira de la pendiente de la orilla, produciendo apenas espuma.

La Figura 4.4 corresponde al esquema de los cuatro tipos de rotura descritos anteriormente.

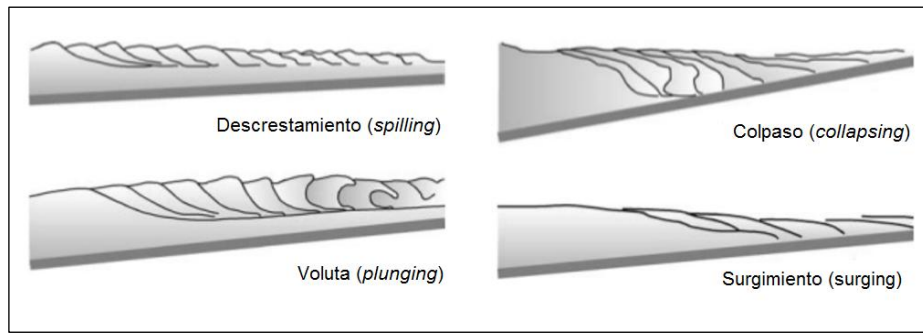


Figura 4.4: Principales formas de rotura del oleaje.

(Fuente: Adaptado de Holthuijsen (2007)).

La predicción del tipo de rotura es posible mediante el parámetro de Iribarren, el cual es un número adimensional. La Ecuación (4.15) se presenta en parámetros de aguas profundas, mientras que la Ecuación (4.16) en función a la altura en rotura.

$$I_r = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad \text{Ecuación (4.15)}$$

$$I_{rb} = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}} \quad \text{Ecuación (4.16)}$$

Para ambos casos m corresponde a la pendiente de la playa. Además, H_0 , H_b , L_0 son la altura de ola en aguas profundas, altura rompiente y longitud de ola en aguas profundas. El tipo de rotura se clasifica de acuerdo los intervalos indicados en la Tabla 4.3.

TIPO DE ROTURA	NÚMERO DE IRIBARREN EN AGUAS PROFUNDAS	NÚMERO DE IRIBARREN EN ROTURA
Descrestamiento	≤ 0.46	≤ 0.4
Voluta	$0.46 - 2.5$	$0.4 - 1.5$
Colapso	$2.5 - 3.3$	$1.5 - 2.0$
Surgimiento	≥ 3.3	≥ 2.0

Tabla 4.3: Clasificación de rotura según el parámetro de Iribarren.

(Fuente: Elaboración propia a partir de Ref.11).

4.1.3 ESPECTROS DE OLEAJE

El espectro de oleaje se define como el proceso matemático que describe el comportamiento energético, en función de la frecuencia, para cada uno de los componentes monocromáticos que se presentan en el oleaje irregular. Un espectro corresponde a la manera más completa de representar el oleaje, ya que guarda la relación entre la altura y el período -en el caso de un espectro 1-D- y la relación altura, período y dirección en los espectros 2-D.

Para la representación y estudio de las condiciones de oleaje se emplea el supuesto que un registro de olas es consecuencia de la superposición de varias ondas que tienen una amplitud, período y dirección constante.

En general, la forma que posee un espectro de energía de olas depende de las condiciones de la generación (tales como la velocidad del viento, duración y fetch del viento, profundidad y tipo de tormenta), así como también de los mecanismos internos (tales como la interacción no lineal entre componentes y disipación de energía).

- ESPECTRO 1-D: Conocido como espectro unidimensional, describe el oleaje con información de la energía asociada a cada uno de los períodos de las olas del registro medido. La representación considera que todas las ondas provienen desde una misma dirección, pudiendo ser representado por la dirección promedio (MWD) y no pudiendo determinar la dirección de cada ola incidente en la zona de medición.
- ESPECTRO 2-D: Conocido como espectro bidimensional o direccional, es la forma más compleja y completa de representar las condiciones de oleaje. La descripción con este tipo de espectro permite obtener información de olas provenientes de todas las direcciones y en cada frecuencia, además de la energía asociada a cada evento.

4.1.4 ESPECTROS DE OLEAJE SINTÉTICO MÁS EMPLEADOS

- 1) ESPECTRO PIERSON-MOSKOWITZ. Esta parametrización se desarrolló a partir de las medidas realizadas por buques oceanográficos en el Atlántico Norte. La densidad espectral corresponde a un mar de viento totalmente desarrollado en aguas profundas. Lo anterior se describe matemática en la Ecuación (4.17).

$$S_{PM}(\omega) = 0.0081 \cdot g \cdot \omega^{-5} \cdot e^{-0.74\left(\frac{g}{\omega U}\right)^{-4}} \quad \text{Ecuación (4.17)}$$

Donde:

g : Aceleración de gravedad.

ω : Parámetro de Philips.

U : Velocidad del viento medida a 19.5 [m] de altura.

- 2) ESPECTRO JONSWAP. Durante los años 1968 y 1969 se llevó a cabo una campaña de medición de oleaje en el Mar del Norte, denominada Joint North Sea Wave Analysis Project (JONSWAP). A partir de dicha campaña se consiguió modificar el espectro de Pierson Moskowitz, ampliando su utilidad para oleaje limitado por fetch. Además, se incorporó el factor (γ) correspondiente al ancho espectral.

$$S_J(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \gamma^\delta \cdot \omega^{-5} \cdot e^{-1.25\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}} \quad \text{Ecuación (4.18)}$$

$$\delta = \frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma_0^2 \cdot \omega_p^2} \quad \text{Ecuación (4.19)}$$

Donde:

g : Aceleración de gravedad.

α : Coeficiente de ajuste.

ω : Frecuencia angular.

γ : Ancho espectral.

Posteriormente, Donelan (1985) propuso que el espectro JONSWAP dependiera de cuatro parámetros, de acuerdo a la Ecuación (4.20).

$$S_J(\omega) = \beta \cdot g^2 \cdot \gamma^\delta \cdot \omega_p^{-1} \cdot \omega^{-4} \cdot e^{-\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}} \quad \text{Ecuación (4.20)}$$

$$\delta = e^{-\frac{(\omega - \omega_p)}{2\sigma_0^2 \omega_p^2}} \quad \text{Ecuación (4.21)}$$

Considerando $\beta = 0.006 \cdot v^{0.55}$, para $0.83 < v < 5.0$ y también.

$$\gamma = \begin{cases} 6.489 + 6 \log v, & 1 \leq v < 5 \\ 1.7, & 0.83 < v < 1 \end{cases}$$

La segunda condición que puede adoptar γ corresponde a oleaje desarrollado.

- 3) ESPECTRO TMA. Es el resultado de tres campañas de medición de campo para validar este espectro (Texel, Marsen y Arsole). Esta parametrización de la densidad espectral es una modificación del espectro JONSWAP para su aplicación en aguas someras, donde existen interacciones entre las componentes del tren de ondas.

$$S_{TMA}(\omega, h) = S_J(\omega) \cdot \phi(\omega') \quad \text{Ecuación (4.22)}$$

En la ecuación anterior se observa el espectro JONSWAP y una función de profundidad ($\phi(\omega')$) y se define a continuación.

$$\phi(\omega') = f^{-2} \left[1 + \frac{2 \cdot \omega'^2 \cdot f}{\sinh(2 \cdot \omega'^2 \cdot f)} \right] \quad \text{Ecuación (4.23)}$$

Donde además:

$$\omega'^2 = \frac{\omega^2 \cdot d}{g} = kh \cdot \tanh(kh) \quad \text{Ecuación (4.24)}$$

$$\phi(f, d) = \begin{cases} 2\pi \cdot f^2 \frac{d}{g} & f < \left(\frac{2\pi d}{g}\right)^{-0.5} \\ 1 - 0.5 \cdot \left[2 - 2\pi f \left(\frac{d}{g}\right)^{-0.5}\right]^2 & f \geq \left(\frac{2\pi d}{g}\right)^{-0.5} \end{cases} \quad \text{Ecuación (4.25)}$$

4.2 MODELOS PARA EL ESTUDIO DE AGITACIÓN PORTUARIA

Para configuraciones sencillas y variaciones suaves, en la batimetría de un recinto portuario, las frecuencias naturales y oscilaciones de la superficie libre pueden ser determinadas analíticamente. No obstante, para configuraciones y batimetrías complejas -sometidas a excitaciones transitorias y donde los efectos no lineales pueden cobrar gran importancia- la respuesta del puerto sólo puede ser obtenida mediante modelos físicos o numéricos. Estas dos opciones de modelación presentan ventajas y desventajas en relación al costo económico, tiempo, dificultad y versatilidad en la explotación de diferentes escenarios.

Otra técnica corresponde al trabajo experimental en campo. Ésta resulta costosa debido al despliegue de los equipos y la duración de las campañas. Además, presenta el inconveniente de que los resultados sirven exclusivamente para explicar la situación en el momento y no con fines predictivos. No obstante, los registros de campo son empleados para calibrar los modelos numéricos.

Liu & Losada (2000) realizaron una revisión de los modelos existentes para el estudio de la agitación portuaria y de las ecuaciones de gobierno. A continuación se presentan sus principales conclusiones.

4.2.1 MODELOS FÍSICOS

Los modelos físicos pueden entregar importantes resultados; sin embargo, cuentan con bastantes limitantes, por ejemplo, un elevado costo de construcción y modificación de la configuración, extenso tiempo de recolección de datos y si éstos se desean en alta resolución implica un alto costo adicional.

Por otra parte, para representar ondas largas se debe emplear tanques de grandes dimensiones en donde se garantice la correcta disipación de este tipo de onda. El proceso de generación resulta de alta complejidad como también el proceso de absorción de la pala. Otra complejidad se presenta al querer encontrar una escala adecuada para estudiar ondas cortas y largas sobre un mismo modelo.

4.2.2 MODELOS NUMÉRICOS

Los modelos numéricos permiten reproducir los principales fenómenos que caracterizan el oleaje y la forma en que éste ingresa a los recintos portuarios.

Actualmente ha existido una tendencia de modelar por separado los procesos asociados a ondas largas y ondas cortas. También se ha realizado un importante avance en la determinación de los períodos naturales resonantes -en los recintos portuarios- asociados a variaciones geométricas, calados y contornos. Sin embargo, los actuales modelos numéricos presentan limitaciones propias de las ecuaciones de gobierno que emplean.

4.2.2.1 LIMITACIONES Y FALENCIAS

Las ecuaciones empleadas en los modelos numéricos existentes no han presentado énfasis en los efectos no lineales, condicionando ostensiblemente el rango de profundidades relativas en que éstos son aplicables. Además, estudiar por separado las oscilaciones o las interacciones entre las mismas no ha sido modelado. Algunos de los modelos existentes para el estudio de agitación portuaria presentan la limitación de ser estacionarios, por lo que no permiten, por ejemplo, estudiar las oscilaciones inducidas en un puerto a partir del registro obtenido de un instrumento ubicado en el exterior del recinto.

Los modelos también presentan otras limitaciones derivadas de las condiciones de contorno, así como las formulaciones empleadas para representar la fricción de fondo y rotura, esta última, generalmente es incluida mediante parametrización del roller.

Un modelo robusto para estudiar la agitación portuaria debería incluir las siguientes características:

- Considerar simultáneamente el efecto de las ondas largas y corto período.
- Capacidad de abarcar profundidades intermedias como reducidas, simulando adecuadamente los efectos de las diferentes componentes del oleaje irregular incidente.
- Considerar interacciones no lineales entre componentes.
- Calidad de ser transitorio, a modo de poder establecer sistemas de aviso.

4.2.2.2 ECUACIONES DE GOBIERNO

El movimiento oscilatorio para ondas inmersas en un fluido Newtoniano e incompresible, puede ser modelado mediante las ecuaciones de Navier Stokes, que representan los principios de conservación de la masa y del momento lineal. Las condiciones de contorno en la superficie libre permiten garantizar la existencia de una interfase y continuidad entre el tensor de tensiones a través de la superficie libre; mediante esto, se puede determinar la posición de ésta en cualquier instante. Tanto las ecuaciones de Navier Stokes como las condiciones de contorno en la superficie libre son no lineales. Aunque se desprecie la turbulencia, el gasto computacional es muy alto para resolver el problema de tridimensionalidad en la propagación de la onda, con una escala horizontal de cientos de longitudes de onda, resultando inviable para ser asumido en el mundo de la ingeniería. Las ecuaciones de gobierno más recurrentes se describen a continuación.

- 1) LA TEORÍA DEL RAYO. Corresponde a una teoría que permite propagar ondas infinitesimales por una batimetría suavemente variable, en distancias mucho mayores que la longitud de onda local. En esta aproximación se comienza obteniendo los rayos con base en la teoría óptico-geométrica, en la que se definen los rayos como línea tangente al vector número de onda. Posteriormente se calcula la variación espacial de la envolvente de la onda a lo largo de estos en base al principio de conservación de la energía.

La discretización numérica se realiza paso a paso a lo largo del rayo, debido a que esta teoría no permite el flujo de energía a través de éste, lo que genera errores en los sectores donde se intersectan éstos; por lo tanto, los efectos de difracción, refracción y los efectos no lineales no son correctamente representados. Debido a las limitaciones descritas anteriormente, la teoría del rayo está en desuso.

- 2) ECUACIÓN DE MILD-SLOPE. Es una mejora de la teoría del rayo y se basa en que la disipación no es importante cuando las ondas se propagan sobre batimetrías suavemente variables, excepto en las cercanías de obstáculos.

Mild-Slope se presenta en dos aproximaciones: parabólica y elíptica. La primera fue presentada por Kirby & Dalrymple (1983) y Liu & Tsay (1984) y permite realizar propagaciones desde aguas profundas hasta la cercanía de la costa, para casos donde la onda se propaga esencialmente hacia adelante debido a que no incluye efectos de reflexión. La segunda corresponde a la versión elíptica, presentada por Eckart (1952) y Berkhoff (1972, 1976), es adecuada para estudios de agitación portuaria debido a que representa los efectos de transformación de oleaje en aguas someras incluyendo la reflexión.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \eta) + \frac{\omega^2}{g} \eta = 0 \quad \text{Ecuación (4.26)}$$

- 3) APROXIMACIÓN DE BOUSSINESQ. Asumiendo que tanto la no linealidad como la dispersión de frecuencias son débiles y del mismo orden de magnitud, Peregrine (1967) derivó las ecuaciones estándares de Boussinesq, para fondo variable.

$$\eta_t + \nabla \cdot [(\eta + h) \cdot \bar{u}] = 0 \quad \text{Ecuación (4.27)}$$

$$\bar{u}_t + \frac{1}{2} \nabla |\bar{u}|^2 + g \nabla \cdot \eta + \left\{ \frac{h^2}{6} \nabla (\nabla \bar{u}_t) - \frac{h}{2} \nabla (\nabla \cdot (h \bar{u}_t)) \right\} = 0 \quad \text{Ecuación (4.28)}$$

Donde:

\bar{u}_t	: Velocidad promediada en la vertical.	[m/s]
η	: Superficie libre.	[m]
h	: Profundidad referida al nivel de reposo.	[m]
g	: Aceleración de la gravedad.	[m/s ²]

A pesar de que Peregrine expresó sus ecuaciones empleando la velocidad media integrada en la vertical como variable dependiente, dichas ecuaciones pueden obtenerse con una estructura similar utilizando como variable la velocidad en el fondo o en la superficie libre. La ecuación de dispersión y la celeridad de la onda derivadas, son algo diferentes para esta segunda versión de las ecuaciones, aunque el orden de magnitud de la exactitud de dichas ecuaciones es la misma. Los resultados numéricos basados en las ecuaciones estándar de Boussinesq -o en formulaciones equivalentes- han dado una buena comparación con datos de campo obtenidos por Elgar & Guza (1985) y los de laboratorio obtenidos por Goring (1978) y Liu et al. (1985).

Dado que esta aproximación exige asumir que los efectos de la dispersión de frecuencias y no lineales sean débiles, las ecuaciones estándar de Boussinesq no son aplicables en profundidades muy reducidas (donde los efectos no lineales empiezan a ser más importantes que los efectos de la dispersión frecuencial) ni en profundidades indefinidas (donde la dispersión frecuencial es del orden de la unidad). Las ecuaciones estándar de Boussinesq, formuladas en función de la velocidad promediada en la vertical, dejan de ser válidas cuando la profundidad es mayor que un quinto de la longitud de onda equivalente en profundidades indefinidas. En la mayor parte de las aplicaciones ingenieriles, donde el espectro incidente está formado por múltiples componentes frecuenciales, sería deseable que la condición de profundidad no fuera restrictiva. Más aún, la resolución numérica de las ecuaciones de Boussinesq, las altas frecuencias -con longitudes de onda semejantes al tamaño de la malla - pueden dar lugar a inestabilidades.

Para poder extender la aplicación a profundidades mayores, se introdujeron varias formulaciones modificadas de las ecuaciones de Boussinesq (Madsen et al. (1991), Nwogu (1993) y Chen & Liu, (1995)). A pesar de que los métodos de derivación son diferentes, las relaciones de dispersión de las componentes lineales de estas ecuaciones son similares y pueden considerarse como leves modificaciones de la aproximación de Padé. Las

ecuaciones de continuidad y conservación del momento integradas en la vertical, pueden expresarse en función del desplazamiento de la superficie libre, (η), y el vector horizontal de velocidades (u_α) a una profundidad (z_α).

$$\eta_t + \nabla \cdot [(\eta + h)u_\alpha] + \nabla \cdot \left\{ \left(\frac{z_\alpha^2}{2} - \frac{h^2}{6} \right) \cdot h \nabla (\nabla \cdot u_\alpha) + \left(z_\alpha + \frac{h}{2} \right) h \nabla (\nabla \cdot hu_\alpha) \right\} = 0 \quad \text{Ecuación (4.29)}$$

$$u_{\alpha t} + \frac{1}{2} \nabla |u_\alpha|^2 + g \nabla \eta + z_\alpha \left\{ \frac{1}{2} z_\alpha \nabla (\nabla \cdot u_{\alpha t}) + \nabla (\nabla \cdot (hu_{\alpha t})) \right\} = 0 \quad \text{Ecuación (4.30)}$$

Chen et al. (1998) demostró que con una selección óptima de $z_\alpha = -0.531h$ las ecuaciones modificadas de Boussinesq son válidas para modelar la propagación de ondas desde profundidades indefinidas hasta reducidas, incluyendo la interacción ola-corriente. Es necesario enfatizar que el término de aceleración convectiva de la ecuación del momento (Ecuación (4.28) y Ecuación (4.30)) se han escrito de forma conservativa. Este término podría ser sustituido por su expresión correspondiente no conservativa, es decir, $u \cdot \nabla u$ y $u_\alpha \cdot \nabla u_\alpha$, respectivamente, sin que ello conduzca a variaciones en el orden de magnitud de la exactitud de las ecuaciones de gobierno del modelo.

4.2.2.3 DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Las ecuaciones presentadas anteriormente se basan en la hipótesis que durante el proceso de transformación de las ondas no se produce disipación de energía. Sin embargo, la mayoría de los fenómenos que se producen en la costa disipan energía, por ejemplo, la fricción de fondo o por procesos de rotura. Dalrymple et al. (1984) indicó que la ecuación de Mild-Slope puede ser modificada de manera sencilla para incorporar el proceso de disipación de energía mediante una función. Ésta se define de manera empírica de acuerdo a los diferentes procesos de disipación que se pretenden modelar.

De forma análoga, los modelos basados en las formulaciones de Boussinesq representan la rotura de forma parametrizada mediante la incorporación de un nuevo término en la ecuación de momento integrada en la vertical. Mientras que Zelt (1991), Karambas & Koutitas (1992) y Kennedy et al. (2000) emplean un modelo basado en la viscosidad de remolino, Boucchini et al. (1992) y Schäffer et al. (1993) optan por la implementación de un modelo más complicado y basado en el concepto del roller superficial que se produce en la rotura en descrestamiento.

El ajuste entre los resultados numéricos y los datos de evolución de la superficie libre en el laboratorio y campo, deben ser calibrados adecuando los parámetros incluidos en los modelos de rotura. Sin embargo, ninguno de los modelos es capaz de reproducir convenientemente el campo de velocidades o lograr determinar la distribución espacial de la energía cinética turbulenta.

4.2.2.4 MODELOS NUMÉRICOS EXISTENTES

En la actualidad existen dos tipos de modelos para simular la agitación al interior de los recintos portuarios:

- a) Modelos basados en la ecuación de Mild-Slope.
- b) Modelos basados en la ecuación de Boussinesq.

En ambos tipos, las ecuaciones de gobierno están integradas en la vertical, simplificando así el problema tridimensional a un problema bidimensional. La ecuación de Mild-Slope se suele aplicar exclusivamente para fondo variable, teoría lineal y oleaje regular, mientras que Boussinesq suele emplearse para oleaje irregular en profundidades reducidas. Desde el punto de vista ingenieril, el

análisis de oleaje de corto y largo período suele estudiarse por separado, siendo el análisis de onda larga usualmente lineal. Lo anterior se debe a que los modelos de mayor uso en el ambiente ingenieril no han considerado posibles acoplamientos entre los movimientos asociados a onda corta y larga.

a) **MODELOS BASADOS EN LA ECUACIÓN DE MILD-SLOPE MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS**

Estos modelos están resueltos en elementos finitos y calculan oscilaciones monocromáticas y lineales en dársenas con geometría y batimetría arbitraria. Los efectos de la fricción en el fondo y de la reflexión se incluyen en el modelo. En general, estos métodos emplean una solución híbrida que precisa la combinación de una solución analítica (en zona de aguas profundas) y una solución numérica en elementos finitos, en la zona cercana e interior del puerto para determinar la respuesta de la dársena frente a una onda de pequeña amplitud y de una sola frecuencia.

Este modelo corresponde a una extensión del trabajo original desarrollado por Chei y Mei (1974), que se basa en las ecuaciones en profundidades reducidas. Debido a su simpleza, estos modelos han sido empleados para estudiar el diseño de nuevos recintos portuarios y sus modificaciones. Sin embargo, la limitación más importante es su carácter lineal. El modelo no puede ser empleado para estudiar las oscilaciones inducidas por ondas transitorias.

b) **MODELOS BASADOS EN LA ECUACIÓN DE BOUSSINESQ**

- 1) **RESUELTOS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS.** Lepelletier (1980) desarrolló un modelo en elementos finitos para resolver las ecuaciones del movimiento débilmente lineales, dispersivas y disipativas para fondo variable. En el modelo se incluyen varios efectos, tales como la fricción en el fondo o pérdidas de energía por rotura.

Wu & Liu (1990) indican que el modelo no es adecuado para estudiar problemas en los que el oleaje incidente está formado por componentes de corto período, debido a que el estado del arte indica que las ondas cortas pueden ser responsables de la generación de ondas largas en las inmediaciones e interior del puerto, dando lugar a eventos de resonancia.

- 2) **RESUELTOS MEDIANTE DIFERENCIAS FINITAS.** Durante los últimos años el Danish Hydraulic Institute (DHI) ha desarrollado varios modelos en diferencias finitas, basados en las ecuaciones no lineales en profundidades reducidas o en ecuaciones tipo Boussinesq (Abbott (1979), Abbott et al. (1978) y Madsen et al. (1991)). Las desventajas de estos es primordialmente la falta de flexibilidad de las diferencias finitas para tratar contornos irregulares, así como batimetrías complejas.

4.3 RESONANCIA PORTUARIA

4.3.1 GENERALIDADES

La resonancia portuaria corresponde a la amplificación de la energía de ondas que quedan atrapadas en un lugar semi encerrado (una dársena, por ejemplo). Cada recinto portuario posee su propia geometría y con ello sus propias frecuencias naturales de oscilación. Cuando un forzante externo, cuya frecuencia coincide con alguna de las propias del terminal, producirá un aumento de las amplitudes de oscilación al interior del puerto hasta que la fricción de fondo o la absorción de los contorno disipe la energía. El aumento de las desnivelaciones trae consigo movimientos excesivos de las naves y con ello importantes esfuerzos a las bitas, que pueden

producir la rotura de ellas. Por lo tanto, el diseño de un nuevo puerto -o modificación en su geometría- requiere cuantificar las frecuencias naturales de las dársenas como también la forma en que las posibles forzantes exteriores ingresan al puerto.

Los períodos naturales típicos de un puerto son del orden de minutos, por lo que es evidente que la resonancia no es causada por las ondas de viento en el exterior debido a que éste posee períodos del orden de segundos.

Losada et al. (2000) indicó que los posibles forzadores de resonancia en un puerto pueden ser ondas infragravatorias no lineales -generadas localmente- y ondas infragravatorias libres, generadas y propagadas desde zonas lejanas, tsunamis y cambios de presión atmosféricos.

Varias observaciones de campo han detectado que la resonancia portuaria puede ser inducida por ondas infragravatorias libres, originadas lejos de la costa (Okihiro et al. (1993), Okihiro & Guza (1996)). Las ondas infragravatorias asociadas a ondas de viento de alta frecuencia fueron observadas por primera vez por Munk (1949). Longuet-Higgins & Stewart (1962) lograron explicar física y matemáticamente la generación de ondas largas libres y ligadas por efectos no lineales. Sin embargo, el estado del arte indica que las ondas largas (generadas por grupos de ondas propagándose en dirección al puerto) pueden dar lugar a la resonancia de las dársenas (Bowers (1977), Mei & Agnon (1989), Wu & Liu (1990)). Además, las ondas largas pueden ser generadas localmente debido a la interacción entre ondas cortas y los contornos del puerto.

También se ha evidenciado que -a pesar de la ausencia de energía de onda larga en el exterior del puerto- las frecuencias correspondientes a éstas se ven amplificadas al interior de las dársenas como consecuencia de la transferencia no lineal de energía de las componentes de corto a las de largo período. Esto aplica en casos que los puertos estén situados en profundidades reducidas o recintos en que se produce la rotura en zonas próximas a la entrada de éste en condiciones de temporales.

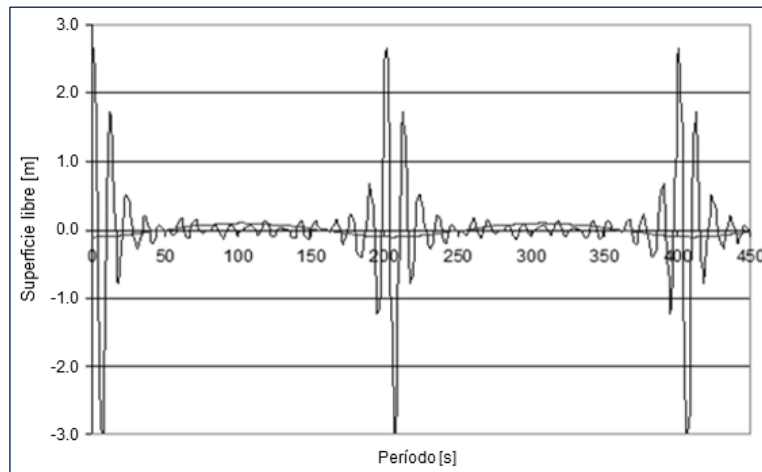
4.3.2 ONDAS LARGAS

Las ondas largas (*long waves*) se definen como aquellas que poseen período mayor a 30 [s], aunque de acuerdo a diferentes autores son una combinación entre ondas infragravatorias y ondas largas. Para fines de este estudio se considerarán las oscilaciones comprendidas entre 30 y 1000 [s] (0.001 y 0.033 [Hz]). A continuación, se realiza una descripción de las diversas formas y mecanismos de generación de estas de acuerdo al estado del arte.

4.3.2.1 ONDAS LARGAS ASOCIADAS A GRUPOS DE ONDAS

Se refiere a ondas largas asociadas a grupos de olas (*bound long waves*) generadas por viento que se propagan desde aguas profundas hacia la costa.

Holthuijsen (2007) indica que las ondas largas asociadas a grupos de olas tienen una longitud igual al espaciamiento entre grupos sucesivos y -por lo general- poseen período superior a 30 segundos. La onda larga se propaga hacia la costa con la misma velocidad que lo hace el grupo de ondas asociado hasta que ésta se convierte en una onda larga libre. Longuet-Higgins & Stewart (1964) describen matemáticamente los efectos de los tensores de radiación; éstos han sido indicados como un mecanismo que permite identificar las forzantes de ondas largas. La Figura 4.5 corresponde a un ejemplo asociadas a grupos de ondas.



**Figura 4.5: Ondas largas asociadas a grupos de ondas (bound long waves).
 (Fuente:Elaboración propia a partir del análisis de Fourier).**

4.3.2.2 ONDAS LARGAS LIBRES

Baldock & Huntley (1949) indican que una vez que los grupos de olas rompen en la denominada *surfzone*, las ondas largas asociadas son liberadas y se convierten en ondas largas libres (*free long waves*), siendo reflejadas en la línea de costa y viajando a la velocidad de su longitud en lugar de la velocidad del grupo que estaban asociadas. La liberación de *long waves* en la *surf zone* con grupos de ondas cortas fue observado por primera vez por Munk (1949) y denominó este proceso como *surf beat*.

Los tsunamis son otro tipo de ondas largas y pueden ser generados por terremotos o deslizamientos de tierra (*landslide*), entre otros mecanismos de generación. Éstas también pueden ser generadas por efectos meteorológicos, producto de grandes cambios de presión atmosféricos asociados al paso de un sistema frontal. El fenómeno se denomina Rissaga o meteo-tsunamis y ha sido documentado por Monsó & Escartín (1993) para eventos ocurridos en dársenas de Menorca, España.

4.3.2.3 REGISTROS DE ONDAS LARGAS

Para un registro de ondas largas se requiere cumplir algunas condiciones que permitirán su correcta caracterización; una de ellas es la extensión de la medición como también el intervalo de muestreo del registro, a modo de evitar el efecto de aliasing.

Para la caracterización espectral y estadística del registro, éste debe poseer una duración suficiente. La longitud de registro puede ser determinado por el número total de ciclos de onda N .

Las mediciones se realizan a una frecuencia de muestreo de acuerdo al tipo de ondas que se desea registrar (corto o largo período) y el equipo a emplear. Generalmente la superficie libre se analiza mediante Fourier realizando una discretización. Una errónea selección de la frecuencia no permitiría distinguir correctamente el fenómeno registrado.

