



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

EFFECTS IN THE AGITATION AND RESONANCE IN PUERTECITO DUE TO THE CONSTRUCTION OF PGE, PUERTO SAN ANTONIO, CHILE

Mauricio Giovanni Lagos Mena

Abril 2019

EFFECTOS EN LA AGITACIÓN Y RESONANCIA EN PUERTECITO DEBIDO A LA
CONSTRUCCIÓN DE PGE, PUERTO SAN ANTONIO, CHILE

Mauricio Giovanni Lagos Mena

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Patricio Winckler Grez
Profesor guía

Francisco Molteni Pérez
Revisor

Pablo Pozo Rojas
Revisor

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.

Mauricio Lagos Mena
Autor

Patricio Winckler Grez
Profesor guía

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia y seres queridos, que incondicionalmente han apoyado e incentivado en todo momento mi desarrollo personal y profesional. A mis padres Inés Mena y Carlos Lagos, que con su amor y sacrificio permitieron que llegara hasta estas instancias. A mis hermanas Yanina y Valentina, que con su ejemplo me llevaron a seguir adelante en este proceso. A mi hija Catalina, mi mayor motivación, quien desde el primer momento alegró mis días, contagiándome de su buen humor en momentos difíciles. A Camila Tarifeño, mi compañera de aventuras, por su apoyo y consejos, con quien proyectando el futuro fijamos las metas que hoy me permiten terminar este proceso de formación académica.

Agradezco a mi profesor guía, Patricio Winckler, por su ayuda en el desarrollo de este proyecto de título, y por entregarme una mirada distinta y motivadora de la ingeniería.

A don José Aldunate, coordinador de ingeniería EPSA, por gestionar la entrega de información relevante para el proyecto.

A don José Gallardo, coordinador Obras Marítimas, Asesoría PGE San Antonio (AGCP), por la recopilación y entrega de datos necesarios para el proyecto.

A Rodrigo Campos y Pablo Vera por su pronta y desinteresada ayuda con los modelos numéricos.

Finalmente agradecer a los amigos que dejó este proceso de formación, con quienes he compartido agradables momentos, e hicieron de mi paso por la universidad un periodo más ameno.

Dedicado a mis padres e hija.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS, ALCANCES Y LIMITACIONES	2
2.1	OBJETIVO GENERAL	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2.3	ALCANCES Y LIMITACIONES	3
3.	PUERTO SAN ANTONIO	4
3.1	UBICACIÓN DEL PUERTO	4
3.2	ANTECEDENTES HISTÓRICOS	5
3.2.1	INFRAESTRUCTURA PORTUARIA EXISTENTE	6
3.3	PUERTECITO	7
3.4	PROYECTO PGE SAN ANTONIO	8
4.	MARCO TEÓRICO	12
4.1	OLEAJE	12
4.1.1	CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE	12
4.1.1.1	Clasificación de acuerdo con la profundidad relativa	12
4.1.1.2	Clasificación según periodo, fuerza generadora y cantidad de energía que portan 13	
4.1.1.3	Clasificación de acuerdo a su génesis	14
4.2	AGITACIÓN PORTUARIA	15
4.2.1	ONDAS CORTAS	15
4.2.2	OPERATIVIDAD DE LOS SITIOS	16
4.3	RESONANCIA PORTUARIA	16
4.3.1	ONDAS LARGAS	16
4.3.2	ONDAS LARGAS ASOCIADAS A GRUPOS DE ONDAS	17
4.3.3	TEORÍA HIDRODINÁMICA	17
4.4	ESPECTRO DE RUIDO BLANCO	20
4.5	MODELOS NUMÉRICOS	21
4.5.1	MODELO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE SWAN	22
4.5.2	MODELO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE MIKE 21BW	24
5.	ANÁLISIS DE CONDICIONES NATURALES	27
5.1	BATIMETRÍA	27
5.1.1	BATIMETRÍA CARTAS NÁUTICAS	27
5.1.2	BATIMETRÍA DE DETALLE SITUACIÓN ACTUAL	27

5.1.3	BATIMETRÍA PROYECTO PGE.....	28
5.2	MAREA.....	28
5.2.1	ANÁLISIS ARMÓNICO	28
5.2.2	RÉGIMEN MAREAL	29
5.2.3	ANÁLISIS NO ARMÓNICO.....	29
5.3	MEDICIONES DE CAMPO DISPONIBLES.....	30
5.3.1	MEDICIÓN DE OLEAJE IN SITU.....	30
5.3.2	REGISTRO DE OLEAJE	32
5.3.2.1	Campaña invierno	32
5.3.2.2	Campaña verano	33
5.4	ESTUDIO DE OLEAJE	34
5.4.1	DESCRIPCIÓN OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS.....	34
5.4.2	PROPAGACIÓN MODELO SWAN	37
5.4.3	RESULTADOS	39
6.	MODELO NUMÉRICO DE AGITACIÓN Y RESONANCIA	42
6.1	PARÁMETROS BÁSICOS.....	43
6.2	MODELO DE AGITACIÓN.....	45
6.2.1	BATIMETRÍA	45
6.2.2	CONDICIONES DE BORDE HIDRODINÁMICAS	46
6.2.3	GENERACIÓN DE OLEAJE	47
6.2.4	CAPA ESPONJA	47
6.2.5	CAPA POROSA	48
6.2.6	RESULTADOS	50
6.2.6.1	Validación.....	50
6.2.6.2	Comparación resultados coeficientes de agitación	53
6.2.7	COMPARACIÓN CLIMA DE OLEAJE 1980 A 2016, PARA AMBOS ESCENARIOS	55
6.2.7.1	Condiciones actuales.....	55
6.2.7.2	Condición futura	56
6.2.7.3	Operatividad sector Puertecito.....	57
6.3	MODELO DE RESONANCIA.....	58
6.3.1	CÁLCULO PRELIMINAR MEDIANTE ECUACIONES PARAMÉTRICAS....	58
6.3.2	MODELO NUMÉRICO DE RESONANCIA.....	60
6.3.3	RESULTADOS	60

6.3.3.1	Análisis de bandas de frecuencia	60
6.3.3.2	Amplitud longitudinal.....	65
6.3.3.3	Amplitud transversal	68
6.3.3.4	Modos de vibrar.....	71
7.	CONCLUSIONES	73
8.	RECOMENDACIONES	75
9.	REFERENCIAS.....	76
10.	ANEXOS	78
10.1	ANEXO A: DIAGRAMAS DE COEFICIENTE DE AGITACIÓN.....	78
10.2	ANEXO B: CURVAS DE COEFICIENTES DE AGITACIÓN.....	84
10.3	ANEXO C: CLIMA DE OLEAJE EN SITIOS PERIODO 1980- 2016.....	90
10.3.1	Clima de oleaje NODO 1	90
10.3.2	Clima de oleaje NODO 2	91
10.3.3	Clima de oleaje NODO 3	93
10.3.4	Clima de oleaje NODO 4	94
10.3.5	Clima de oleaje NODO 5	96
10.3.6	Clima de oleaje NODO 6	97
10.3.7	Clima de oleaje NODO 7	99
10.3.8	Clima de oleaje NODO 8	101
10.3.9	Clima de oleaje NODO 10	103
10.4	ANEXO D: ESPECTROS ONDAS LARGAS NODOS DE CONTROL	105

INDICE DE FIGURAS

Figura 3-1:	Ubicación Puerto San Antonio.	4
Figura 3-2:	Puerto San Antonio, año 1933.	5
Figura 3-3:	Terminales administración EPSA.....	6
Figura 3-4:	Proyecto general, PGE.	8
Figura 3-5:	Fase 1 A, proyecto PGE.	9
Figura 3-6:	Fase 1 A y 1 B, proyecto PGE.	9
Figura 3-7:	Fase 1 A, 1 B y 2, proyecto PGE.	10
Figura 3-8:	Conexión a Camino de la fruta y Autopista del Sol.....	11
Figura 3-9:	Conexión ferroviaria.....	11
Figura 4-1:	Periodo-energía de las ondas (adaptado de Kinsman, 1965).....	14
Figura 4-2:	Ondas largas asociadas a grupos de ondas.	17
Figura 4-3:	Modos de oscilación (Adaptado de Rabinovich, 2010).....	19
Figura 4-4:	Ejemplo espectro de ruido blanco.	21
Figura 5-1:	Batimetría exterior, situación actual.	27

Figura 5-2: Batimetría exterior, proyecto PGE.....	28
Figura 5-3: Planos de referencia de la marea.	30
Figura 5-4: Dispositivo ADCP RDI.	30
Figura 5-5: Ubicación ADCP, nodos invierno norte y sur.....	31
Figura 5-6: Ubicación ADCP, nodos verano norte y sur.	31
Figura 5-7: Registro de medición de oleaje invierno.....	32
Figura 5-8: Registro de medición de oleaje verano.	33
Figura 5-9: Nodo oleaje aguas profundas.	34
Figura 5-10: Rosas de oleaje altura significativa (izquierda) y periodo peak (derecha).	36
Figura 5-11: Ubicación nodo A.....	37
Figura 5-12: Batimetría modelo SWAN.	38
Figura 5-13: Coeficientes de agitación nodo A.....	40
Figura 5-14: Coeficientes de transformación direccional nodo A.....	40
Figura 6-1: Nodos de control.....	42
Figura 6-2: Serie de tiempo Kt, WNW sin PGE	43
Figura 6-3: Serie de tiempo Kt, W sin PGE	43
Figura 6-4: Serie de tiempo Kt, WSW sin PGE	44
Figura 6-5: Serie de tiempo Kt, WNW con PGE	44
Figura 6-6: Serie de tiempo Kt, W con PGE	44
Figura 6-7: Serie de tiempo Kt, WSW con PGE	45
Figura 6-8: Batimetría situación actual.	46
Figura 6-9: Batimetría proyecto PGE.	46
Figura 6-10: Capa esponja situación actual (izquierda), proyecto PGE (derecha).....	47
Figura 6-11: Coeficientes de reflexión típicos, Thompson et al. (1996).	48
Figura 6-12: Capa porosa situación actual (izquierda), proyecto PGE (derecha).	49
Figura 6-13: Coeficientes de porosidad periodo 18 s, profundidad media 14.79 m.	49
Figura 6-14: Comparación registro de oleaje, modelo sin corrección y modelo corregido.	51
Figura 6-15: Comparación excedencia modelo Mike21 BW y ADCP invierno.	51
Figura 6-16: Comparación excedencia modelo Mike21 BW y ADCP verano.....	52
Figura 6-17: Comparación coeficientes de agitación dirección WNW.....	54
Figura 6-18: Comparación coeficientes de agitación dirección W.	54
Figura 6-19: Comparación coeficientes de agitación dirección WSW.....	55
Figura 6-20: Comparación excedencia altura significativa situación actual y con PGE.	57
Figura 6-21: Dimensiones dársena (izquierda), bahía (derecha) y dársena STI PCE (abajo).	58
Figura 6-22: Espectro para escenario sin PGE.	61
Figura 6-23: Espectro de frecuencias para escenario con PGE.	61
Figura 6-24: Comparación peaks para cada banda de frecuencias.....	62
Figura 6-25: Líneas de extracción longitudinal y transversal.....	62
Figura 6-26: Amplitud banda de frecuencias 0.00091 Hz-0.00178 Hz.....	65
Figura 6-27: Amplitud banda de frecuencias 0.00178 Hz-0.00199 Hz.....	65
Figura 6-28: Amplitud banda de frecuencias 0.00199 Hz-0.00270 Hz.....	65
Figura 6-29: Amplitud banda de frecuencias 0.00270 Hz-0.00383 Hz.....	66
Figura 6-30: Amplitud banda de frecuencias 0.00383 Hz-0.00442 Hz.....	66
Figura 6-31: Amplitud banda de frecuencias 0.00442 Hz-0.00523 Hz.....	66
Figura 6-32: Amplitud banda de frecuencias 0.00523 Hz-0.00599 Hz.....	67

Figura 6-33: Amplitud banda de frecuencias 0.00599 Hz-0.033326 Hz.....	67
Figura 6-34: Amplitud banda de frecuencias 0.00091 Hz-0.00178 Hz.....	68
Figura 6-35: Amplitud banda de frecuencias 0.00178 Hz-0.00199 Hz.....	68
Figura 6-36: Amplitud banda de frecuencias 0.00199 Hz-0.00270 Hz.....	68
Figura 6-37: Amplitud banda de frecuencias 0.00270 Hz-0.00383 Hz.....	69
Figura 6-38: Amplitud banda de frecuencias 0.00383 Hz-0.00442 Hz.....	69
Figura 6-39: Amplitud banda de frecuencias 0.00442 Hz-0.00523 Hz.....	69
Figura 6-40: Amplitud banda de frecuencias 0.00523 Hz-0.00599 Hz.....	70
Figura 6-41: Amplitud banda de frecuencias 0.00599 Hz-0.033326 Hz.....	70
Figura 10-1: Coeficientes de agitación escenario sin PGE, dirección WNW.....	78
Figura 10-2: Coeficientes de agitación escenario sin PGE, dirección W.	79
Figura 10-3: Coeficientes de agitación escenario sin PGE, dirección WSW.....	80
Figura 10-4: Coeficientes de agitación escenario con PGE, dirección WNW.	81
Figura 10-5: Coeficientes de agitación escenario con PGE, dirección W.	82
Figura 10-6: Coeficientes de agitación escenario con PGE, dirección WSW.....	83
Figura 10-7: Comparación excedencia NODO 1.....	91
Figura 10-8: Comparación excedencia NODO 2.....	92
Figura 10-9: Comparación excedencia NODO 3.....	94
Figura 10-10: Comparación excedencia NODO 4.....	95
Figura 10-11: Comparación excedencia NODO 5.....	97
Figura 10-12: Comparación excedencia NODO 6.....	98
Figura 10-13: Comparación excedencia NODO 7.....	100
Figura 10-14: Comparación excedencia NODO 8.....	103
Figura 10-15: Comparación excedencia NODO 10.....	104
Figura 10-16: Espectros nodo 1.....	105
Figura 10-17: Espectros nodo 2.....	106
Figura 10-18: Espectros nodo 3.....	107
Figura 10-19: Espectros nodo 4.....	108
Figura 10-20: Espectros nodo 5.....	109
Figura 10-21: Espectros nodo 6.....	110
Figura 10-22: Espectros nodo 7.....	111
Figura 10-23: Espectros nodo 8.....	112
Figura 10-24: Espectros nodo 9.....	113
Figura 10-25: Espectros nodo 10.....	114

INDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Productos extraídos en Puertecito, año 2015.....	8
Tabla 4-1: Clasificación del oleaje de acuerdo a su profundidad relativa.	12
Tabla 4-2: Clasificación de las ondas por su periodo (Johnson et al., 1978)	13
Tabla 4-3: Operatividad en puertos para embarcaciones hasta 20 m de eslora.	16
Tabla 5-1: Cartas batimétricas SHOA.....	27
Tabla 5-2: Principales componentes armónicos de la marea.	29
Tabla 5-3: Planos de referencia de la marea.....	29

Tabla 5-4: Detalle de registro de oleaje.....	31
Tabla 5-5: Incidencia altura significativa v/s periodo peak.....	35
Tabla 5-6: Incidencia dirección v/s altura significativa.	35
Tabla 5-7: Incidencia dirección v/s periodo peak.....	36
Tabla 5-8: Coordenadas y profundidad nodo A.....	37
Tabla 5-9: Parámetros modelados.....	39
Tabla 5-10: Coeficientes de transformación de altura significativa nodo A.	39
Tabla 5-11: Incidencia periodo v/s dirección nodo A.	41
Tabla 6-1: Nodos de control.....	42
Tabla 6-2: Extensión y profundidad batimetría.	45
Tabla 6-3: Parámetros propagados modelo Mike21.....	46
Tabla 6-4: Coeficientes de reflexión utilizados en el modelo.	48
Tabla 6-5: Comparación estadística modelo Mike21 BW y ADCP invierno.	52
Tabla 6-6: Comparación estadística modelo Mike21 BW y ADCP verano.	53
Tabla 6-7: Incidencia altura significativa v/s periodo peak, nodo Puertecito sin PGE.	56
Tabla 6-8: Incidencia altura significativa v/s periodo peak, nodo Puertecito con PGE.	56
Tabla 6-9: Operatividad Puertecito.....	57
Tabla 6-10: Periodos naturales obtenidos con ecuaciones paramétricas.	59
Tabla 6-11: Bandas de frecuencia analizadas.....	60
Tabla 6-12: Envoltentes de elevación de superficie longitudinal y transversal, y energía espectral para escenario sin PGE y con PGE.....	63
Tabla 6-13: Análisis de modos de vibrar.	71
Tabla 10-1: Clima de oleaje NODO 1, escenario sin PGE.....	90
Tabla 10-2: Clima de oleaje NODO 1, escenario con PGE.	90
Tabla 10-3: Clima de oleaje NODO 2, escenario sin PGE.....	91
Tabla 10-4: Clima de oleaje NODO 2, escenario con PGE.	92
Tabla 10-5: Clima de oleaje NODO 3, escenario sin PGE.....	93
Tabla 10-6: Clima de oleaje NODO 3, escenario con PGE.	93
Tabla 10-7: Clima de oleaje NODO 4, escenario sin PGE.....	94
Tabla 10-8: Clima de oleaje NODO 4, escenario con PGE.	95
Tabla 10-9: Clima de oleaje NODO 5, escenario sin PGE.....	96
Tabla 10-10: Clima de oleaje NODO 5, escenario con PGE.	96
Tabla 10-11: Clima de oleaje NODO 6, escenario sin PGE.....	97
Tabla 10-12: Clima de oleaje NODO 6, escenario con PGE.	98
Tabla 10-13: Clima de oleaje NODO 7, escenario sin PGE.....	99
Tabla 10-14: Clima de oleaje NODO 7, escenario con PGE.	100
Tabla 10-15: Clima de oleaje NODO 8, escenario sin PGE.....	101
Tabla 10-16: Clima de oleaje NODO 8, escenario con PGE.	102
Tabla 10-17: Clima de oleaje NODO 10, escenario sin PGE.....	103
Tabla 10-18: Clima de oleaje NODO 10, escenario con PGE.....	104

RESUMEN

Estudios elaborados por el Ministerio de Transporte en el año 2011, muestran que las proyecciones de demanda para los puertos de la región de Valparaíso se cuadruplicarán para el año 2033, lo que supera la actual capacidad del sistema portuario. Es por esto que, en respuesta a dichas proyecciones, EPSA ha desarrollado el proyecto PGE, que corresponde a la nueva infraestructura con la que se busca aumentar la transferencia de carga de la zona central del país. Esta nueva infraestructura portuaria traerá consigo cambios en la agitación y resonancia portuaria dentro de los sitios del actual puerto. Uno de estos sitios es el de Puertecito, caleta de pescadores ubicada dentro de la llamada “poza chica” del puerto, con más de 1000 pescadores vinculados a los servicios prestados por la caleta la posicionan como una de las más importantes dentro de la región.