La máxima frecuencia que podría ser analizada en un intervalo de muestreo está determinada por la Ecuación (4.31) donde f_n es la frecuencia de Nyquist y Δt el intervalo de medición. La Figura 4.6 ilustra lo anteriormente descrito.

$$f_{Nyquist} = f_N = \frac{1}{2\Delta t} \quad \text{Ecuación (4.31)}$$

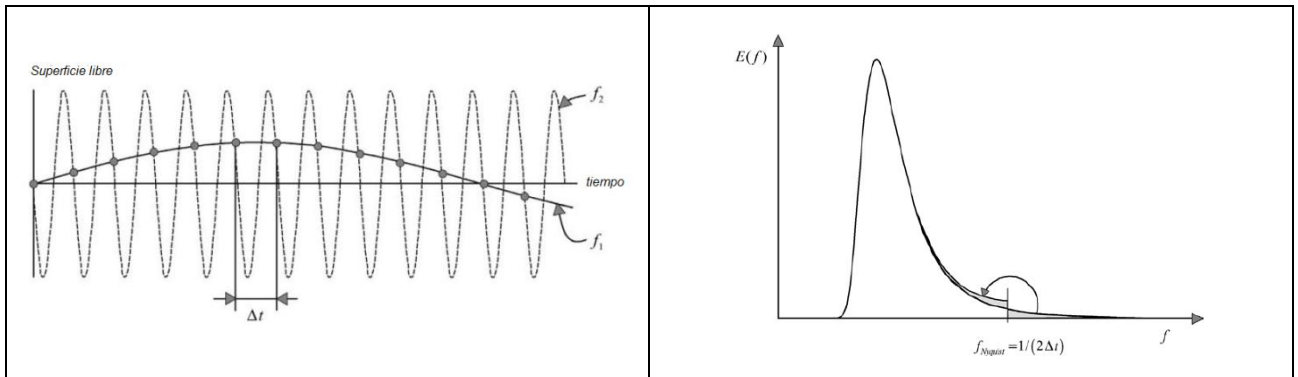


Figura 4.6: Registro de superficie libre en dos frecuencias de muestreo diferentes (Figura izquierda) y efecto de aliasing en el espectro de un registro de onda con intervalos de tiempo discretos (Figura derecha). (Fuente: Adaptado de Holthuijsen (2007)).

4.3.3 SEICHES

Rabinovich (2009) definió los seiches como ondas largas encerradas en una dársena o en algún sector aislado de una cuenca cerrada (golfos, bahías, fiordos, ensenadas) que está conectada a través de una o más aberturas al mar. Cada dársena, o cuenca, posee frecuencias naturales únicas que están en función de la geometría y profundidad. Si una fuerza externa coincide con la frecuencia resonante, se experimentarán oscilaciones de la masa de agua.

Las oscilaciones en un cuerpo de agua cerrado con respecto a uno abierto difieren en tres formas.

1. A diferencia de los seiches generados por forzantes externos (efectos atmosféricos, actividad sísmica, entre otros), las oscilaciones en puertos son principalmente generadas por ondas largas que ingresan a través de la bocana (entrada del puerto) al mar abierto.
2. Las pérdidas de energía de los seiches en cuencas cerradas son, en su mayoría, asociados con la disipación de la fricción de fondo, mientras que el decaimiento de las oscilaciones es -principalmente- debido a la radiación a través de la bocana del puerto.
3. Las oscilaciones en puertos tienen un modo fundamental denominado Helmholtz, similar al tono fundamental de un resonador acústico; sin embargo, en una cuenca cerrada este modo está ausente.

Por lo tanto, el fenómeno de seiche en un puerto es comúnmente debido a la excitación de ondas estacionarias. Una onda estacionaria se crea cuando una onda incidente es reflejada por una estructura; el aumento de las ondas reflejadas crea una onda estacionaria que no permite propagarse horizontalmente, formando un patrón fijo de nodos y antinodos. Los nodos corresponden al punto donde no hay desplazamiento vertical; sin embargo, en él se generan corrientes horizontales que pueden generar esfuerzos sobre las amarras de los buques al interior del recinto portuario. Por otra parte, los antinodos se definen como la posición donde habrá un aumento y descenso máximo de la superficie libre. Debido a las dimensiones de los actuales puertos y buques, sólo ondas estacionarias generadas por ondas largas podrían interrumpir las operaciones de carga y descarga.

Para las operaciones portuarias las elevaciones del nivel del mar -producto de seiches- no son el problema, si no las corrientes horizontales generadas por este fenómeno en los nodos, debido a que son un potencial riesgo para la actividad.

4.3.4 ESTIMACIÓN DE LOS MODOS RESONANTES

4.3.4.1 ECUACIONES PARAMÉTRICAS

Rabinovich (2009) expuso una metodología para determinar los modos resonantes teóricos de una cuenca cerrada y abierta. Primero, se iniciará con una cuenca cerrada; para ello se debe considerar un fondo constante y plantear la onda estacionaria de acuerdo a la siguiente formulación.

$$\eta(x, t) = A \cdot \cos(kx) \cdot \cos(\omega t) \quad \text{Ecuación (4.32)}$$

Donde:

η	: Superficie libre.	[m]
A	: Amplitud de onda.	[m]
x	: Coordenada en eje horizontal.	[m]
t	: Tiempo.	[s]

El número de ondas es $k = 2\pi/L$, y frecuencia angular $\omega = 2\pi/T$, donde L y T es la longitud y período de la onda. La frecuencia angular y el número de ondas están relacionadas por las siguientes expresiones.

$$\omega = k \cdot C \quad \text{Ecuación (4.33)}$$

$$T = \frac{L}{C} \quad \text{Ecuación (4.34)}$$

La celeridad de una onda larga es $C = \sqrt{g \cdot d}$ donde g es la aceleración de gravedad y d la profundidad.

Empleando una condición de no flujo a través de los límites de la cuenca, es decir, una cuenca cerrada, ($x = 0; x = L$) los números de ondas obtenidos son:

$$k = \frac{\pi}{L}, \frac{2\pi}{L}, \frac{3\pi}{L}, \dots, \frac{n\pi}{L} \quad \text{Ecuación (4.35)}$$

Estos números de ondas están relacionados con los modos posibles de oscilación mostrados en la Figura 4.7 y Tabla 4.4. Para una cuenca cerrada, el modo fundamental corresponde a $n = 1$ donde la longitud de onda es dos veces la extensión de la cuenca y los restantes poseen longitudes igual a la mitad, un tercio, un cuarto y así sucesivamente.

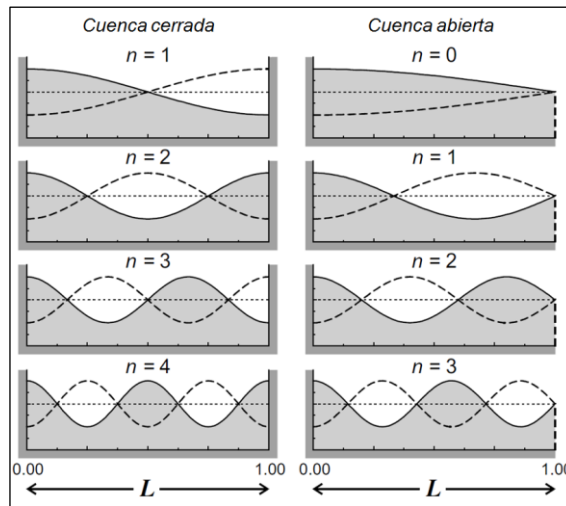


Figura 4.7: Primeros cuatro modos de oscilación de ondas para cuencas cerradas y abiertas. (Fuente: Adaptado de Rabinovich (2009)).

CUENCA	MODO				
	n=0	n=1	n=2	n=3	n=4
Cerrada	-	1	1/2	1/3	1/4
Abierta	2	2/3	2/5	2/7	2/9

Tabla 4.4: Modos fundamentales y armónicos para cuencas rectangulares cerradas y abiertas. (Fuente: Elaboración propia a partir de Rabinovich (2009)).

Para una cuenca cerrada el modo fundamental es asimétrico, es decir, que en un extremo la superficie libre está subiendo y en el lado opuesto está descendiendo. Las máximas oscilaciones se presentan cercanas a la frontera de la cuenca cerrada ($x = 0, x = L$), mientras que las corrientes máximas se producen en los nodos, es decir, donde $\eta = 0$ para cada tiempo.

El período natural de una cuenca rectangular y cerrada, con profundidad constante, se puede obtener mediante la Ecuación (4.36), denominada ecuación de Merian (1828).

$$T_n = \frac{2L}{n\sqrt{g \cdot d}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{Ecuación (4.36)}$$

De la Ecuación (4.36) se desprende que entre más largo sea la longitud de la cuenca y menor la profundidad, mayor será el largo del seiche. El modo fundamental $n = 1$ corresponde al período máximo, mientras que los restantes armónicos del modo fundamental tienen períodos igual a la mitad, un tercio, un cuarto y así sucesivamente.

Para el caso de cuencas abiertas también tienen la forma de onda estacionaria presentada en la Ecuación (4.32) pero con una línea nodal ubicada cercana a la entrada del puerto (bocana del puerto). Éstos se determinan mediante la Figura 4.7 y Tabla 4.4. El modo más bajo corresponde a $n = 0$ y es conocido como modo de Helmholtz, el cual tiene sólo una línea nodal en la desembocadura de la bahía ($x = L$) y un antinodo en la orilla opuesta ($x = 0$). La longitud de onda de este modo es aproximadamente cuatro veces la longitud de la bahía. El modo Helmholtz es conocido también como el modo cero; éste es importante para bahías y puertos de entrada

estrecha y geometrías alargadas donde puede dominar. El período de Helmholtz y los restantes modo de un puerto se puede aproximar mediante la siguiente formulación:

$$T_n = \frac{4L}{(2n + 1)\sqrt{g \cdot d}}, \quad n = 0,1,2,3, \dots \quad \text{Ecuación (4.37)}$$

La forma presentada para estimar los modos resonantes en una cuenca cerrada y abierta, corresponden a un método idealizado que considera geometrías sencillas y fondos constantes; sin embargo, resulta una buena estimación preliminar para determinar los modos resonantes de alguna dársena o bahía. Un análisis más acabado para la determinación de las frecuencias naturales y modos resonantes de una bahía o recinto portuario se realiza mediante la implementación de un modelo numérico que emplee un espectro de ruido blanco (*white noise*) como condición de borde.

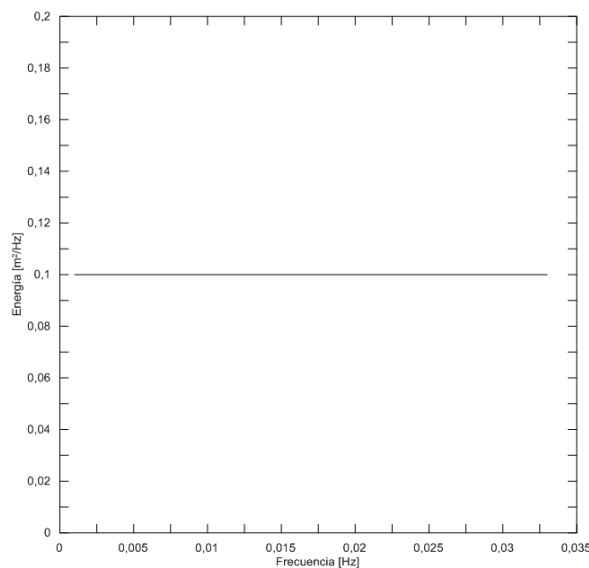
4.3.4.2 ESPECTRO DE RUIDO BLANCO

Un espectro de ruido blanco (*white noise*) corresponde al estado del arte para determinar las frecuencias naturales de una cuenca o recinto portuario. Ha sido documentado por Gierlevse et al. (2001) y Kofoed-Hansen et al. (2005). Se define como un estado de mar sintético que se caracteriza por tener la misma cantidad de energía (independiente del orden de magnitud) en el intervalo de frecuencia a estudiar.

Las ventajas de emplear un espectro de ruido blanco son las siguientes.

1. El método permite excitar todas las frecuencias de interés en una sola simulación por lo cual se reduce el tiempo que tomaría ejecutar cada una de estas de manera independiente.
2. No requiere contar con registros in situ de ondas largas.
3. Es posible analizar cada zona del dominio numérico y mediante análisis espectral identificar las frecuencias naturales.

La Figura 4.8 presenta un espectro de ruido blanco que abarca el intervalo de ondas largas (0.001 y 0.033 [Hz]) definido en este estudio.



**Figura 4.8: Espectro de ruido blanco para determinar las frecuencias naturales.
 (Fuente: Elaboración propia).**

5. ANÁLISIS DE CONDICIONES NATURALES

5.1 BATIMETRÍA

Las fuentes de información utilizadas para la representación de la batimetría fueron dos: la primera corresponde a la carta náutica SHOA N°1211 (ver Figura 5.1) y la segunda son los levantamientos batimétricos de detalle en las inmediaciones del Puerto de Iquique (ver Figura 5.2).

Las dos fuentes de información fueron consolidadas en una única base de datos, privilegiando las de mayor resolución. De esta manera a la carta náutica SHOA N°1211 se reemplazaron los datos cubiertos por el área correspondiente a los levantamientos batimétricos de detalle.

5.1.1 CARTA NÁUTICA ELECTRÓNICA SHOA

La información entregada por las cartas náuticas electrónicas del SHOA corresponden principalmente a descripción geográfica del terreno y profundidades. Si bien el uso está orientado a apoyar la navegación, para el análisis proporcionarán información batimétrica útil.

- Carta 1211: Bahía Iquique CL5TR005 (1:10.000)

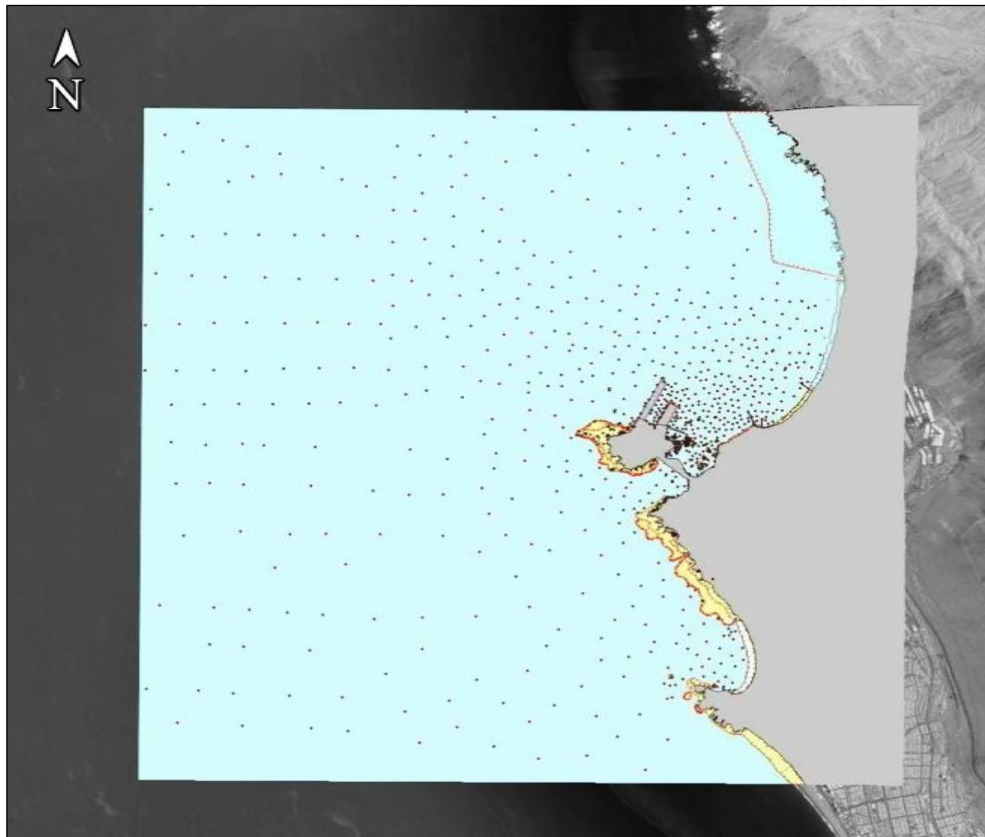


Figura 5.1: Información carta náutica SHOA N°1211 – Bahía Iquique.
(Fuente: Elaboración propia).

5.1.2 LEVANTAMIENTOS BATIMÉTRICOS

Para representar el fondo marino se emplearán los levantamientos batimétricos existentes, tanto en las proximidades como al interior del Puerto de Iquique. La información batimétrica a utilizar se presenta a continuación.

- INGEMAR S.A., 2005. Levantamiento batimétrico Sitios 1 y 2, elaborado para EPI.
- Manuel Villar Simón, 2011. Levantamiento batimétrico Sitios 3 y 4, elaborado para EPI.
- GEOMAR Ingeniería, 2011. Levantamiento topobatimétrico Ex Isla Serrano, elaborado para EPI.
- Bordemar Ingeniería SpA., 2012. Levantamiento topobatimétrico rellenos borde costero, elaborado para EPI.
- Bordemar Ingeniería SpA., 2013. Levantamiento topobatimétrico para construcción Frente N°3, elaborado para EPI.
- Bordemar Ingeniería SpA., 2014. Levantamiento topobatimétrico Astillero Marco, elaborado para EPI.
- Bordemar Ingeniería SpA., 2014. Levantamiento topobatimétrico poza Avda. Jorge Barrera, elaborado para la Dirección de Obras Portuarias, Ministerio de Obras Públicas.

La Figura 5.2 presenta la información batimétrica consolidada.



Figura 5.2: Levantamientos batimétricos consolidados.
(Fuente: Elaboración propia).

5.2 MEDICIONES DE CAMPO DISPONIBLES

A partir de la Ref.3 y Ref.4 se dispuso de mediciones de campo para diversos parámetros oceanográficos en dos campañas (verano e invierno), resultando de interés para el presente estudio las mediciones de oleaje y mareas.

Para caracterizar el oleaje se fondearon dos equipos ADCP, marca RDI, modelo WH Sentinel, uno de 600 kHz (ADCP 1) y otro de 300 kHz (ADCP 2). Los instrumentos fueron programados para realizar registros de olas cada 10800 [s] (3 horas) a una frecuencia de muestreo de 2 [Hz], con un número de datos por burst de 4200 (35 minutos). El nivel del mar fue registrado cada 5 minutos mediante una estación de mareas Hobbo, modelo U20 con rango de operación de 0 a 4 [m]. La Figura 5.3 y Tabla 5.1 presentan la disposición en planta y coordenadas de los instrumentos.

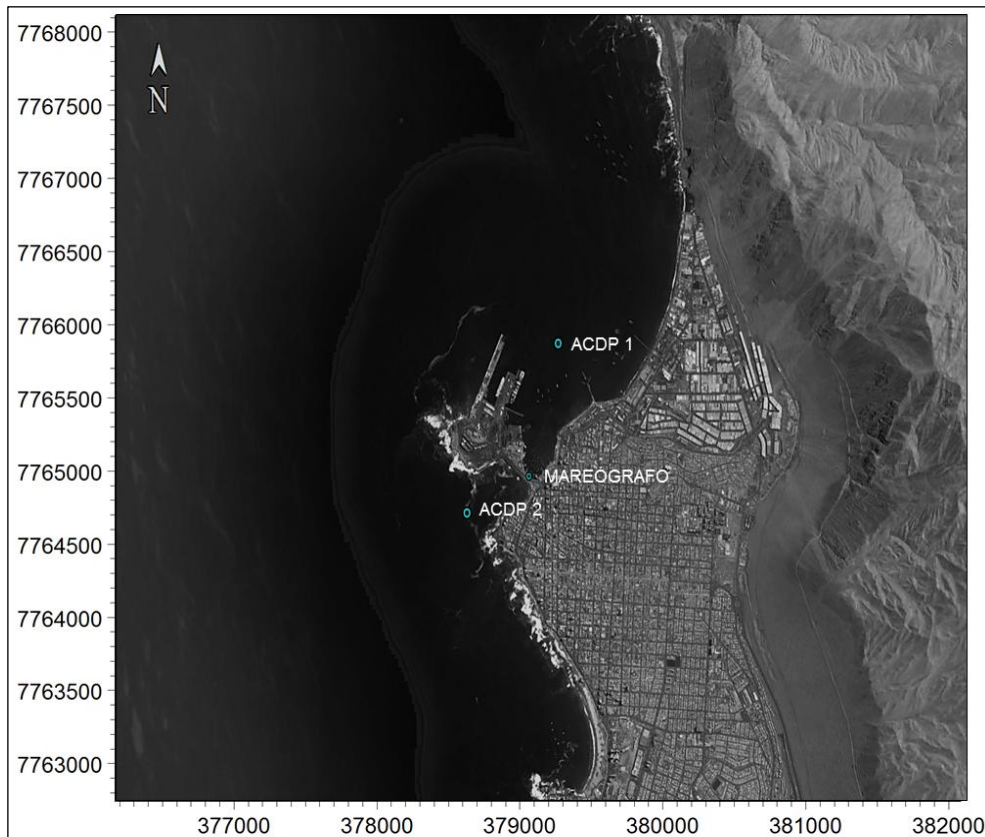


Figura 5.3: Ubicación de las mediciones de campo disponibles.
 (Fuente: Elaboración propia).

INSTRUMENTO	COORDENADA UTM (*)		COORDENADA GEOGRÁFICA		z [m NMM]
	E [m]	N [m]	LATITUD [°]	LONGITUD [°]	
ADCP 1	379728.10	7765868.97	20°12'49.37" S	70°09'40.49" W	-16.3
ADCP 2	378685.88	7764444.01	20°12'49.37" S	70°09'40.49" W	-17.2
Mareógrafo	379390.31	7764749.99	20°12'39.58" S	70°9'16.15" W	-1.5

(*) UTM – WGS'84 Zona 19S.

Tabla 5.1: Coordenadas de los instrumentos fondeados para las mediciones de campo disponibles.
 (Fuente: Elaboración propia a partir de Ref.3 y Ref.4).

El procesamiento de información y presentación de resultados fue desarrollado de acuerdo al instructivo SHOA, Pub. N°3201, Instrucciones Oceanográficas N°1.

La Figura 5.4 corresponde a registros fotográficos realizados durante el fondeo del instrumental y ejecución de las campañas de terreno, mientras la Tabla 5.2 presenta los intervalos de tiempo de medición para ambas campañas ejecutadas.



Figura 5.4: Imágenes de las campañas de campo realizadas en el Puerto de Iquique. (Fuente: Elaboración propia a partir de registros fotográficos obtenidos en campo).

La campaña estival se ejecutó entre el 17 de enero y 03 de marzo de 2015, correspondiendo a 45 días de extensión, mientras que la campaña invernal contó con una duración de 34 días comprendida entre el 02 de julio y 05 de agosto de 2015, de acuerdo a lo indicado en la Tabla 5.2.

INSTRUMENTO	CAMPAÑA VERANO		CAMPAÑA INVIERNO	
	INICIO	FIN	INICIO	FIN
ADCP 1 y 2	17-01-2015	03-03-2015	02-07-2015	05-08-2015
Mareógrafo	17-01-2015	03-03-2015	02-07-2015	05-08-2015

Tabla 5.2: Intervalos de tiempo de las campañas en terreno ejecutadas. (Fuente: Elaboración propia a partir de Ref.3 y Ref.4).

5.2.1 MEDICIÓN DE OLEAJE

5.2.1.1 CAMPAÑA DE VERANO

La Figura 5.5 presenta las series de tiempo para los parámetros de oleaje altura significativa (H_s), período significativo (T_s) y dirección media (MWD) para el ADCP 1 (Puerto) y ADCP 2 (Offshore), respectivamente.

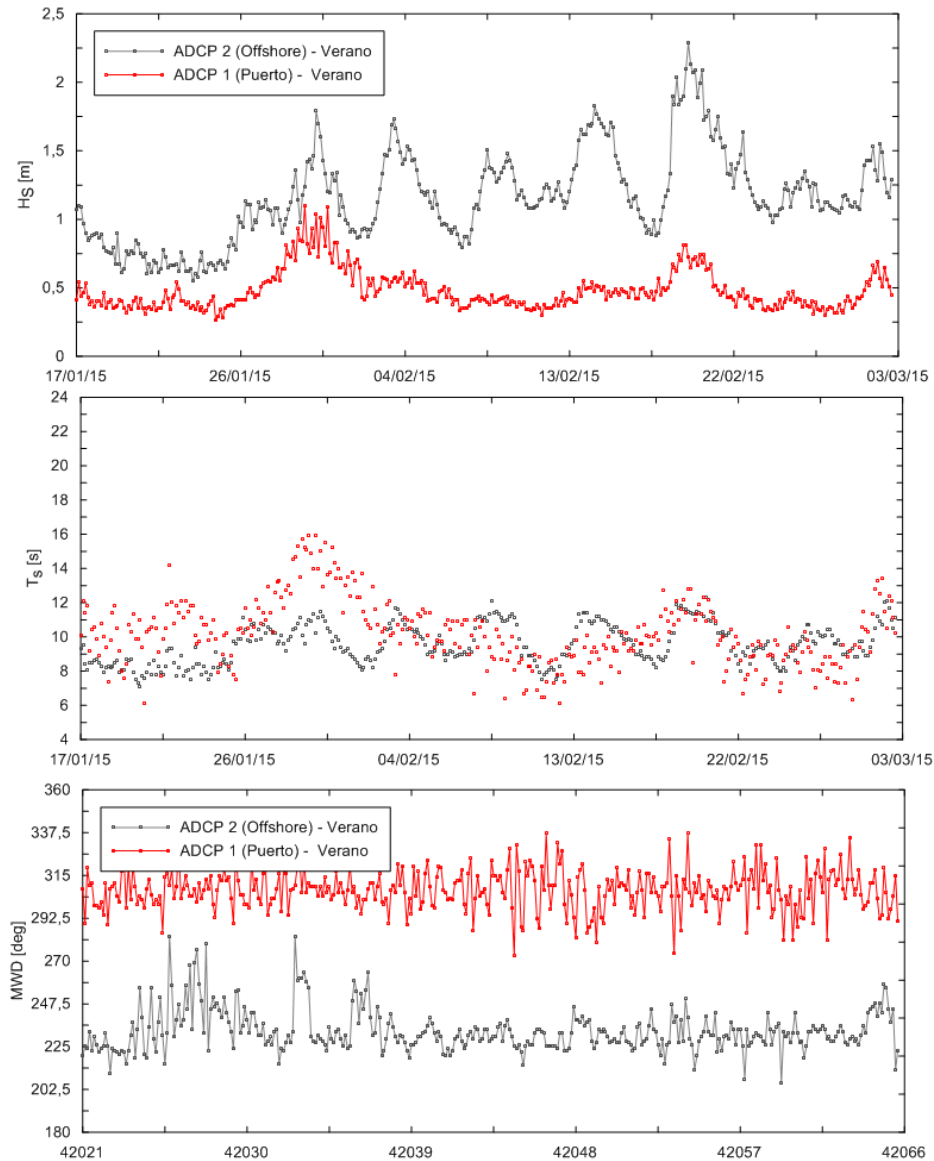


Figura 5.5: Comparación entre altura significativa H_s , período significativo T_s y dirección media MWD. Al interior del Puerto (ADCP 1) y Offshore (ADCP 2) – Campaña verano. (Fuente: Elaboración propia).

Para la campaña verano el ADCP 1 registró alturas entre 0.26 y 1.10 [m] provenientes principalmente de la dirección 307° y con períodos asociados entre 6.10 y 15.90 [s]. Para el ADCP 2 las alturas se encontraron entre 0.55 y 2.29 [m] provenientes desde la dirección 233° con períodos entre 7.10 y 12.30 [s].

5.2.1.2 CAMPAÑA INVIERNO

De manera análoga, se presentan las series de tiempo para los parámetros de oleaje altura significativa H_s , período significativo T_s y dirección media MWD para el ADCP 1 (Puerto) y ADCP 2 (Offshore), respectivamente.

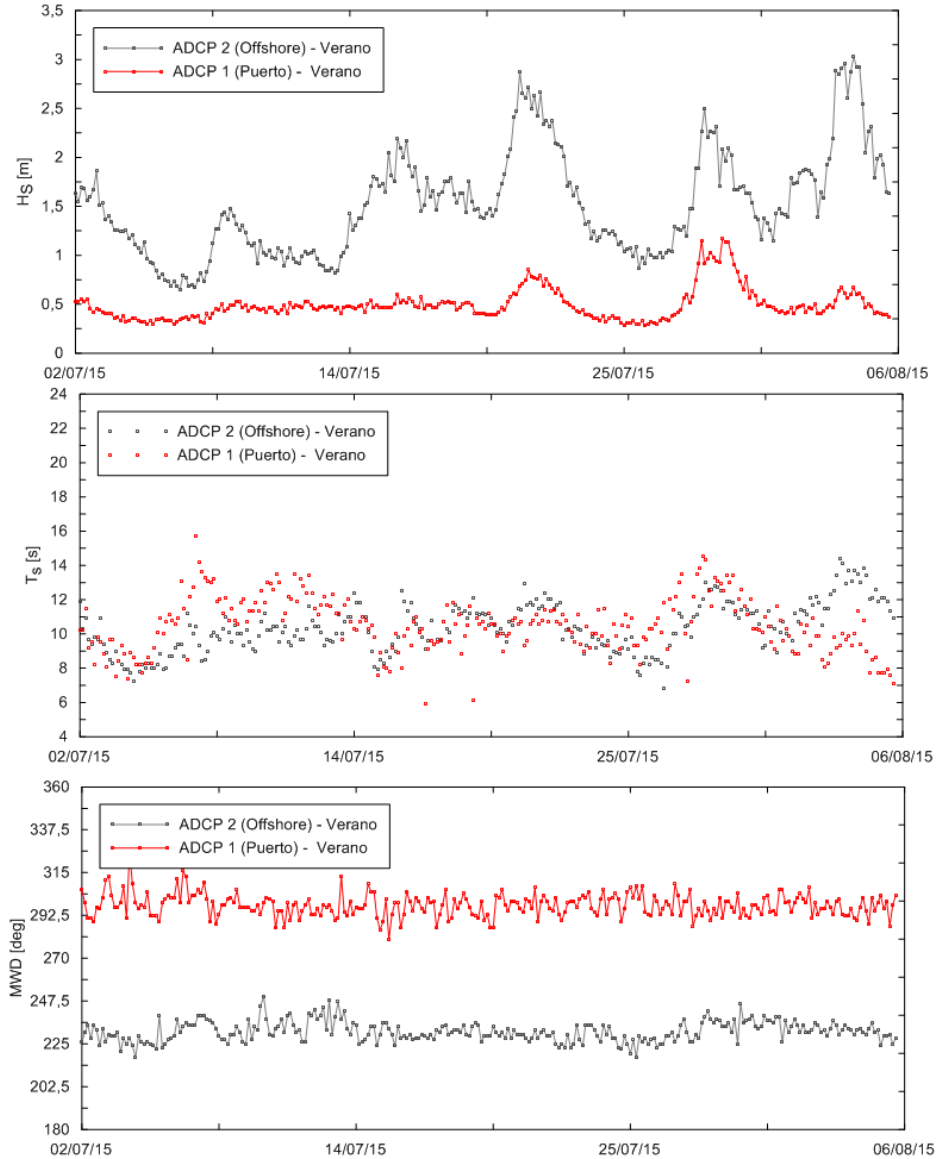


Figura 5.6: Comparación entre altura significativa H_s , período significativo T_s y dirección media MWD. Al interior del Puerto (ADCP 1) y Offshore (ADCP 2) – Campaña invierno. (Fuente: Elaboración propia).

Para la campaña invierno el ADCP 1 registró alturas entre 0.28 y 1.17 [m] provenientes principalmente de la dirección 298° y con períodos asociados entre 5.90 y 15.70 [s]. Para el ADCP 2 las alturas se encontraron entre 0.65 y 3.03 [m] provenientes desde la dirección 231° con períodos entre 6.80 y 14.40 [s].