Los cambios en la agitación en Puertecito, provocados por la nueva infraestructura portuaria, registrarán un leve aumento de hasta 10% de excedencia de altura significativa del oleaje entre 1 y 2 cm, y en menor medida un 4% de aumento en la excedencia para oleaje entre 2 y 3 cm respecto a la situación actual, no registrando variación para alturas mayores (entre 3 y 9 cm). Sin embargo este aumento no tiene mayor significancia para la dársena, ya que para los dos escenarios (actual y futuro) se registra un oleaje con altura máxima de 9 cm, lo que permitirá mantener la operatividad actual de 100% en Puertecito.

Mediante propagación de un espectro de ruido blanco, se identificaron 8 periodos resonantes, que generan 6 modos de oscilación dentro de la dársena de Puertecito. De ellos, solo el quinto y sexto podrían llegar a ocasionar efectos resonantes, tanto para la condición actual como para la condición futura. El sexto modo de oscilar registra un peak espectral de 165 s, que genera un nodo a 130 m de distancia del fondo de la dársena y dos antinodos, uno en la bocana y el otro en el extremo opuesto. El quinto modo registra un peak en los 183 s, con un nodo en la bocana y un antinodo en el fondo de la dársena, siendo este el modo dominante para Puertecito, este modo también es conocido como Helmholtz o modo fundamental. Al comparar la amplitud característica de oscilación para ambos escenarios, que representa la variación energética, se registró para la condición futura un leve aumento de 1 cm en el sexto modo oscilante, y una disminución para los primeros cinco modos de oscilación, que para el modo Helmholtz disminuye hasta en 2 cm.

1. INTRODUCCIÓN

Las proyecciones indican que para el final de esta década los puertos de la Quinta Región se encontrarán cerca de su saturación, llegando a cuadruplicar la demanda actual para el año 2033, por lo que se hace necesario un nuevo puerto que permita suplir las demandas proyectadas. Para esto la Empresa Portuaria de San Antonio, en adelante EPSA, ha desarrollado el proyecto “Puerto de Gran Escala”, más comúnmente conocido como PGE.

El proyecto PGE consta de un dique de abrigo de 3700 m de longitud, que genera una nueva dársena con una zona de reviro en su bocana, dos muelles de 3600 m de longitud total con dos terminales de aproximadamente 90 ha cada uno, permitiendo movilizar anualmente hasta 6MM TEUS, pudiendo atender buques clase E, con capacidad de 15 mil TEUS (EPSA, 2017).

La construcción del PGE generará cambios en la agitación y resonancia dentro de los actuales sitios del puerto, dentro de los cuales se encuentra el de Puertecito, ubicado en la llamada “poza chica”, y administrado por Corporación de Fomento y Desarrollo de la Pesca Artesanal Puertecito San Antonio. El sector de Puertecito es explotado como caleta de pesca artesanal que cuenta con 500 socios y más de 1000 pescadores relacionados con las actividades desarrolladas en la caleta. Los cambios generados en Puertecito debido a la construcción del PGE son posibles de cuantificar mediante técnicas de modelación numérica, para lo cual se utilizó en el presente proyecto el modelo SWAN y el software Mike21 BW.

2. OBJETIVOS, ALCANCES Y LIMITACIONES

2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar los efectos en la agitación y resonancia en el sector de Puertecito, debido a la construcción del PGE.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las condiciones naturales en las cercanías del sector.
- Determinar y analizar coeficientes de agitación en Puertecito, bajo condiciones actuales y futuras.
- Caracterizar el clima operacional de oleaje en Puertecito, bajo condiciones actuales y futuras.
- Comparar modos resonantes en Puertecito, para el escenario actual y futuro, mediante ecuaciones paramétricas y propagación de espectros de ruido blanco.

2.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

Los alcances del proyecto contemplaron la evaluación de los efectos en la agitación y resonancia portuaria debido a la construcción del PGE en San Antonio, para lo cual se realizó una comparación de la situación actual y condiciones futuras en el sector de Puertecito. Se muestran además gráficamente las variaciones de los coeficientes de agitación, clima operacional y variación energética de las ondas largas en los actuales sitios de atraque administrados por EPSA, en anexos.

En el proyecto se utilizaron datos de parámetros de resumen de oleaje en aguas profundas modelado en Wavewatch III, obtenidos desde el sitio web del proyecto “Atlas de oleaje de Chile”.

El análisis de resonancia se realizó con respecto a la frecuencia natural de la dársena, mediante ecuaciones paramétricas y espectro de ruido blanco, ya que no existen registros de oleaje de baja frecuencia que permitan estudiar cómo ingresan las ondas largas reales al puerto ni las ondas largas asociadas a grupos de ondas, lo que representa una limitación para el presente estudio.

3. PUERTO SAN ANTONIO

3.1 UBICACIÓN DEL PUERTO

El puerto de San Antonio se ubica en la bahía de San Antonio, al norte de la desembocadura del río Maipo, en la quinta región de Valparaíso. La provincia de San Antonio limita al norte con la Provincia de Valparaíso, al este con la Región Metropolitana de Santiago, al sur con la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins y al oeste con el Océano Pacífico. La ciudad de San Antonio se encuentra a 110 kilómetros de la ciudad de Santiago, capital de Chile y principal centro de consumo del país. El área de influencia del puerto es la zona central de Chile y la provincia de Mendoza en Argentina.

Figura 3-1: Ubicación Puerto San Antonio.

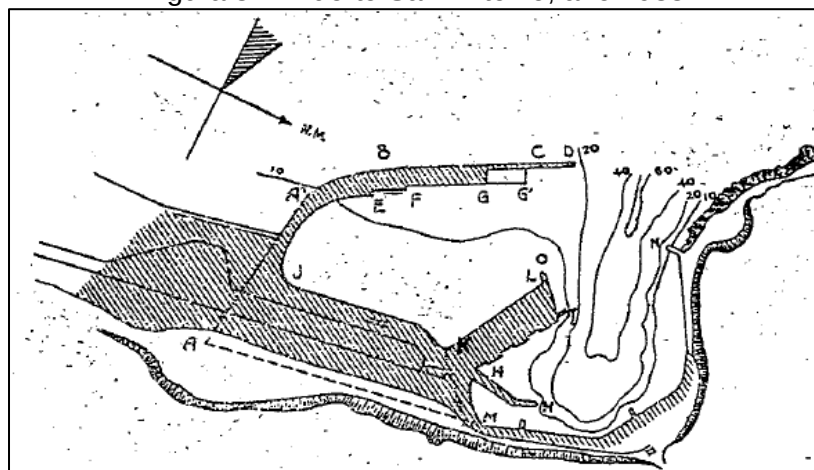


Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes satelitales de Google Earth.

3.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El año 1810, una vez consolidada la Independencia de Chile, se nombra a San Antonio "Puerto Mayor". Los estudios para la construcción del Puerto de San Antonio, fueron encomendados al ingeniero Holandés Van M. Brockman en el año 1911, por parte de la Comisión de Puertos, obras que fueron contratadas a la empresa Augusto Galtier, y constaban de un molo de abrigo, AA'BCD y una gran explanada AJHM, limitada por la cota +4 m y protegida por un talud de enrocados. Posteriormente se agregaron al contrato los malecones discontinuos HI. Luego de terminado el contrato con Augusto Galtier, y entre los años 1918 y 1933 se construyeron los malecones para buques FG de 300 metros y KL de 400 metros, y los malecones para lanchas EF, de 100 metros, además de prolongar en 150 metros en GG', los malecones para buques adosados al molo. (Lira, 1933).

Figura 3-2: Puerto San Antonio, año 1933.



Fuente: Lira (1933).

El Puerto de San Antonio comenzó como un terminal granelero, pero posteriormente incorporó la transferencia de carga general y contenedores. De esta manera, en 1995 logra constituirse en el Puerto N°1 de Chile, al incrementar fuertemente el movimiento de contenedores. (EPSA, 2017).

3.2.1 INFRAESTRUCTURA PORTUARIA EXISTENTE

Figura 3-3: Terminales administración EPSA.



Fuente: EPSA, (2017).

La infraestructura portuaria administrada por EPSA se compone de los siguientes terminales (EPSA, 2017):

Terminal STI (sitios 1, 2, 3): Está ubicado en la costa oeste de Chile y opera la concesión del Frente de Atraque Molo Sur del Puerto de San Antonio. Cuenta con la mayor dotación de grúas Gantry del país y de la costa oeste de Sudamérica. Este equipamiento, junto con los altísimos niveles de eficiencia que logran sus operaciones, contribuyen a posicionarse como el terminal de mayores rendimientos en transferencia de contenedores en esta parte del continente.

Terminal PCE (sitios 4, 5, 6 y 7): Puerto Central (PCE). En mayo de 2011, Puerto de Lirquén S.A. se adjudicó la concesión a 20 años del Frente de Atraque Costanera - Espigón del Puerto de San Antonio, llevada a cabo por la Empresa Portuaria San Antonio (EPSA). En julio de 2011 Puerto Central S.A se constituyó como Sociedad Anónima con el objeto de construir, desarrollar, mantener, reparar y explotar el frente de atraque Costanera-Espigón del Puerto de San Antonio.

Terminal Puerto Panul: Es el mayor operador de gráneles sólidos de Puerto San Antonio. Su principal área de negocios es explotar el frente de atraque, donde se prestan los servicios de muellaje, transferencia de carga y otros servicios propios e inherentes a la actividad portuaria. Su sitio tiene un calado aproximado de 38 pies y las naves graneleras son atendidas por una grúa Level Luffing, que puede descargar 700 toneladas por hora.

Terminal Sitio 9: Opera bajo un sistema multioperado, que se especializa en la transferencia de graneles líquidos. (EPSA, 2017)

3.3 PUERTECITO

La caleta Puertecito está ubicada en el Puerto de San Antonio, en el sector sur del Paseo Bellamar, específicamente en la denominada “poza chica”, lugar donde se fondea la mayoría de las embarcaciones menores. Actualmente, más de 1000 pescadores se relacionan con las actividades pesqueras que dependen de los servicios prestados en la caleta. Esta caleta se encuentra bajo la administración de la Corporación de Fomento y Desarrollo de la Pesca Artesanal Puertecito San Antonio, que nace el 19 de Junio de 1998 con el fin de educar, promover, proteger y generar investigación para el sector pesquero artesanal ubicado en el puerto y bahía de San Antonio. En Puertecito los pescadores artesanales desarrollan actividades de extracción de productos y apoyo a la labor portuaria.

Actualmente 500 socios constituyen esta organización, la cual está compuesta por 5 sindicatos y 1 cooperativa:

- S.T.I. de Buzos Mariscadores Embarcados “Puertecito”.
- S.T.I. de Pescadores “Montemar”.
- S.T.I. de Pescadores Artesanales “Rincón de Puertecito”.
- S.T.I. de Pescadores Artesanales “Caleta Puertecito de San Antonio”.
- Sindicato de Fletes y Turismo de Puertecito.
- Cooperativa de Pescadores Artesanales de San Antonio.

En Puertecito se ha desarrollado la pesca artesanal de distintos productos como el jurel, merluza, albacora, congrio, corvina y jibia, y actualmente cuenta con un área de manejo de 40 hectareas, atendiendo aproximadamente 150 embarcaciones. La Tabla 3-1 muestra un resumen de los productos extraídos en Puertecito. (Corporacion de fomento y desarrollo de la pesca artesanal Puertecito, 2017)

Tabla 3-1: Productos extraídos en Puertecito, año 2015.

Producto	% de producción Puertecito	Ton	MM\$
Jibia	70	24.888	9.955
Sardina Común	18	6.582	922
Anchoveta	5	2.072	290
Albacora	3	1.077	2.693
Jurel, Machuelo y Merluza	3	970	970
Bacalao de profundidad	1	74	1.116

Fuente: Plan Maestro Caleta Puertecito, San Antonio (2017).

3.4 PROYECTO PGE SAN ANTONIO

Según lo definido por EPSA (2017), las obras de este nuevo puerto consistirán en un dique de abrigo de 3700 m de longitud que protegerá del oleaje a la nueva dársena interior y al círculo de reviro. Así mismo se construirán dos muelles con una longitud total de 3600 m. El puerto dispondrá de dos grandes terminales denominados “Sur 1” y “Sur 2” con dimensiones muy similares y con una superficie de 90 ha cada una.

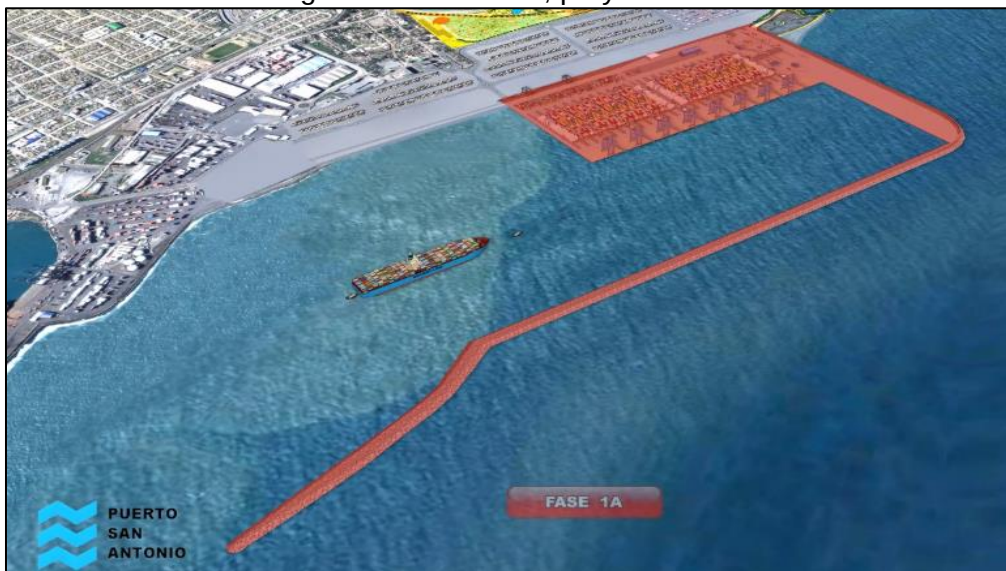
Figura 3-4: Proyecto general, PGE.



Fuente: EPSA (2018).

El PGE será desarrollado por fases acomodadas a la demanda de contenedores, en una primera fase denominada 1 A, se habilitará la mitad del terminal Sur 1, con una capacidad de 1.5MM de TEUS anuales.

Figura 3-5: Fase 1 A, proyecto PGE.



Fuente: EPSA (2018).

Con posterioridad, en la fase 1B se construirá la segunda mitad, con lo cual se alcanzará una capacidad de 3MM de TEUS al año.

Figura 3-6: Fase 1 A y 1 B, proyecto PGE.



Fuente: EPSA (2018).

La segunda fase consistirá en la construcción del terminal Sur 2, con una capacidad anual de 3MM de TEUS, de manera que al finalizar la construcción del PGE, este tendrá una capacidad de 6MM de TEUS al año.

Figura 3-7: Fase 1 A, 1 B y 2, proyecto PGE.



Fuente: EPSA (2018).

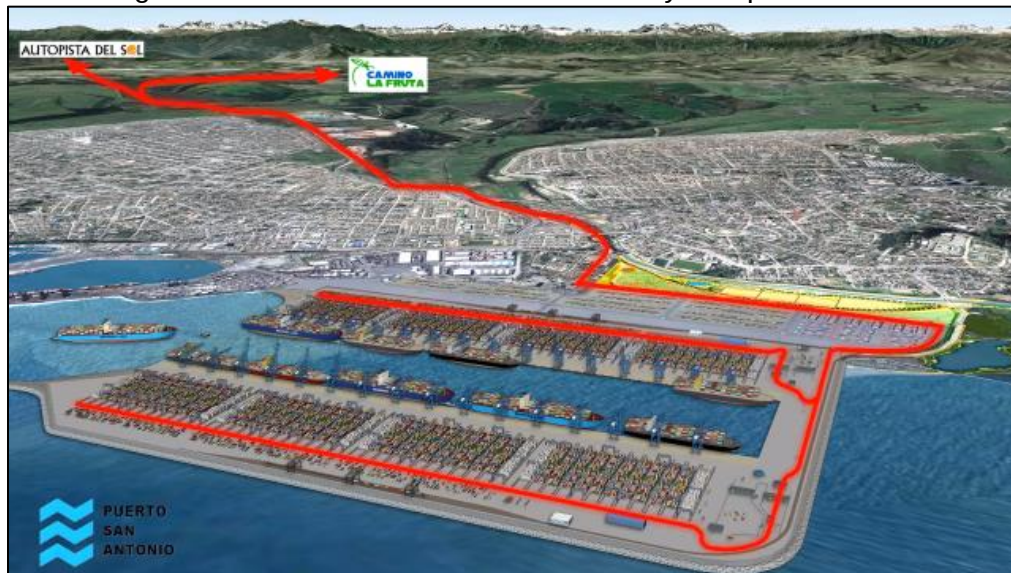
Este nuevo puerto está diseñado para recibir buques portacontenedores de clase E, en condiciones con vientos de hasta 25 nudos. Estos buques son los más grandes existentes en la actualidad, con una eslora de 400 m, y una capacidad de 15 mil TEUS.