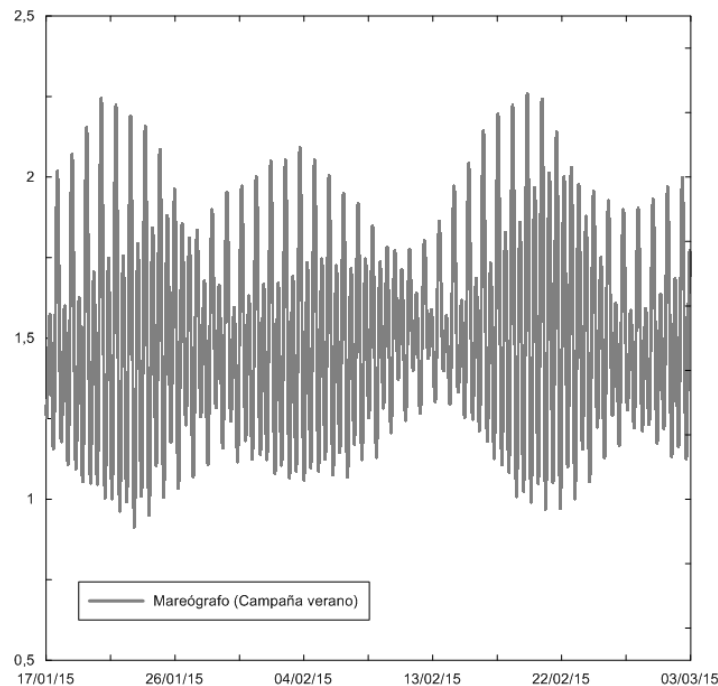
5.2.2 MAREA

Para determinar los valores característicos que experimenta el nivel del mar en la zona de estudio, se recopiló información contenida en las Tablas de Marea publicadas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), entre los años 2012 y 2016, para el puerto patrón Iquique. Los resultados fueron comparados con el registro de medición efectuado por el mareógrafo (ver Figura 5.8) durante la campaña verano.

De la Ref.3 se desprende que el régimen mareal en Iquique corresponde al tipo semidiurno con desigualdad diurna, con dos pleamares y dos bajamares en un día (24 horas 50 minutos).

5.2.2.1 MEDICIÓN DE MAREAS

En la Figura 5.7 se presenta la gráfica de amplitud de marea registrada por el mareógrafo ubicado al interior del puerto para la campaña verano.



**Figura 5.7: Registro de amplitud de marea (mareógrafo) para campaña verano.
(Fuente: Elaboración propia).**

5.2.2.2 COMPARACIÓN ENTRE LOS REGISTROS Y TABLAS DE MAREA

Se compararon las mediciones realizadas con el mareógrafo instalado al interior del puerto, con el pronóstico obtenido de las Tablas de marea de la costa de Chile del SHOA, versión 2015 para el puerto patrón de Iquique.

En términos generales, se aprecia que las pleas y bajas obtenidas del pronóstico son ligeramente menores que los registros obtenidos por el mareógrafo; se obtuvo -en promedio- una diferencia cercana a 0.1 [m] en magnitud.

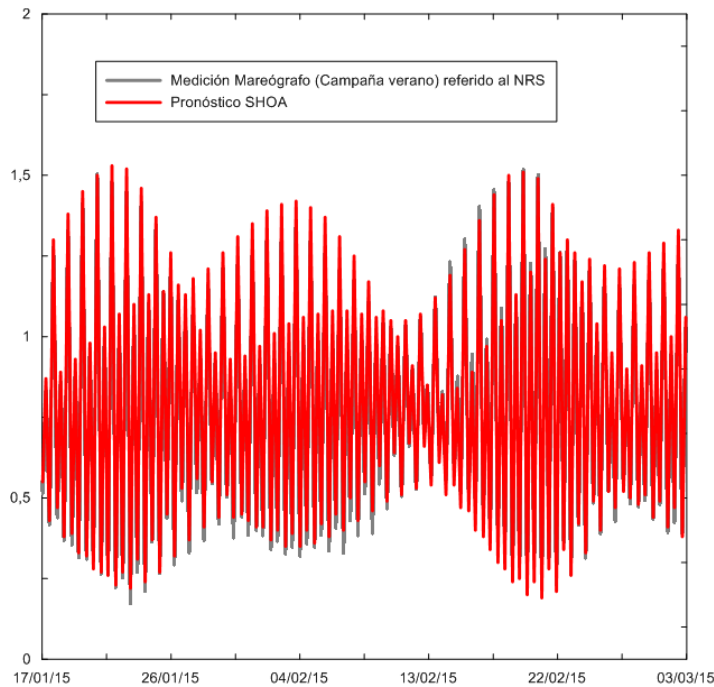


Figura 5.8: Comparación del registro con el pronóstico de marea del SHOA.
 (Fuente: Elaboración propia).

Se concluye que el registro medido tiene un comportamiento similar al pronóstico de marea, el cual corresponde a los valores oficiales de marea para Chile. Por lo anterior, se emplearán las tablas de pronóstico del SHOA para definir los principales planos de marea astronómica.

5.2.2.3 ANÁLISIS NO ARMÓNICO DE MAREA

Se realizó un análisis no armónico de marea mediante el cual se determinaron los principales planos de referencia. La metodología empleada está basada en el método oficial para el cálculo de valores no armónicos de la marea, contenida en la publicación “Instrucciones hidrográficas y oceanográficas N°2” del SHOA.

PRINCIPALES PLANOS MAREALES (2012 - 2016)	mNRS
Pleamar máxima	+1.58
Promedio pleamares mayores	+1.30
Promedio pleamares	+1.16
Nivel medio	+0.79
Promedio bajamares	+0.43
Promedio bajamares menores	+0.39
Bajamar mínima	+0.19
Nivel de reducción de sondas (NRS)	0.00

Tabla 5.3: Planos mareales pronosticados para Iquique.
 (Fuente: Elaboración propia a partir de Ref.7).

De los resultados se destaca el nivel medio de marea correspondiente a +0.79 [mNRS], el cual será empleado en las simulaciones numéricas.

5.3 ESTUDIO ESPECTRAL DE OLEAJE

En el presente apartado se encuentran las condiciones operacionales de oleaje en las cercanías del Puerto de Iquique (Ref.5). El estudio fue realizado mediante el modelo numérico MIKE 21 Spectral Waves (SW) y la base de datos Olas Chile V, la cual cuenta con 34 años de extensión. La estadística corresponde a espectros bidimensionales en aguas profundas, nodo Iquique.

La metodología de transferencia empleada consistió en propagaciones de oleaje unitario, determinando coeficientes de transformación de altura y dirección, obteniendo los parámetros característicos del oleaje en la zona cercana al área de estudio. Se consideró la extracción de información en el nodo P_0 , el cual será empleado como acople para el posterior modelo no lineal. La ubicación y coordenadas del nodo P_0 se presentan en la Figura 5.9 y Tabla 5.4.

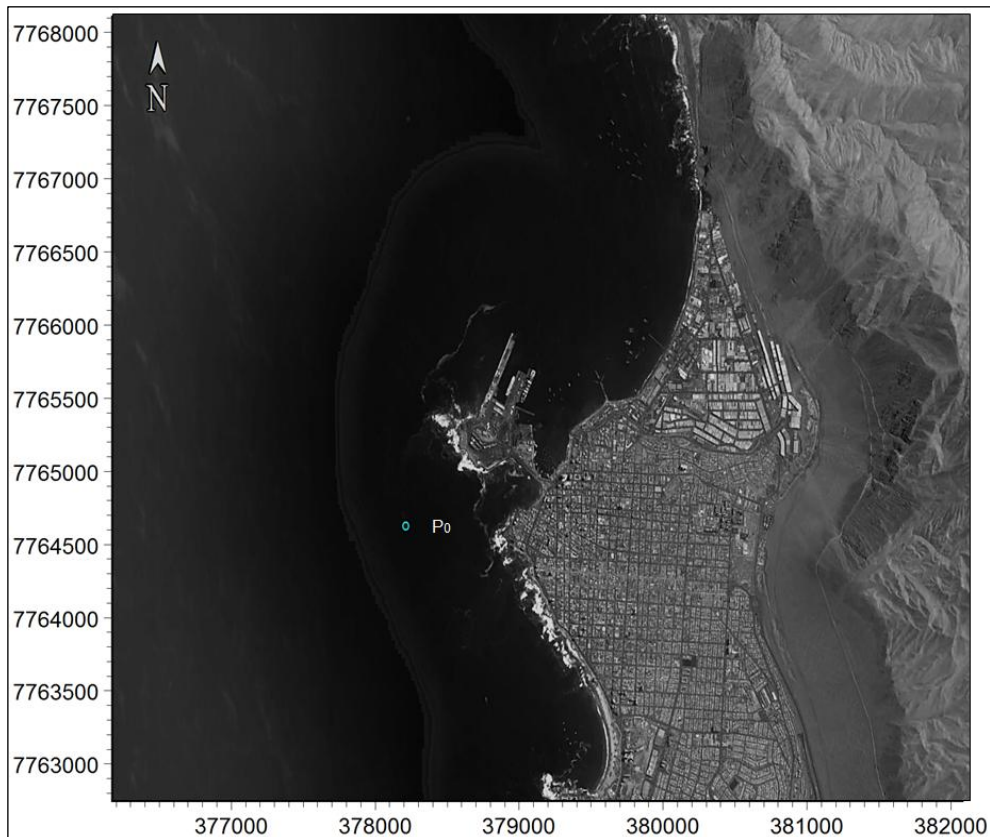


Figura 5.9: Ubicación de los puntos de extracción de resultados.
 (Fuente: Elaboración propia a partir de Ref.5).

NOMBRE NODO	COORDENADA UTM (*)		COORDENADA GEOGRÁFICA		COTA [mNRS]
	E [m]	N [m]	LAT [°]	LON [°]	
P ₀	377908	7764330	20°12'52.90"	70°10'7.32"	-34.21

(*) UTM – WGS'84 Zona 19S

Tabla 5.4: Coordenadas del nodo de extracción P₀.
 (Fuente: Elaboración propia a partir de Ref.5).

El estudio de oleaje fue calibrado y validado con respecto a las mediciones de oleaje registradas por el ADCP 2 (la ubicación del instrumento se presentó en la Figura 5.3) siendo una fuente de información robusta en el proceso de simulación numérica de este estudio. Para mayor información consultar Ref.5.

En la Figura 5.10 se presentan los resultados gráficos de la propagación unitaria de oleaje para las direcciones SW y NW.

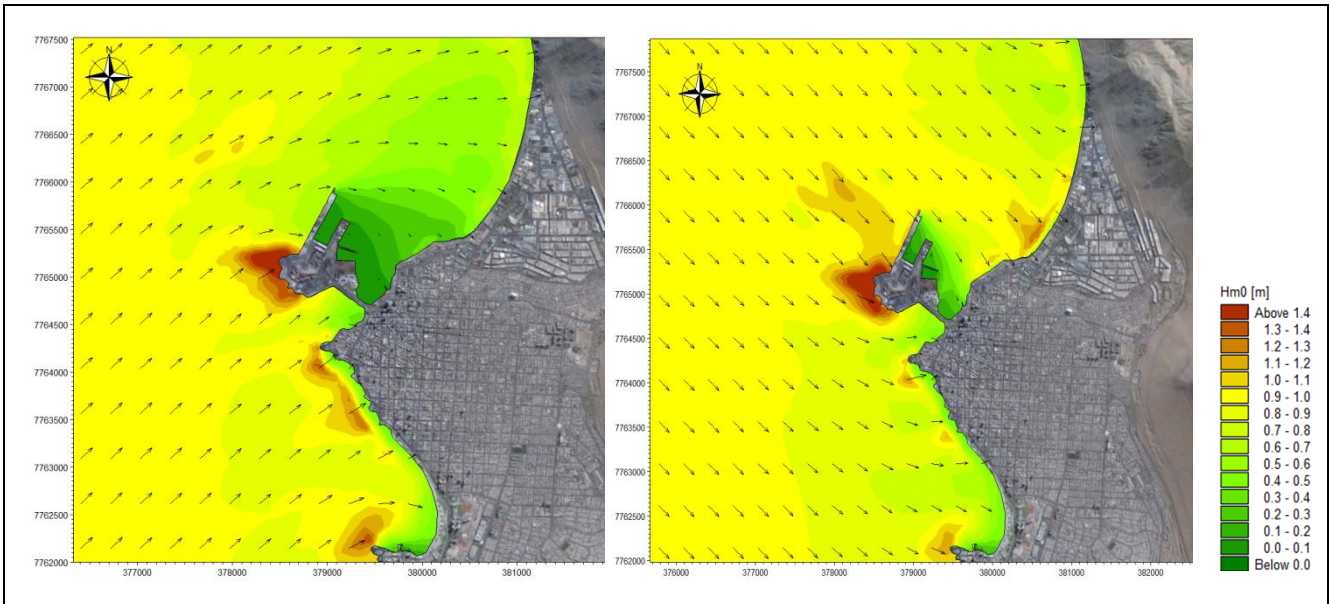


Figura 5.10: Resultados típicos de la propagación de oleaje para $H_{m0}=1.0$ [m], $T_p=14$ [s], $MWD=225$ [deg] (panel izquierdo) y $H_{m0}=1.0$ [m], $T_p=14$ [s], $MWD=315$ [deg] (panel derecho). (Fuente: Elaboración propia a partir de Ref.5).

Se aprecia el oleaje propagado desde la dirección SW (Figura 5.10, panel izquierdo) y el efecto de la refracción frente a la zona de estudio, provocan un cambio en la dirección del oleaje hacia una trayectoria aproximadamente perpendicular a la línea de costa o -en su defecto- el frente de olas se posiciona de manera paralela a la costa. En la Figura 5.10 (panel derecho) se presenta el resultado del oleaje unitario propagado desde una dirección NW (315°). El efecto de los procesos de transformación, principalmente refracción y difracción, son menores que en el caso del oleaje proveniente del SW. Respecto de las alturas de ola al interior del recinto portuario, se obtienen valores mayores en comparación con la situación del oleaje que proviene de la dirección 225° (SW), debido a que el puerto no presenta obra de abrigo para esta dirección. Sin embargo, como se observa en la Tabla 5.5, no hay eventos que posean direcciones incidentes de oleaje mayores a 270° .

5.3.1 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

En la Figura 5.11, se presentan las funciones de transferencia de altura y dirección de ola en el Nodo P_0 para cada período y dirección modelada desde aguas profundas.

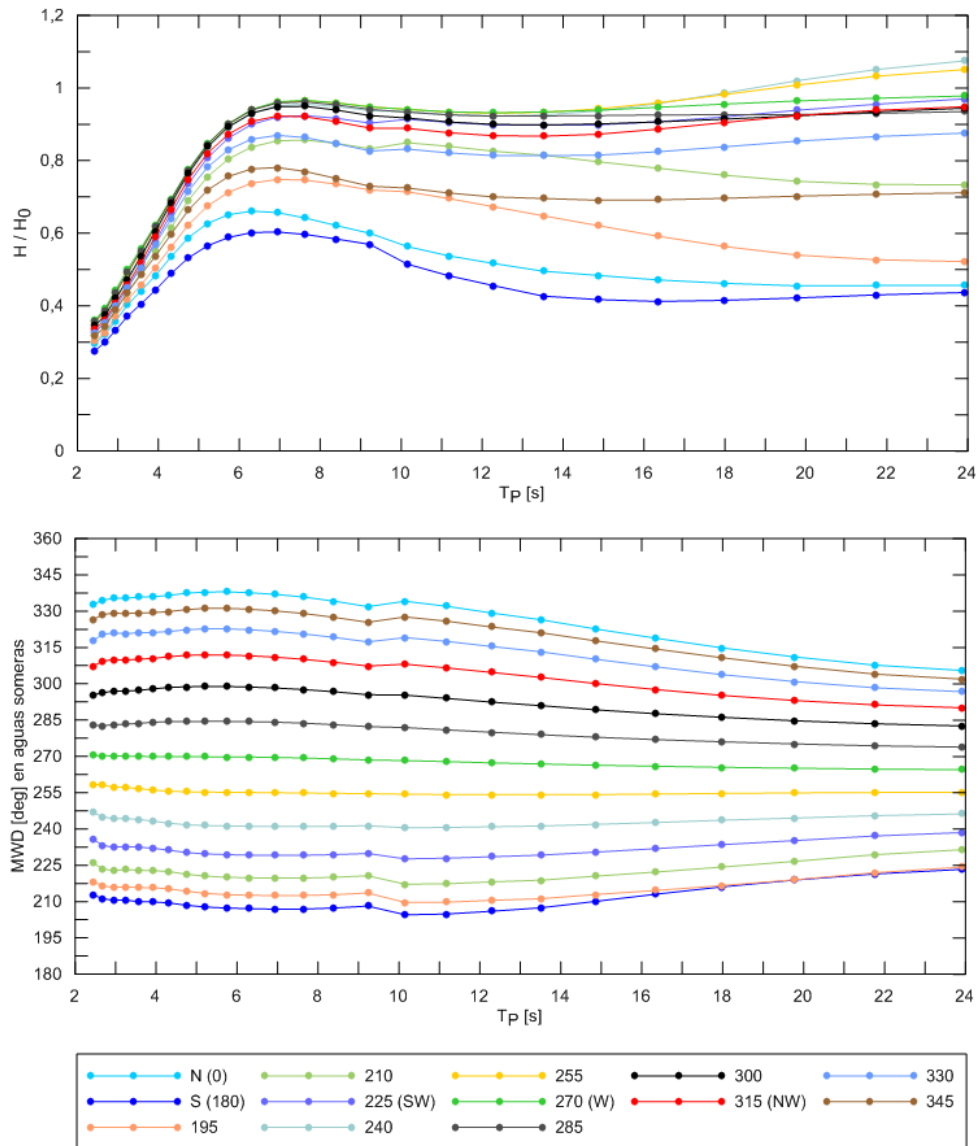


Figura 5.11: Funciones de transferencia de altura de ola (panel superior) y dirección de ola (panel inferior) para Nodo P_0 . (Fuente: Elaboración propia a partir de Ref.5).

Para el oleaje más frecuente desde aguas profundas SW (225°), los procesos de transformación disminuyen la altura de olas hasta un 10% para períodos mayores a 12 [s]; mientras que para las direcciones 240° y 255° aumentan de altura en el Nodo P_0 para períodos superiores a 18 [s]. De forma análoga, las olas con períodos inferiores a 18 [s] disminuyen la altura de olas en el Nodo P_0 respecto a la altura en aguas profundas.

Con relación a las direcciones, se infiere que las olas con bajos períodos sufren un menor grado de refracción que las olas de mayor período. Esto se observa cuando los períodos mayores poseen tendencia hacia el W (270°), alineando -aproximadamente- el frente de ola con la costa. Cabe destacar que para la dirección W la trayectoria se mantiene casi constante.

5.3.2 CLIMA OPERACIONAL DE OLEAJE

Los resultados del clima operacional de oleaje en el Nodo P_0 , se presentan mediante rosas de altura y período (Figura 5.12), curva de excedencia de altura y tablas bivariantes (Tabla 5.5) en función de la altura significativa (H_{m0}), período peak (T_P) y dirección media de oleaje (MWD), considerando:

A (%): Porcentaje de ocurrencia para cada intervalo.

C (%): Porcentaje de excedencia para cada intervalo.

Nodo P_0		T_P [s]									A(%)	C(%)
		4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20	+20		
H _{m0} [m]	0.0 - 0.5										0.00	100.00
	0.5 - 1.0	0.00	0.01	0.04	0.04	0.02	0.01	0.01			0.12	100.00
	1.0 - 1.5	0.01	0.45	2.16	4.41	2.15	0.82	0.34	0.09	0.01	10.44	99.88
	1.5 - 2.0	0.02	0.49	4.48	16.79	11.45	3.45	1.08	0.26	0.02	38.04	89.44
	2.0 - 2.5	0.00	0.16	1.73	9.69	15.61	3.61	1.07	0.24	0.02	32.13	51.41
	2.5 - 3.0		0.02	0.34	2.12	7.97	2.92	0.53	0.10	0.01	14.00	19.28
	3.0 - 3.5			0.03	0.19	2.11	1.46	0.27	0.04	0.01	4.11	5.29
	3.5 - 4.0				0.00	0.29	0.48	0.14	0.02	0.00	0.93	1.17
	4.0 - 4.5					0.01	0.12	0.06	0.01		0.20	0.24
	4.5 - 5.0					0.01	0.02	0.02			0.04	0.04
	5.0 - 5.5						0.00	0.00			0.00	0.00
	+5.5										0.00	0.00
A(%)		0.03	1.14	8.78	33.23	39.62	12.88	3.51	0.75	0.06	100.00	
C(%)		100.00	99.97	98.83	90.05	56.81	17.20	4.32	0.81	0.06		

Nodo P_0		H_{m0} [m]											A(%)	C(%)
		0.0 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 1.5	1.5 - 2.0	2.0 - 2.5	2.5 - 3.0	3.0 - 3.5	3.5 - 4.0	4.0 - 4.5	4.5 - 5.0	5.0 - 5.5		
MWD [deg]	0												0.00	100.00
	180												0.00	100.00
	202.5		0.01	1.33	4.95	3.42	1.01	0.08					10.79	100.00
	225		0.10	8.63	32.15	28.28	12.94	4.04	0.93	0.20	0.04	0.00	87.31	89.21
	247.5		0.00	0.49	0.93	0.41	0.05						1.88	1.90
	270				0.00	0.01							0.02	0.02
	292.5												0.00	0.00
	315												0.00	0.00
	337.5												0.00	0.00
A(%)		0.00	0.12	10.44	38.04	32.13	14.00	4.11	0.93	0.20	0.04	0.00	0.00	100.00
C(%)		100.00	100.00	99.88	89.44	51.41	19.28	5.29	1.17	0.24	0.04	0.00	0.00	

Tabla 5.5: Tablas bivariantes nodo P_0 de H_{m0} vs T_P (tabla superior), y MWD vs H_{m0} (tabla inferior). (Fuente: Elaboración propia a partir de Ref.5).

En el Nodo P_0 las alturas de olas se encuentran agrupadas mayoritariamente entre 1.5 y 2.5 [m] con el 70.17% de las ocurrencias. El intervalo comprendido entre 1.5 y 2.0 [m] corresponde al 38.04% de los eventos, mientras que las alturas entre 2.0 y 2.5 [m] alcanzan el 32.13% de la estadística.

Los períodos más recurrentes se presentan entre 10 y 16 [s], alcanzando el 85.73% de las ocurrencias. El intervalo comprendido entre 12 y 14 [s] corresponde al 39.62% de los eventos, mientras que los períodos entre 10 y 12 [s] alcanzan el 33.23%.

Finalmente, la dirección predominante corresponde al 225° con un 87.31% de los eventos, seguida por la dirección 202.5° que posee el 10.79% de las ocurrencias.

Lo anteriormente descrito se presenta en la Figura 5.12 mediante rosas de dispersión para los parámetros de altura de ola y período peak en función de la dirección media. Además, la Figura 5.13 corresponde a la curva de excedencia para H_{m0} .

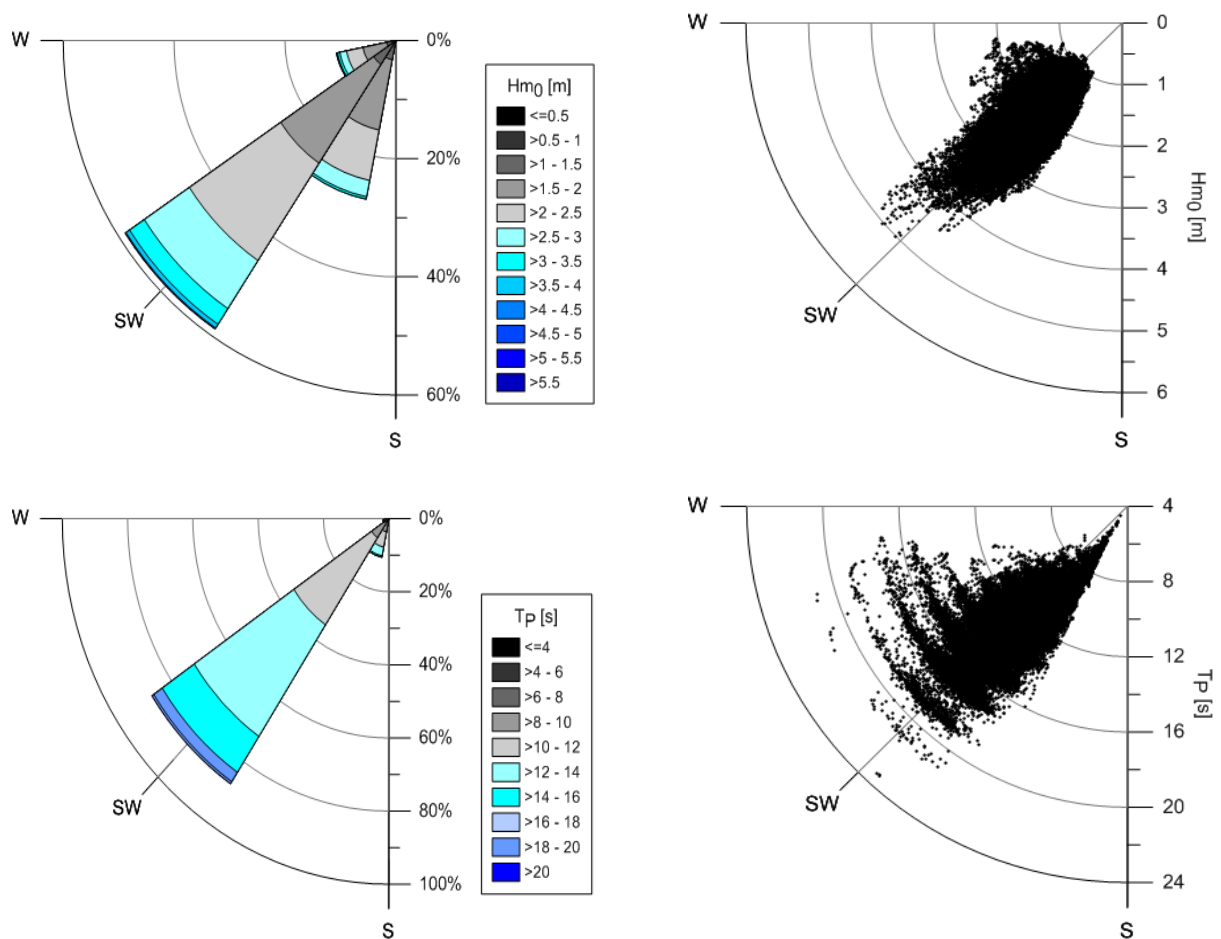


Figura 5.12: Rosas de altura de oleaje (panel superior) y rosas de períodos de oleaje (panel inferior) en Nodo P_0 .

(Fuente: Elaboración propia a partir de Ref.5).

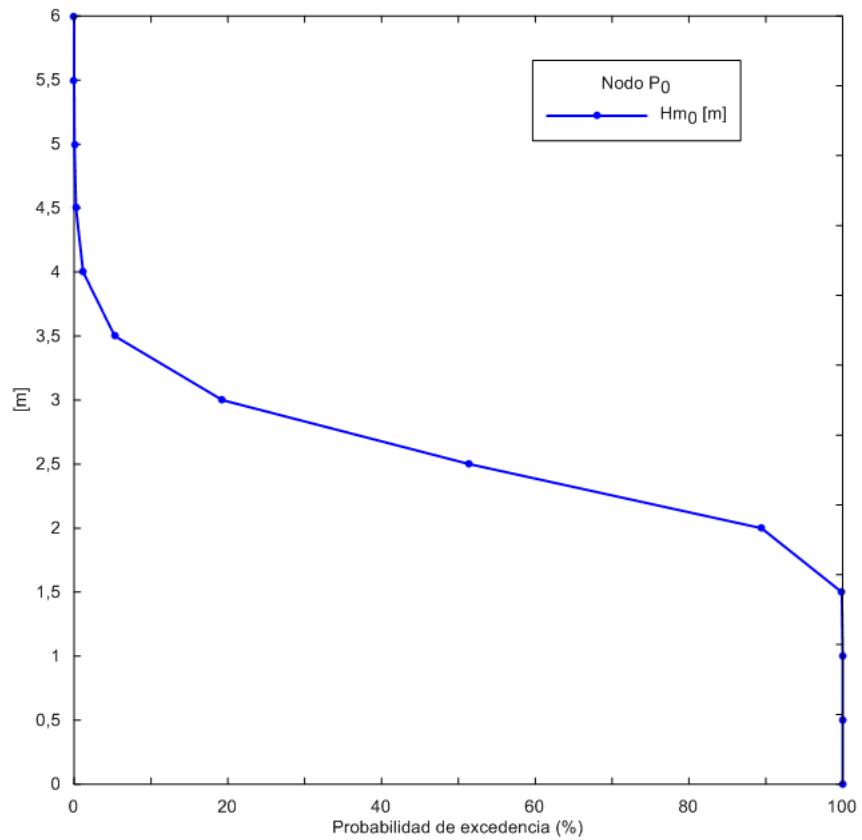


Figura 5.13: Curvas de probabilidad de excedencia para altura de ola (Hm0) – Nodo P₀.
(Fuente: Elaboración propia a partir de Ref.5).

En la Figura 5.13 se desprende que el 51.41% de las olas exceden los 2.5 [m] de altura, mientras que el 19.28% de los eventos sobrepasan 3.0 [m]. Finalmente, sólo el 1.17% de la muestra superan los 4.0 [m].

6. MODELO NUMÉRICO DE AGITACIÓN Y RESONANCIA

El presente capítulo corresponde a la descripción y configuración del modelo numérico MIKE 21 BW, mediante el cual se obtendrán las condiciones de agitación y resonancia en los sitios de atraque del Puerto de Iquique.

6.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO MIKE 21 BW

Para el análisis se utilizó el modelo numérico MIKE 21 BW desarrollado por Danish Hydraulic Institute (DHI). El cual está basado en las ecuaciones de Boussinesq desarrolladas por Madsen et al. (1991) y modificadas por Madsen & Sørensen (1992), las ecuaciones son discretizadas mediante diferencias finitas en una malla regular.

MIKE 21 BW es un modelo no lineal que resuelve la fase de las olas en función de ecuaciones del tipo Boussinesq, siendo capaz de simular fenómenos lineales y no lineales tales como asomeramiento, refracción, difracción, interacción lineal ola-ola, dispersión en frecuencia y dirección, rotura, disipación de energía, fricción en el fondo, movimientos de la línea de costa, reflexión parcial, transmisión y resonancia.