Los terminales contarán con grúas tipo Super Post Panamax, 16 en cada uno de sus muelles. Estas depositarán los contenedores encima del pavimento, para después ser recogidos por una grúa tipo Shuttle Carrier, para trasladarlos a la zona de patio. Los contenedores serán depositados en la zona de calle, o retirados en la operación inversa.

Grúas ASC serán las encargadas de la transferencia de contenedores entre el patio y los camiones que los transportaran a sus destinos finales o inversamente en el caso de carga a buque.

Tras la carga, el camión se dirigirá a la salida, pasando en primer lugar sin detenerse por el control RF ID, donde la matrícula del camión y contenedor serán escaneadas para su identificación. Posteriormente pasará por una de las 10 pistas de la pre puerta que permitirá identificar al conductor y verificar que la documentación sea correcta. Luego pasará por un tercer control para realizar la última verificación que le permitirá salir del terminal. Siendo el procedimiento similar en el caso de entrada. Los camiones tendrán un nuevo acceso, el cual constará con cuatro pistas (dos por sentido) que conectarán los terminales con el actual acceso al puerto, que vincula con la autopista del sol y el camino de la fruta.

Figura 3-8: Conexión a Camino de la fruta y Autopista del Sol.



Fuente: EPSA (2018).

En el caso de transferencia entre el patio y el ferrocarril, los Shuttle Carrier depositarán los contenedores en el pavimento, junto a las vías ferroviarias, para luego ser depositados en el vagón de tren por grúas tipo Rail Mounted Gantry Crane (RMG Crane), siendo el mismo proceso para el caso inverso de descarga. Una vez cargado o descargado el tren, éste podrá retirarse a través de las nuevas vías diseñadas que conectaran con la actual red ferroviaria dirigiéndolos a sus destinos finales.

Figura 3-9: Conexión ferroviaria.



Fuente: EPSA (2018).

4. MARCO TEÓRICO

4.1 OLEAJE

4.1.1 CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE

4.1.1.1 Clasificación de acuerdo con la profundidad relativa

La profundidad relativa (d/L) permite determinar el grado de influencia que tiene el fondo sobre el oleaje, y está determinada por la relación que existe entre la profundidad (d) en la cual se propagan las ondas, y la longitud (L) de éstas. Esta profundidad relativa, permite clasificar las ecuaciones que representan el oleaje, en ecuaciones de ondas en aguas profundas, aguas intermedias y aguas someras.

Tabla 4-1: Clasificación del oleaje de acuerdo a su profundidad relativa.

Clasificación	$\frac{d}{L}$	Descripción
Aguas profundas	$\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$	El oleaje no experimenta modificaciones debidas a la profundidad. (zona de generación y dispersión de frecuencias)
Aguas intermedias	$\frac{1}{20} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$	El oleaje comienza a ser influenciado por el fondo en su propagación. (efectos de asomeramiento, refracción, difracción, reflexión y disipación por fricción de fondo)
Aguas someras	$\frac{d}{L} < \frac{1}{20}$	Oleaje totalmente influenciado por el fondo, con frentes de ola aproximadamente paralelos a los veriles batimétricos. (Disipación por rotura, generación de ondas infragravitatorias atrapadas o libres, run-up, etc)

Fuente: Silva (2005).

4.1.1.2 Clasificación según periodo, fuerza generadora y cantidad de energía que portan

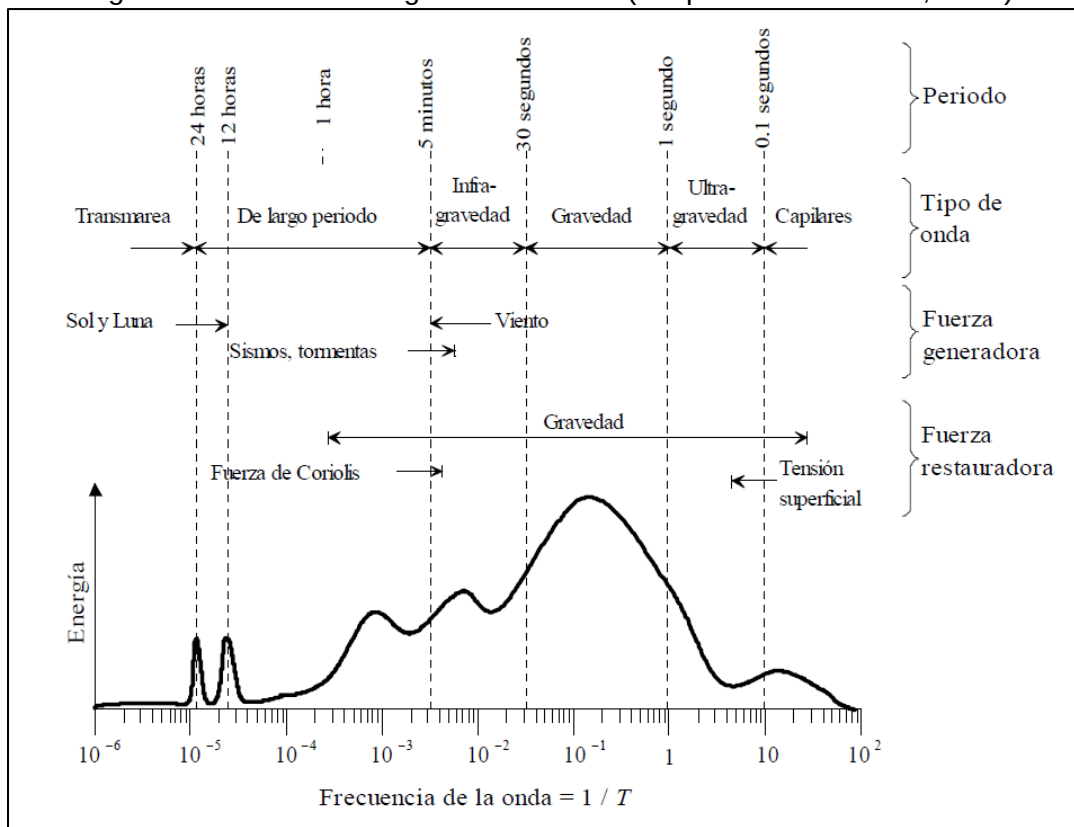
Los registros de ondas presentan una gran variedad de periodos, longitudes y alturas, las que portan energía de acuerdo a su fuerza generadora, clasificadas según la Tabla 4-2 y Figura 4-1.

Tabla 4-2: Clasificación de las ondas por su periodo (Johnson et al., 1978)

Nombre	Periodo (T)	Longitud (L)	Altura (H)	Fuerza generadora	Fuerza restauradora
Capilares	0 a 0.1 s	2 a 7 cm	1 a 2 mm	Viento	Tensión superficial
Ultragravedad	0.1 a 1 s	Centímetros	Centímetros	Viento	Tensión superficial y gravedad
Gravedad	1 a 30 s	De metros a cientos de metros	De centímetros a 15 m	Viento	Gravedad
Infragravedad	30 s a 30 min	100 a 200 m	Pequeña	Viento	Gravedad, fuerza de Coriolis
Periodo largo	5 min a 24 h	Puede llegar a ser de escala planetaria	1 a 5 m	Sismo, derrumbes, atracción de cuerpos celestes	Gravedad, fuerza de Coriolis
Transmarea	Más de 24 h	-	0 a 12 m	Oscilaciones climáticas	Gravedad, fuerza de Coriolis

Fuente: Silva (2005).

Figura 4-1: Periodo-energía de las ondas (adaptado de Kinsman, 1965)



Fuente: Silva (2005)

4.1.1.3 Clasificación de acuerdo a su génesis

Según Silva (2005), es posible identificar dos tipos de oleaje de acuerdo a su génesis:

Oleaje local o sea: El oleaje de este tipo es aquel producido en la zona de generación, con gran irregularidad en su periodicidad y direcciones, asimetría entre la forma del valle y la cresta de las olas, presentando una altura relativamente grande para su longitud de onda.

Oleaje distante o swell: Cuando el oleaje al propagarse abandona la zona de generación, ocurren tres fenómenos;

- Las olas viajan a expensas de su propia energía, perdiendo energía (decaimiento).
- Doble dispersión de las olas. Una angular, en la que las olas se dispersan en todas direcciones y otra radial, debida a que la celeridad es función directa del periodo, por lo que las olas más largas viajan más rápido que las más cortas.

- Fenómeno de soldadura, según el cual las ondas de periodos cercanos se fusionan en largas crestas de onda, lo cual origina que la superficie caótica se simplifique. Al envejecer el oleaje y especialmente cuando abandona el área de generación va tendiendo a un oleaje de tipo *swell*.

Este es el oleaje que es posible ver en aguas someras del borde costero, presentando frentes que tienden a alinearse con los veriles batimétricos, más ordenado, con largos frentes de olas y direcciones predominantes.

4.2 AGITACIÓN PORTUARIA

El oleaje en el proceso de propagación comienza a experimentar el efecto del fondo a medida que se acerca a la costa; cuando se encuentra a una profundidad aproximadamente menor a la mitad de su longitud de onda ($d < \frac{L}{2}$), según la teoría lineal de oleaje. Esta interacción con el fondo se traduce principalmente en variaciones en la altura de la ola y dirección de propagación del oleaje, debido a los fenómenos de asomeramiento y refracción. Sin embargo el oleaje también interactúa con elementos que se encuentran en la superficie, ya sea de origen natural o artificial. Producto de esta interacción se generan los fenómenos de difracción y reflexión de las ondas, que principalmente provocan una variación en la dirección del oleaje.

El fenómeno de agitación portuaria es el resultado del proceso de transformación del oleaje de corto periodo, desde su origen en aguas profundas, hasta aguas someras, en donde es posible encontrar estructuras de gran relevancia para el ser humano. Una de las principales estructuras costeras son los puertos, los cuales se ven afectados en su operatividad, pudiendo provocar situaciones no deseadas como movimientos de las embarcaciones y tensiones en sus amarres. El estudio del fenómeno de agitación permite diseñar las tipologías de los distintos elementos estructurales que componen un puerto, maximizando su operatividad.

4.2.1 ONDAS CORTAS

Las ondas cortas en esta memoria se definen como aquellas con un período de entre 1 y 30 segundos. Estas ondas pueden ser de tipo sea o swell, la primera se refiere a aquellas ondas generadas por la perturbación del viento actuando sobre la superficie del agua mientras que el estado swell se refiere a las olas que son en su mayoría libres de la fuerza perturbadora del viento y son más ordenadas. La definición del período aproximado entre estos dos estados es de 1 a 10 segundos para sea y de 10 a 30 segundos para el oleaje swell, según Kinsman, (1965).

4.2.2 OPERATIVIDAD DE LOS SITIOS

Según PIANC (1995), los límites que garantizan la operatividad de los sitios y la seguridad de las embarcaciones se establecen en función de las dimensiones de estas, la altura significativa, el periodo del oleaje y la dirección en que inciden las olas en las naves (Tabla 4-3):

Tabla 4-3: Operatividad en puertos para embarcaciones hasta 20 m de eslora.

LONGITUD DE LA EMBARCACION [m]	INCIDENCIA LATERAL		INCIDENCIA LONGITUDINAL	
	PERIODO [s]	ALTURA Hs [m]	PERIODO [s]	ALTURA Hs [m]
4-10	<2.0	0.20	<2.5	0.20
	2.0-4.0	0.10	2.5-4.0	0.15
	>4.0	0.15	>4.0	0.20
10-16	<3.0	0.25	<3.5	0.30
	3.0-5.0	0.15	3.5-5.5	0.20
	>5.0	0.20	>5.5	0.30
20	<4.0	0.30	<4.5	0.30
	4.0-6.0	0.15	4.5-7.0	0.25
	>6.0	0.25	>7.0	0.30

Fuente: PIANC (1995).

4.3 RESONANCIA PORTUARIA

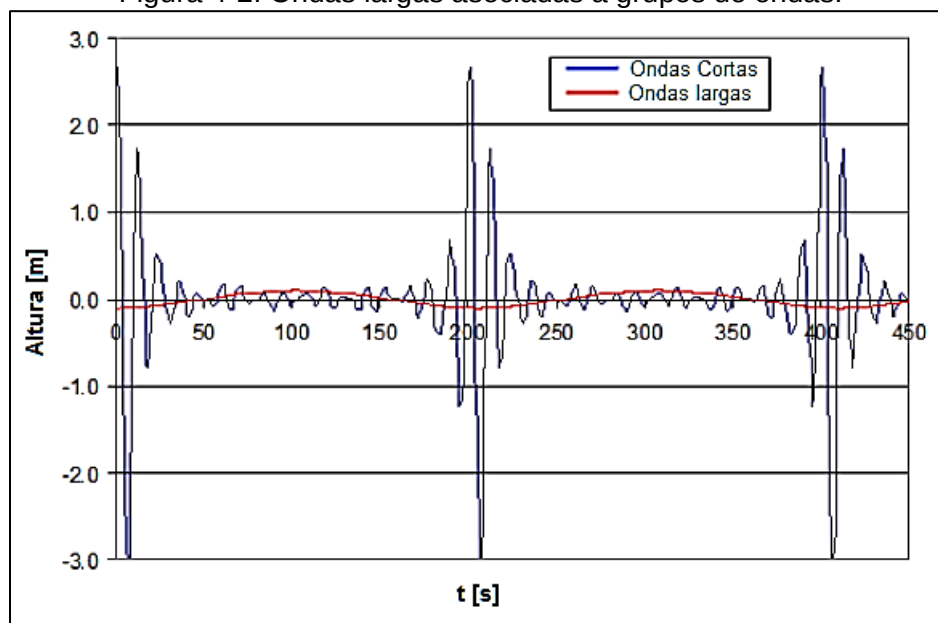
4.3.1 ONDAS LARGAS

El oleaje incidente desde el océano presenta en general un espectro amplio que va desde las ondas de marea, cuyos períodos son del orden de horas, hasta oleaje generado por viento, de períodos del orden de segundos. Por otra parte, entre tales extremos aparecen las denominadas ondas largas, especialmente peligrosas ya que sus períodos son cercanos a los naturales de la mayoría de los puertos existentes. Si el periodo de las ondas largas es cercano a uno de los periodos naturales de una dársena, puede tener lugar un fenómeno resonante, donde las ondas incidentes van reforzando el movimiento oscilatorio natural del puerto, llegando a amplitudes de elevación mucho mayores que las del oleaje incidente. Además de las grandes elevaciones que se producen dentro de las dársenas, los movimientos resonantes producen, en las líneas nodales (de elevación nula), velocidades de corriente muy elevadas, eventualmente mayores a 2 m/seg para amplitudes de ondas del orden de centímetros. Tales corrientes pueden provocar daños en amarres de embarcaciones, dificultades para efectuar maniobras de acceso y también colisiones entre barcos (Cortínez et al., 2014).

4.3.2 ONDAS LARGAS ASOCIADAS A GRUPOS DE ONDAS

Esto ocurre cuando se presentan interacciones no lineales en el oleaje de onda corta, y que eventualmente llega a producir una oscilación de baja frecuencia, con valles en las olas más grandes y crestas en las olas más pequeñas. Estas ondas largas tienen una longitud igual a la distancia entre los sucesivos grupos de ondas, con un periodo superior a 30 s, y tienen una altura directamente proporcional a la altura de las ondas cortas agrupadas. Las ondas largas viajan a la misma celeridad de los grupos de onda hasta llegar a aguas someras donde se liberan, fenómeno conocido como surfbeat. Las ondas largas liberadas pueden propagarse a través de la costa, quedar atrapadas de forma reflectiva o propagarse como una mezcla de ambas (Baldock y Huntely, 2002; Stuart, 2013)

Figura 4-2: Ondas largas asociadas a grupos de ondas.



Fuente: Stuart (2013).

4.3.3 TEORÍA HIDRODINÁMICA

La teoría básica de oscilaciones seiche es similar a la teoría de oscilaciones libres y forzadas de sistemas mecánicos, eléctricos y acústicos. Los sistemas responden a un forzamiento externo desarrollando una fuerza de restauración que reestablece el equilibrio en el sistema. Un péndulo es un ejemplo típico de tal sistema. Las oscilaciones libres ocurren a la frecuencia natural del sistema si el sistema se perturba más allá de su equilibrio. Sin forzamiento adicional, estas oscilaciones libres retienen las mismas frecuencias pero sus amplitudes disminuyen exponencialmente debido a la fricción, hasta que el sistema finalmente se detiene. En el caso de un forzamiento continuo periódico, las oscilaciones forzadas se producen con amplitudes que dependen de la fricción y la proximidad de la frecuencia de forzado a la frecuencia natural del sistema. (Rabinovich, 2010)

Ecuaciones paramétricas

Rabinovich (2010) determinó las ecuaciones que definen los periodos resonantes de una cuenca abierta o cerrada, asumiendo un canal largo y estrecho, de longitud l , profundidad constante d , y una altura de onda estacionaria como se muestra:

$$\eta(x, t) = A \cos kx \cos \omega t,$$

donde η elevación de la superficie libre, A es la amplitud de la onda, x es la coordenada a lo largo del canal, t es el tiempo, $k = 2\pi/L$ es el número de onda, L es la longitud de onda, $\omega = 2\pi/T$ es la frecuencia angular, y T es el periodo. La frecuencia angular y el número de onda están ligados a través de la siguiente relación:

$$\begin{aligned}\omega &= kc, \\ T &= \frac{L}{c},\end{aligned}$$

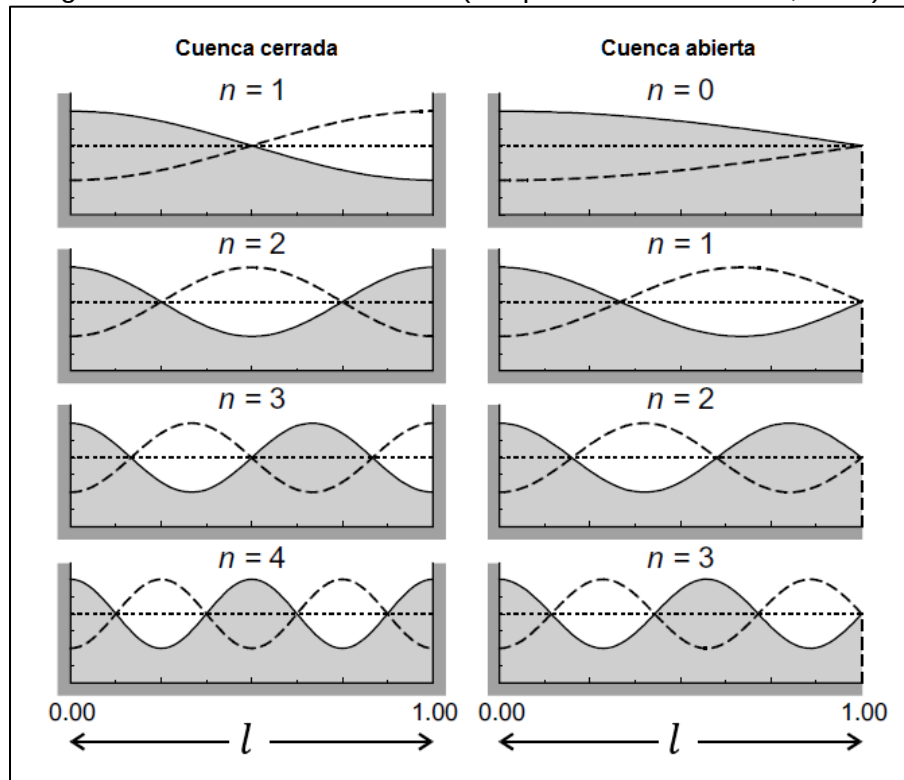
Donde $c = \sqrt{gd}$ es la celeridad de onda y g es la aceleración de gravedad.

Bajo la condición de no flujo en los contornos de la cuenca ($x = 0; x = l$), los números de onda son:

$$k = \frac{\pi}{l}, \frac{2\pi}{l}, \frac{3\pi}{l}, \dots, \frac{n\pi}{l},$$

que están relacionados con los modos de oscilación propios de la cuenca. Figura 4-3

Figura 4-3: Modos de oscilación (Adaptado de Rabinovich, 2010).



Fuente: (Rabinovich, 2010).

El modo fundamental en un canal abierto, o primer modo de oscilación es asimétrico, dado que mientras en un lado la superficie del agua sube, el lado opuesto está bajando. Las oscilaciones máximas del nivel del agua se observan cerca de los límites de la cuenca ($x = 0; x = l$), mientras que la corrientes máximas se producen cerca de los nodos, es decir donde $\eta = 0$.

La ecuación que define el periodo natural de una cuenca cerrada es la formulada por Merian (1828):

$$T_n = \frac{2l}{n\sqrt{gd}}$$

La ecuación de Merian muestra que cuanto más larga es la longitud de la cuenca (l), más largo es el periodo del seiche. El modo fundamental y todos los demás modos impares son asimétricos, mientras que los pares son simétricos (un antinodo en medio de la cuenca).

El modo más importante es el modo más bajo ($n = 0$), conocido como modo Helmholtz, el que tiene un solo nodo en la boca de la cuenca ($x = l$) y un solo antinodo en el borde opuesto ($x = 0$). La longitud de onda de este modo es cuatro veces la longitud de la bahía. El modo Helmholtz es el modo de mayor importancia, ya que está relacionado con el transporte periódico de masa a través de la boca de la cuenca, lo que es de vital

importancia para bahías, puertos de bocana estrecha y fiordos, donde este modo normalmente domina. El modo Helmholtz se puede estimar por:

$$T_n = \frac{4l}{(2n+1)\sqrt{gd}}, \text{ para } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

El cual para el modo fundamental tiene un valor que dobla al periodo fundamental para cuencas cerradas de igual longitud.

Este modelo es útil para algunas estimaciones preliminares de los parámetros de seiche en cuencas abiertas y cerradas. Wilson (1972) obtuvo soluciones analíticas para varias otras cuencas con geometría simple y profundidad variable, con las que se obtienen muy buenas aproximaciones para formas irregulares de lagos naturales, bahías, ensenadas y puertos.

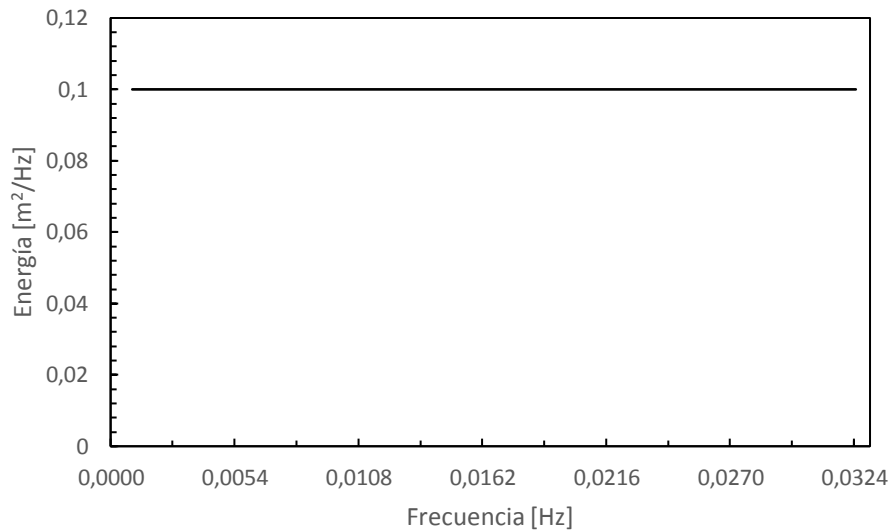
4.4 ESPECTRO DE RUIDO BLANCO

El espectro de ruido blanco se caracteriza por tener cantidades iguales de energía en cada período en un rango de frecuencia definido. En este estudio, el rango de frecuencia del espectro de ruido blanco se estableció entre 30 y 1000 segundos. Aunque se trate de una simulación de condiciones de oleaje de baja frecuencia de manera sintética, este método tiene las siguientes ventajas:

- A través del análisis espectral es posible identificar los periodos de resonancia dentro de las dársenas de un puerto.
- El método permite disminuir los tiempos de cómputo, ya que incluye muchos periodos de onda en su ejecución.
- No se requieren mediciones de onda larga.

Es importante tener en cuenta que los espectros de ruido blanco representan un estado de mar sintético y por esa razón solo pueden usarse para indicar frecuencias de resonancia potenciales. Esta metodología se encuentra documentada por Kofoed-Hansen et al., 2005 y Gierlevsen et al., 2001.

Figura 4-4: Ejemplo espectro de ruido blanco.



Fuente: Elaboración propia.

4.5 MODELOS NUMÉRICOS

Según Guisado (2010), la clasificación de los modelos numéricos que simulan las condiciones de oleaje en la costa, dependen de las ecuaciones que se utilizan en la propagación del oleaje. Entre estos se encuentran los modelos basados en la ecuación de pendiente suave, en la ecuación de la conservación de la masa, modelos que calculan el espectro direccional. También se pueden clasificar según la teoría de ondas en los que se basan los cálculos matemáticos: teoría lineal de Airy, Stokes o las teorías de ondas largas basadas en la ecuaciones de Boussinesq. Por último, la clasificación más aceptada de los modelos para simular la evolución del oleaje es la que los considera en dos grandes grupos: de resolución de fase y los de fase promediada.

- Modelos de resolución de fase: se encuentran los modelos basados en la ecuación de la pendiente suave (Berkhoff, 1972) y su versión parabólica de Radder (1979), y los basados en las aproximaciones de Boussinesq (Peregrine, 1967, Madsen y Sørensen, 1992). Los modelos basados en las ecuaciones y aproximación de Boussinesq se basan en la ecuación de continuidad y conservación del momento, modelando la propagación de ondas desde profundidades indefinidas hasta reducidas. Son muchas las aproximaciones que se han llevado a cabo a partir de las ecuaciones de Boussinesq, lo que ha dado lugar a un número de modelos que simulan los procesos más representativos que sufren las olas en las proximidades de la costa.

- Modelos de fase promediada o modelos espectrales: Describen el espectro de energía de la ola, en las cuales la superficie irregular del mar se describe mediante una función espectral de energía. Los modelos espectrales tuvieron su desarrollo entre los años 50 y 60, con los importantes avances introducidos por el concepto de espectro de oleaje de Pierson y Moskowitz (1964), siendo el trabajo de Gelci et al. (1956) el primero en introducir el concepto de la ecuación de transporte espectral.

Los modelos espectrales resuelven la ecuación de balance de energía teniendo en cuenta los efectos de refracción, interacción con corrientes y fondo, el crecimiento y decaimiento de la energía de ola y las interacciones no lineales entre ellas. Dependiendo de cómo se resuelvan los términos que componen las fuentes o los sumideros de energía, los modelos espectrales se clasifican en primera, segunda o tercera generación, en función de las mejoras impuestas con respecto a las limitaciones del anterior.

4.5.1 MODELO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE SWAN

SWAN (Simulating WAVes Nearshore) (Booij et al., 2004) es un modelo de propagación de oleaje espectral de tercera generación de libre acceso y código abierto, que simula la energía contenida en las ondas en su propagación desde superficies oceánicas hasta zonas costeras, promediando la fase de las ondas (Delft University of Technology, 2007).

Ecuaciones

Este modelo se basa en la resolución de la ecuación de conservación de la energía espectral, la cual se puede expresar como:

$$\frac{\partial N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial C_x N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial C_y N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial C_\theta N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \theta} + \frac{\partial C_\sigma N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma, \theta; x, y, t)}{\sigma}$$

Donde

$$\frac{\partial N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial t}$$

Razón de cambio (local) en el tiempo del espectro de energía.

$$\frac{\partial C_x N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial C_y N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial y}$$

Propagación de espectro en el espacio con celeridad de onda C_x y C_y en direcciones x e y respectivamente, lo que representa al shoaling.

$$\frac{\partial C_\theta N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \theta}$$

Refracción inducida por variaciones de fondo y corrientes, con velocidad de propagación C_θ (en el espacio direccional).

$$\frac{\partial C_\sigma N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \sigma}$$

Variación de la frecuencia relativa debido a variaciones en la profundidad y corrientes, con velocidad de propagación C_σ (en el espacio de las frecuencias).

$$\frac{S(\sigma, \theta; x, y, t)}{\sigma}$$

Término fuente expresado como densidad de energía. Este representa los efectos de generación, disipación e interacciones no lineales ola-ola.

θ

Dirección de propagación.

σ

Frecuencia relativa.

El modelo SWAN puede incluir los siguientes fenómenos:

- Asomeramiento
- Difracción
- Whitecapping
- Fricción de fondo
- Interacción ola-ola en aguas profundas y someras

4.5.2 MODELO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE MIKE 21BW

MIKE 21 BW es un modelo que utiliza la denominada aproximación de Boussinesq mejorada (Madsen et al. 1991 y Madsen & Sørensen 1992) para el análisis de agitación por oleaje en puertos y zonas costeras. El modelo simula varios fenómenos combinados en forma bidimensional, tales como asomeramiento, refracción, reflexión run up, difracción dispersión, movimientos en la línea de costa y el efecto rompiente de las olas. También puede simular la generación de grupos de onda, el efecto de resonancia y ondas largas.

Los dos módulos incluidos en MIKE 21 BW (2D y 1D) se basan en la solución numérica de formulaciones de dominio de tiempo de ecuaciones de tipo Boussinesq. Las ecuaciones de Boussinesq incluyen la no linealidad así como la dispersión de frecuencia. Básicamente, la dispersión de frecuencia se introduce en las ecuaciones de momento teniendo en cuenta el efecto de las aceleraciones verticales sobre la distribución de presión. Ambos módulos resuelven las ecuaciones de tipo Boussinesq utilizando una formulación de flujo con características mejoradas de dispersión lineal. Estas ecuaciones de tipo Boussinesq hacen que los módulos sean adecuados para la simulación de la propagación de trenes de ondas direccionales que viajan desde aguas profundas a aguas poco profundas. (DHI, 2007)

MIKE 21 BW incluye dos módulos:

- 2DH Boussinesq Wave Module
- 1DH Boussinesq Wave Module

El módulo 2DH (dos coordenadas espaciales horizontales) resuelve las ecuaciones Boussinesq mejoradas mediante una técnica implícita de diferencias finitas con variables definidas en una cuadrícula rectangular escalonada.

El módulo 1DH (una coordenada espacial horizontal) resuelve las ecuaciones de Boussinesq mejoradas mediante un método de elemento finito Galerkin estándar con interpolación mixta para las variables definidas en una cuadrícula no estructurada (o estructurada). La dinámica de la zona de surf y las oscilaciones de la zona de splash se pueden simular para cualquier perfil costero en este módulo.

MIKE 21 BW también incluye la porosidad para la simulación de la reflexión parcial y la transmisión a través de muelles y rompeolas. Las capas de esponja se aplican cuando se requiere la absorción total de la energía de las olas. Finalmente, MIKE 21 BW también incluye la generación interna de ondas.

Ecuaciones

El modelo de ondas tipo Boussinesq incluido en Mike 21BW, resuelve las ecuaciones de Boussinesq mejoradas expresadas en una o dos dimensiones en términos de la elevación de la superficie ξ y componentes de velocidad integradas en la profundidad, P y Q .

Ecuaciones utilizadas por el modelo:

Continuidad

$$n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0$$

Momentum en x

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

Momentum en y

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

Donde los términos dispersivos ψ_1 y ψ_2 se definen como

$$\begin{aligned} \psi_1 &\equiv - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xxt} + Q_{xyt}) - nBg d^3 (\xi_{xxx} + \xi_{xyy}) \\ &\quad - dd_x \left(\frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + nBg d (2\xi_{xx} + \xi_{yy}) \right) - dd_y \left(\frac{1}{6} Q_{xt} + nBg d \xi_{xy} \right) \\ \psi_2 &\equiv - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (Q_{yyt} + P_{xyt}) - nBg d^3 (\xi_{yyy} + \xi_{xxy}) \\ &\quad - dd_y \left(\frac{1}{3} Q_{yt} + \frac{1}{6} P_{xt} + nBg d (2\xi_{yy} + \xi_{xx}) \right) - dd_x \left(\frac{1}{6} P_{yt} + nBg d \xi_{xy} \right) \end{aligned}$$

Los términos R_{xx} , R_{xy} y R_{yy} representan el exceso de momentum debido a la variación de la distribución de la velocidad producto del roller, luego de la rotura de las olas. R_{xx} , R_{xy} y R_{yy} se definen como:

$$R_{xx} = \frac{\delta}{1 - \delta/h} \left(c_x - \frac{P}{h} \right)^2$$

$$R_{xy} = \frac{\delta}{1 - \delta/h} \left(c_x - \frac{P}{h} \right) \left(c_y - \frac{Q}{h} \right)$$

$$R_{yy} = \frac{\delta}{1 - \delta/h} \left(c_y - \frac{P}{h} \right)^2$$

Donde:

P	Densidad de flujo en la dirección x [$\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$]
Q	Densidad de flujo en la dirección y [$\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$]
B	Coeficiente de dispersión de Boussinesq [-]
x, y	Coordenadas cartesianas [m]
t	Tiempo [s]
h	Profundidad total [= $d + \xi$]
d	Nivel medio del agua [m]
g	Aceleración gravitacional [=9.81 m/s^2]
n	Porosidad [-]
C	Numero de resistencia de Chezy
α	Coeficiente de resistencia para flujo laminar en un medio poroso [-]
β	Coeficiente de resistencia para flujo turbulento en un medio poroso [-]
ξ	Elevación de la superficie
δ	Espesor del roller en superficie, está en función de (t, x, y) ,
C_x	Celeridad del roller en eje x
C_y	Celeridad del roller en eje y

5. ANÁLISIS DE CONDICIONES NATURALES

5.1 BATIMETRÍA

La batimetría utilizada se obtuvo desde dos fuentes de datos; la primera corresponde a las cartas náuticas dispuestas por el SHOA y la segunda a levantamientos batimétricos de detalle, proporcionados por EPSA y la empresa PRDW.

5.1.1 BATIMETRÍA CARTAS NÁUTICAS

La batimetría correspondiente a las cartas náuticas SHOA que se muestran en detalle en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1: Cartas batimétricas SHOA.

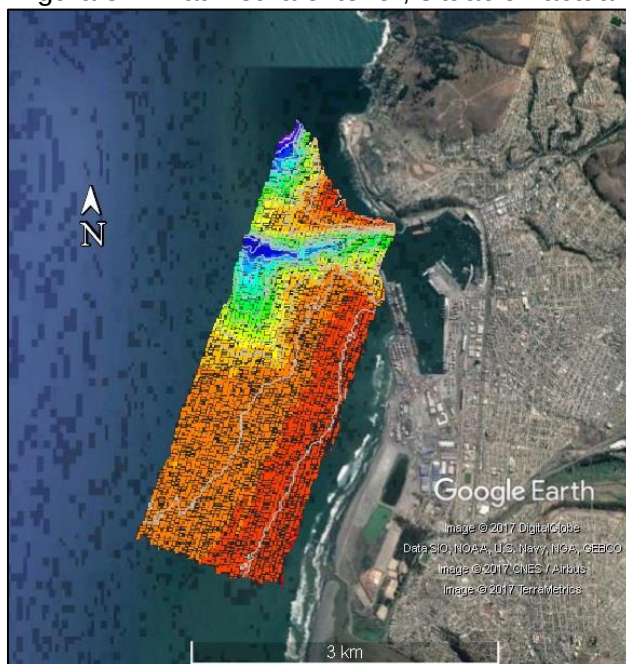
N°	Nombre	Escala
4000	Bahía Coquimbo a Bahía Valparaíso	1:500.000
5000	Bahía Valparaíso a Golfo de Arauco	1:500.000
5114	Aproximación a Puerto San Antonio	1:10.000
5115	Puerto San Antonio	1:5.000

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 BATIMETRÍA DE DETALLE SITUACIÓN ACTUAL

Batimetría realizada por Global Ltda., año 2012 para EPSA, que presenta las condiciones actuales de batimetría en las proximidades del puerto (Figura 5-1).

Figura 5-1: Batimetría exterior, situación actual.