Las ecuaciones de gobierno del modelo son la continuidad (ver Ecuación (6.1)) y de momentum expresadas en X e Y (Ecuación (6.2) y Ecuación (6.3)). Estas ecuaciones se expresan en función de la superficie libre y de las componentes de velocidades P y Q integradas en la vertical (Madsen, (1997)).

$$n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad \text{Ecuación (6.1)}$$

$$\begin{aligned} n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_x \\ + n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + n^2 P \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gP\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n\psi_1 = 0 \end{aligned} \quad \text{Ecuación (6.2)}$$

$$\begin{aligned} n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_y \\ + n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + n^2 Q \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gQ\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n\psi_2 = 0 \end{aligned} \quad \text{Ecuación (6.3)}$$

Donde

ξ	: Superficie libre.	[m]
P, Q	: Funciones de velocidad integrada en la profundidad.	[m ³ /m/s]
h	: Profundidad total.	[m]

- g : Aceleración gravitacional. $[m/s^2]$
- α : Coeficiente de resistencia para flujo laminar de porosidad media.
- β : Coeficiente de resistencia para flujo turbulento de porosidad media.
- n : Porosidad.
- F_x : Esfuerzo horizontal en dirección x.
- F_y : Esfuerzo horizontal en dirección y.

La dispersión se expresa en términos ψ_1 , ψ_2 respectivamente.

$$\begin{aligned} \psi_1 \equiv & -\left(B + \frac{1}{3}\right) d^2 (P_{xxt} + Q_{xyt}) - nBgd^3 (\xi_{xxx} + \xi_{yyy}) \\ & - dd_x \left(\frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + nBgd(2\xi_{xx} + \xi_{yy}) \right) \\ & - dd_y \left(\frac{1}{6} Q_{xt} + nBgd\xi_{xy} \right) \end{aligned} \quad \text{Ecuación (6.4)}$$

$$\begin{aligned} \psi_2 \equiv & -\left(B + \frac{1}{3}\right) d^2 (Q_{yyt} + P_{xyt}) - nBgd^3 (\xi_{yyy} + \xi_{xxy}) \\ & - dd_y \left(\frac{1}{3} Q_{yt} + \frac{1}{6} P_{xt} + nBgd(2\xi_{yy} + \xi_{xx}) \right) \\ & - dd_x \left(\frac{1}{6} P_{yt} + nBgd\xi_{xy} \right) \end{aligned} \quad \text{Ecuación (6.5)}$$

Donde n corresponde a la porosidad mientras que B es un factor de la dispersión. Los subíndices x, y, t representan las derivadas parciales con respecto al espacio y tiempo, mientras que los esfuerzos horizontales se incluyen mediante la relación de un gradiente-tensión.

$$R_{xx} = \frac{\delta}{1 - \frac{\delta}{d}} \left(c_x - \frac{P}{d} \right)^2 \quad \text{Ecuación (6.6)}$$

$$\begin{aligned} R_{xy} &= \frac{\delta}{1 - \frac{\delta}{d}} \left(c_x - \frac{P}{d} \right) \left(c_y - \frac{Q}{d} \right) \\ R_{yy} &= \frac{\delta}{1 - \frac{\delta}{d}} \left(c_y - \frac{Q}{d} \right)^2 \end{aligned} \quad \text{Ecuación (6.7)}$$

Donde $\delta = \delta(t, x, y)$ es el ancho de la superficie de roller, mientras que c_x, c_y son componentes de celeridad del roller.

6.1.1 ESQUEMA EN DIFERENCIAS FINITAS

El modelo MIKE 21 BW emplea un método numérico basado en el esquema SYSTEM 21, el cual fue desarrollado por Abbott et al. (1973) y extendido a la solución de onda corta por Abbott et al. (1978). Desde entonces, ha estado bajo constante desarrollo. Para ver su evolución, se puede consultar Madsen et al. (1991) y Madsen & Sørensen (1992).

Las ecuaciones diferenciales son discretizadas espacialmente en una grilla rectangular escalonada, como se muestra en la Figura 6.1. Las cantidades escalares, como las desnivelaciones instantáneas, se definen en los nodos de la grilla mientras que las componentes de flujo se incorporan entre los nodos de la grilla para las direcciones respectivas. La aproximación de las derivadas espaciales por diferencias finitas es estrictamente centrada, excepto por los términos de convección, que se describen en detalle en Madsen & Sørensen (1992).

La integración en el tiempo se lleva a cabo utilizando un esquema implícito tiempo centrado.

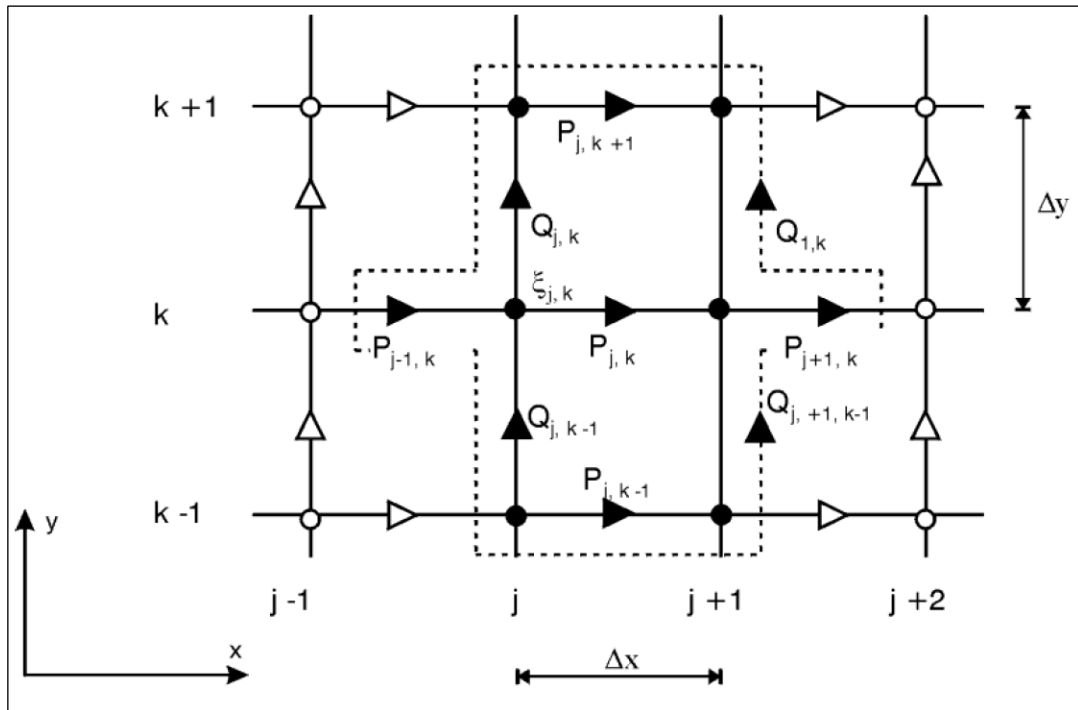


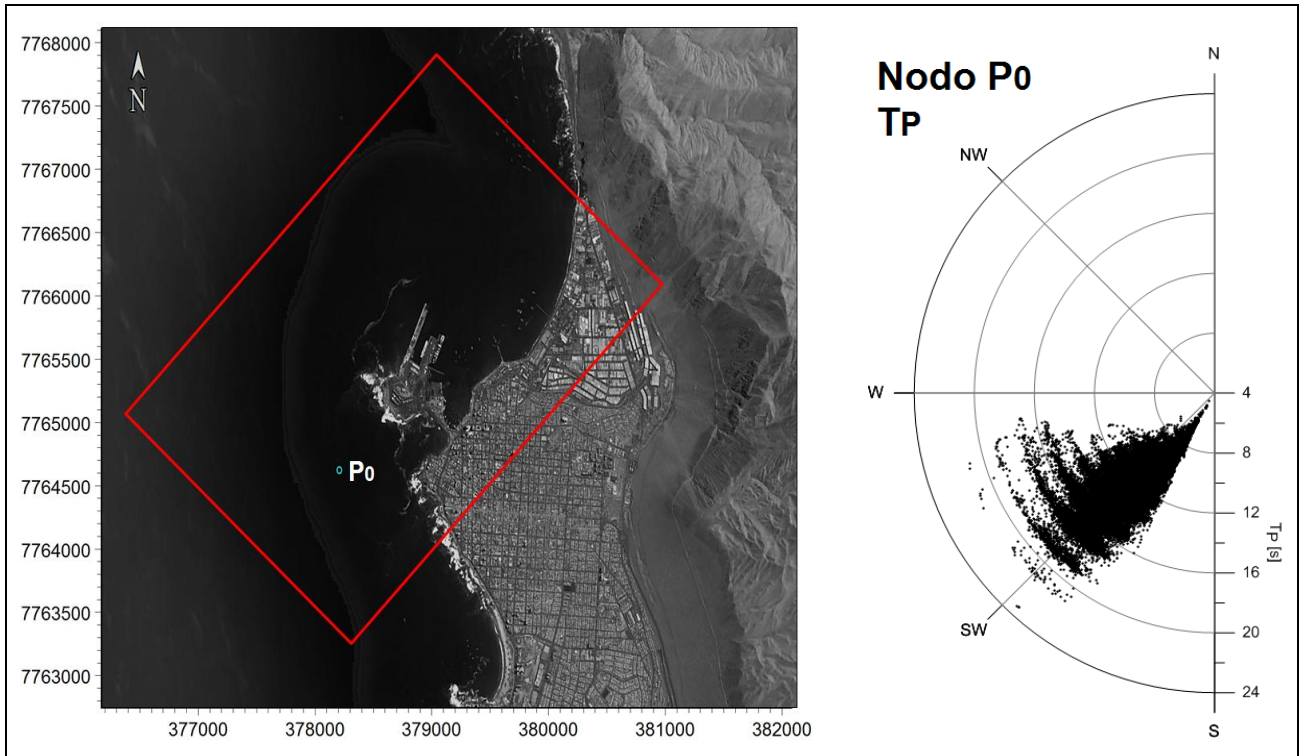
Figura 6.1: Esquema de discretización espacial en una grilla escalonada en x-y.
 (Fuente: DHI (2012)).

El algoritmo aplicado es implícito Alternante de Dirección (IDA) con una estructura no iterativa; para esto se utiliza una técnica de paso fraccional y de información adyacente (semi-linealización de términos no lineales). Los sistemas de ecuaciones tridiagonales resultantes se resuelven mediante el algoritmo de barrido doble.

6.2 CONFIGURACIÓN DEL MODELO NÚMÉRICO DE AGITACIÓN

6.2.1 DOMINIO NUMÉRICO

La extensión y orientación del dominio numérico se definió en función de las características del oleaje existente en el Nodo P_0 , de acuerdo a lo presentado en la Sección 5.3. En P_0 , el oleaje proviene -principalmente- desde las direcciones 202.5° a 247.5° , respectivamente. Por lo anterior, se rotó el dominio en 45° con respecto al Norte para que la generación del oleaje sea paralela al borde izquierdo del dominio escogido. En la Figura 6.2 se presenta el dominio definido para las simulaciones numéricas.



**Figura 6.2: Definición del dominio empleado de acuerdo al oleaje incidente en Nodo P_0 .
 (Fuente: Elaboración propia).**

6.2.2 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Se analizaron dos escenarios para el Puerto de Iquique. El primero corresponde a la situación actual y el segundo a la construcción del Frente N°3; este último será analizado en dos tipologías estructurales.

1. **SITUACIÓN ACTUAL:** Corresponde a la actual situación del Puerto de Iquique, el cual contiene cuatro sitios de atraque. La descripción detallada se presentó en la sección 3.4.
2. **ESCENARIO DE EXPANSIÓN:** Corresponde a la construcción del Frente N°3, el cual consiste en la ampliación del actual Sitio 1 en 526 [m] hacia el NE y 56 [m] de ancho. El nuevo sitio de atraque proyectado se ubica al costado oriente del nuevo rompeolas. Las profundidades que abarca la obra de protección de oleaje se extiende entre los veriles -15 a -25 [mNRS].

Ambas alternativas tipológicas se describen a continuación.

- 2.1 ALTERNATIVA N°1: Considera una escollera de protección en el exterior del molo sobre un núcleo de desmonte de cantera, coronado por un muro de hormigón armado. En el interior del molo se ubica el sitio de atraque, compuesto por un muelle de pilotes hincados para sostener el tablero de hormigón armado. La descripción detallada se presentó en la sección 3.5.1.
- 2.2 ALTERNATIVA N°2: Considera la construcción de cajones de hormigón armado a ambos costados del molo de abrigo, unidos por un relleno estructural y cimentado sobre una base estabilizadora de rocas. Por el exterior, el pie del cajón se encuentra protegido por un talud de rocas sumergidas y coronado por un muro parapeto. El interior cobijará el sitio de atraque con defensas adosadas al cajón de hormigón armado. La descripción detallada se presentó en la sección 3.5.2.

6.2.3 MODELO BATIMÉTRICO

Acoplando la información batimétrica obtenida a partir de la carta náutica SHOA N°1211 y los levantamientos existentes en el sitio de interés (ver sección 5.1), se generaron dos modelos batimétricos para los escenarios a simular.

Las grillas generadas son rectangulares, con un espaciamiento en la dirección horizontal y vertical de 5 [m]. Las coordenadas de proyección son E: 378030 [m]; N: 7761739 [m] con X: 1250, Y: 850, puntos respectivamente.

Las batimetrías están referidas al NRS y fueron interpoladas con un radio de 5 [m] mediante interpolación bilinear. La profundidad máxima y mínima alcanzan -34.24 y -2.31 [mNRS], respectivamente.

La Figura 6.3 presenta los modelos batimétricos generados para representar la situación actual y la construcción del Frente N°3 (Escenario de expansión). Este último será empleado para analizar ambas alternativas tipológicas.

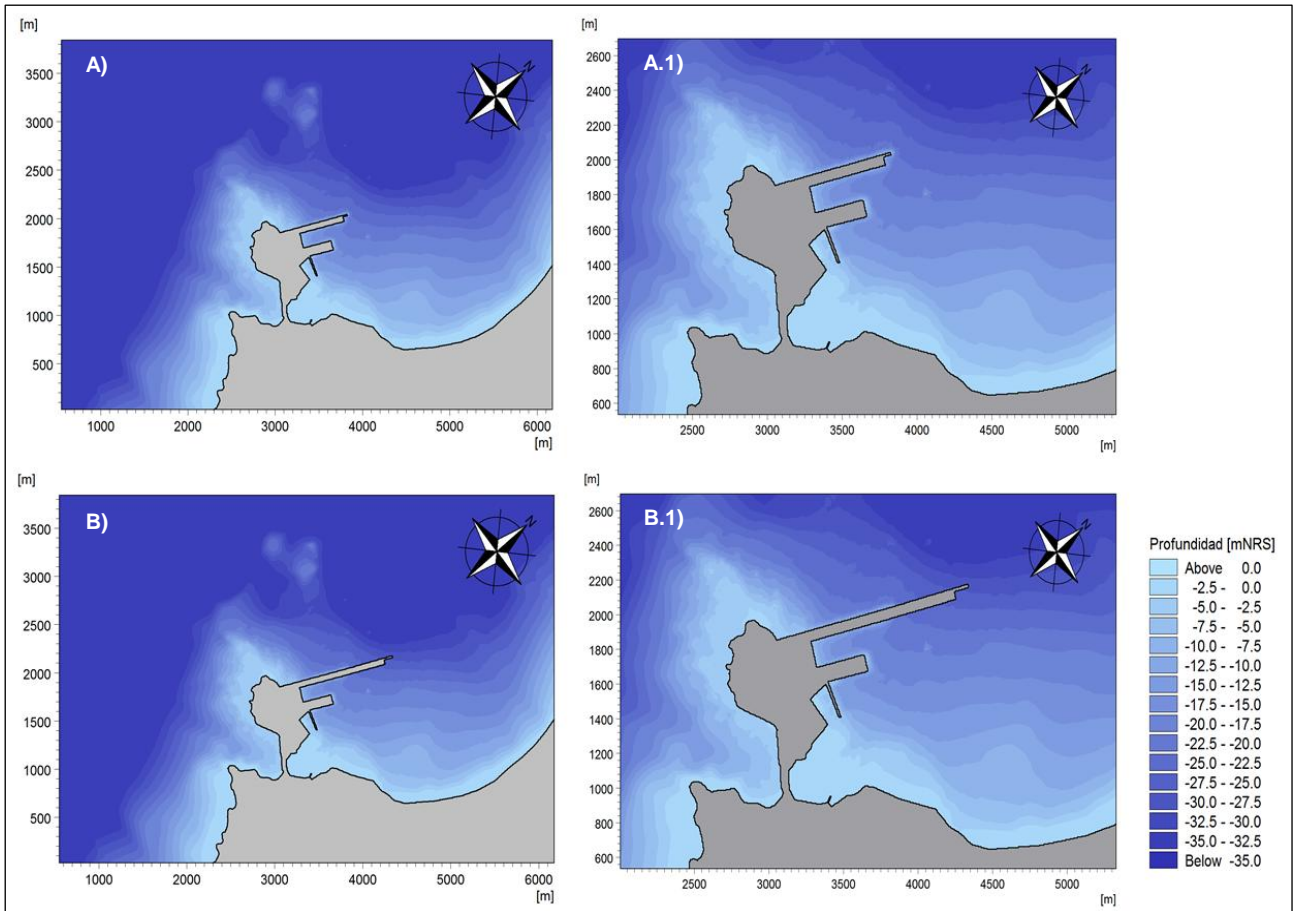


Figura 6.3: Modelos batimétricos. A) Situación actual y B) Escenario de expansión (Frente N°3). (Fuente: Elaboración propia).

6.2.4 REFLEXIÓN Y POROSIDAD

El valor mínimo para el coeficiente de reflexión es cero y corresponde a los contornos por los cuales entra o sale oleaje, sin producir reflexión. Por el contrario, el coeficiente máximo de reflexión es uno y corresponde al caso de reflexión perfecta. Entre ambos valores extremos se encuentran los coeficientes correspondientes a playas, bordes rocosos, muros, entre otros, determinados a partir de las características morfológicas del sector y tipologías de las estructuras que se encuentran inmersas en el dominio batimétrico estudiado. Para obtener los coeficientes de reflexión se utilizaron los valores recomendados en Shore Protection Manual (1984), el cual asocia la tipología de borde con coeficientes típicos de reflexión.

Los cuatro tramos determinados para la zona de estudio y los coeficientes asociados a sus características se presentan en la Figura 6.4 y Tabla 6.1.

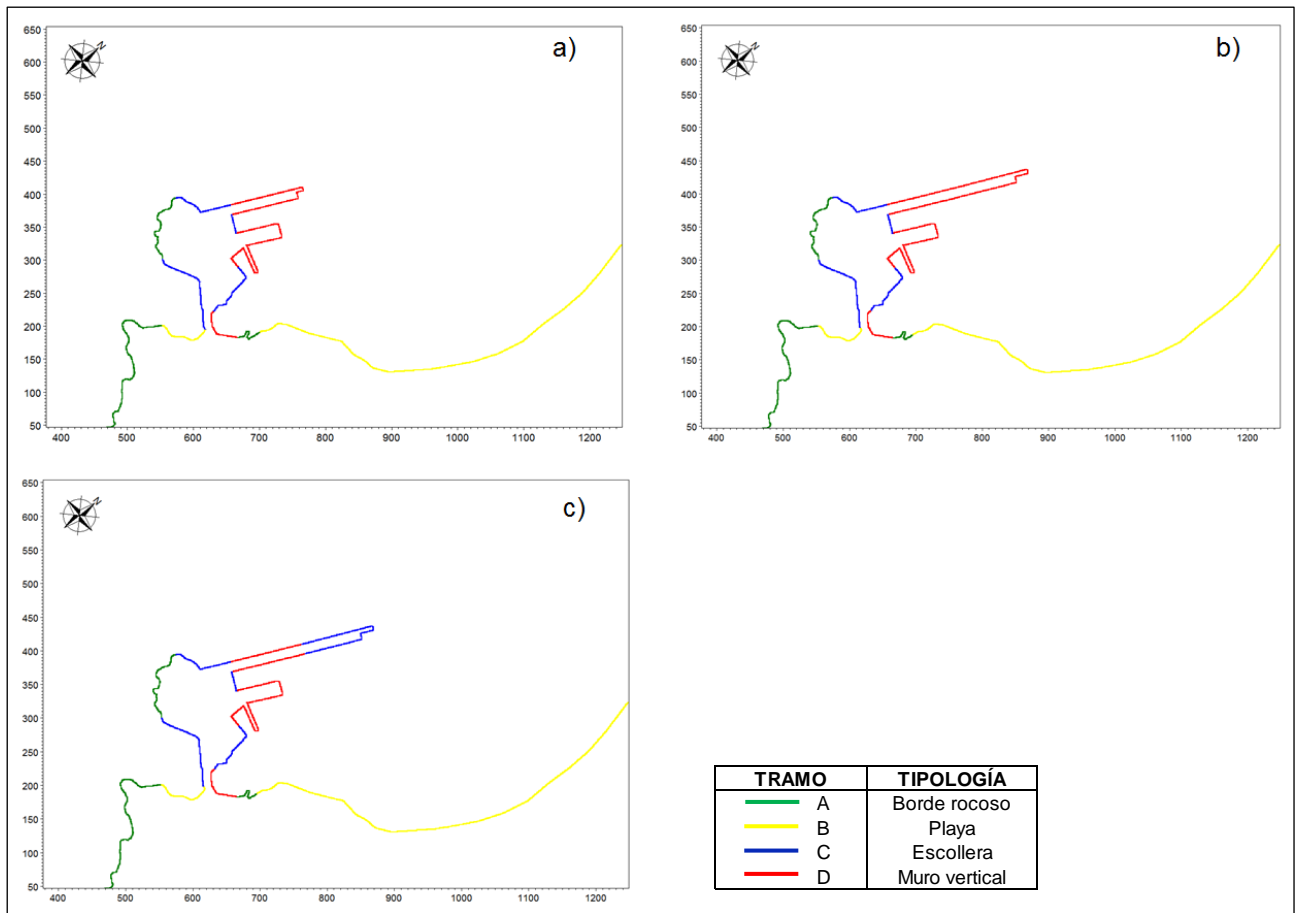


Figura 6.4: Tramos de reflexión en el dominio de modelación. a) Situación actual. b) Escenario de expansión, alternativa 1. c) Escenario de expansión, alternativa 2. (Fuente: Elaboración propia).

TRAMO	TIPOLOGÍA	COEFICIENTE DE REFLEXIÓN	PROFUNDIDAD PROMEDIO [mNRS]
A	Borde rocoso	0.6	- 3.0
B	Playa natural	0.2	- 3.0
C	Escollera	0.6	- 15
D	Muro vertical	0.9	- 15
-	Talud escollera Frente N°3	0.6	- 25
-	Cajones hormigón Frente N°3	0.9	- 25

Tabla 6.1: Coeficientes de reflexión para cada tramo en el dominio de modelación. (Fuente: Elaboración propia a partir de Shore Protection Manual (1984)).

6.2.4.1 COEFICIENTES DE POROSIDAD

Definidos los coeficientes de reflexión y a través de la herramienta "Calculation of reflection coefficient" de MIKE 21, la cual permite asociar la porosidad con diferentes coeficientes de reflexión. Dependiendo de las condiciones de oleaje, se definieron los valores de porosidad utilizados en los contornos de la línea de costa del modelo. La relación entre porosidad y reflexión para diferentes períodos y profundidades se presentan en la Figura 6.5.

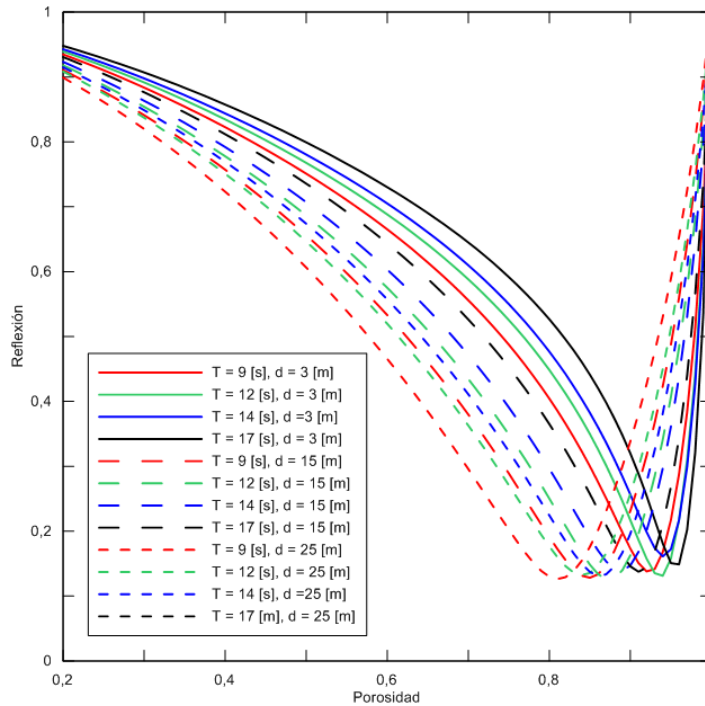


Figura 6.5: Curvas de reflexión vs porosidad para distintos períodos y profundidades. (Fuente: Elaboración propia).

Finalmente, se obtienen los coeficientes de porosidad para cada caso analizado. Los valores se presentan en la Tabla 6.2.

TRAMO	COEFICIENTE DE REFLEXIÓN	POROSIDAD			
		T=9 [s]	T=12 [s]	T=14 [s]	T=17 [s]
A	0.6	0.68	0.69	0.70	0.72
B	0.2	0.93	0.94	0.94	0.95
C	0.6	0.65	0.67	0.68	0.70
D	0.9	0.25	0.34	0.43	0.62
E	0.6	0.50	0.54	0.56	0.61
F	0.9	0.99	0.99	0.99	0.99

Tabla 6.2: Coeficientes de porosidad para los diferentes tramos y períodos simulados. (Fuente: Elaboración propia).

6.2.5 CAPAS DE ESPONJAS

Las esponjas son un mecanismo de absorción numérica del oleaje que se emplean como condición de borde en el dominio numérico. El mecanismo permite suprimir posibles ruidos producidos por la interacción del oleaje con el borde del modelo; la capa debe poseer un espesor entre uno a dos veces la longitud de la onda más energética a simular (DHI, 2012). En la Figura 6.6 se presentan las capas de esponjas que se utilizaron como archivos de entrada en los modelos realizados, tanto para la situación actual y escenario de expansión.

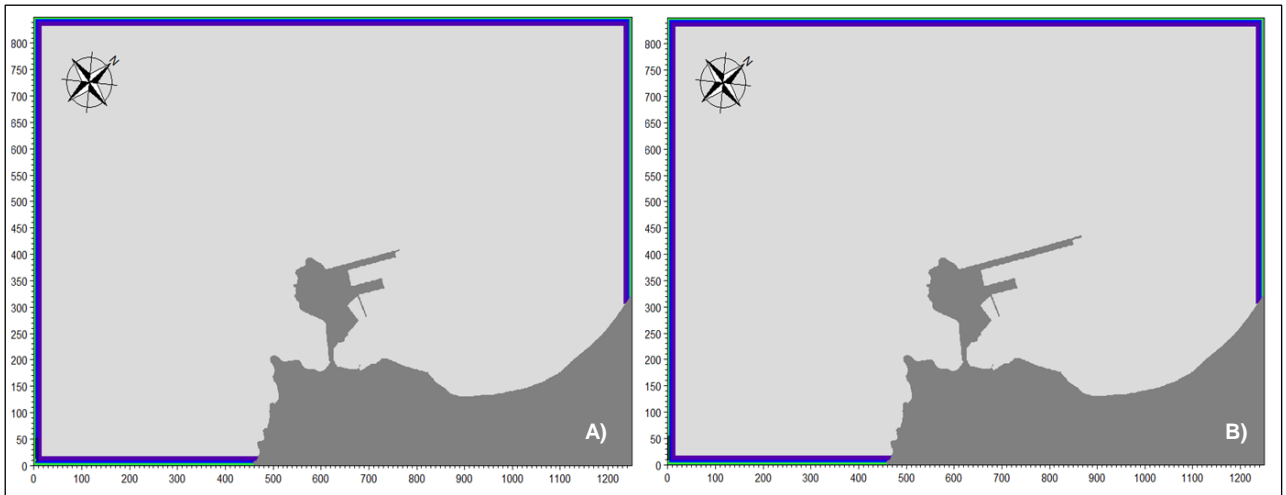


Figura 6.6: Capas de esponjas. A) Situación actual. B) Escenario de expansión Alternativas 1 y 2. (Fuente: Elaboración propia).

6.2.6 CONDICIONES DE BORDE HIDRODINÁMICAS

Conocido el clima de oleaje operacional en el Nodo P_0 , se discretizó el intervalo de direcciones incidentes cada 10° para caracterizar de mejor manera el oleaje que ingresa al recinto portuario. Las direcciones corresponden a 210° , 220° , 230° y 240° , asociados a los períodos 9, 12, 14 y 17 [s]; dichas combinaciones alcanzan el 96.23% del oleaje reinante en el nodo de acople. La Tabla 6.3 presenta las condiciones de oleaje simuladas.

Hm ₀ [m]	T _P [s]	DIRECCIÓN DE OLAJE			
		210	220	230	240
1.0	9	X	X	X	X
	12	X	X	X	X
	14	X	X	X	X
	17	X	X	X	X

Tabla 6.3: Condiciones de oleaje simuladas. (Fuente: Elaboración propia).

El nodo P_0 corresponde al punto de acople entre el modelo espectral de oleaje y el de agitación portuaria. Se monitoreó -a través de sensores numéricos- que se cumplan las condiciones de borde impuestas, garantizando el correcto ingreso del oleaje incidente al puerto.

6.2.6.1 PALETAS DE GENERACIÓN

En MIKE 21 BW, la condición de borde de oleaje se reproduce por medio de paletas virtuales que generan el oleaje caracterizado por el período peak, altura significativa y dirección media a través de una línea del dominio y para un espacio de tiempo determinado.

Las paletas virtuales fueron configuradas para generar oleaje direccional irregular, caracterizado mediante el espectro sintético Texel-Marsen-Arsole (TMA) sugerido por Bouws (1983) en el dominio de la frecuencia y con una distribución direccional.

Para reproducir adecuadamente las condiciones de oleaje en la zona de interés, se generaron paletas capaces de reproducir las condiciones indicadas en la Tabla 6.3. Éstas fueron impuestas a

una distancia de aproximadamente cuatro veces el largo de la ola de mayor período, entre la zona de generación y el nodo de acoplamiento P_0 , a una profundidad constante de -35 [mNRS].

6.2.7 PARÁMETROS FÍSICOS

6.2.7.1 ROTURA DE OLAJE

No se consideró rotura debido que la zona de interés -sitios de atraque- no presenta el fenómeno. Si bien se produce en algunos sectores del dominio numérico, ésta no condiciona los resultados. Además, el estudio no considera la caracterización de ondas largas libres (*free long waves*) producidas por rompiente.

Para verificar los resultados obtenidos, se emplearon las campañas de campo para validar la herramienta numérica.

6.2.7.2 FRICCIÓN POR FONDO Y VISCOSIDAD

No se consideró en las simulaciones numéricas.

6.2.7.3 NIVEL DE MAREA

Para todas las simulaciones numéricas se consideró el nivel medio del mar +0.79 [mNRS], a partir del análisis no armónico de marea (ver Tabla 5.3) realizado en el punto 5.2.2.3.