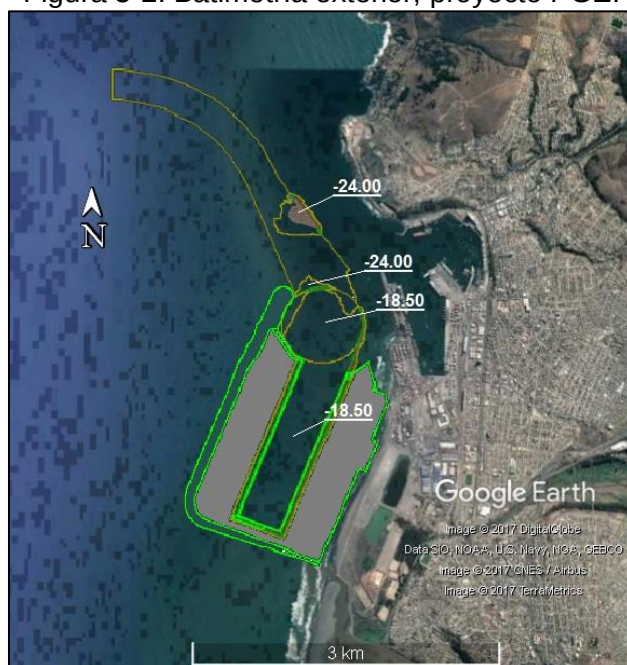


Fuente: Elaboración propia.

5.1.3 BATIMETRÍA PROYECTO PGE

La batimetría con proyecto PGE se definió a partir de lo determinado por PRDW (2016), donde las profundidades de la nueva dársena y el círculo de reviro alcanzan los 18.5 m, mientras que para el canal de acceso se alcanzará como mínimo los 24 m de profundidad.

Figura 5-2: Batimetría exterior, proyecto PGE.



Fuente: Elaboración propia.

5.2 MAREA

Los planos característicos del nivel del mar en San Antonio fueron obtenidos mediante el análisis de los componentes armónicos y no armónicos de la marea. Dicho análisis se realizó sobre datos correspondientes al año 2016, recopilados desde el mareógrafo ubicado en el puerto de San Antonio, perteneciente al SHOA.

5.2.1 ANÁLISIS ARMÓNICO

El análisis de armónicos es el método más utilizado para el estudio de la marea astronómica, basándose en que dicha marea está formada por componentes armónicas cuyos periodos se encuentran ya definidos, y coinciden con los periodos de algunos movimientos astronómicos relativos entre la tierra la luna y el sol. Este análisis consiste en realizar un ajuste por mínimos cuadrados, es decir, calcular minimizando el cuadrado de las diferencias entre los niveles observados y los estimados en el método.

Para el análisis se determinaron 67 constituyentes armónicas, las cuales permitieron establecer el régimen mareal, usando la función T_Tide (Pawlowicz et al., 2002), en el software Matlab para el proceso de datos.

Los principales componentes armónicos de la marea analizados con su respectiva valorización se detallan a continuación:

Tabla 5-2: Principales componentes armónicos de la marea.

Símbolo	Nombre	Periodo solar [hrs]	Semiapertura [m]
O1	Lunar declinacional diario	25.82	0.084
K1	Lunisolar declinacional diario	23.93	0.138
N2	Lunar eclíptica mayor semidiurna	12.66	0.101
M2	Lunar principal semidiurna	12.42	0.441
S2	Solar principal semidiurna	12	0.148

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 RÉGIMEN MAREAL

El régimen de marea analizada corresponde a mixta semidiurna, con dos pleamares y dos bajamares en un día (23 horas y 50 minutos), según coeficiente de Courtier, el cual analiza las principales componentes armónicas de la marea, como se muestra:

$$\zeta = \frac{K1 + O1}{M2 + S2} = 0.378$$

Si $\zeta < 0,25$	→ Régimen semi diario
Si $0,25 < \zeta < 1,5$	→ Régimen mixto semi diario
Si $1,5 < \zeta < 3,0$	→ Régimen mixto diario
Si $3,0 < \zeta$	→ Régimen diario

5.2.3 ANÁLISIS NO ARMÓNICO

Mediante el análisis no armónico, se obtuvieron los niveles característicos del mar en la estación. Para este análisis se utilizó el Método Oficial para el Cálculo de los Valores No-Armónicos de la Marea, según publicación SHOA N°3202 Ed. 1999, "Instrucciones Oceanográficas N° 2" del SHOA.

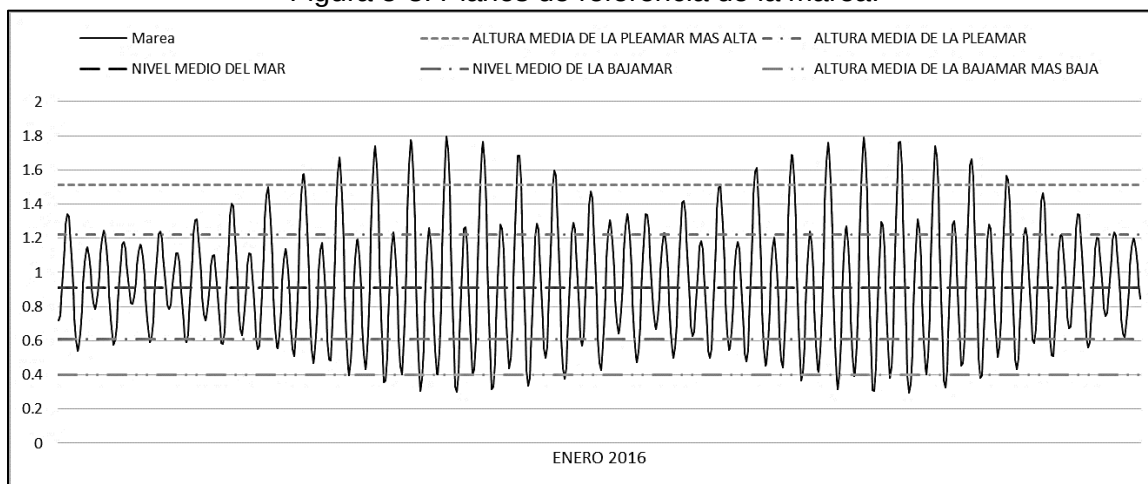
El análisis no armónico de la marea presenta los siguientes planos mostrados en la Tabla 5-3 y el Figura 5-3.

Tabla 5-3: Planos de referencia de la marea.

Planos de referencia de la marea	NRS [m]
ALTURA MEDIA DE LA PLEAMAR MÁS ALTA	+1.51
ALTURA MEDIA DE LA PLEAMAR	+1.22
NIVEL MEDIO DEL MAR	+0.91
ALTURA MEDIA DE LA BAJAMAR	+0.61
ALTURA MEDIA DE LA BAJAMAR MÁS BAJA	+0.40

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-3: Planos de referencia de la marea.



Fuente: Elaboración propia.

5.3 MEDICIONES DE CAMPO DISPONIBLES

5.3.1 MEDICIÓN DE OLAJE IN SITU

Las mediciones de oleaje se realizaron por parte de la empresa Bordemar Ingeniería SPA para EPSA, tanto para la condición de invierno como para la condición de verano, en nodos llamados norte y sur. Dichos registros de oleaje se llevaron a cabo con equipo ADCP RDI (Figura 5-4), programado para medir durante 35 minutos cada 3 horas.

Figura 5-4: Dispositivo ADCP RDI.



Fuente: Informe técnico olas, Bordemar ingeniería SPA.

Los rangos de operación de la ADCP son los siguientes:

- Profundidad máxima : 50 m (600 KHz)
- Resolución : 0.1 cm/s
- Rango de velocidad : +- 5m/s (default) +- 20 m/s (máx.)
- Numero de celdas : 1 - 255

Las campañas de medición de oleaje se llevaron a cabo en los nodos detallados en la Tabla 5-4, Figura 5-5 y Figura 5-6.

Tabla 5-4: Detalle de registro de oleaje.

Nodo	Fecha de registro	Coordenadas UTM	Profundidad [m]	Corrección declinación magnética
INVIERNO NORTE	21 de Julio de 2016 al 23 de Agosto de 2016	6281239 E 256027 N	16	2.86° E
INVIERNO SUR		6280407 E 256186 N	16.25	
VERANO NORTE	26 de Diciembre de 2015 al 27 de Enero de 2016	6281223 E 256017 N	17.34	
VERANO SUR		6280291 E 256140 N	15.2	

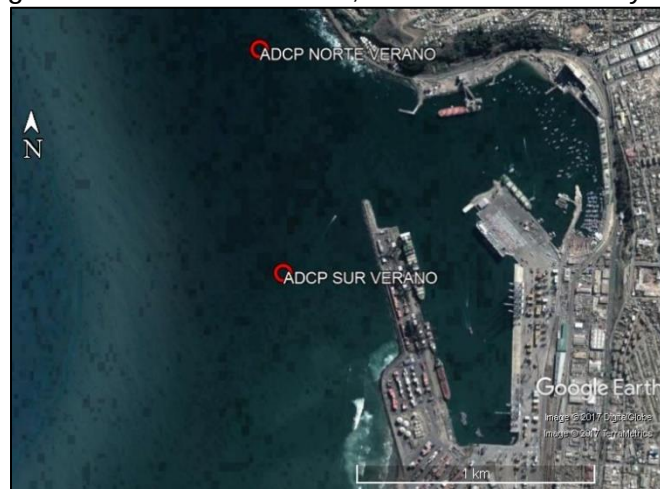
Fuente: Informe técnico olas, Bordemar ingeniería SPA.

Figura 5-5: Ubicación ADCP, nodos invierno norte y sur.



Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes de Google earth.

Figura 5-6: Ubicación ADCP, nodos verano norte y sur.



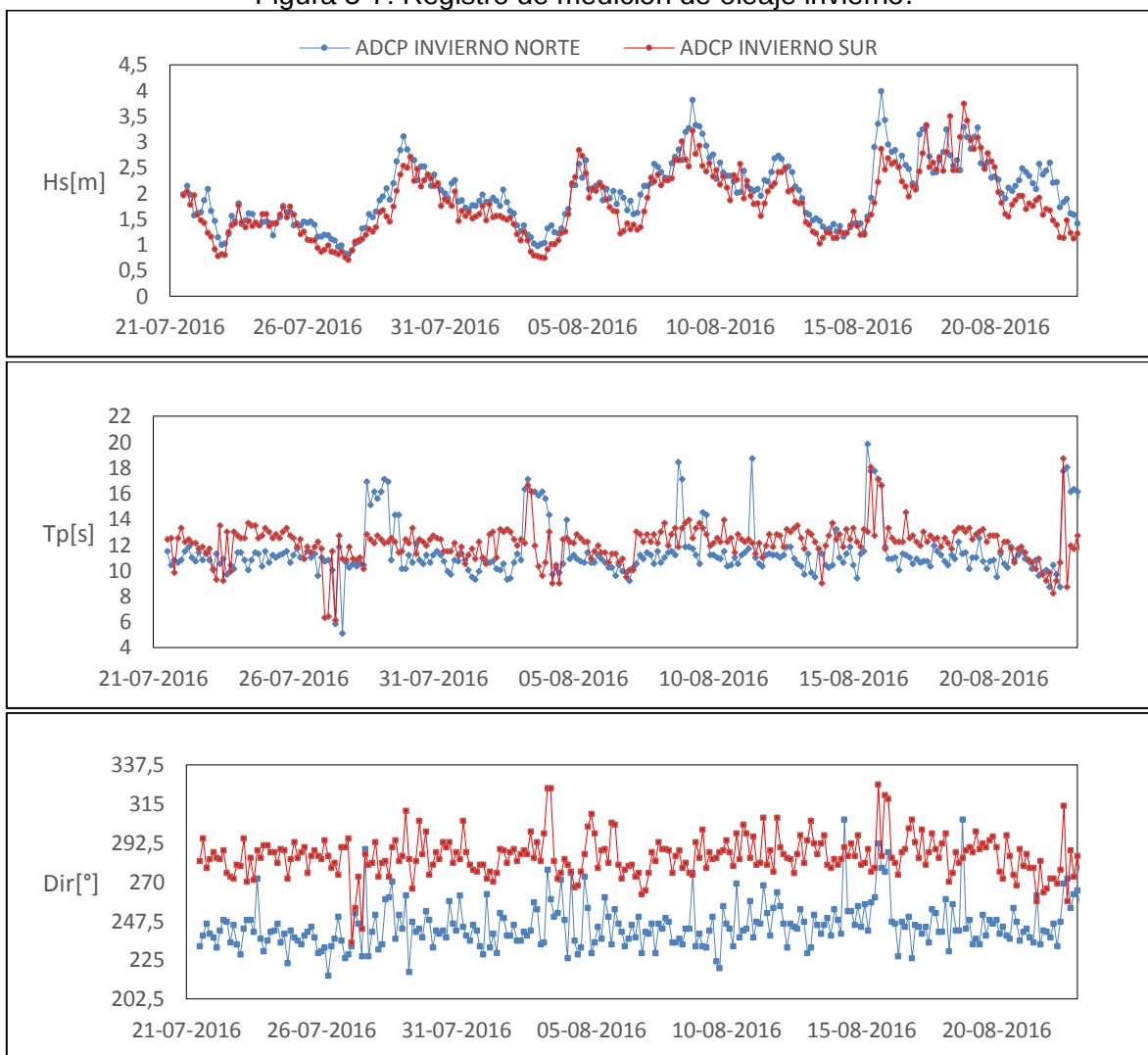
Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes de Google earth.

5.3.2 REGISTRO DE OLAJE

5.3.2.1 Campaña invierno

La Figura 5-7 muestra el registro de medición de oleaje para la época de invierno, en los nodos norte y sur para el periodo comprendido entre el 21 de Julio al 23 de Agosto de 2016.

Figura 5-7: Registro de medición de oleaje invierno.

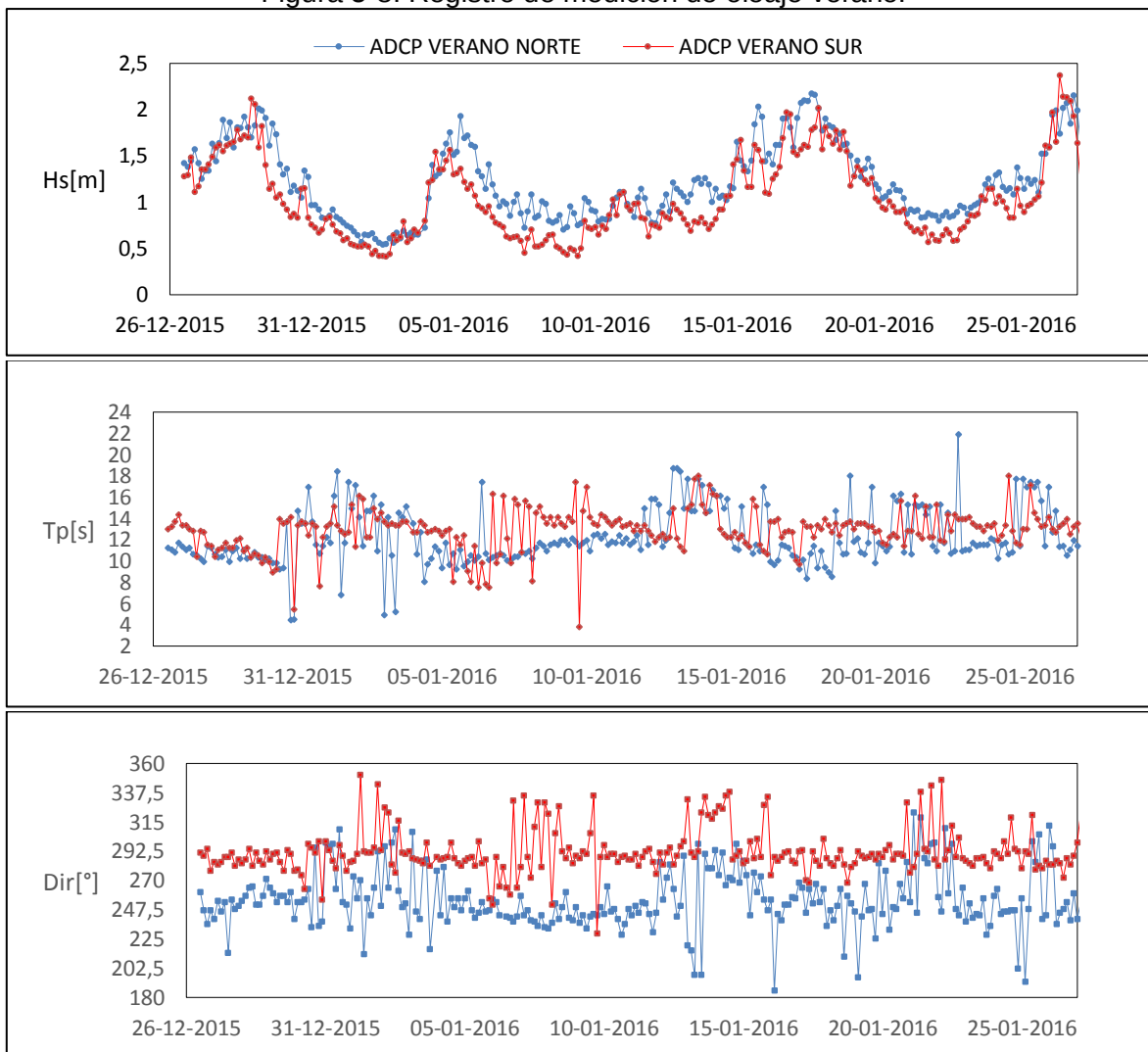


Fuente: Elaboración propia.

5.3.2.2 Campaña verano

La Figura 5-8 muestra el registro de medición de oleaje para la época de verano, en los nodos norte y sur para el periodo comprendido entre el 26 de Diciembre de 2015 al 27 de Enero de 2016.

Figura 5-8: Registro de medición de oleaje verano.



Fuente: Elaboración propia.

5.4 ESTUDIO DE OLEAJE

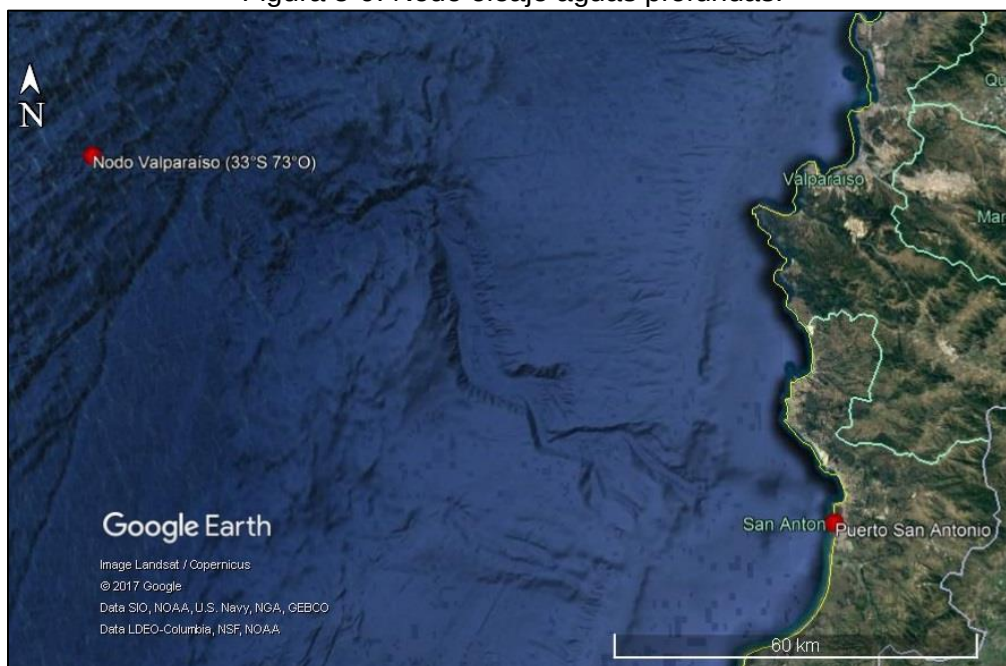
5.4.1 DESCRIPCIÓN OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS

La bahía de San Antonio se encuentra abierta al Océano Pacífico, por lo que sus costas se ven afectadas por oleaje tipo swell, siendo el oleaje reinante aquel proveniente desde la dirección SW, resultado del anticiclón permanente del Pacífico Sur.

En general la incidencia del SW, o III cuadrante, suele tener períodos más largos, de hasta 22 segundos, en tanto que los oleajes de los temporales de invierno, del IV cuadrante, suelen tener períodos menores a 14 segundos, debido a que los fetch se ubican más cerca de la costa. En los meses de verano, cuando en el Hemisferio Norte ocurren temporales de invierno de gran magnitud, estas olas pueden alcanzar el Hemisferio Sur, y pueden incidiendo en el litoral chileno con alturas relativamente bajas, pero con períodos largos de hasta 24 segundos.

Los datos de oleaje analizados corresponden a 34 años de parámetros de resumen de altura, periodo y dirección cada 3 horas, obtenidos del modelo WAVEWATCH III (Atlas de oleaje para Chile, 2017), en un nodo en aguas profundas ubicado frente a la región de Valparaíso, en las coordenadas 33°S 73°W.

Figura 5-9: Nodo oleaje aguas profundas.



Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes de Google earth.

Clima medio de oleaje aguas profundas

Con el fin de describir el oleaje en aguas profundas se confeccionaron tablas de incidencia de altura significativa v/s período peak, altura significativa v/s dirección y período peak v/s dirección. Además en la Figura 5-10 se presentan las rosas de oleaje para altura y periodo.

Tabla 5-5: Incidencia altura significativa v/s periodo peak.

		Tp[s]											R%	A%	
		3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21	21-23	23-25			Total
H[m]	0.5-1		3	9	98	394	284	63	30	22			903	0.858	0.858
	1-1.5	6	40	102	1121	4465	3948	760	359	97	10	4	10912	10.374	11.232
	1.5-2		388	376	1708	10925	10427	1732	724	260	49	9	26598	25.285	36.517
	2-2.5		798	908	1149	9995	13114	1900	657	179	13	3	28716	27.299	63.816
	2.5-3		239	1327	908	5176	11955	1519	348	54	2		21528	20.466	84.282
	3-3.5		13	810	607	1568	6697	1318	205	22	4		11244	10.689	94.971
	3.5-4		1	115	325	337	2325	805	114	10	3		4035	3.836	98.807
	4-4.5			8	71	36	422	283	90	14			924	0.878	99.685
	4.5-5				21	19	100	87	18				245	0.233	99.918
	5-5.5				3	5	28	15	10				61	0.058	99.976
	5.5-6				3	3	6	5	1				18	0.017	99.993
	6-6.5				2	2	1		1				6	0.006	99.999
	6.5-7						1						1	0.001	100
		Total	6	1482	3655	6016	32925	49308	8487	2557	658	81	16	105191	
R%		0.006	1.409	3.475	5.719	31.300	46.875	8.068	2.431	0.626	0.077	0.015	100		
A%		0.006	1.415	4.889	10.608	41.909	88.783	96.851	99.282	99.908	99.985	100			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-6: Incidencia dirección v/s altura significativa.

		H[m]													R%	A%	
		0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4-4.5	4.5-5	5-5.5	5.5-6	6-6.5	6.5-7			Total
Dir	S	611													8	0.008	0.008
	SSW	5	389	2012	3742	4019	2780	1066	196	34	5	1			14249	13.546	13.553
	SW	435	6413	18418	20437	14767	6850	2113	467	73	6			69979	66.526	80.079	
	WSW	388	3412	5158	3534	1930	1115	514	169	72	32	6	1		16331	15.525	95.604
	W	72	628	837	713	462	228	139	28	42	16	5	1	1	3172	3.015	98.620
	WNW	3	68	139	206	225	162	95	34	12	1	3	1		949	0.902	99.522
	NW		2	33	68	100	80	76	18	8		2	1		388	0.369	99.891
	NNW			1	10	23	28	32	12	4	1	1	2		114	0.108	99.999
	N						1								1	0.001	100
Total		903	10912	26598	28716	21528	11244	4035	924	245	61	18	6	1	105191		
R%		0.858	10.374	25.285	27.299	20.466	10.689	3.836	0.878	0.233	0.058	0.017	0.006	0.001	100		
A%		0.858	11.232	36.517	63.816	84.282	94.971	98.807	99.685	99.918	99.976	99.993	99.999	100			

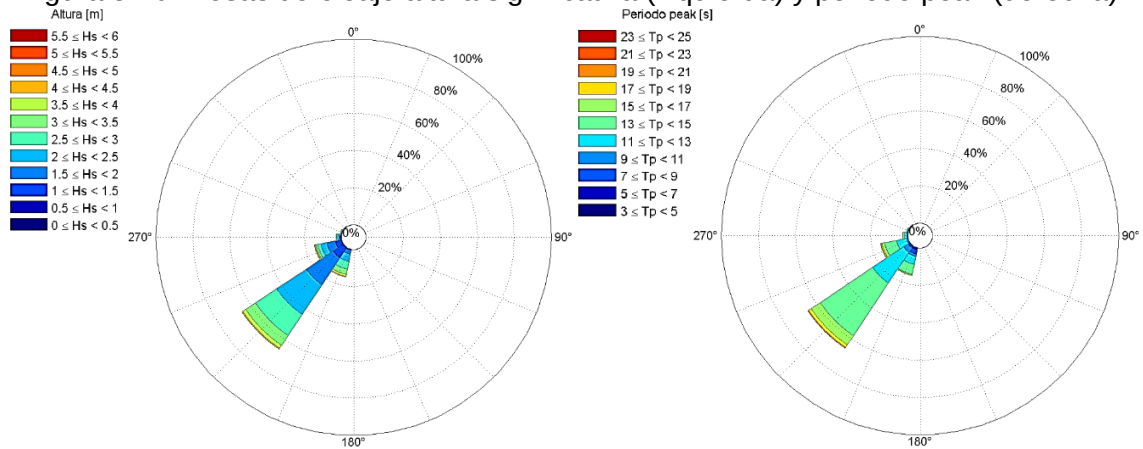
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-7: Incidencia dirección v/s periodo peak.

		Tp[s]											R%	A%	
		3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21	21-23	23-25			Total
Dir	S	71											8	0.008	0.008
	SSW	6	1113	2265	1221	4089	5011	426	103	15			14249	13.546	13.553
	SW		267	1057	3126	21146	36008	6193	1718	416	40	8	69979	66.526	80.079
	WSW		5	32	802	5939	7178	1584	590	166	28	7	16331	15.525	95.604
	W			57	462	1285	913	240	140	61	13	1	3172	3.015	98.620
	WNW		25	77	229	402	172	39	5				949	0.902	99.522
	NW		51	114	135	62	22	3	1				388	0.369	99.891
	NNW		13	52	41	2	4	2					114	0.108	99.999
	N		1										1	0.001	100
Total		6	1482	3655	6016	32925	49308	8487	2557	658	81	16	105191		
R%		0.006	1.409	3.475	5.719	31.300	46.875	8.068	2.431	0.626	0.077	0.015	100		
A%		0.006	1.415	4.889	10.608	41.909	88.783	96.851	99.282	99.908	99.985	100			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-10: Rosas de oleaje altura significativa (izquierda) y periodo peak (derecha).



Fuente: Elaboración propia.

El oleaje reinante proviene desde el III cuadrante en un 95.6% de los casos, donde un 66.52% del total corresponde al SW, también encontrando direcciones desde el WSW en un 15.52% y un 13.54% desde el SSW.

Se observa que un 46.87% de los casos corresponde a periodos entre 13 y 15 s y un 31.3% periodos entre 11 y 13 s. Estos periodos provienen mayormente desde el III cuadrante, siendo principalmente desde el SW en un 51.75%.

5.4.2 PROPAGACIÓN MODELO SWAN

La propagación de oleaje se realiza desde el nodo de aguas profundas a una zona de aguas intermedias, en un nodo ubicado en las coordenadas 33.588°S 71.620°W, denominado nodo “A”, el cual permitirá el acople del modelo de agitación y resonancia portuaria. La transferencia de oleaje desde aguas profundas hasta el nodo A, ubicado según muestra en la Tabla 5-8, se realizó mediante el método de propagación semipurista, esto es, la propagación de oleaje con altura de 1 m, considerando que la altura de las olas representa solo un factor de escala.

Esta propagación se realiza mediante una transferencia de parámetros de resumen, con la que es posible obtener los coeficientes de transformación y direcciones que permitirán estimar las características del oleaje en las cercanías del puerto.

Tabla 5-8: Coordenadas y profundidad nodo A.

NOMBRE NODO	COORDENADA UTM		COORDENADA GEOGRÁFICA		PROFUNDIDAD [m NRS]
	E[m]	N[m]	Lat[°]	Long[°]	
A	255600	6280770	-33.589°	-71.616°	138

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-11: Ubicación nodo A



Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes de Google earth.

La altura y dirección del oleaje en el Nodo A se obtiene de la siguiente forma:

$$H_s = H_0 \times K_{ts}(T_0, \theta_0)$$

$$\theta = f(\theta_0, T_0)$$

Donde:

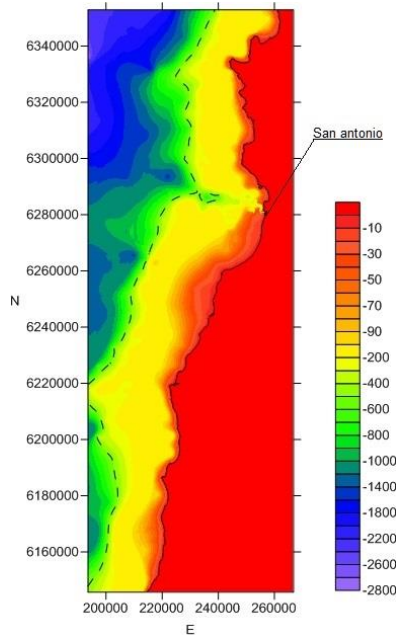
- H_s : Altura significativa Nodo A.
- H_0 : Altura significativa en aguas profundas.
- K_{ts} : Coeficiente de transformación obtenido mediante modelo SWAN en Nodo A.
- T_0 : Periodo en aguas profundas.
- θ_0 : Dirección en aguas profundas.

La dirección de incidencia del oleaje se obtiene a partir de los efectos experimentados en los dominios de resolución, es decir, el oleaje experimentará una transformación en la malla de propagación en SWAN, a partir de la cual se obtendrán nuevas direcciones en el nodo "A".

Dominio físico modelo SWAN

Se utilizó un dominio de integración de 400 x 400 m, con tres mallas anidadas de 200 x 200 m., 100 x 100 m. y 50 X 50 m. La malla general llega hasta una distancia tal donde existen profundidades mayores a 500 m, profundidad donde el oleaje analizado no sufre efectos por fondo. La Figura 5-12 muestra la batimetría del modelo, destacando con una línea segmentada el veril 500m.

Figura 5-12: Batimetría modelo SWAN.



Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros modelados se presentan en la Tabla 5-9, determinados a partir del clima de oleaje obtenido en el Capítulo 5.4.1. Las direcciones fueron discretizadas cada 22.5°, mientras que los periodos del oleaje se discretizaron cada dos segundos. El parámetro de acentuación del máximo del espectro sintético JONSWAP, y el parámetro Directional Spreading, se definieron a partir de los resultados obtenidos en el proyecto Atlas de Oleaje para Chile, siendo estos los valores medios obtenidos para el nodo Valparaíso, en aguas profundas (33°S 73°W).

Tabla 5-9: Parámetros modelados.

H[m]	Tp[s]	θ_0 [°]	γ Jonswap	Directional Spreading [°]
1	8		1.42	21.9
	10	202.5		
	12	225		
	14	247.5		
	16	270		
	18	292.5		
	20	315		
	22	337.5		
	24			

Fuente: Elaboración propia.

5.4.3 RESULTADOS

Coeficientes de transformación y clima de oleaje en nodo A

Para la obtención de los coeficientes de transformación del oleaje, se fijó una estación de control en el nodo A con el objetivo de evaluar la transformación del oleaje y acoplar al modelo de agitación y resonancia. En la Tabla 5-10, Figura 5-13 y Figura 5-14 se presentan los resultados de las propagaciones, identificando su transformación de altura y dirección.

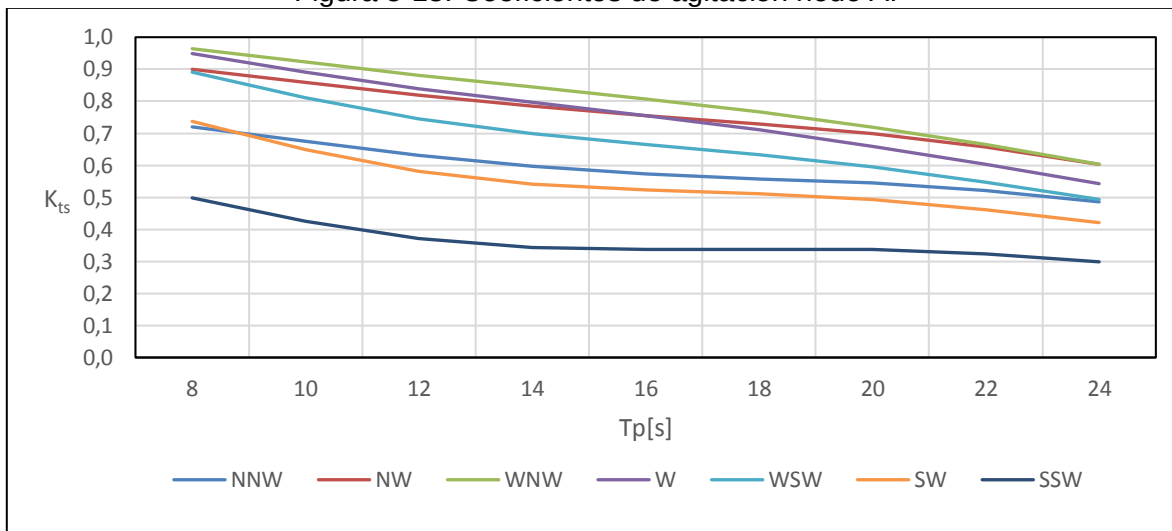
Tabla 5-10: Coeficientes de transformación de altura significativa nodo A.

		NNW		NW		WNW		W		WSW		SW		SSW	
		Kt	Dir	Kt	Dir	Kt	Dir	Kt	Dir	Kt	Dir	Kt	Dir	Kt	Dir
Tp[s]	8	0.72	319.2	0.90	307.8	0.96	291.5	0.95	271.3	0.89	254.5	0.74	241.7	0.50	232.9
	10	0.67	316.3	0.86	305.8	0.92	291.4	0.89	273.7	0.81	258.6	0.65	246.8	0.43	238.4
	12	0.63	313.1	0.82	303.8	0.88	291.6	0.84	276.4	0.74	263.1	0.58	252.7	0.37	244.9
	14	0.60	310.2	0.78	302.3	0.84	292.1	0.80	279.0	0.70	267.5	0.54	259.1	0.34	253.0
	16	0.57	307.7	0.75	301.3	0.81	292.9	0.76	281.4	0.67	271.5	0.52	265.2	0.34	261.2
	18	0.56	305.7	0.73	300.7	0.77	293.8	0.71	283.5	0.63	274.8	0.51	270.2	0.34	268.0
	20	0.54	304.1	0.70	300.3	0.72	294.5	0.66	285.1	0.59	277.2	0.49	273.7	0.34	272.7
	22	0.52	303.1	0.66	300.1	0.67	295.0	0.60	286.2	0.55	278.8	0.46	275.9	0.32	275.4
	24	0.49	302.6	0.60	300.0	0.60	295.3	0.54	287.0	0.49	279.8	0.42	277.1	0.30	276.8

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de los coeficientes de agitación del oleaje obtenidos presentan una disminución conforme aumenta el periodo, como se muestra en la Figura 5-13.