6.2.8 TIEMPO DE SIMULACIÓN Y PASO DEL TIEMPO

El tiempo de simulación numérica correspondió a 90 minutos, con un paso de integración temporal de 0.1 [s], alcanzando un número de Courant de 0.37 para todas las simulaciones. Los parámetros de altura significativa fueron extraídas cada 10 [s] y se consideraron válidos los últimos 20 minutos en la determinación del coeficiente de agitación, para cada nodo de extracción. La Figura 6.7 presenta un ejemplo de la evolución de los coeficientes de agitación.

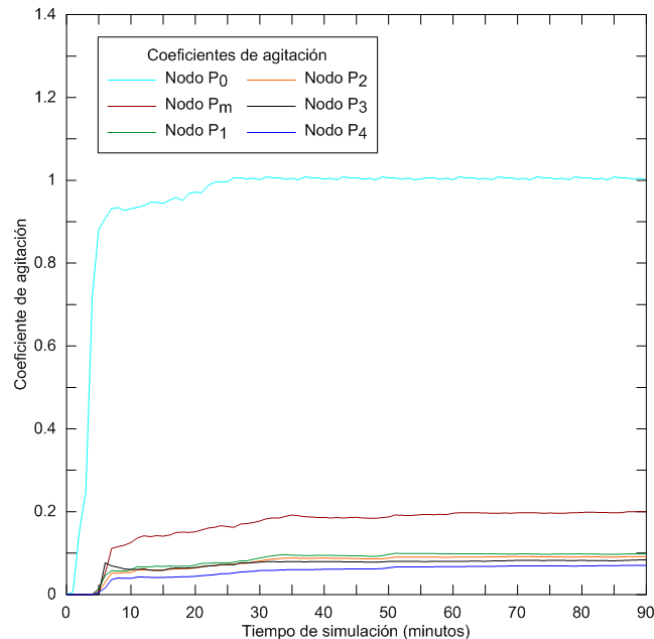


Figura 6.7: Ejemplo de coeficiente de agitación para $H_{m0}=1.0$, $T_p=14$, $MWD=220$ [deg], situación actual (Fuente: Elaboración propia).

6.3 RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO DE AGITACIÓN

El presente capítulo, corresponde a los resultados obtenidos del proceso de simulación numérica para la situación actual y el escenario de expansión a través de las dos alternativas tipológicas. Para cada configuración del puerto se simularon 16 casos de oleaje, correspondientes a cuatro direcciones: 210°, 220°, 230° y 240° y cuatro períodos: 9, 12, 14 y 17 [s].

6.3.1 RESULTADOS SITUACIÓN ACTUAL

Para la situación actual se extrajeron cinco sensores numéricos, de los cuales cuatro corresponden a los sitios de atraque existentes y el restante al nodo donde se fondeó el ADCP 1; este último se empleó para realizar la validación del modelo numérico. La ubicación de los nodos y coordenadas se presentan en la Figura 6.8 y Tabla 6.4.

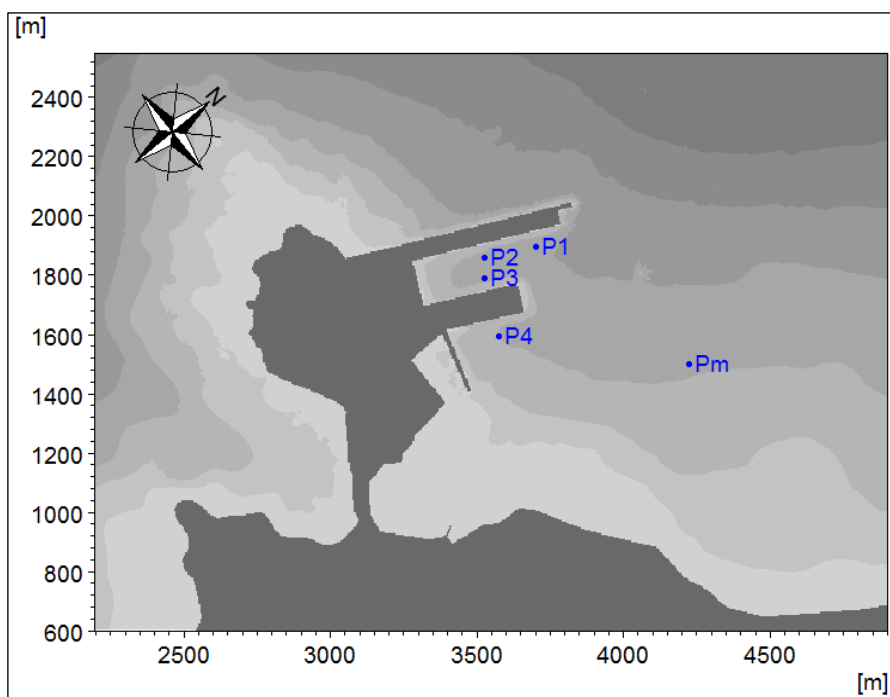


Figura 6.8: Ubicación de los sensores numéricos para la situación actual.
 (Fuente: Elaboración propia).

EMPLAZAMIENTO	SENSOR NUMÉRICO	COORDENADAS UTM (*)		COORDENADAS EN GRILLA		PROFUNDIDAD [mNRS]
		ESTE	NORTE	X	Y	
Sitio 1	P ₁	379090	7765768	740	379	-16.57
Sitio 2	P ₂	379010	7765596	705	372	-15.59
Sitio 3	P ₃	379086	7765561	705	358	-15.09
Sitio 4	P ₄	379208	7765431	715	319	-14.35
ADCP	P _m	379728	7765869	845	300	-16.84

(*) UTM – WGS'84 Zona 19S.

Tabla 6.4: Coordenadas de los sensores numéricos para situación actual.
 (Fuente: Elaboración propia).

La Figura 6.9 presenta un ejemplo de un diagrama de agitación de oleaje y desnivelación instantánea del Puerto de Iquique obtenido para $H_{m0}=1.0$ [m], $T_P=14$ [s] y $MWD=220$ [deg]. En el exterior del recinto portuario los coeficientes de agitación superan los 1.60 debido a la abrupta disminución de la profundidad. Al interior del puerto resultan menores a 0.15 producto del abrigo proporcionado por el molo de protección.

En relación al diagrama de desnivelación instantánea, se visualiza que el oleaje incidente es reflejado por el contorno exterior del molo de protección y los alrededores del puerto. También se observa el fenómeno de difracción en el sector del cabezo del molo y la forma en que el oleaje ingresa a la dársena.

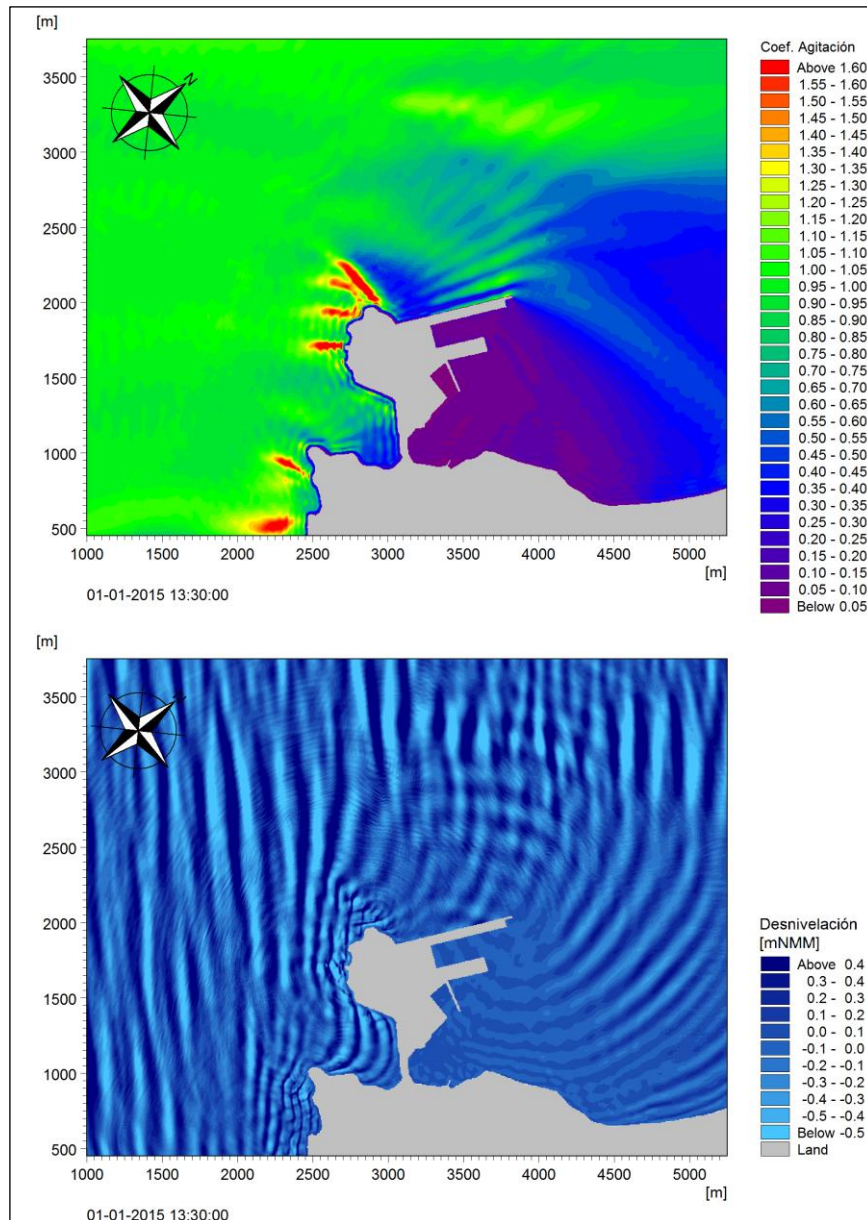


Figura 6.9: Resultados típicos del modelo numérico para la situación actual. $H_{m0}=1.0$ [m], $T_P=14$ [s], $MWD=220$ [deg]. Diagrama de agitación de oleaje (panel superior). Diagrama de desnivelación instantánea (panel inferior). (Fuente: Elaboración propia).

6.3.1.1 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Se generaron funciones de transferencia para las 16 condiciones de oleaje simuladas mediante MIKE 21 BW. Con éstas se transfirió el oleaje desde el P_0 hasta los cinco nodos de extracción.

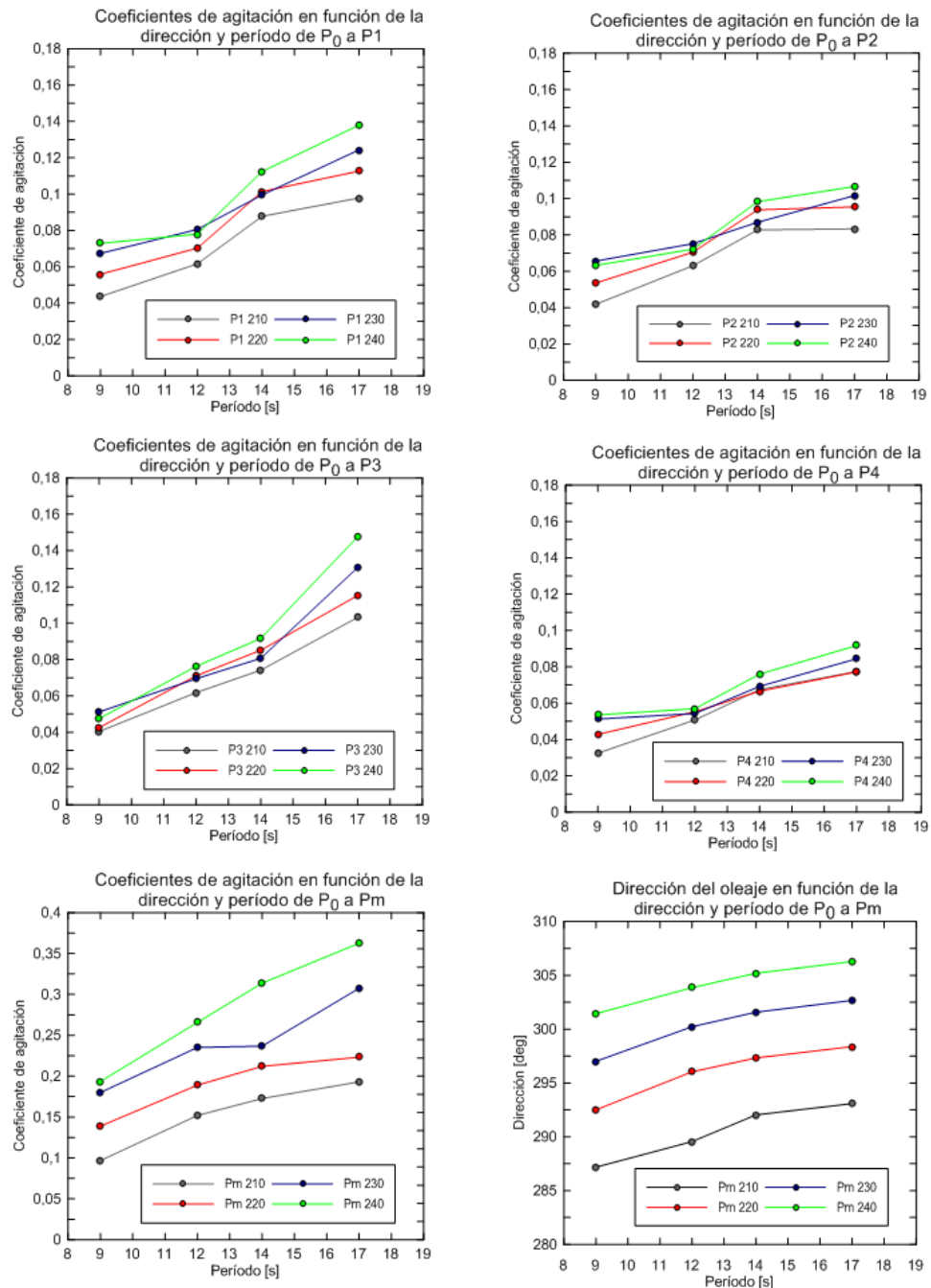


Figura 6.10: Funciones de transferencia desde el Nodo P_0 hasta P1, P2, P3, P4 y Pm. (Fuente: Elaboración propia).

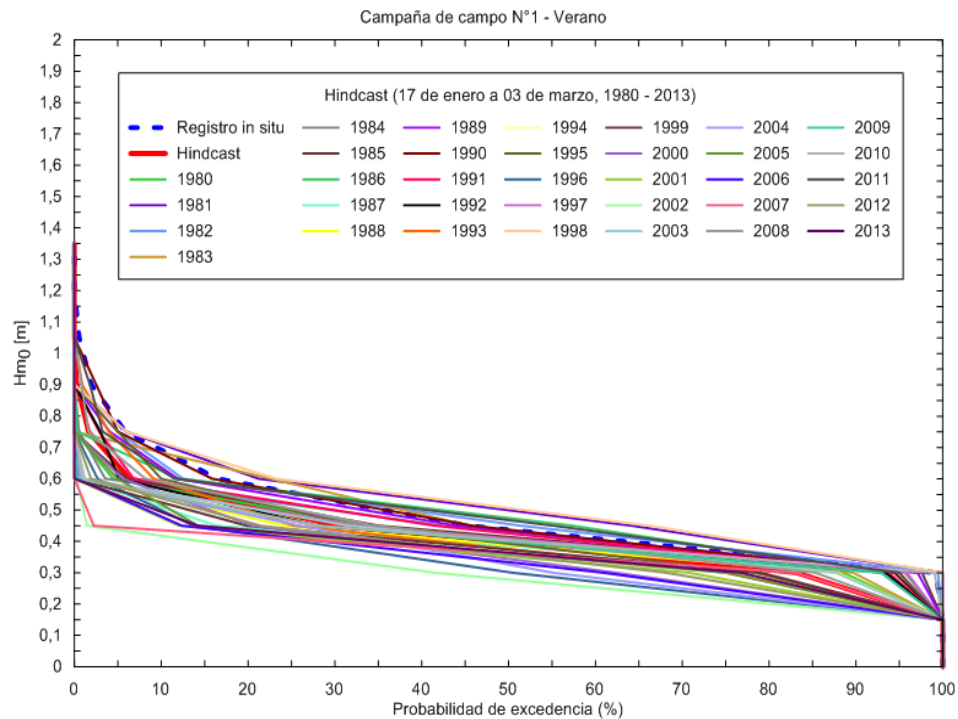
Las funciones de transferencia permiten obtener el coeficiente de transformación de altura (altura de ola en el nodo de interés dividida por la altura de ola en P_0) para cada punto analizado y con ello transferir el oleaje a cada nodo de extracción.

La dirección de oleaje en el nodo P_m fue determinado mediante la herramienta de postproceso *Ws Directional Wave Analysis* contenida en MIKE ZERO. Cualquier mención a la dirección del oleaje en los nodos P1, P2, P3 y P4 no presenta sentido debido que al interior de la dársena las reflexiones hacen que las direcciones sean caóticas.

6.3.1.2 VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

En la simulación numérica el término validación corresponde al proceso donde se verifican los supuestos y modificaciones aplicadas en el modelo numérico. Este proceso se realizó de acuerdo a lo indicado en el instructivo SHOA, Pub. N°3201 y se contó con información oceanográfica de dos campañas (verano e invierno 2015, ver punto 5.2.1).

Para validar el modelo numérico, y cuantificar su bondad, se presenta la comparación estadística entre los parámetros de resumen más relevantes y los datos de oleaje medidos in situ. Inicialmente, se construyen curvas de excedencia con los datos de altura significativa de la campaña de verano e invierno para los mismos períodos de tiempo de la base de datos transferida desde el Nodo P_0 hasta el Nodo P_m , estas se presentan en la Figura 6.11 y Figura 6.12. Para completar la información de validación, se entregan algunos valores estadísticos para los registros de oleaje in situ de la campaña verano e invierno, y el promedio de la estadística para los mismos períodos de tiempo.



**Figura 6.11: Curvas de excedencia H_{m0} [m] – Campaña verano.
 (Fuente: Elaboración propia).**

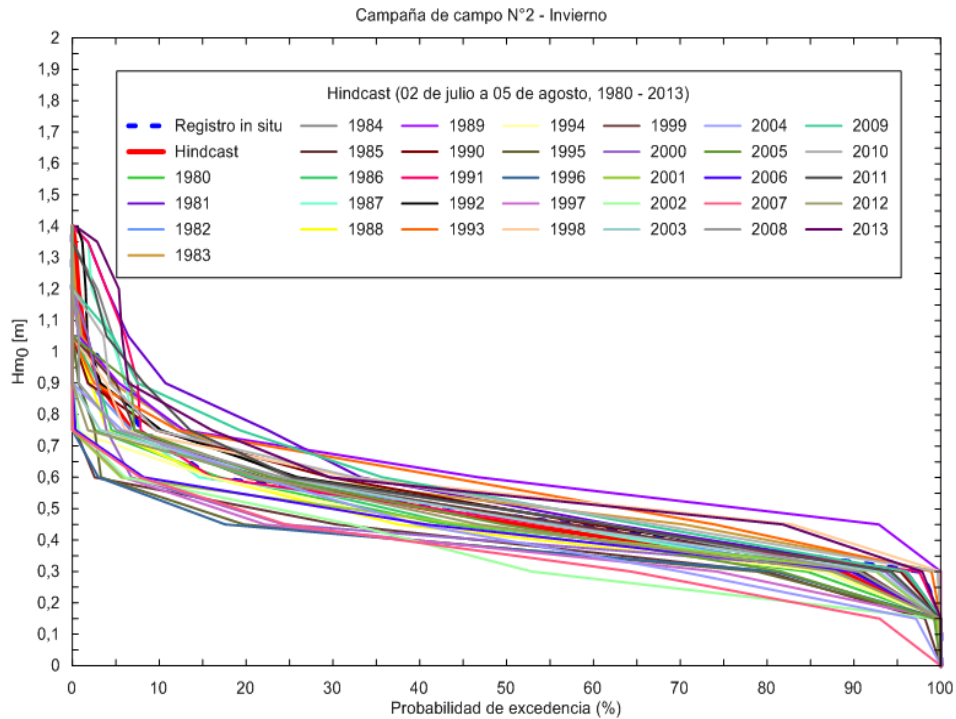


Figura 6.12: Curvas de excedencia H_{m_0} [m] – Campaña invierno.
 (Fuente: Elaboración propia).

En la Tabla 6.5 se observa que el valor promedio de alturas de olas (H_{m_0}), registrado en la campaña verano e invierno, difieren entre 8 y 1 [cm] con respecto al hindcast histórico de los períodos equivalentes de tiempo. Si bien la estimación es consistente, representa solamente un mes de la base datos para ambas estaciones.

H_{m_0} [m]	CAMPAÑA VERANO		CAMPAÑA INVIERNO	
	REGISTRO IN SITU 18/01 a 03/03 2015	HINDCAST 18/01 a 03/03 1980 a 2013	REGISTRO IN SITU 02/07 a 05/08 2015	HINDCAST 02/07 a 05/08 1980 a 2013
Número de datos	358	11424	274	9649
Máximo	1.10	0.99	1.17	1.54
Mínimo	0.26	0.18	0.28	0.11
Promedio	0.48	0.40	0.49	0.48
Desv. estándar	0.14	0.12	0.16	0.18
Percentil 25%	0.38	0.32	0.39	0.36
Percentil 50%	0.43	0.39	0.46	0.45
Percentil 75%	0.53	0.47	0.52	0.56

Tabla 6.5: Parámetros estadísticos de altura de ola (H_{m_0} [m]).
 (Fuente: Elaboración propia).

El valor promedio de dirección media (MWD) registrada para verano e invierno difiere en 8 y 7° con el valor histórico para los mismos períodos de tiempo de acuerdo a lo indicado en la Tabla 6.6, sin embargo, llama la atención la alta desviación estándar de las direcciones registradas in situ.

MWD [deg]	CAMPAÑA VERANO		CAMPAÑA INVIERNO	
	REGISTRO IN SITU	HINDCAST	REGISTRO IN SITU	HINDCAST
	18/01 a 03/03 2015	18/01 a 03/03 1980 a 2013	02/07 a 05/08 2015	02/07 a 05/08 1980 a 2013
Número de datos	358	11424	274	9649
Máximo	337	305	325	294
Mínimo	273	290	280	287
Promedio	307	299	298	291
Desv. estándar	11	3	6	1
Percentil 25%	301	297	293	290
Percentil 50%	307	299	298	291
Percentil 75%	314	301	301	291

Tabla 6.6: Parámetros estadísticos de dirección media de ola (MWD [deg]).
 (Fuente: Elaboración propia).

Finalmente, la Tabla 6.7 presenta la comparación de parámetros estadísticos para el período peak (T_P). Los valores promedios de las campañas de verano e invierno difieren en 3.32 y 2.40 [s] con respecto al promedio histórico de los períodos tiempo equivalentes.

T_P [s]	CAMPAÑA VERANO		CAMPAÑA INVIERNO	
	REGISTRO IN SITU	HINDCAST	REGISTRO IN SITU	HINDCAST
	18/01 a 03/03 2015	18/01 a 03/03 1980 a 2013	02/07 a 05/08 2015	02/07 a 05/08 1980 a 2013
Número de datos	358	11424	274	9649
Máximo	23.10	21.07	18.20	21.07
Mínimo	10.20	7.10	11.60	6.58
Promedio	15.46	12.14	14.82	12.42
Desviación estándar	1.90	3.49	2.04	2.01
Percentil 25%	15.00	10.79	14.20	11.21
Percentil 50%	15.00	11.80	14.20	12.39
Percentil 75%	17.00	13.50	14.20	13.67

Tabla 6.7: Parámetros estadísticos de período peak de ola (T_P [s]).
 (Fuente: Elaboración propia).

Se concluye que los resultados obtenidos mediante las simulaciones numéricas poseen un alto grado de similitud con lo registrado en terreno, por lo cual se validó el modelo numérico y se procedió a explotar la herramienta numérica para los escenarios y casos a analizar.

6.3.1.3 COEFICIENTES DE AGITACIÓN EN SITIOS DE ATRAQUE

En la Figura 6.13 se presentan los coeficientes de agitación (K_a) obtenidos para cada sitio existente del Puerto de Iquique.

En general, los menores valores -para los cuatro nodos- están asociados al período peak de 9 [s] mientras que las mayores magnitudes se presentan para 17 [s]. Los menores coeficientes de agitación están asociados a la dirección 210°, debido al abrigo del puerto a esta dirección, mientras que los máximos se presentan en el Sitio 3 para la dirección 240° y período 17 [s], alcanzando un K_a de 0.15.

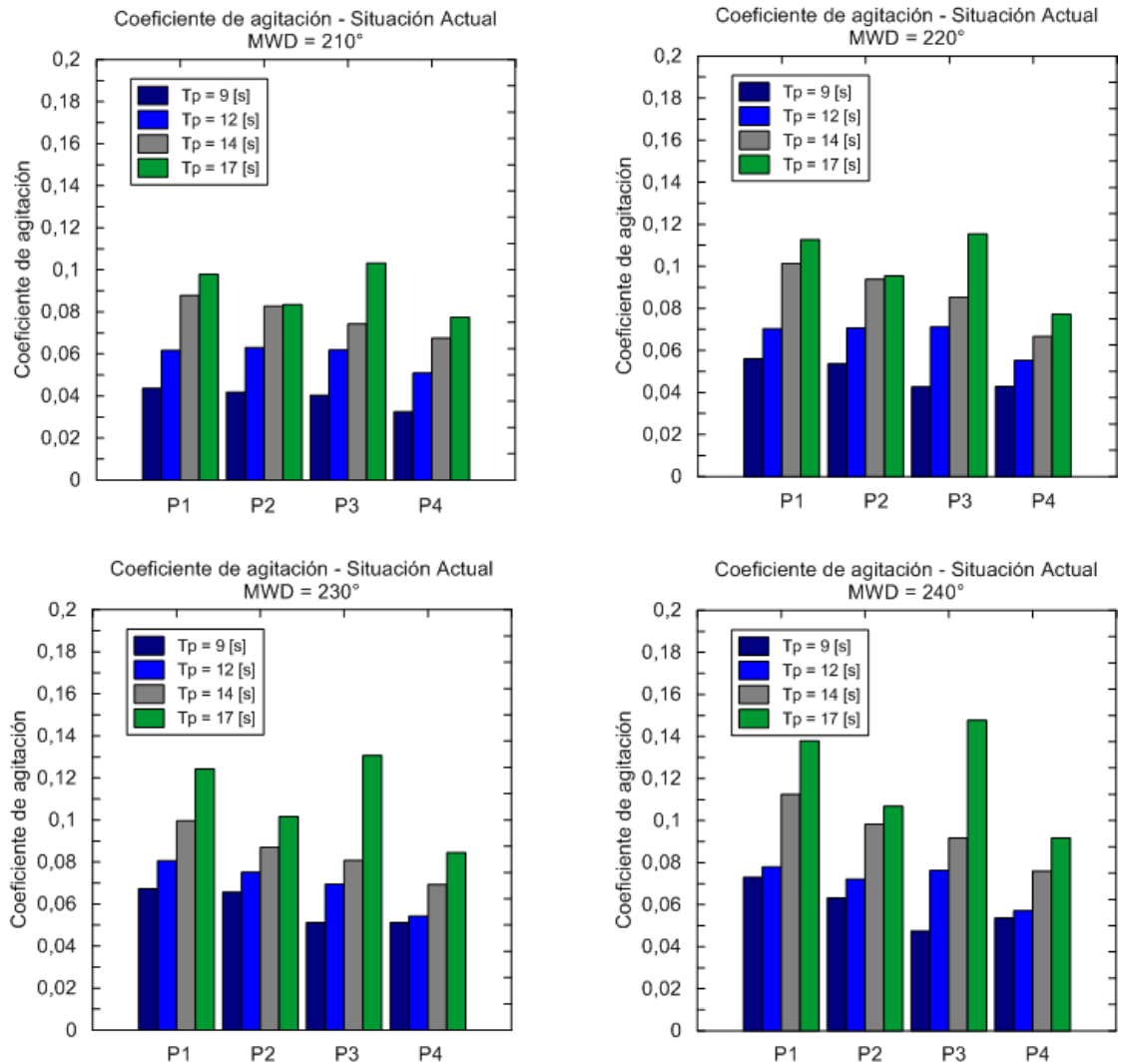


Figura 6.13: Coeficientes de agitación para la situación actual, nodos P1, P2, P3 y P4. (Fuente: Elaboración propia).

6.3.1.4 CLIMA DE OLAJE OPERACIONAL

Realizada la validación del modelo numérico y obtenidos los coeficientes de agitación, se transfirió el clima de oleaje operacional desde el nodo P₀ hasta los nodos P1, P2, P3 y P4. Los resultados se presentan a través de tablas bivariadas (Tabla 6.8 y Tabla 6.9) y de manera gráfica mediante curvas de excedencia de altura de ola en la Figura 6.14. La distribución de oleaje se realiza en términos de la altura significativa (H_{m0}) y período peak (T_p). Considerando:

- A (%): Porcentaje de ocurrencia para cada intervalo.
- C (%): Porcentaje de excedencia para cada intervalo.