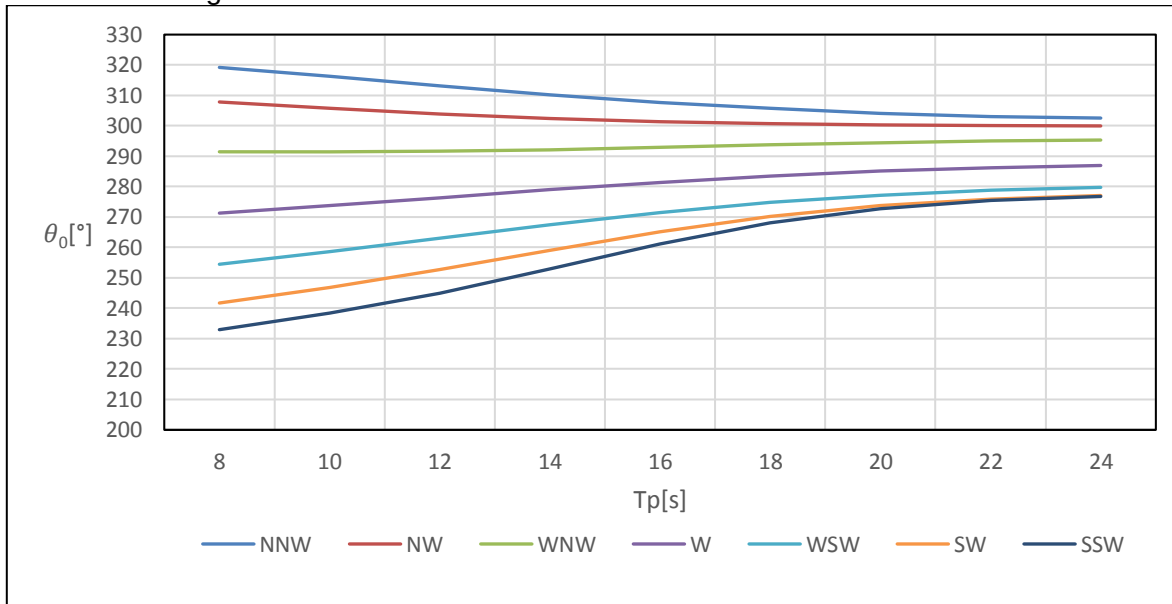
Figura 5-13: Coeficientes de agitación nodo A.



Fuente: Elaboración propia.

Las direcciones del oleaje en el nodo A tienden a concentrarse entre las direcciones 240° y 320° para periodos entre 8 y 14 s y entre 280° y 300° para periodos entre 22 y 24 s.

Figura 5-14: Coeficientes de transformación direccional nodo A.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-11: Incidencia periodo v/s dirección nodo A.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Dir [°]	N	13									13	0.01	0.01
	NW	230	171	68	34	4	1				508	0.47	0.48
	W	58	1266	7195	43403	8792	2592	662	79	17	64064	59.25	59.74
	WNW	102	231	400	1065	322	158	66	13	3	2360	2.18	61.92
	WSW	4784	4479	26055	5856						41174	38.08	100
	Total	5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119		
R%		4.80	5.69	31.19	46.58	8.43	2.54	0.67	0.09	0.02			
A%		4.80	10.48	41.67	88.25	96.68	99.22	99.90	99.98	100			

Fuente: Elaboración propia.

Se muestra que mayormente el oleaje en el nodo A proviene principalmente desde las direcciones WNW, W y WSW (99.51%), con periodos comprendidos entre los 8 y 20 s que representan el 99.89% de los datos.

6. MODELO NUMÉRICO DE AGITACIÓN Y RESONANCIA

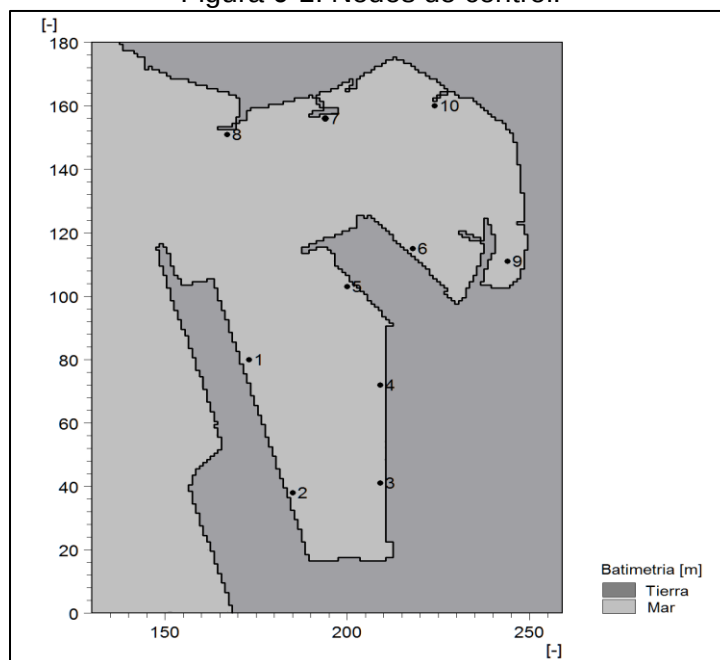
Para el modelo de agitación y resonancia se definió un nodo de control en el sector de Puertecito, en la llamada posa chica, que permitirá establecer las variaciones de las condiciones que actualmente se presentan en el sector. Además se establecieron nodos de control en los sitios administrados por EPSA que muestran las variaciones de agitación y resonancia (ANEXOS). En la Tabla 6-1 se definen las características de los nodos, y en la Figura 6-1 se muestra su ubicación en la malla.

Tabla 6-1: Nodos de control.

Nodo	Coordenadas malla [m]		Coordenadas UTM [m]		Profundidad [m]	SECTOR	Sitio
	X	Y	X	Y			
1	173	80	256725	6280300	11.73	TERMINAL STI	1, 2
2	185	38	256844	6279880	25		3
3	209	41	257083	6279910	8.82	TERMINAL PCE	4
4	209	72	257084	6280220	13.20		5
5	200	103	256994	6280529	12.33		6
6	218	115	257176	6280650	8.54		7
7	194	156	256933	6281060	12.20	TERMINAL PUERTO PANUL	8
8	167	151	256664	6281009	21.20	TERMINAL SITIO 9	9
9	244	111	257434	6280610	3.19	PUERTECITO	NA
10	224	160	257250	6281120	12.30	MUELLE PESCADORES	NA

Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-1: Nodos de control.



Fuente: Elaboración propia.

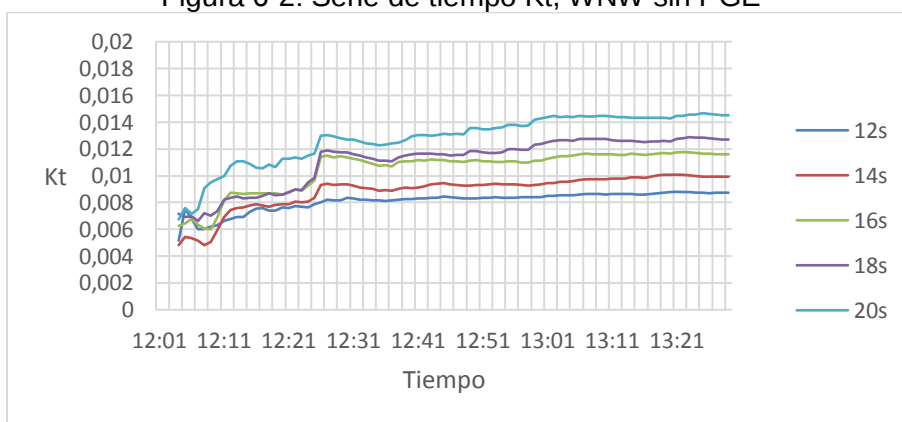
6.1 PARÁMETROS BÁSICOS

Para las simulaciones tanto de agitación como de resonancia se utilizó el modulo 2D, en Mike21 BW, incluyendo términos de aguas profundas en las ecuaciones Boussinesq con un factor de dispersión lineal “B” de 0.066, una discretización espacial de términos convectivos mediante esquemas “*Quadratic upwinding with simple upwinding at steep gradients and near land*” y un factor de tiempo de extrapolación de 0.5 para profundidades mayores a 35 m, determinados mediante pruebas de estabilidad numérica.

El tiempo de simulación fue de 90 minutos, lo que asegura que ondas de corto periodo puedan llegar desde la zona de generación de oleaje (Paleta virtual) hasta todas las áreas del modelo.

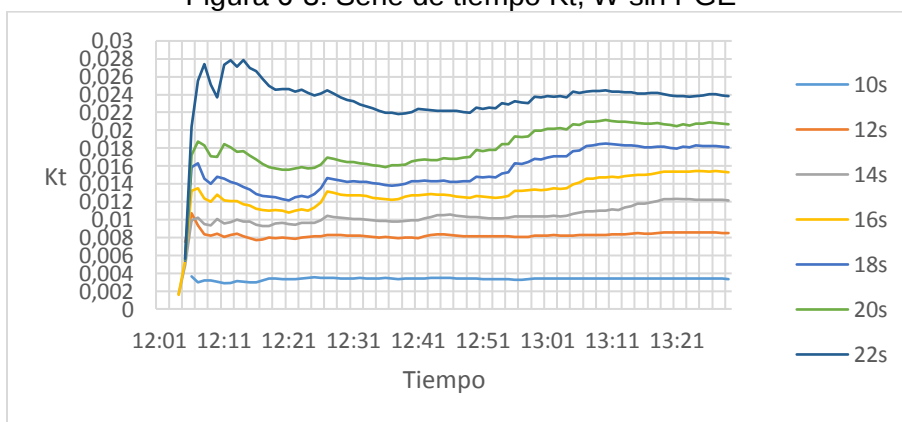
Esto se verifica a través de los siguientes gráficos de Kt en función del Tiempo, para la condición sin y con proyecto PGE en el nodo 9, donde es posible ver que 90 minutos es suficiente para alcanzar una condición estable:

Figura 6-2: Serie de tiempo Kt, WNW sin PGE



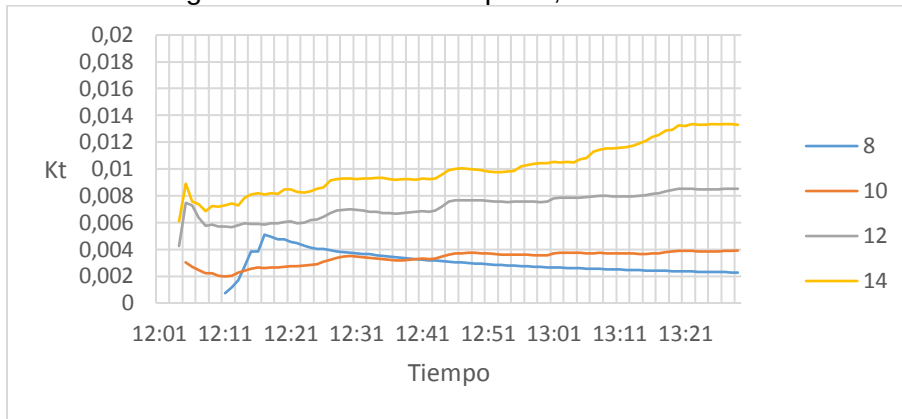
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-3: Serie de tiempo Kt, W sin PGE



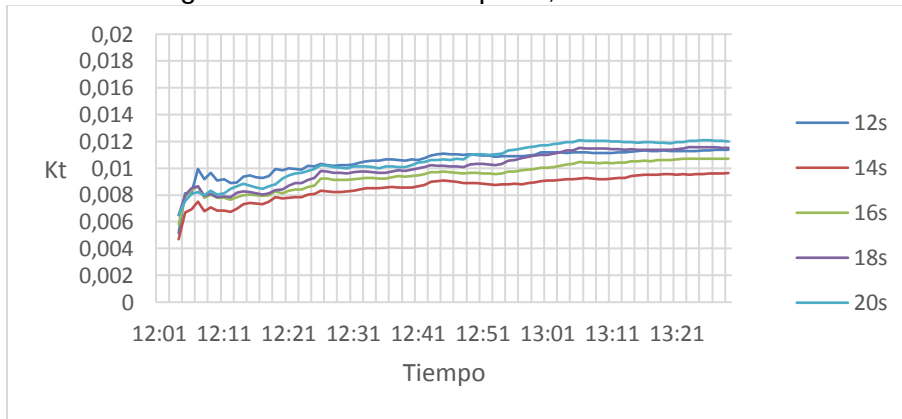
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-4: Serie de tiempo Kt, WSW sin PGE



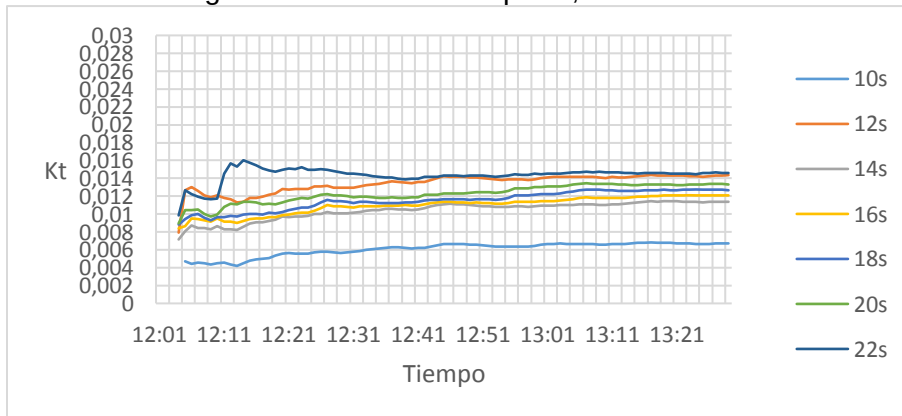
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-5: Serie de tiempo Kt, WNW con PGE



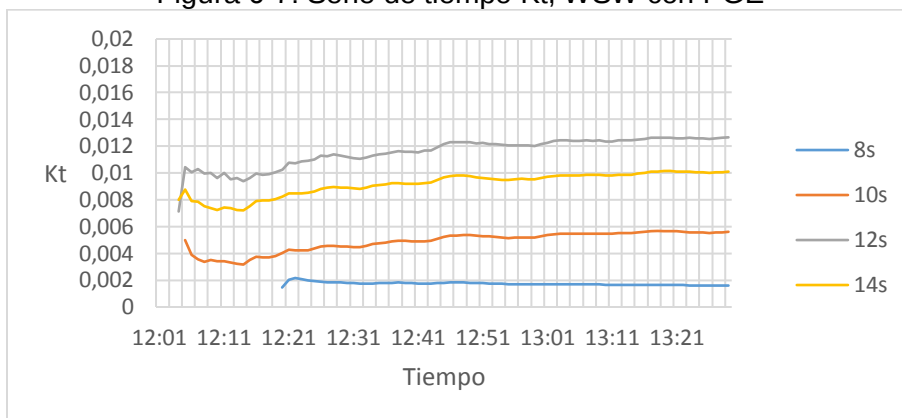
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-6: Serie de tiempo Kt, W con PGE



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-7: Serie de tiempo Kt, WSW con PGE



Fuente: Elaboración propia.

Se calculó por medio de la herramienta Mike21 BW Setup Planner un paso de tiempo de 0.226 s y 23950 pasos, alcanzando un número de Courant de 0.7.

Todas las simulaciones fueron propagadas con un nivel medio del mar de 0.91 m, mostrado en el Capítulo 5.2.3.

6.2 MODELO DE AGITACIÓN

6.2.1 BATIMETRÍA

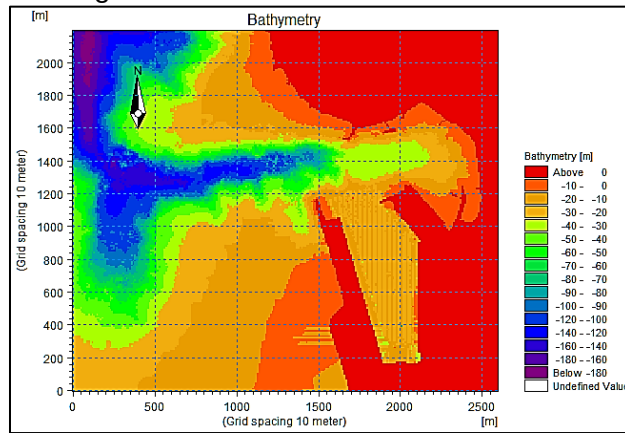
La batimetría utilizada para elaborar el modelo es la descrita en el Capítulo 5.1, con las dimensiones y profundidades mostradas en la Tabla 6-2, bajo una resolución de 10x10 m para condiciones actuales y futuras.

Tabla 6-2: Extensión y profundidad batimetría.

	Coordenadas UTM X [m]	Coordenadas UTM Y [m]	Profundidad [m]
Mínimo	254995	6279500	2
Máximo	257595	6281700	190

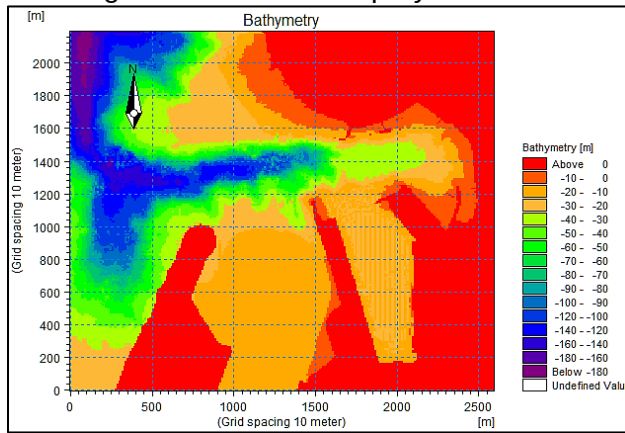
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-8: Batimetría situación actual.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-9: Batimetría proyecto PGE.



Fuente: Elaboración propia.

6.2.2 CONDICIONES DE BORDE HIDRODINÁMICAS

Las direcciones y periodos propagados en el modelo de agitación fueron determinadas a partir de la tabla de incidencia mostrada en el Capítulo 5.4.3, y a las mediciones de oleaje in situ (Capítulo 5.3), con el fin de validar estas. La Tabla 6-3 muestra los valores propagados desde el nodo A, donde se acoplan los modelos SWAN y Mike21.