Nodo P1 Sitio 1		T _P [s]											A (%)	C (%)
		4.0 - 6.0	6.0 - 8.0	8.0 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20	20 - 22	22 - 24	+ 24		
Hm ₀ [m]	0.0 - 0.15	0.03	1.16	7.91	23.29	1.84	0.19	0.07	0.01	0.00			34.49	100
	0.15 - 0.30		0.00	1.01	10.19	34.95	7.67	2.21	0.53	0.04	0.00		56.60	65.51
	0.30 - 0.45					3.00	4.34	0.86	0.15	0.02			8.38	8.91
	0.45 - 0.60					0.01	0.34	0.15	0.01				0.51	0.52
	0.60 - 0.75						0.01	0.01					0.01	0.01
	0.75 - 0.90												0.00	0.00
	+ 0.90												0.00	0.00
A (%)		0.03	1.16	8.91	33.49	39.80	12.55	3.30	0.70	0.06	0.00	0.00	100	
C (%)		100	99.97	98.81	89.90	56.41	16.61	4.06	0.76	0.06	0.00	0.00		

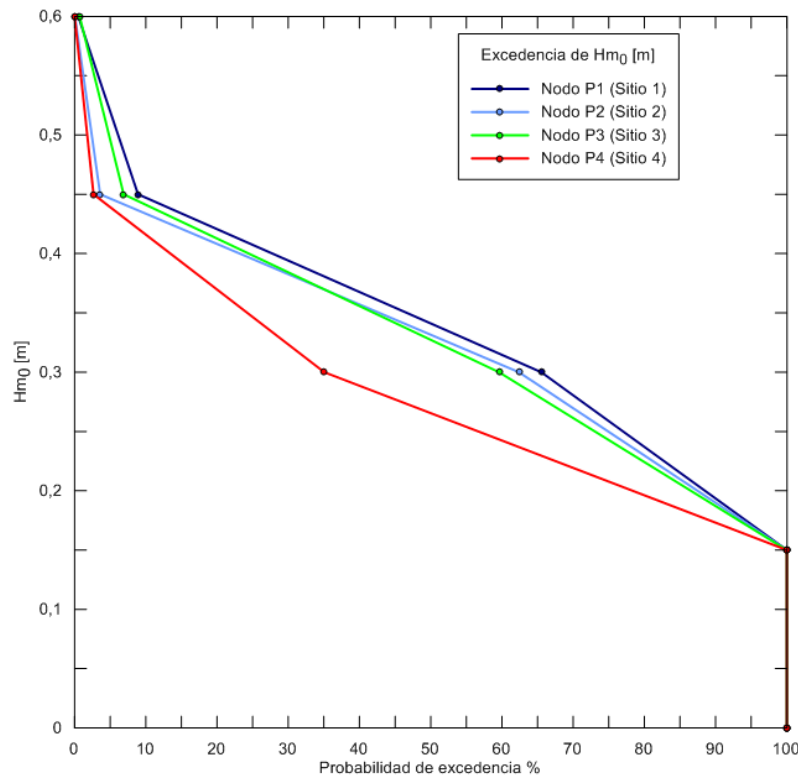
Nodo P2 Sitio 2		T _P [s]											A (%)	C (%)
		4.0 - 6.0	6.0 - 8.0	8.0 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20	20 - 22	22 - 24	+ 24		
Hm ₀ [m]	0.0 - 0.15	0.03	1.16	7.91	23.83	3.56	0.83	0.25	0.04	0.01			37.62	100
	0.15 - 0.30		0.00	1.00	9.66	35.12	9.81	2.57	0.59	0.04	0.00		58.80	62.38
	0.30 - 0.45					1.12	1.88	0.46	0.06	0.01			3.53	3.58
	0.45 - 0.60						0.03	0.02	0.00				0.05	0.05
	0.60 - 0.75												0.00	0.00
	0.75 - 0.90												0.00	0.00
	+ 0.90												0.00	0.00
A (%)		0.03	1.16	8.91	33.49	39.80	12.55	3.30	0.70	0.06	0.00	0.00	100	
C (%)		100	99.97	98.81	89.90	56.41	16.61	4.06	0.76	0.06	0.00	0.00		

Nodo P3 Sitio 3		T _P [s]											A (%)	C (%)
		4.0 - 6.0	6.0 - 8.0	8.0 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20	20 - 22	22 - 24	+ 24		
Hm ₀ [m]	0.0 - 0.15	0.03	1.16	7.98	24.34	6.71	0.14	0.04		0.00			40.41	100
	0.15 - 0.30			0.93	9.14	32.81	7.21	2.07	0.50	0.04	0.00		52.70	59.59
	0.30 - 0.45					0.28	4.71	0.98	0.19	0.02			6.18	6.89
	0.45 - 0.60						0.48	0.18	0.02	0.00			0.68	0.71
	0.60 - 0.75						0.02	0.01					0.03	0.03
	0.75 - 0.90												0.00	0.00
	+ 0.90												0.00	0.00
A (%)		0.03	1.16	8.91	33.49	39.80	12.55	3.30	0.70	0.06	0.00	0.00	100	
C (%)		100	99.97	98.81	89.90	56.41	16.61	4.06	0.76	0.06	0.00	0.00		

**Tabla 6.8: Tablas bivariadas Hm₀ v/s T_P para nodos P1, P2 y P3.
 (Fuente: Elaboración propia).**

Nodo P4 Sitio 4		T _P [s]											A (%)	C (%)
		4.0 - 6.0	6.0 - 8.0	8.0 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20	20 - 22	22 - 24	+ 24		
Hm ₀ [m]	0.0 - 0.15	0.03	1.16	8.81	32.37	18.95	2.62	0.80	0.19	0.02			64.95	100
	0.15 - 0.30			0.10	1.11	20.84	9.49	2.32	0.49	0.04	0.00		34.40	35.05
	0.30 - 0.45					0.01	0.44	0.18	0.02	0.00			0.65	0.65
	0.45 - 0.60												0.00	0.00
	0.60 - 0.75												0.00	0.00
	0.75 - 0.90												0.00	0.00
	+ 0.90												0.00	0.00
A (%)	0.03	1.16	8.91	33.49	39.80	12.55	3.30	0.70	0.06	0.00	0.00	100		
C (%)	100	99.97	98.81	89.90	56.41	16.61	4.06	0.76	0.06	0.00	0.00			

**Tabla 6.9: Tablas bivariables Hm₀ v/s T_P para nodo P4.
 (Fuente: Elaboración propia).**



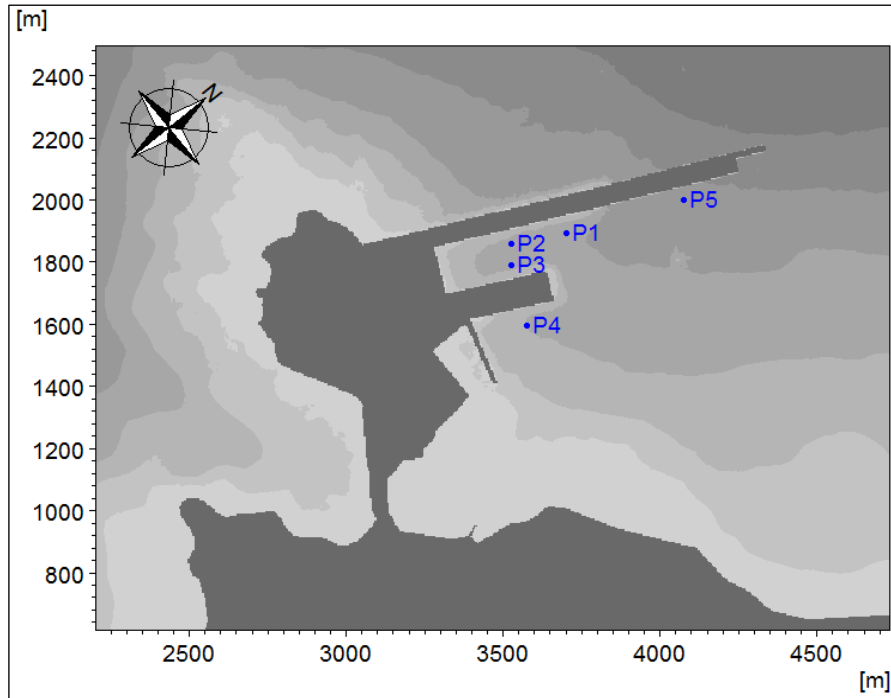
**Figura 6.14: Curvas de excedencia de altura de ola (Hm₀ [m]) en nodos P1, P2, P3 y P4.
 (Fuente: Elaboración propia).**

El sitio 4 presenta las menores alturas en relación a los restantes sitios, teniendo asociado una probabilidad de 0.65% que las alturas de olas excedan los 0.45 [m]. El Sitio 3 es el que presenta las mayores alturas, teniendo asociado una probabilidad de 0.03% que se excedan los 0.75 [m] de altura en éste sitio. Se debe tener presente que las alturas de oleaje al interior del puerto son menores.

6.3.2 RESULTADOS ESCENARIO DE EXPANSIÓN

A partir de la validación del modelo numérico presentado en el punto 6.3.1.2, se procedió a explotar la herramienta numérica simulando el escenario denominado expansión, correspondiente a la construcción del Frente N°3; éste se simuló para las dos alternativas de estructuración tipológicas, según lo presentado anteriormente.

Para las alternativas 1 y 2 se extrajeron resultados en cinco sensores numéricos, de los cuales cuatro corresponden a los sitios de atraque existentes y uno al proyectado. La ubicación de los nodos y coordenadas se presentan en la Figura 6.15 y Tabla 6.10.



**Figura 6.15: Ubicación de los sensores numéricos para el escenario de expansión.
 (Fuente: Elaboración propia).**

EMPLAZAMIENTO	SENSOR NUMÉRICO	COORDENADAS UTM (*)		COORDENADAS EN GRILLA		PROFUNDIDAD [mNRS]
		ESTE	NORTE	X	Y	
Sitio 1	P ₁	379090	7765768	740	379	-16.57
Sitio 2	P ₂	379010	7765596	705	372	-15.59
Sitio 3	P ₃	379086	7765561	705	358	-15.09
Sitio 4	P ₄	379208	7765431	715	319	-14.35
Sitio 5	P ₅	379297	7765998	815	400	-15.42

(*) UTM – WGS'84 Zona 19S.

**Tabla 6.10: Coordenadas de los sensores numéricos para el escenario de expansión.
 (Fuente: Elaboración propia).**

En la Figura 6.16 se presentan ejemplos de diagramas de agitación y desnivelación instantánea, obtenidos con el modelo numérico para las alternativas 1 y 2. La condición de oleaje empleada corresponde a $H_{m0}=1.0$ [m], $T_p=14$ [s] y $MWD=220$ [deg].

Se observa que las condiciones de agitación no inciden mayormente en las dependencias existentes y proyectadas del puerto.

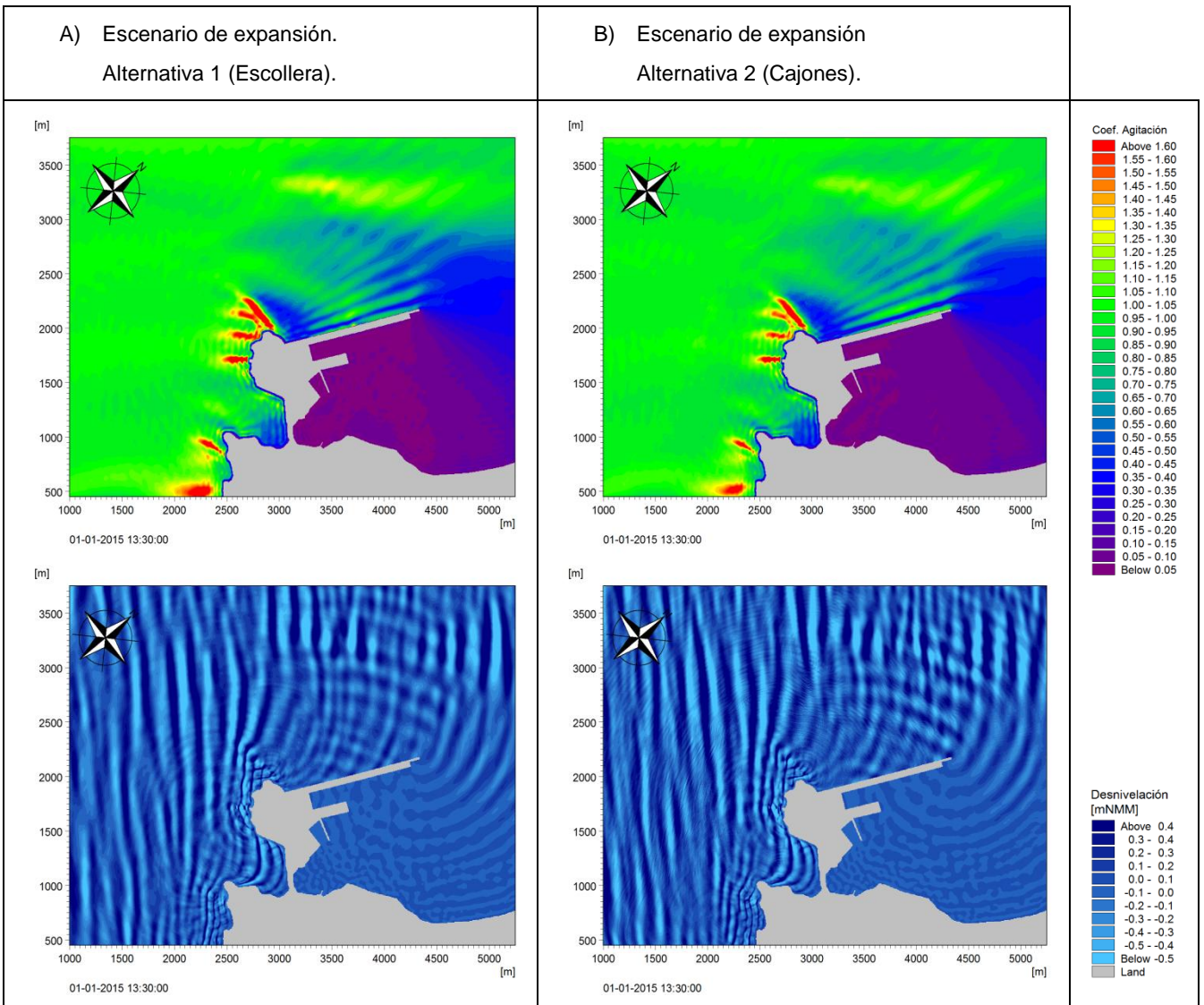


Figura 6.16: Resultados típicos del modelo numérico para escenario de expansión. A) Alternativa 1 (panel izquierdo) y B) Alternativa 2 (panel derecho). $H_{m0}=1.0$ [m], $T_p=14$ [s], $MWD=220$ [deg].

(Fuente: Elaboración propia).

Los coeficientes de agitación obtenidos de las simulaciones de las alternativas 1 y 2 de cada sitio de atraque se encuentran en el Anexo A.

Los resultados del escenario de expansión fueron analizados y se presentan de acuerdo al siguiente orden.

1. RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL SITIO 5: Se inició comparando los coeficientes de agitación obtenidos para el Sitio 5 (Nodo P5) en ambas alternativas.
2. RESULTADOS DEL ESCENARIO DE EXPANSIÓN: Se verificó la variación de la agitación en los actuales sitios de atraque, debido a la construcción del Frente N°3 en ambas alternativas. Para cuantificar lo anterior, se realizó una comparación porcentual de la disminución en la agitación de la alternativa con respecto a la situación actual.
3. CLIMA OPERACIONAL DE OLEAJE: Se caracterizó el oleaje operacional en la alternativa que presentó menores condiciones de agitación en cada sitio existente y proyectado.

6.3.2.1 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL SITIO 5

El Sitio 5 corresponde al nuevo terminal proyectado en la expansión del recinto portuario. La construcción del nuevo frente de atraque se proyectó mediante la tipología de escollera y cajones (alternativas 1 y 2). En la Tabla 6.11 se presentan los coeficientes de agitación obtenidos para el nuevo sitio para ambas alternativas, mientras que la Figura 6.17 corresponde a la comparación entre los resultados obtenidos.

CASOS		ESCENARIO EXPANSIÓN	
MWD [deg]	T _P [s]	P5 - ALTERNATIVA 1 (ESCOLLERA)	P5 - ALTERNATIVA 2 (CAJÓN)
210	9	0.04	0.04
	12	0.05	0.06
	14	0.05	0.07
	17	0.05	0.08
220	9	0.04	0.05
	12	0.05	0.06
	14	0.05	0.07
	17	0.06	0.09
230	9	0.04	0.05
	12	0.05	0.07
	14	0.05	0.07
	17	0.05	0.08
240	9	0.05	0.06
	12	0.05	0.07
	14	0.06	0.08
	17	0.06	0.09

**Tabla 6.11: Coeficientes de agitación del Sitio 5 obtenidos para las alternativas 1 y 2.
 (Fuente: Elaboración propia).**

Los coeficientes de agitación alcanzan un mínimo de 0.04 asociado a un período de 9 [s] en ambas alternativas, y un máximo de 0.09 para la alternativa 2 y 0.06 para la Alternativa 1, asociado a períodos de 17 [s]. En general, el incremento del período implica un oleaje más energético, lo cual conduce a un mayor coeficiente de agitación.

La Figura 6.17 presenta la comparación gráfica entre los coeficientes de agitación obtenidos para el Sitio 5 (Nodo P5) en ambas alternativas.

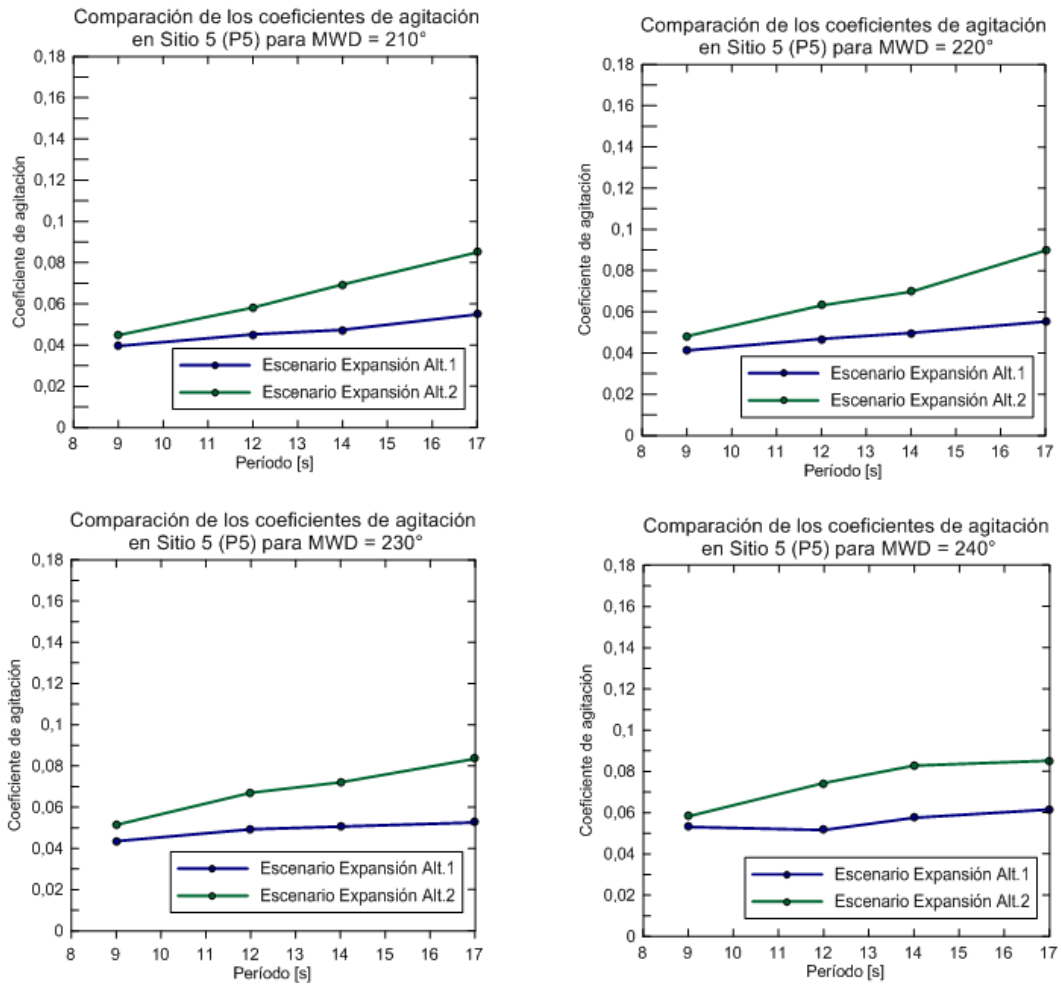


Figura 6.17: Comparación de los coeficientes de agitación obtenidos para el escenario de expansión en el Sitio 5 para alternativas 1 y 2. (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 6.17 se observa -principalmente- que las condiciones de agitación son menores para la estructuración de escollera, en comparación a los cajones. Sin embargo, ambas alternativas presentan coeficientes bajos, siempre menores a 0.1; es decir, el oleaje incidente en el Sitio 5 se presenta con un 10% de la altura existente afuera del recinto portuario (Nodo P₀).

6.3.2.2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ESCENARIO DE EXPANSIÓN

Para determinar la variación inducida por las alternativas en la agitación actual, se compararon los resultados obtenidos en cada sitio de atraque existente mediante sensores numéricos, de acuerdo a la Figura 6.8. Se cuantificó porcentualmente para los 16 escenarios hidrodinámicos simulados mediante la Ecuación (6.8).

$$\Delta k_i = \frac{k_{ESCENARIO_i} - k_{ST}}{k_{ST}} \cdot 100 \quad , i = 1, 2 \dots n \quad \text{Ecuación (6.8)}$$

Donde

$k_{ESCENARIO_i}$: Coeficiente de agitación de escenario analizado.

k_{ST} : Coeficiente de agitación de la situación actual.

Los resultados indican el porcentaje de aumento (+) o disminución (-) del coeficiente de agitación de cada alternativa, con respecto a la situación actual. Por ejemplo, un Δk_i de -100% indicaría la disminución completa del oleaje; sin embargo, ninguna escollera o tipología es perfecta. Cero por ciento indica que no existe atenuación o aumento del oleaje. Finalmente, los valores positivos responden a un aumento de la agitación con respecto a la situación actual; es decir, la tipología está amplificando la condición de altura de ola.

A modo de ejemplo, y de acuerdo a la información de oleaje operacional en el nodo de acople P_0 , la dirección 220° asociado a períodos 12 y 14 [s] son los casos de mayor ocurrencia. La Figura 6.18 presenta un esquema de la variación de la agitación para un caso típico.

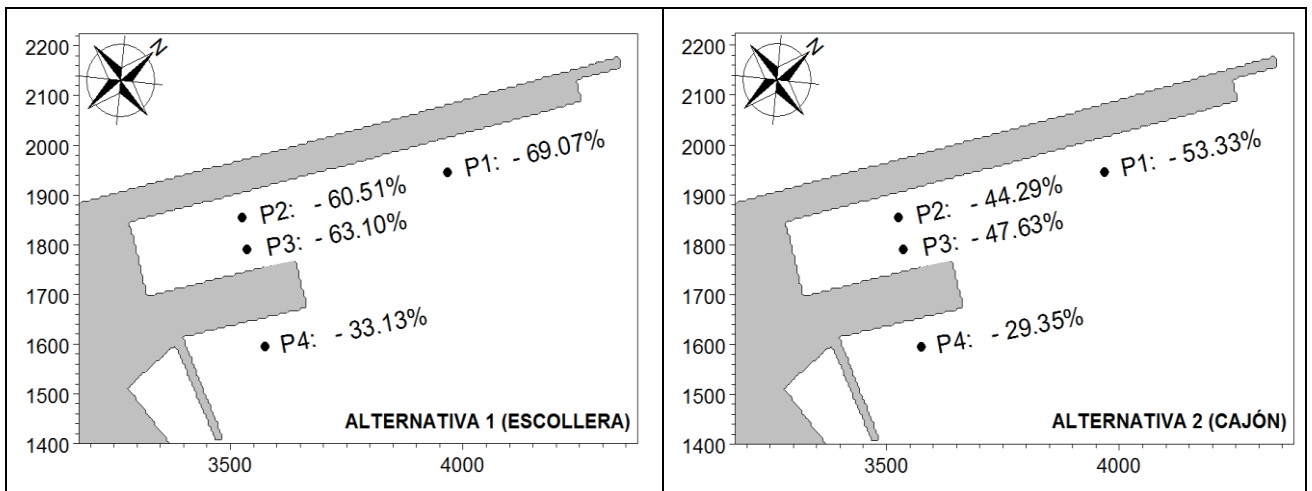


Figura 6.18: Variación porcentual en la agitación de los sitios de atraque entre la alternativa 1 (panel izquierdo) y alternativa 2 (panel derecho) con respecto a la situación actual para la condición hidrodinámica $MWD=220$ [deg] y $T_p=14$ [s]. (Fuente: Elaboración propia).

La Tabla 6.12 presenta las variaciones porcentuales de cada escenario y condición hidrodinámica con respecto a la situación actual.

CASOS		ESCENARIO EXPANSIÓN ALTERNATIVA 1 (ESCOLLERA)				ESCENARIO EXPANSIÓN ALTERNATIVA 2 (CAJÓN)			
MWD [deg]	T _p [s]	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
210	9	-39.09%	-38.53%	-35.89%	-22.37%	-15.09%	-8.25%	-18.50%	-8.51%
	12	-46.15%	-39.70%	-58.82%	-33.24%	-29.31%	-31.19%	-28.78%	-26.56%
	14	-62.55%	-53.31%	-54.19%	-36.95%	-43.39%	-33.64%	-38.07%	-25.84%
	17	-59.41%	-51.68%	-54.02%	-39.56%	-37.09%	-29.06%	-38.44%	-18.44%
220	9	-49.04%	-49.49%	-37.33%	-15.98%	-27.33%	-23.10%	-23.09%	-13.85%
	12	-54.98%	-47.77%	-56.92%	-34.66%	-32.80%	-30.07%	-41.08%	-33.82%
	14	-69.07%	-60.51%	-63.10%	-33.13%	-53.33%	-44.29%	-47.63%	-29.35%
	17	-61.50%	-57.21%	-61.06%	-38.19%	-41.01%	-36.51%	-45.04%	-17.95%
230	9	-55.72%	-54.75%	-39.40%	-29.02%	-41.95%	-29.52%	-23.31%	-25.14%
	12	-59.96%	-52.68%	-51.63%	-29.91%	-41.61%	-36.02%	-30.34%	-32.81%
	14	-67.78%	-55.50%	-56.75%	-35.75%	-51.59%	-36.96%	-39.58%	-31.75%
	17	-69.36%	-56.08%	-65.55%	-39.40%	-52.61%	-39.69%	-53.09%	-24.43%
240	9	-52.52%	-48.84%	-24.12%	-26.23%	-41.25%	-16.66%	-10.74%	-18.60%
	12	-50.29%	-44.85%	-48.51%	-28.41%	-27.31%	-11.68%	-34.74%	-18.11%
	14	-67.43%	-58.27%	-57.93%	-39.55%	-50.69%	-36.03%	-43.91%	-28.83%
	17	-68.51%	-59.06%	-67.66%	-40.17%	-53.34%	-41.58%	-56.46%	-29.94%

Tabla 6.12: Variación porcentual en la agitación de cada escenario con respecto a la situación actual. (Fuente: Elaboración propia).

En general, los resultados confirman el análisis intuitivo, en el sentido que el alargue del molo de abrigo mejora la actual agitación de los sitios de atraque. Con respecto a la comparación porcentual, la alternativa 1 genera una atenuación del 16.19% con respecto a la alternativa 2, y un 48.70% comparado a la situación actual del Puerto de Iquique.

La construcción del Frente N°3 conlleva a una mejora de la agitación en todos los sitios de atraque. El sitio que experimenta la mayor atenuación es el Sitio 1 (P1), independiente de la tipología empleada. Con la alternativa 1 se obtiene una disminución de 58.34% y con la alternativa 2 un 39.98%. El Sitio 4 (P4) presenta los menores cambios, con un 32.66% para la alternativa 1 y 24.00% para la alternativa 2.

En general, la alternativa 1 genera mejores condiciones de agitación en relación a la segunda debido a los menores coeficientes de reflexión asociados al uso de escollera con respecto a cajones. No obstante, se debe considerar que la agitación actual del puerto es baja, y que -independiente de la alternativa de expansión a emplear- el abrigo para todos los sitios aumentará.

Finalmente, se concluye que la alternativa 1 presenta la menor agitación para el sitio proyectado y -además- genera la atenuación mayor de la agitación en todos los sitios existentes. Lo anterior se debe a los menores coeficientes de reflexión y mayores efectos disipativos asociados al uso de escollera con respecto a cajones.

6.3.2.3 CLIMA OPERACIONAL DE OLEAJE – ESCENARIO DE EXPANSIÓN - ALTERNATIVA 1

Se caracterizó el clima operacional de oleaje en todos los sitios existentes y proyectados para la alternativa 1, considerando los coeficientes de agitación obtenidos en cada sitio y el clima de olas de 34 años, existente en el Nodo P₀.

De manera análoga al punto 6.3.1.4, los resultados son presentados mediante tablas bivariantes (Tabla 6.13 y Tabla 6.14) y de manera gráfica mediante curvas de excedencia de altura de ola en la Figura 6.19 en términos de la altura significativa (H_{m0}) y período peak (T_P). Considerando:

A (%): Porcentaje de ocurrencia para cada intervalo.

C (%): Porcentaje de excedencia.

Nodo P1 Sitio 1		T_P [s]								A (%)	C (%)
		4.0 - 6.0	6.0 - 8.0	8.0 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	+18		
H_{m0} [m]	0.0 - 0.15	0.03	1.16	8.91	33.49	39.80	11.88	3.11	0.74	99.12	100
	0.15 - 0.30					0.01	0.67	0.19	0.02	0.88	0.88
	0.30 - 0.45									0.00	0.00
	0.45 - 0.60									0.00	0.00
	0.60 - 0.75									0.00	0.00
	0.75 - 0.90									0.00	0.00
	+ 0.90									0.00	0.00
A (%)		0.03	1.16	8.91	33.49	39.80	12.55	3.30	0.76	100.00	
C (%)		100.00	99.97	98.81	89.90	56.41	16.61	4.06	0.76		

Nodo P2 Sitio 2		T_P [s]								A (%)	C (%)
		4.0 - 6.0	6.0 - 8.0	8.0 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	+18		
H_{m0} [m]	0.0 - 0.15	0.03	1.16	8.91	33.49	39.75	11.77	3.01	0.73	98.85	100
	0.15 - 0.30					0.05	0.78	0.29	0.04	1.15	1.15
	0.30 - 0.45									0.00	0.00
	0.45 - 0.60									0.00	0.00
	0.60 - 0.75									0.00	0.00
	0.75 - 0.90									0.00	0.00
	+ 0.90									0.00	0.00
A (%)		0.03	1.16	8.91	33.49	39.80	12.55	3.30	0.76	100.00	
C (%)		100.00	99.97	98.81	89.90	56.41	16.61	4.06	0.76		

Nodo P3 Sitio 3		T_P [s]								A (%)	C (%)
		4.0 - 6.0	6.0 - 8.0	8.0 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	+18		
H_{m0} [m]	0.0 - 0.15	0.03	1.16	8.91	33.49	39.79	11.30	2.94	0.72	98.33	100
	0.15 - 0.30					0.01	1.25	0.36	0.04	1.67	1.67
	0.30 - 0.45									0.00	0.00
	0.45 - 0.60									0.00	0.00
	0.60 - 0.75									0.00	0.00
	0.75 - 0.90									0.00	0.00
	+ 0.90									0.00	0.00
A (%)		0.03	1.16	8.91	33.49	39.80	12.55	3.30	0.76	100.00	
C (%)		100.00	99.97	98.81	89.90	56.41	16.61	4.06	0.76		

**Tabla 6.13: Tablas bivariantes H_{m0} v/s T_P para Nodos P1, P2 y P3.
 (Fuente: Elaboración propia).**

Nodo P4 Sitio 4		T _P [s]								A (%)	C (%)
		4.0 - 6.0	6.0 - 8.0	8.0 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	+18		
H _{m0} [m]	0.0 - 0.15	0.03	1.16	8.91	33.49	38.89	10.31	2.77	0.69	96.25	100
	0.15 - 0.30					0.91	2.24	0.52	0.08	3.75	3.75
	0.30 - 0.45									0.00	0.00
	0.45 - 0.60									0.00	0.00
	0.60 - 0.75									0.00	0.00
	0.75 - 0.90									0.00	0.00
	+ 0.90									0.00	0.00
A (%)		0.03	1.16	8.91	33.49	39.80	12.55	3.30	0.76	100.00	
C (%)		100.00	99.97	98.81	89.90	56.41	16.61	4.06	0.76		

Nodo P5 Sitio 5		T _P [s]								A (%)	C (%)
		4.0 - 6.0	6.0 - 8.0	8.0 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	+18		
H _{m0} [m]	0.0 - 0.15	0.03	1.16	8.90	33.36	36.53	8.58	2.50	0.64	91.71	100
	0.15 - 0.30			0.01	0.12	3.27	3.97	0.79	0.13	8.29	8.29
	0.30 - 0.45									0.00	0.00
	0.45 - 0.60									0.00	0.00
	0.60 - 0.75									0.00	0.00
	0.75 - 0.90									0.00	0.00
	+ 0.90									0.00	0.00
A (%)		0.03	1.16	8.91	33.49	39.80	12.55	3.30	0.76	100.00	
C (%)		100.00	99.97	98.81	89.90	56.41	16.61	4.06	0.76		

Tabla 6.14: Tablas bivariabes H_{m0} v/s T_P para Nodos P4 y P5.
 (Fuente: Elaboración propia).

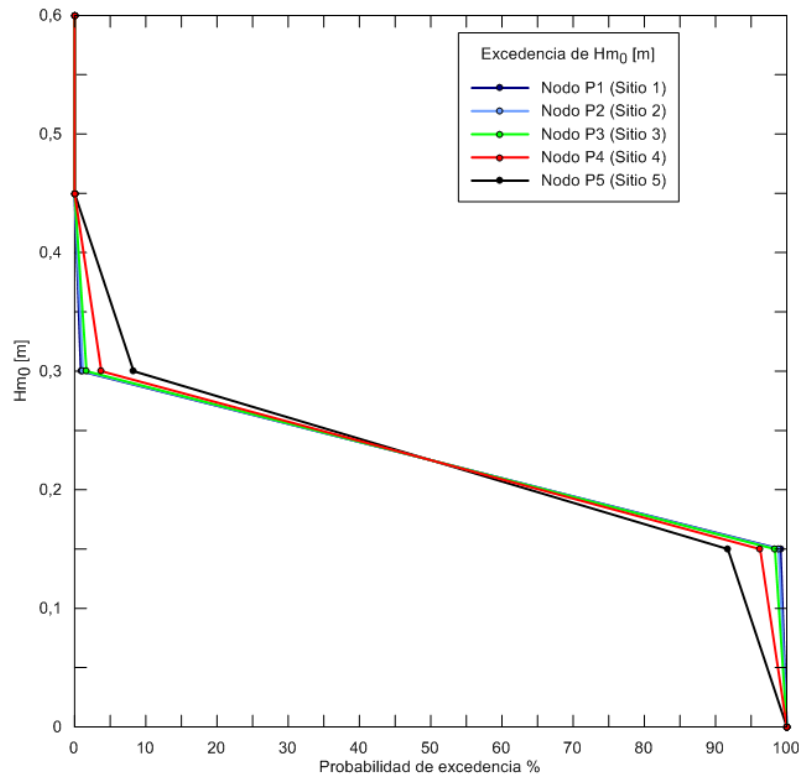


Figura 6.19: Curvas de excedencia de altura de ola (H_{m0} [m]) en nodos P1, P2, P3, P4 y P5.
 (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que los sitios 1, 2 y 3 presentan las menores alturas en relación a los restantes sitios, teniendo asociado una probabilidad menor de 1.67% que las alturas de olas excedan los 0.30 [m]. El Sitio 5 presenta las mayores alturas, teniendo asociado una probabilidad de 8.29% que se excedan los 0.30 [m] de altura en éste sitio. Se debe tener presente que a pesar que el nuevo sitio presente las mayores alturas, éstas son bajas.

6.4 MODELO NUMÉRICO DE RESONANCIA

El presente capítulo corresponde a la estimación de los períodos naturales del Puerto de Iquique a través de dos metodologías:

1. Estimación preliminar de los períodos naturales (ecuaciones paramétricas).
2. Simulación numérica de un espectro de ruido blanco (*white noise*).

La primera corresponde a una estimación preliminar de los períodos naturales mientras que la segunda se refiere al empleo de herramientas numéricas para la estimación de las frecuencias naturales. Los procedimientos empleados para esta última se realizaron mediante técnicas en el estado del arte, siguiendo las recomendaciones de Gierlevse et al. (2001) y Kofoed-Hansen et al. (2005).

6.4.1 ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE LOS PERÍODOS NATURALES

A continuación se presenta el análisis simplificado para obtener los períodos naturales del Puerto de Iquique, esto se realizó empleando las ecuaciones paramétricas presentadas en la sección 4.3.4.1. La metodología considera simplificaciones e idealizaciones, como -por ejemplo- una profundidad promedio constante y dimensiones en planta. Este procedimiento teórico debe ser considerado como una estimación preliminar, debido a que el fenómeno es más complejo y una correcta caracterización se logra mediante simulación numérica de un espectro de ruido blanco. La Figura 6.20 presenta las dimensiones en planta y la Tabla 6.15 los períodos naturales obtenidos.

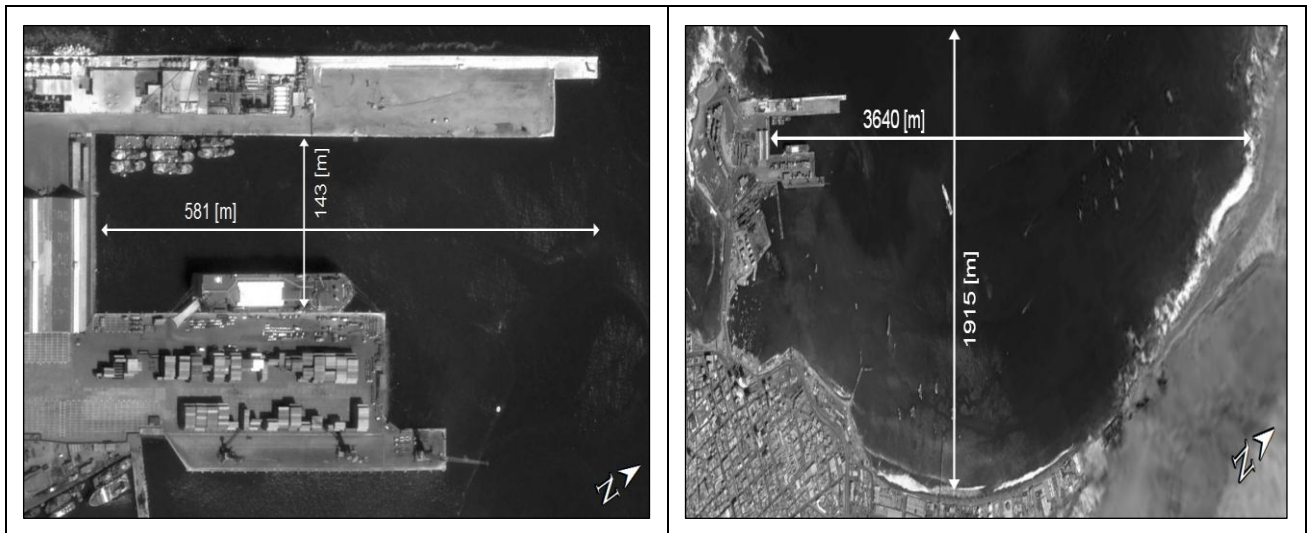


Figura 6.20: Dimensiones en planta de la dársena (panel izquierdo) y bahía (panel derecho) del Puerto de Iquique.
(Fuente: Elaboración propia).

SECTOR	MECANISMO DE ANÁLISIS	PERÍODOS NATURALES [s]			
		T ₀	T ₁	T ₂	T ₃
Dársena	Cuenca abierta - Longitudinal	192	64	38	27
	Cuenca cerrada - Transversal	-	24	12	8
Bahía	Cuenca cerrada - Longitudinal	-	520	260	173
	Cuenca abierta - Transversal	631	210	126	90

Tabla 6.15: Períodos naturales de oscilación obtenidos mediante formulaciones paramétricas. (Fuente: Elaboración propia).

En la Tabla 6.15 se observa que para la dársena generada por el molo de abrigo, se obtuvieron períodos naturales de oscilación comprendidos entre 192 y 27 [s], para los primeros tres modos resonantes longitudinales. Éstos resultados son acordes al rango de ondas largas (30 a 1000 [s]) indicadas en la sección 4.3.2. Sin embargo, los modos transversales no resultan adecuados, debido a los bajos períodos; esto se debe a la limitada dimensión transversal. Por lo anterior, se estimaron los modos resonantes para la bahía.

Los períodos naturales obtenidos para la bahía se encuentran en el rango de períodos de las ondas largas; sin embargo, la idealización de la forma geométrica y de la batimetría carecen de precisión

6.4.2 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN ESPECTRO DE RUIDO BLANCO

6.4.2.1 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Se simularon dos escenarios, de acuerdo al punto 6.2.2. El primero corresponde a la situación actual y el segundo a la construcción del Frente N°3, alternativa 1, debido a que éste presentó resultados más favorables -con respecto a la agitación- al interior de la dársena.

6.4.2.2 PERÍODO DE SIMULACIÓN Y PASO DEL TIEMPO

Debido a que no existen registros de ondas largas en campo, se empleó la simulación numérica de un espectro de ruido blanco (*white noise*) por dos objetivos:

1. Identificar las frecuencias naturales de los sitios de atraque existentes y proyectado.
2. Comparar las frecuencias naturales, obtenidas en la situación actual, con el escenario de expansión, alternativa 1 (tipología talud con escollera de protección).

Las frecuencias del espectro sintético están comprendidas entre 0.001 y 0.033 [Hz] (30 y 1000 [s]), de acuerdo a la clasificación de ondas largas empleada en este estudio. El espectro se impuso en una paleta virtual de generación tipo unidireccional, desde el borde izquierdo de los modelos batimétricos empleados.

El tiempo real de simulación correspondió a 3 horas con un paso de integración temporal de 0.1 [s], el cual fue determinado mediante pruebas de estabilidad y resolución de los resultados obtenidos en relación a la Frecuencia de Nyquist y evitando el efecto de aliasing, a modo de no omitir información relevante del fenómeno estudiado. El intervalo de tiempo empleado es acorde a las recomendaciones de Ota et al. (2010), para simulación de ondas largas, con modelos numéricos basados en ecuaciones de gobierno tipo Boussinesq.

6.5 RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO DE RESONANCIA

Para la situación actual se extrajeron cuatro sensores numéricos, correspondientes a los sitios de atraque existentes, mientras que para el escenario de expansión, alternativa 1, se obtuvieron resultados en cinco nodos de extracción, los primeros cuatro correspondientes a los sitios existentes y uno al proyectado. La Figura 6.21 y Tabla 6.16 presentan la ubicación y coordenadas de los estos.

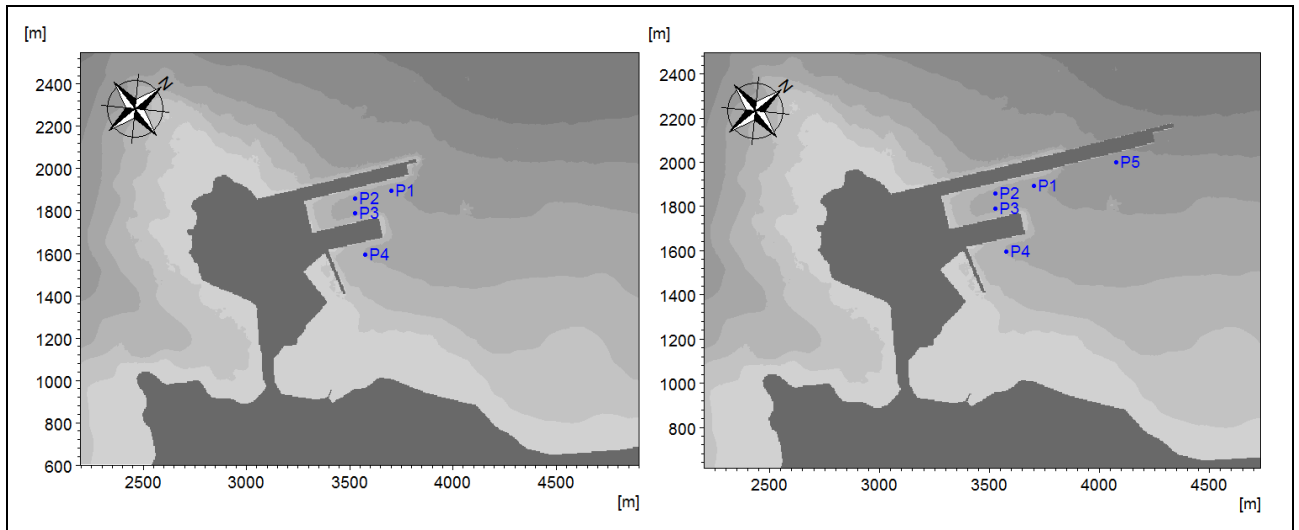


Figura 6.21: Ubicación de los nodos de extracción para la situación actual (panel izquierdo) y escenario de expansión (panel derecho). (Fuente: Elaboración propia).

EMPLAZAMIENTO	SENSOR NUMÉRICO	COORDENADAS UTM		COORDENADAS EN GRILLA		PROFUNDIDAD [mNRS]
		ESTE	NORTE	X	Y	
Sitio 1	P ₁	379090	7765768	740	379	-16.57
Sitio 2	P ₂	379010	7765596	705	372	-15.59
Sitio 3	P ₃	379086	7765561	705	358	-15.09
Sitio 4	P ₄	379208	7765431	715	319	-14.35
Sitio 5	P ₅	379297	7765998	815	400	-15.42

(*) UTM – WGS'84 Zona 19S.

Tabla 6.16: Coordenadas de los nodos de extracción para las simulaciones numéricas mediante espectro de ruido blanco. (Fuente: Elaboración propia).

6.5.1 RESULTADOS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

En la Figura 6.22 se presentan los resultados del espectro de energía para ondas largas de cada sitio de atraque existente.

La frecuencia en que se presenta el mayor peak energético, varía de acuerdo a la localización del sensor numérico y a la distribución de la energía espectral, en cada modo resonante. El sitio 1 se ubica cercano a la frontera abierta (inicio de la dársena), conteniendo menor energía en las bajas frecuencias, en comparación a los que se encuentran cercanos al final de la dársena.

Los sitios 2 y 3 se encuentran próximos entre sí y presentan una distribución energética similar; ambos con peaks en las frecuencias más bajas, resultando coincidente con su ubicación. Por último, el sitio 4 presenta menor energía en las bajas frecuencia, debido a que se ubica cercano al inicio del espigón.

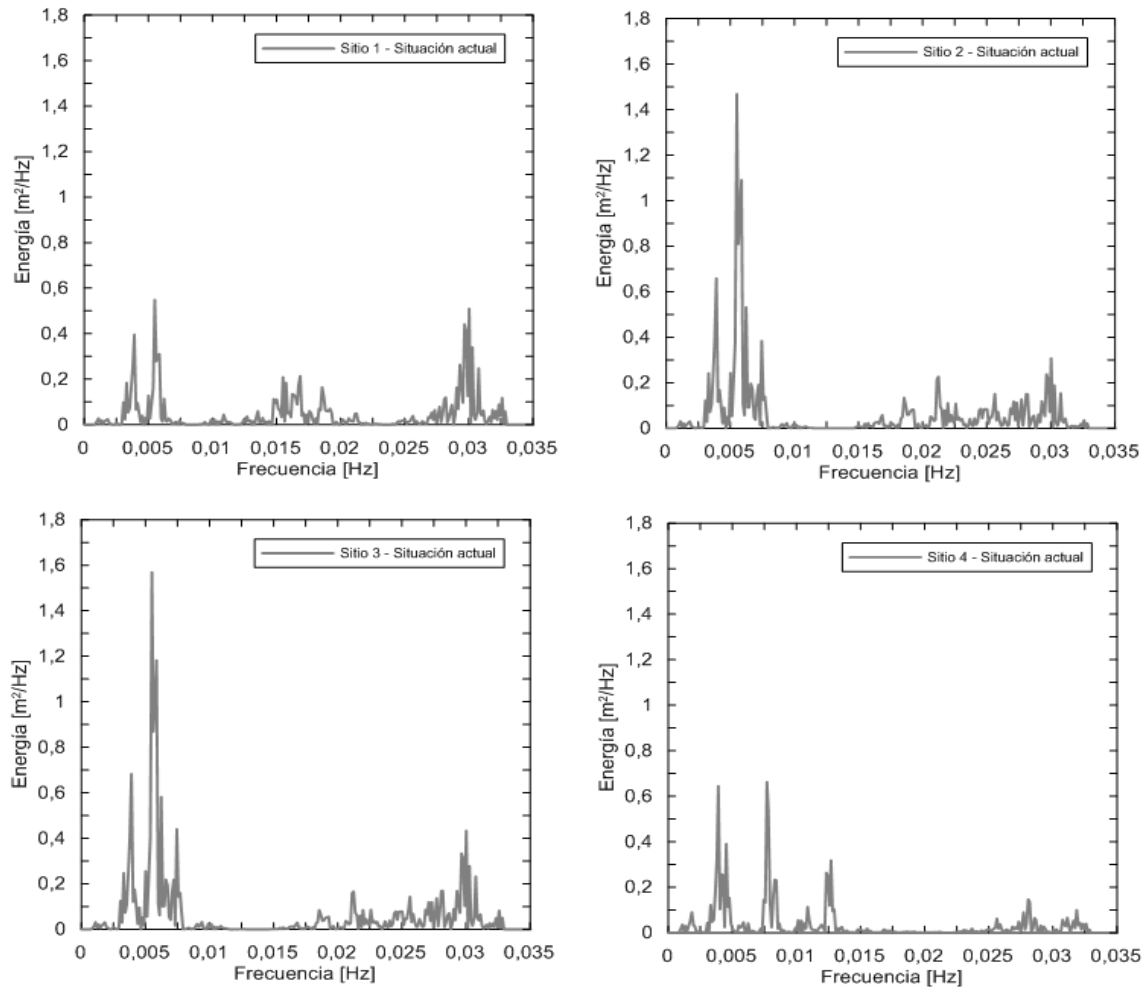


Figura 6.22: Espectros de energía obtenidos de la simulación de ruido blanco en cada sitio de atraque, situación actual.
 (Fuente: Elaboración propia).

La Figura 6.23 presenta de manera compilada los espectros mostrados en la anterior gráfica e identifica -mediante puntos rojos- los peaks energéticos. La Tabla 6.17 presenta los modos resonantes de la situación actual del Puerto de Iquique.

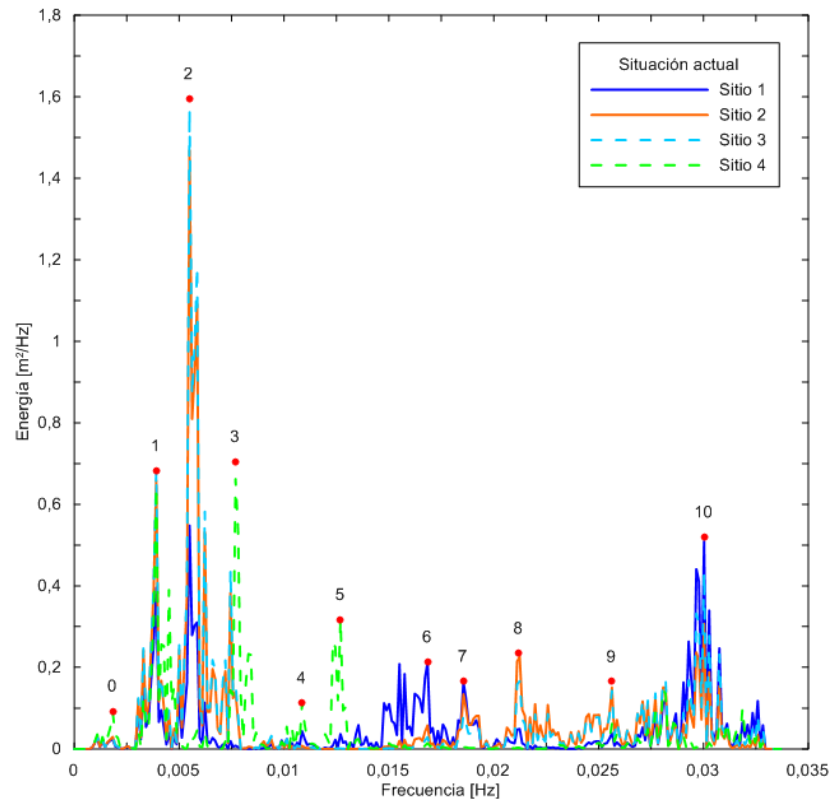


Figura 6.23: Frecuencias naturales de los sitios de atraque en el Puerto de Iquique, situación actual. (Fuente: Elaboración propia).

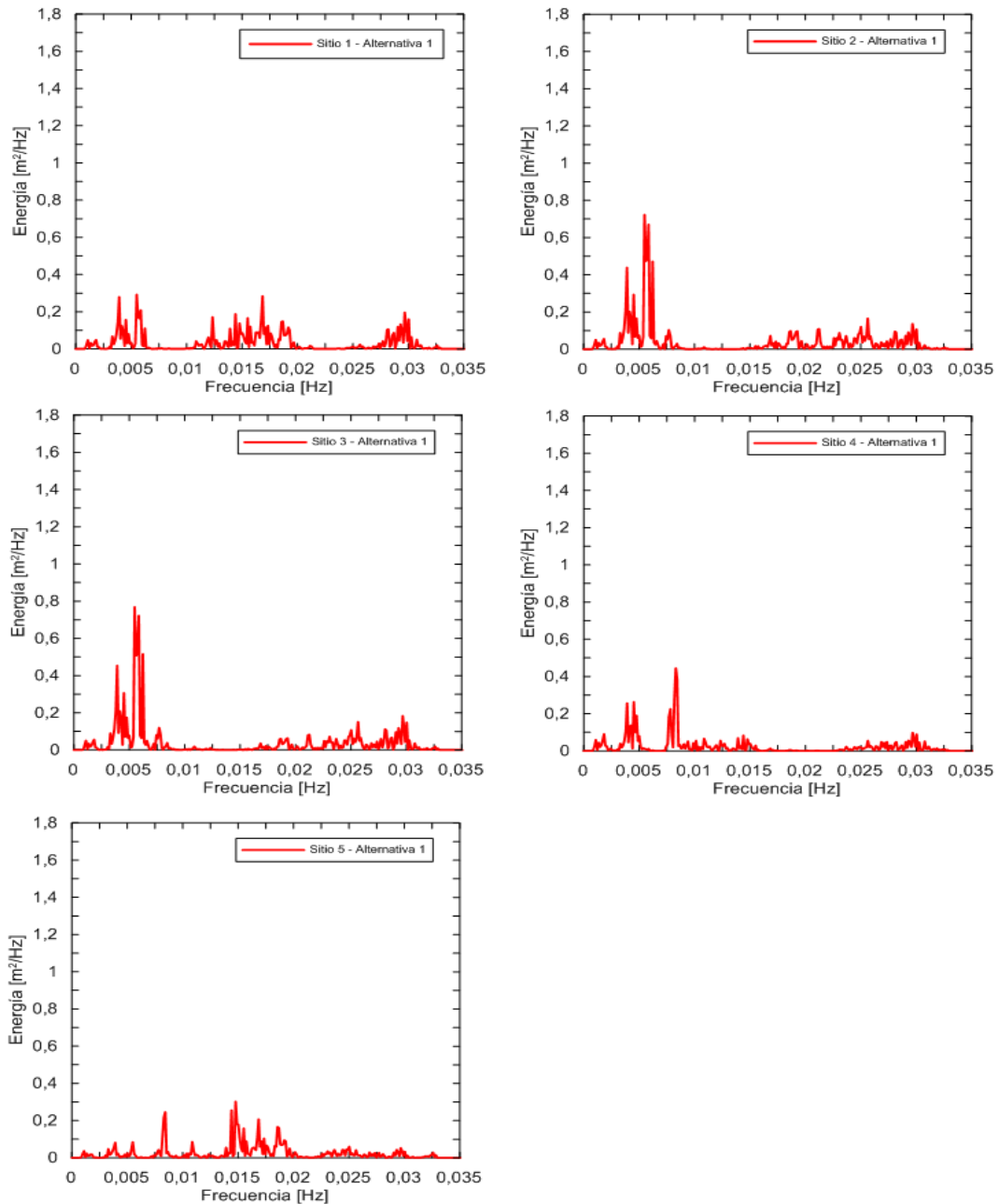
Se identificaron once frecuencias peaks, donde el modo cero corresponde al menor y es conocido como Helmholtz; el cual está asociado a una longitud de onda aproximada de 6780 [m] y provocaría un movimiento vertical de la superficie del agua de pocos centímetros, que no afectaría la operatividad de las naves. Los restantes peaks corresponden a las frecuencias naturales y se estima que los períodos de oscilación se encuentran entre 0.5 y 4 minutos. Es importante destacar que los peaks ocho, nueve y diez podrían afectar la dársena debido a la longitud de ésta.

N° PEAK	FRECUENCIA [Hz]	PERÍODO [s]	LONGITUD DE ONDA [m]
1	0.0039	256	3205
2	0.0055	182	2279
3	0.0077	130	1627
4	0.0127	79	985
5	0.0109	92	1151
6	0.0168	59	741
7	0.0186	54	672
8	0.0212	47	587
9	0.0256	39	485
10	0.0300	33	413

Tabla 6.17: Modos resonantes del Puerto de Iquique , situación actual. (Fuente: Elaboración propia).

6.5.2 RESULTADOS DEL ESCENARIO DE EXPANSIÓN

Los resultados se presentan de manera análoga a la situación actual. La Figura 6.24 muestra la respuesta espectral de los sitios de atraque existentes debido a la construcción del sitio 5.



**Figura 6.24: Espectros de energía obtenidos de la simulación de ruido blanco en cada sitio de atraque, alternativa 1.
(Fuente: Elaboración propia).**

Los resultados corresponden al escenario donde el Frente N°3 está construido; como consecuencia, el sitio 5 es el más expuesto a la frontera abierta de la dársena, presentando menor energía en las bajas frecuencias en comparación a los restantes sitios.

La Figura 6.25 y Tabla 6.18 presenta los espectros de energía para los cinco sitios analizados, se identificaron once frecuencias peaks resonantes para la alternativa 1. El modo cero está asociado a una longitud de onda aproximada de 6780 [m], la cual provocaría un movimiento vertical de pocos centímetros.

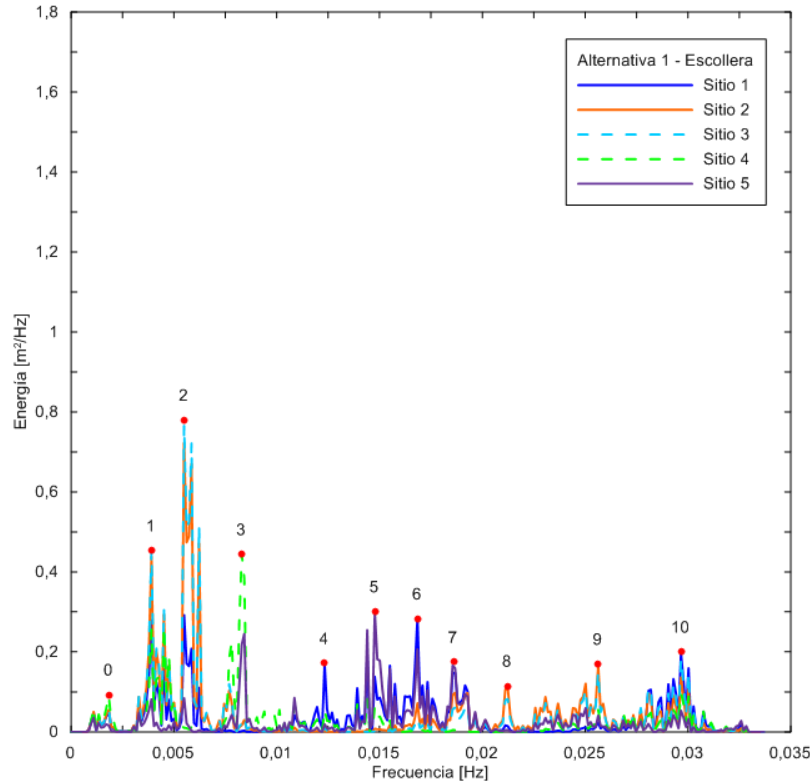


Figura 6.25: Frecuencias naturales de los sitios de atraque en el Puerto de Iquique, escenario expansión, alternativa 1.
 (Fuente: Elaboración propia).

N° PEAK	FRECUENCIA [Hz]	PERÍODO [s]	LONGITUD DE ONDA [m]
1	0.0039	256	3205
2	0.0055	182	2279
3	0.0083	120	1508
4	0.0123	81	1014
5	0.0148	68	846
6	0.0168	59	741
7	0.0186	54	672
8	0.0212	47	587
9	0.0256	39	485
10	0.0297	34	418

Tabla 6.18: Modos resonantes del Puerto de Iquique , escenario expansión, alternativa 1.
 (Fuente: Elaboración propia).

De manera similar a la situación actual, la dársena presenta período natural de oscilación entre 0.5 y 4 minutos, respectivamente. Sin embargo, la extensión del molo de abrigo aumentaría el número de peaks que podrían afectar a la dársena.

6.5.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE RESONANCIA PARA AMBOS ESCENARIOS

La Figura 6.26 presenta los espectros de energía obtenidos mediante simulación de ruido blanco para ambos casos, el escenario de expansión presenta una reducción sustancial de la energía de onda larga entre 133 a 200 [s] y 230 a 330 [s], con una menor reducción entre 50 y 67 [s]; el resto de la energía es bastante similar a la situación actual.

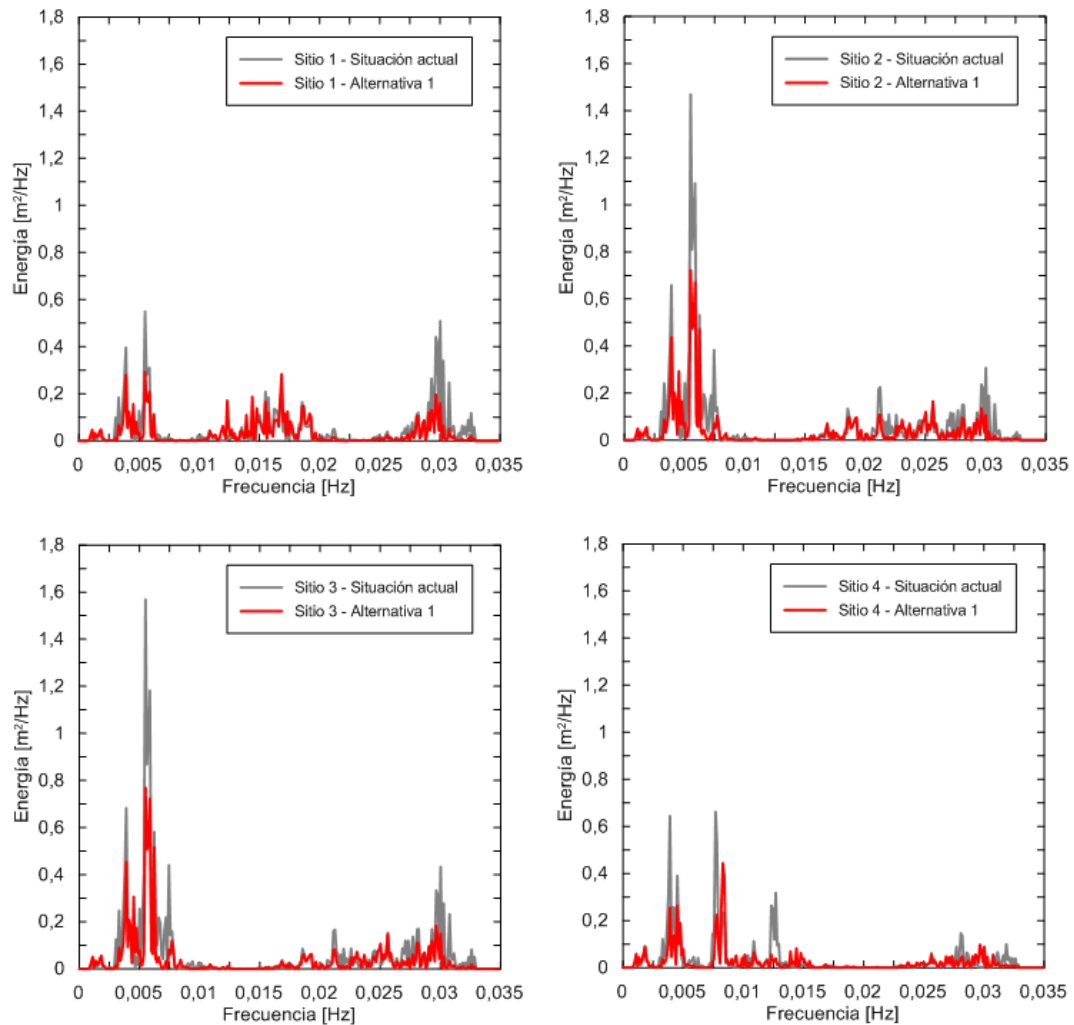


Figura 6.26: Comparación de los espectros de energía obtenidos en cada sitio de atraque en la situación actual y escenario de expansión. (Fuente: Elaboración propia).

En relación a los peaks energéticos, se identificaron once modos resonantes para ambos escenarios, donde el modo cero (Helmholtz) se encuentra asociado a una longitud de onda aproximada de 6780 [m] que -al considerar la extensión de la dársena (en ambos escenario)- sólo generaría un ascenso del nivel del mar de pocos centímetros. Los períodos de oscilación de la dársena se encuentran entre 0.5 y 4 minutos para ambos casos.

Para la situación actual, la dársena podría ser afectada sólo por los peaks ocho, nueve y diez, respectivamente. Los restantes modos generarían un aumento de pocos centímetros de la superficie de agua.

El escenario de expansión concibe 540 [m] de extensión longitudinal de la dársena, alcanzando una longitud total de 1121 [m]; con ello, aumentaría el número de modos resonantes que afectarían la dársena.

La Tabla 6.19 presenta, de manera resumida, los períodos de oscilación asociados a cada frecuencia natural y longitudes de ondas de cada modo y si éstas tendrían efectos en la dársena del Puerto de Iquique.

N° PEAK	FRECUENCIA [Hz]		PERÍODO [s]		LONGITUD DE ONDA [m]		EFECTOS	
	ACTUAL	EXPANSIÓN	ACTUAL	EXPANSIÓN	ACTUAL	EXPANSIÓN	ACTUAL	EXPANSIÓN
1	0.0039	0.0039	256	256	3205	3205	-	-
2	0.0055	0.0055	182	182	2279	2279	-	-
3	0.0077	0.0083	130	120	1627	1508	-	-
4	0.0127	0.0123	79	81	985	1014	-	Posible
5	0.0109	0.0148	92	68	1151	846	-	Posible
6	0.0168	0.0168	59	59	741	741	-	Posible
7	0.0186	0.0186	54	54	672	672	-	Posible
8	0.0212	0.0212	47	47	587	587	Posible	Posible
9	0.0256	0.0256	39	39	485	485	Posible	Posible
10	0.0300	0.0297	33	34	413	418	Posible	Posible

Tabla 6.19: Frecuencias peaks para ambos escenarios.
 (Fuente: Elaboración propia).

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

El modelo numérico MIKE 21 BW fue correctamente validado mediante el empleo de la información de campo disponible para la campaña verano e invierno de 2015. De esta forma, se procedió a explotar la herramienta numérica para los escenarios de simulación definidos.

Las condiciones de agitación obtenidas mediante la simulación numérica explican correctamente el comportamiento del oleaje en la zona de estudio, mostrando que actualmente todos los sitios de atraque presentan excedencias de alturas menores a 0.75 [m]. Con relación a la construcción del Frente N°3, los resultados confirmaron el análisis intuitivo en el sentido que el alargue del molo de abrigo mejorará las condiciones de agitación para todos los sitios de atraque. Se determinó que la alternativa 1 (tipología de escollera) presentará mejores condiciones de agitación con respecto a la alternativa 2 (tipología de cajones), garantizando que las olas no excederán los 0.30 [m] en todos los sitios existentes como en el proyectado. En términos porcentuales, la alternativa 1 generará una atenuación del 16.19% con respecto a la alternativa 2, y un 48.70% comparado a la situación actual del Puerto de Iquique.

Se determinó que para la situación actual y escenario de expansión, los períodos de oscilación están comprendidos entre 0.5 y 4 minutos. Además, se identificaron once modos resonantes para ambos escenarios, donde el más bajo (Helmholtz) se encuentra asociado a una longitud de onda aproximada de 6780 [m] y sólo generaría un ascenso del nivel del mar de pocos centímetros.

De los once peaks determinados, sólo tres de ellos podrían afectar actualmente al puerto (33, 39 y 47 [s]) debido a la longitud de la dársena. Con respecto a la expansión del puerto -incremento de 540 [m] del molo de abrigo- los peaks que podrían afectar el recinto aumentarían a siete y estarían comprendidos entre 34 y 81 [s] respectivamente.

En general, los períodos que podrían hacer resonar el Puerto de Iquique se encuentran comprendidos entre 33 y 81 [s] (0.030 a 0.0127 [Hz]), no obstante se desconoce si forzantes de dichas características se presentan en la zona de estudio ni la forma en que ingresan al recinto portuario.

En base a los análisis de agitación y resonancia realizados, se concluye que la Alternativa N°1 (tipología de escollera) presentaría las mejores condiciones de abrigo para los sitios de atraque, además de no alterar los períodos de oscilación de la dársena. Por lo tanto, se recomienda continuar con ella para las etapas de diseño.

7.2 RECOMENDACIONES

- El estudio evidenció falta de información y registros de ondas largas en la Bahía de Iquique y sus alrededores. Se recomienda fondear dos instrumentos que registren ondas comprendidas entre 0.003 y 0.03 [Hz] (30 a 300 [s]). La ubicación de éstos debería encontrarse al exterior e interior del puerto, respondiendo a la necesidad de obtener información de ondas largas para cuantificar su magnitud y ocurrencia, pudiendo ser una fuente de información robusta para determinar los mecanismo de ingreso al puerto.

Para realizar un análisis de ondas largas asociadas a grupos de ondas, se deberá contar con desnivelaciones instantáneas con frecuencia de muestreo que permita visualizar y cuantificar los grupos.

- Posterior a las mediciones de campo propuestas, se recomienda realizar simulaciones de ondas largas, imponiendo sensores numéricos que permitan ir verificando la amplitud o disminución de las bajas frecuencias. El modelo debe ser calibrado y validado mediante los registros, al exterior e interior del recinto. La herramienta debe ser explotada, considerando el fenómeno de rotura para verificar los efectos no lineales y transmisión de energía entre componentes.
- Se recomienda considerar diferentes niveles de marea en las simulaciones propuestas, realizando -además- un análisis de sensibilidad para los diferentes coeficientes de reflexión de los contornos.
- Emplear las mediciones de campo propuestas para determinar los modos resonantes y la ubicación de los nodos y antinodos, evidenciando bajo qué frecuencias se presentan las condiciones desfavorables para la nave de diseño.
- Realizar simulaciones numéricas, implementando ondas cortas y largas, para verificar la transferencia de energía entre frecuencias.

8. REFERENCIAS

- Ref.1** GHD S.A, 2014. Construcción Frente Tres Puerto Iquique – Etapa de Factibilidad, elaborado para Empresa Portuaria Iquique.
- Ref.2** GSI Ingeniería, 2012. Estudio Construcción Nuevo frente de atraque Puerto de Iquique “Etapa de prefactibilidad”, elaborado para Empresa Portuaria Iquique.
- Ref.3** GHD S.A, 2015. Diagnóstico Poza de Abrigo Avda. Jorge Barrera, Iquique. Etapa 2A. Estudios oceanográficos y procesamiento de datos – Campaña 1, elaborado para Dirección de Obras Portuarias, Ministerio de Obras Públicas.
- Ref.4** GHD S.A, 2015. Diagnóstico Poza de Abrigo Avda. Jorge Barrera, Iquique. Etapa 2B. Estudios oceanográficos y procesamiento de datos – Campaña 2, elaborado para Dirección de Obras Portuarias, Ministerio de Obras Públicas.
- Ref.5** GHD S.A, 2015. Diagnóstico Poza de Abrigo Avda. Jorge Barrera, Iquique. Estudio espectral de oleaje, elaborado para Dirección de Obras Portuarias, Ministerio de Obras Públicas.
- Ref.6** EMPRESA PORTUARIA IQUIQUE (EPI), 2015. Plan maestro Puerto Iquique.
- Ref.7** Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). Tablas de marea, años 2012 a 2016.
- Ref.8** Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM) 3.1-99. Proyecto de la configuración marítima de los puertos; Canales de acceso y áreas de flotación. España.
- Ref.9** Coastal Engineering Research Center. 1984. Shore Protection Manual, Vol. 1.
- Ref.10** U.S. Army Corps of Engineers. 2003. Coastal Engineering Manual. Vol. 2.
- Ref.11** Grupo de Ingeniería oceanográficas y de costas, 2000. Documentos de Referencia. Vol. 1 y 2. Universidad de Cantabria, España.
- Ref.12** CEDEX, 2004. Master en Ingeniería de Puertos y Costas, Sección I: Conceptos generales y caracterización del medio. Vol. 1.
- Ref.13** CEDEX, 2004. Master en Ingeniería de Puertos y Costas, Sección IV: Técnicas avanzadas de estudios de Ingeniería de Puertos y Costas. Vol. 2.
- Ref.14** Goda, Y, 2000. “Random seas and design of maritime structures”. World Scientific, University of Tokyon Japon.
- Ref.15** L.H Holthuijsen, 2007. “Waves in oceanic and coastal waters”. Technische Universiteit Delft.
- Ref.16** Danish Hydraulic Institute, 2012. Boussinesq wave module scientific documentation.

- Ref.17** Gierlevsen et al., 2001. Wave disturbance modelling in the Port of Sines, Portugal. - with special emphasis on long period oscillations. Proceedings International Conference on Port and Maritime R&D and Technology, Singapore, 29-13 October 2001, 8pp.
- Ref.18** Kofoed-Hansen et al., 2005. Simulation of long wave agitation in ports and harbours using a time-domain Boussinesq model. Paper in Proceedings of Fifth International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis – WAVES 2004, 3-7 July 2005, Madrid, Spain.
- Ref.19** Kofoed-Hansen et al., 2000. Combined numerical and physical modelling of seiching in exposed new marina. Paper in Proceedings of 27th International Coastal Engineering Conference, 16-21 July 2000, Sidney, Australia.
- Ref.20** Losada, I.J & Liu, P.L 2000. Modelos matemáticos y numéricos para el estudio de la agitación portuaria.
- Ref.21** Lui, P.L., & Losada I.J. 2002. Wave propagation modelling in coastal engineering. Journal of hydraulic research. Vol. 40, 2002, N°3.
- Ref.22** Madsen, P.A., & Schafer. H.A. 1999. A review of Bussinesq-type equations for gravity waves. In advances in Coastal and Ocean Engineering, pp 1-95.
- Ref.23** Madsen et al., 1991. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Coastal Engineering, 15, pp. 371-388.
- Ref.24** Cortínez et al., 2014. Diseño óptimo de estructuras portuarias para atenuar efectos resonantes por ondas largas. Mecánica computacional Vol. XXXIII, págs. 307-322.
- Ref.25** Rabinovich, A. 2009. Seiches and Harbour Oscillations. Handbook of Coastal and Ocean Engineering (edited by Y.C Kim), World Scientific Publ., Singapoure, 2009.
- Ref.26** Miles, H. & Lee Y.K., 1974. Helmholtz resonance of harbours. J. Fluid Mech. (1975), vol 67, part 3, pp 445-464.
- Ref.27** Santás, J.C. 1999. Análisis de grupos de olas. CEDEX, Centro de Estudios de Puertos y Costas.

9. ANEXOS

9.1 ANEXO A.

9.1.1 COEFICIENTES DE AGITACIÓN SITUACIÓN ACTUAL

Caso	MWD [deg]	T _p [seg]	NODOS DE EXTRACCIÓN				
			P1	P2	P3	P4	P5
Escenario 1. Situación actual	210	9	0.04	0.04	0.04	0.03	0.29
		12	0.06	0.06	0.06	0.05	0.42
		14	0.09	0.08	0.07	0.07	0.49
		17	0.10	0.08	0.10	0.08	0.46
	220	9	0.06	0.05	0.04	0.04	0.43
		12	0.07	0.07	0.07	0.06	0.50
		14	0.10	0.09	0.09	0.07	0.58
		17	0.11	0.10	0.12	0.08	0.53
	230	9	0.07	0.07	0.05	0.05	0.53
		12	0.08	0.08	0.07	0.05	0.57
		14	0.10	0.09	0.08	0.07	0.59
		17	0.12	0.10	0.13	0.08	0.66
	240	9	0.07	0.06	0.05	0.05	0.51
		12	0.08	0.07	0.08	0.06	0.66
		14	0.11	0.10	0.09	0.08	0.70
		17	0.14	0.11	0.15	0.09	0.71

**Tabla 9.1: Coeficientes de agitación de los nodos de extracción para la situación actual.
 (Fuente: Elaboración propia).**

9.1.2 COEFICIENTES DE AGITACIÓN ESCENARIOS DE EXPANSIÓN

Caso	MWD [deg]	T _p [s]	NODOS DE EXTRACCIÓN				
			P1	P2	P3	P4	P5
Escenario 2, alternativa 1 (escollera)	210	9	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
		12	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05
		14	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05
		17	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
	220	9	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
		12	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05
		14	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05
		17	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06
	230	9	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
		12	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05
		14	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05
		17	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
240	9	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	
	12	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	
	14	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	
	17	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	
Escenario 2, alternativa 2 (cajones)	210	9	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04
		12	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06
		14	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07
		17	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08
	220	9	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05
		12	0.05	0.05	0.04	0.04	0.06
		14	0.05	0.05	0.04	0.05	0.07
		17	0.07	0.06	0.06	0.06	0.09
	230	9	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05
		12	0.05	0.05	0.05	0.04	0.07
		14	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07
		17	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08
240	9	0.04	0.05	0.04	0.04	0.06	
	12	0.06	0.06	0.05	0.05	0.07	
	14	0.06	0.06	0.05	0.05	0.08	
	17	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	

Tabla 9.2: Coeficientes de agitación de los nodos de extracción para el escenario de expansión.
 (Fuente: Elaboración propia).

9.1.3 COMPARACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE AGITACIÓN

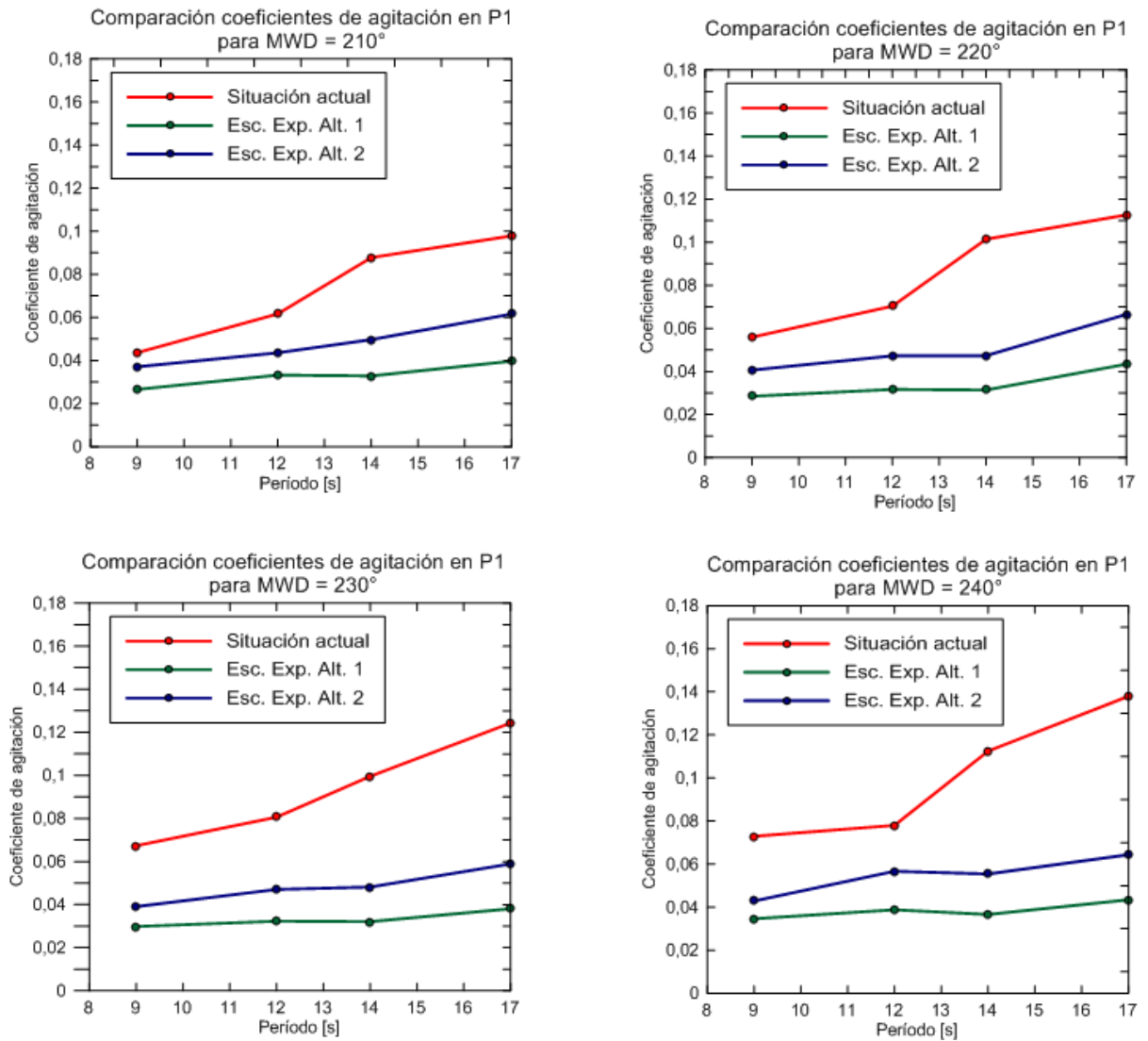


Figura 9.1: Comparación de los coeficientes de agitación en P1 para todos los escenarios simulados. (Fuente: Elaboración propia).

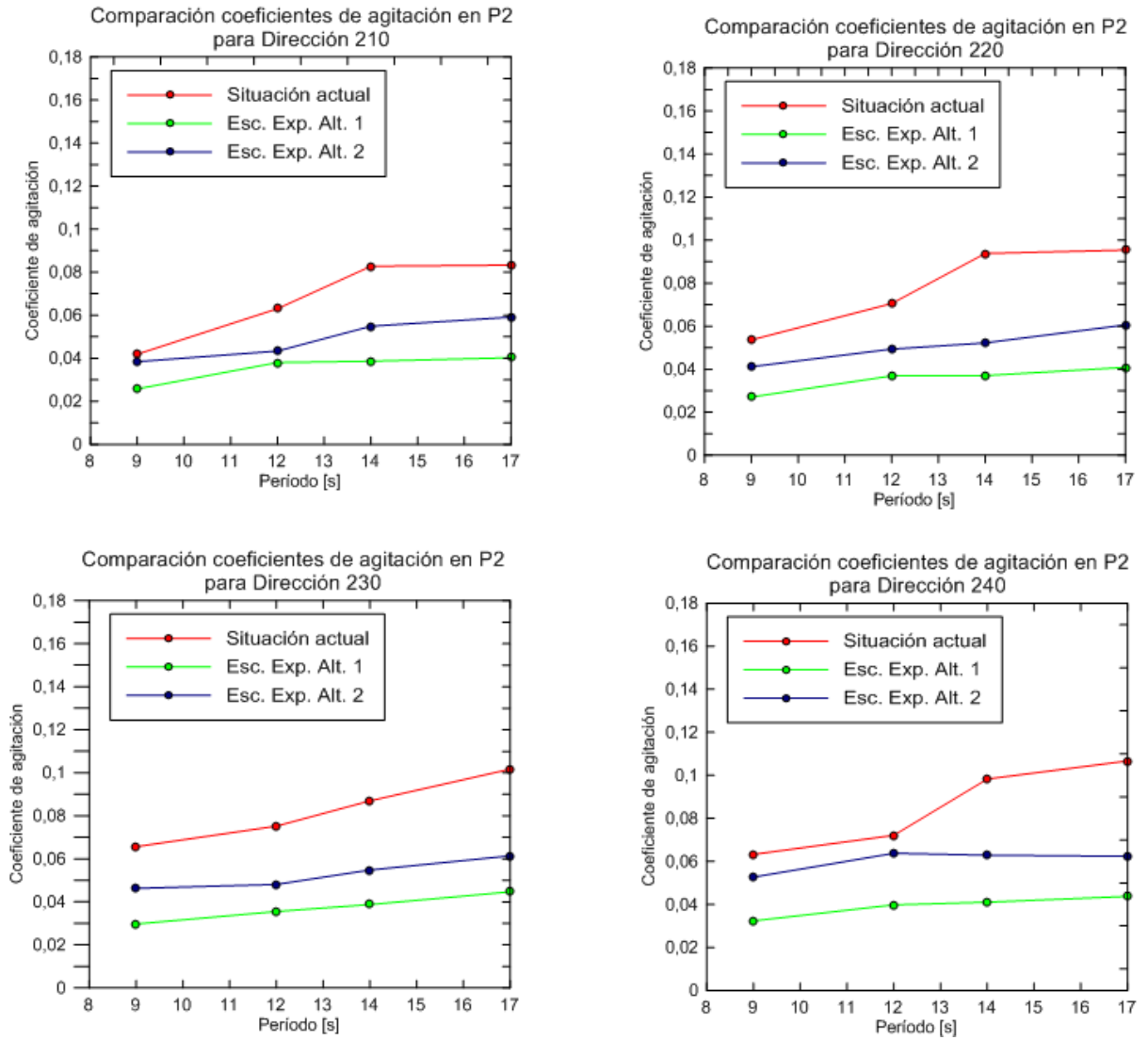


Figura 9.2: Comparación de los coeficientes de agitación en P2 para todos los escenarios simulados. (Fuente: Elaboración propia).

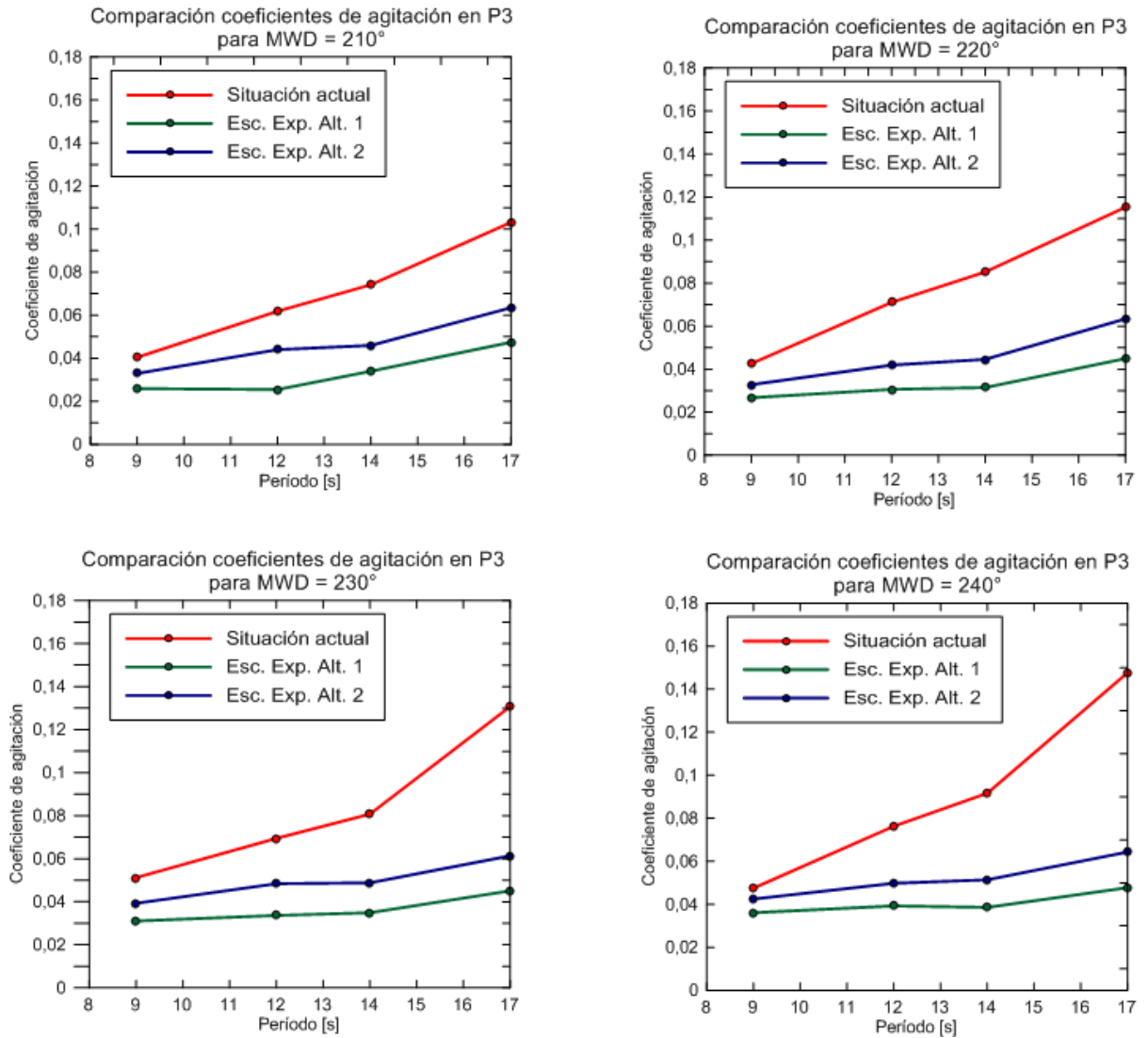


Figura 9.3: Comparación de los coeficientes de agitación en P3 para todos los escenarios simulados. (Fuente: Elaboración propia).

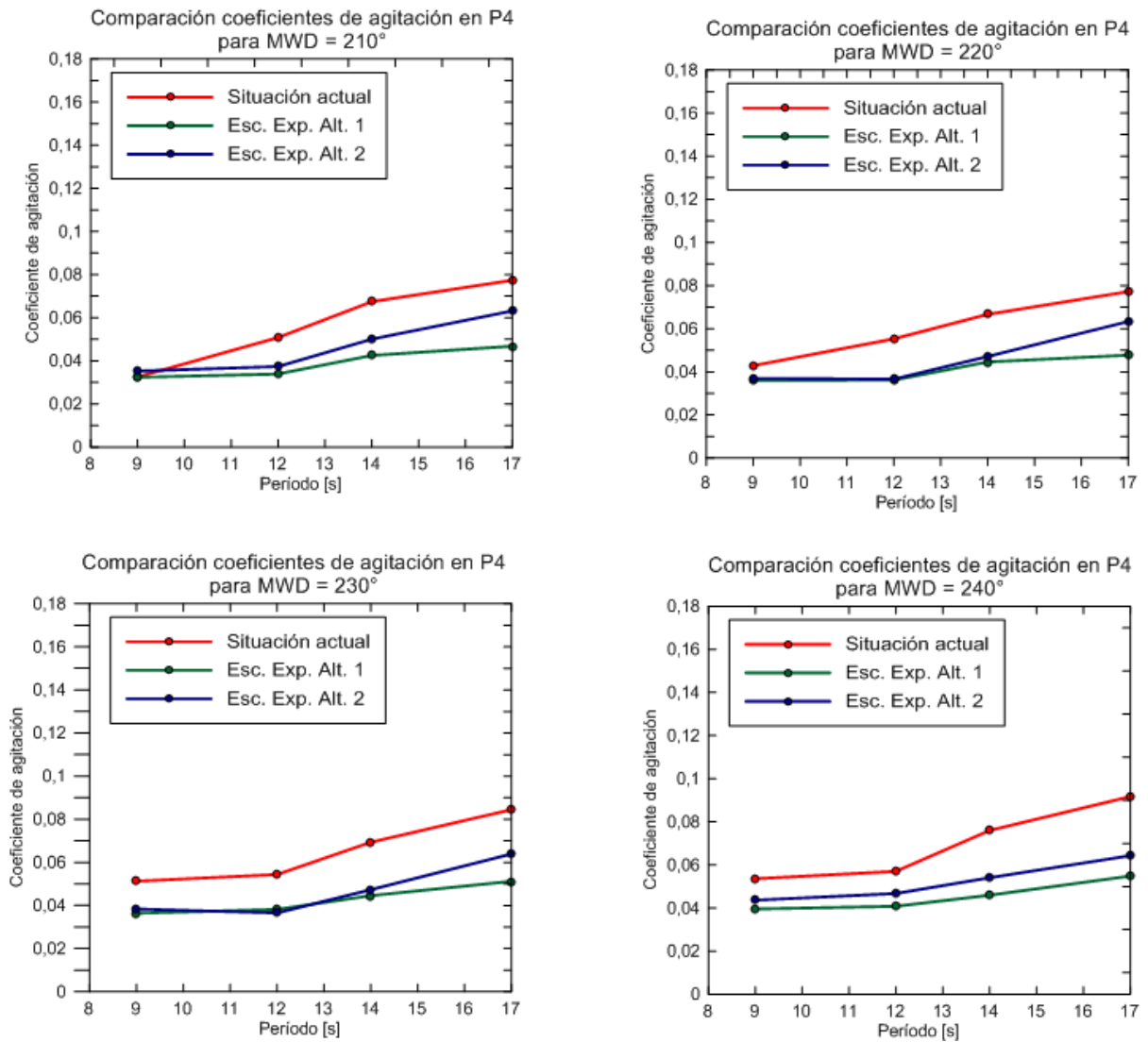


Figura 9.4: Comparación de los coeficientes de agitación en P4 para todos los escenarios simulados. (Fuente: Elaboración propia).