Tabla 6-3: Parámetros propagados modelo Mike21.

		Tp [s]							
		8	10	12	14	16	18	20	22
DIR [°]	WNW			•	•	•	•	•	
	W		•	•	•	•	•	•	•
	WSW	•	•	•	•				

Fuente: Elaboración propia.

6.2.3 GENERACIÓN DE OLEAJE

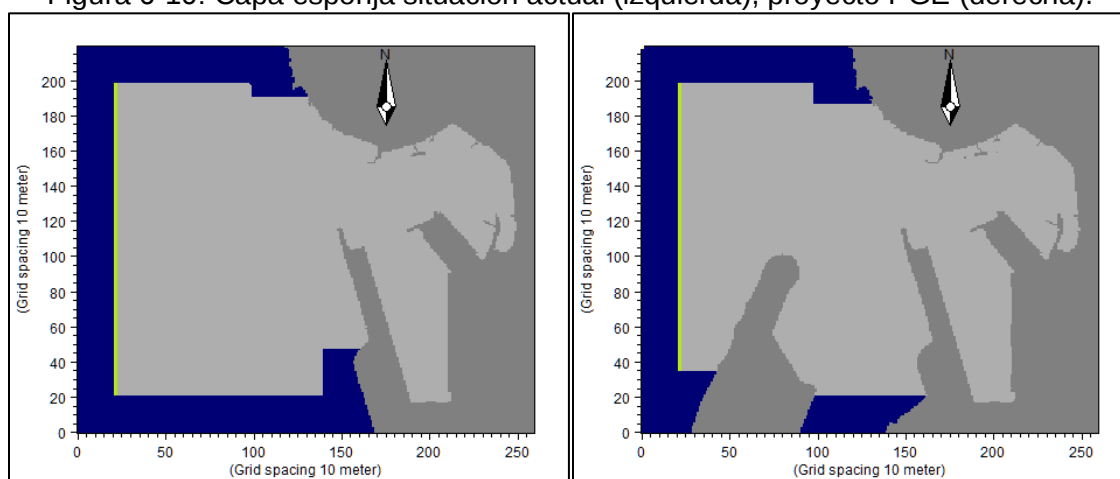
El oleaje modelado se originó en paletas de generación, mediante la herramienta “*Random Wave Generation*”, de Mike Toolbox, paletas que se ubican en el borde izquierdo del modelo batimétrico, contiguas a la capa esponja para así evitar posibles ruidos en la propagación, como se ve en color verde en la Figura 6-10.

Este oleaje se basa en un espectro tipo Jonswap, con un parámetro de acentuación $\gamma=1.34$, según Atlas de oleaje, con un paso de tiempo de 0.226 s y 23950 pasos, modelando un total de 90 minutos de oleaje con altura unitaria y condiciones hidrodinámicas vistas en el Capítulo 6.2.2.

6.2.4 CAPA ESPONJA

La capa esponja configurada a lo largo de los límites del modelo, se utiliza como absorbente de la energía que se propaga fuera de este. La esponja debe tener al menos un ancho de 20 capas, respaldadas por un límite cerrado, es decir, puntos de malla de tierra. Para minimizar las reflexiones, los valores de los coeficientes de la capa de esponja deben estar cerca de la unidad a lo largo de la primera línea de la cuadrícula, y deben aumentar suavemente hacia el límite / tierra (DHI, 2007). La capa esponja se puede ver en la Figura 6-10 en color azul, donde la línea de color amarillo representa la paleta generadora de oleaje.

Figura 6-10: Capa esponja situación actual (izquierda), proyecto PGE (derecha).

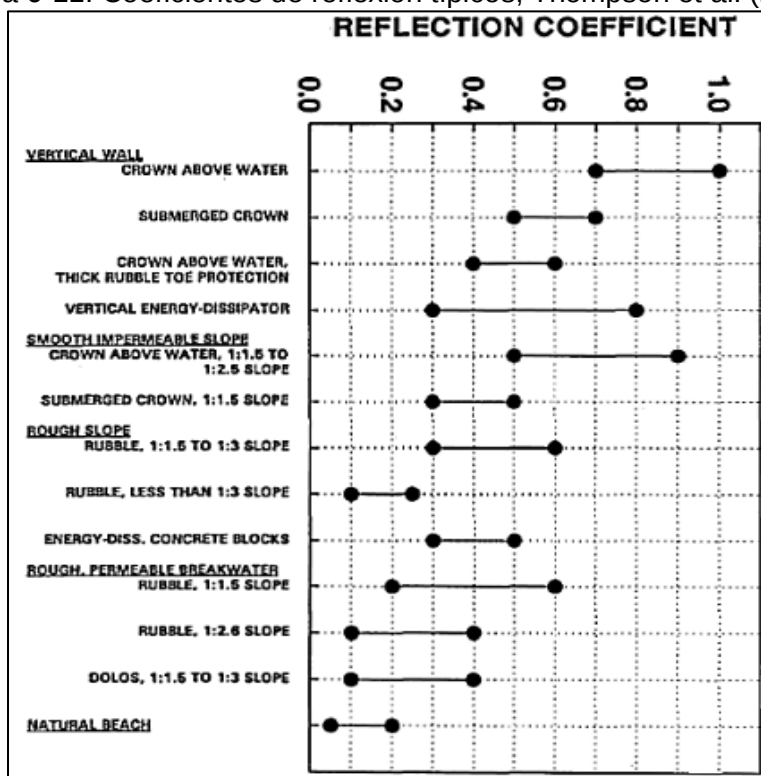


Fuente: Elaboración propia.

6.2.5 CAPA POROSA

Esta capa se utiliza para modelar la reflexión parcial y/o transmisión a través de las estructuras, la cual se definió según los valores de coeficientes de reflexión típicos presentados por Thompson et al. (1996).

Figura 6-11: Coeficientes de reflexión típicos, Thompson et al. (1996).



Fuente: (DHI, 2005).

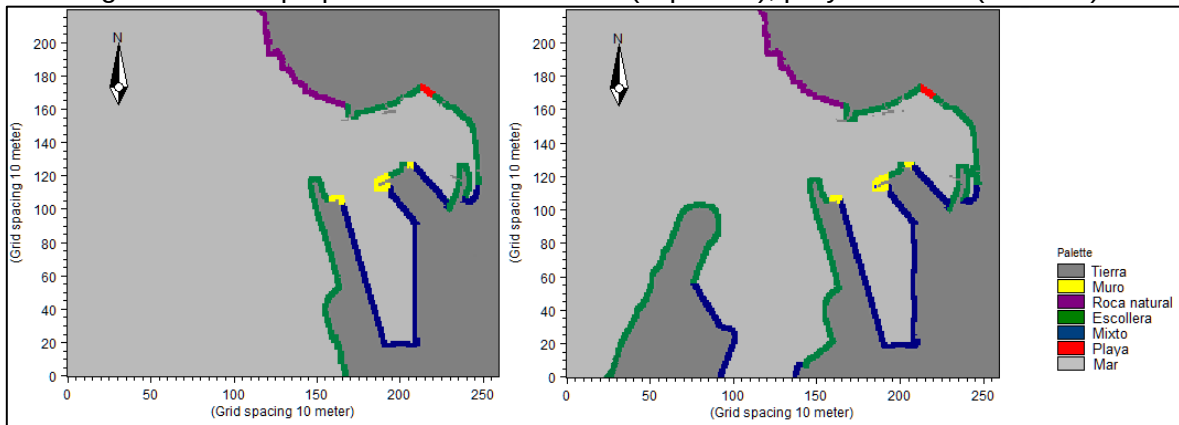
Tabla 6-4: Coeficientes de reflexión utilizados en el modelo.

Tipología	Coeficiente de reflexión
Muro	0.9
Roca natural	0.6
Escollera	0.6
Mixto ¹	0.4
Playa	0.2

Fuente: Elaboración propia.

¹ Tipología de pilotes sobre escollera.

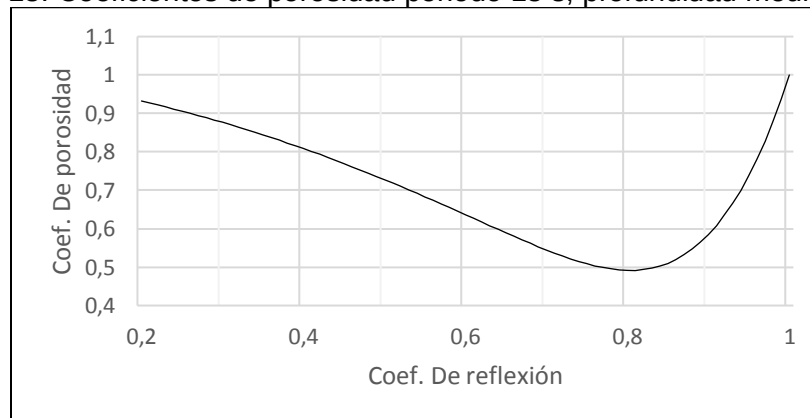
Figura 6-12: Capa porosa situación actual (izquierda), proyecto PGE (derecha).



Fuente: Elaboración propia.

En el modelo no es posible especificar directamente los coeficientes de reflexión, por lo que se recurrió a la herramienta “*Calculation of reflection coefficients*” de Mike 21 Toolbox, con la que fue posible obtener coeficientes de porosidad de las estructuras. En la Figura 6-13 se muestran a modo de ejemplo los coeficientes para un periodo de 18 s y una profundidad media de 14.79 m correspondiente a la tipología estructural muro.

Figura 6-13: Coeficientes de porosidad periodo 18 s, profundidad media 14.79 m.



Fuente: Elaboración propia.

6.2.6 RESULTADOS

6.2.6.1 Validación

Para validar el modelo de agitación, se propagó el oleaje con Mike21 BW desde el nodo A, hasta el nodo ADCP Norte, descrito en el Capítulo 5.3.1, comparando los datos obtenidos por el modelo y los registros del ADCP en el periodo exacto de medición según lo dispuesto en publicación SHOA 3201.

Se realizó una comparación de gráficos de excedencia, en donde se evaluaron los parámetros de la Altura de ola (H), Período peak (Tp) y Dirección (Dir). Además se compararon parámetros estadísticos para el periodo de invierno y verano. Los resultados obtenidos para la época de invierno presentaron una subestimación de los valores de altura significativa, debido posiblemente a los siguientes factores:

- Solo se consideró oleaje tipo swel, obviando el oleaje sea, de generación local, el cual para épocas de invierno puede aportar considerables niveles de energía al oleaje, aumentando su altura.
- Se supone un oleaje unimodal bajo un espectro tipo JONSWAP desde aguas profundas hasta aguas intermedias (modelo SWAN), y desde aguas intermedias hasta aguas someras (modelo MIKE21 BW).

Esta subestimación de altura significativa se mejoró utilizando un factor de corrección igual a 1.4 para cada uno los coeficientes de agitación obtenidos en el nodo A para la época de invierno, lo que permitió un mejor ajuste entre los valores de excedencia de alturas de oleaje para el nodo ADCP norte y el oleaje modelado. Estas correcciones se aplicaron al resto de los datos obtenidos con el modelo de agitación, en el periodo comprendido entre el 21 de junio y el 22 de septiembre de cada año mediante:

$$H_s = H_{sA} * K_t * F_c$$

Donde:

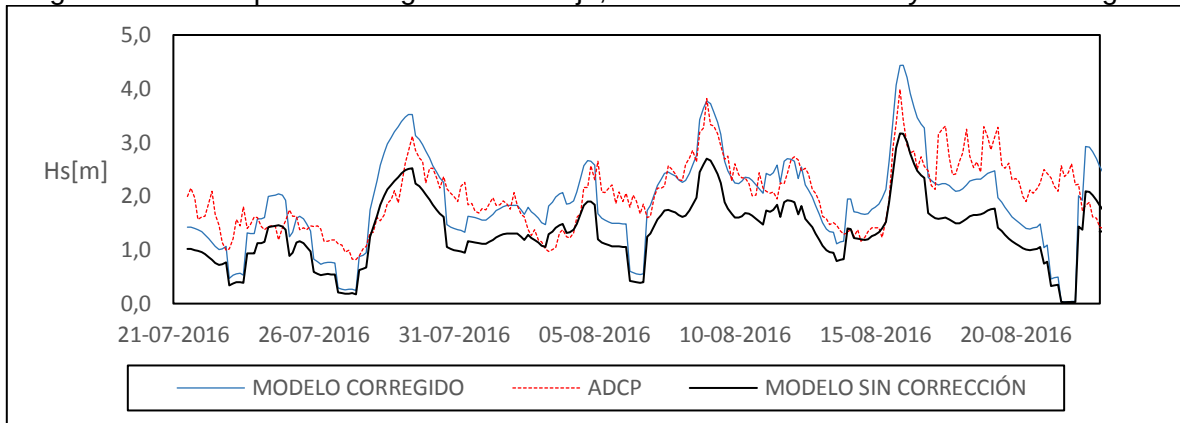
H_s : Altura significativa.

H_{sA} : Altura significativa en nodo A.

K_t : Coeficiente de agitación.

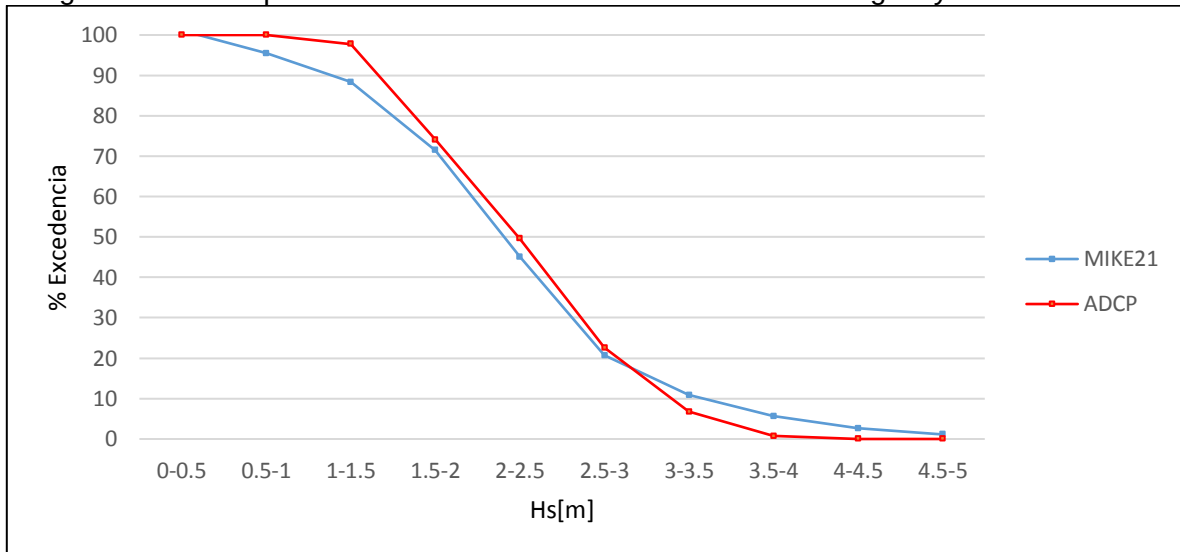
F_c : Factor de corrección.

Figura 6-14: Comparación registro de oleaje, modelo sin corrección y modelo corregido.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-15: Comparación excedencia modelo Mike21 BW corregido y ADCP invierno.



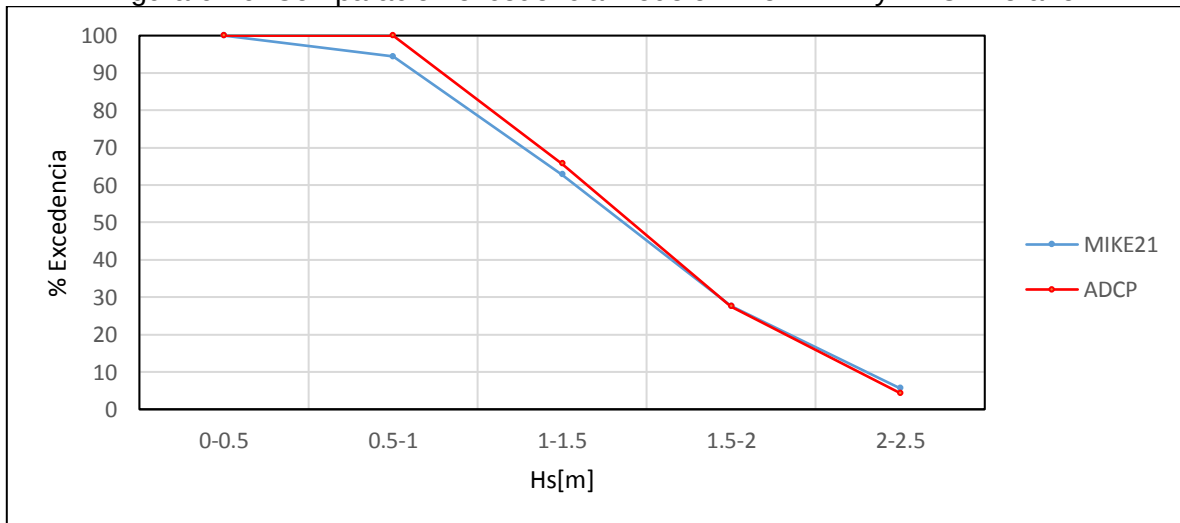
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-5: Comparación estadística modelo Mike21 BW y ADCP invierno.

		MIKE	ADCP	DIF
Hs[m]	Max	4.43	3.99	0.44
	Min	0.03	0.82	0.79
	Promedio	1.91	2.00	0.10
	Desvest	0.85	0.62	0.23
	Percentil 25%	1.01	1.46	0.45
	Percentil 50%	1.33	1.98	0.65
	Percentil 75%	1.69	2.42	0.73
Tp[s]	Max	20.00	20.00	0.00
	Min	8.00	6.00	2.00
	Promedio	13.67	11.49	2.18
	Desvest	2.11	2.21	0.10
	Percentil 25%	12	10.5	1.50
	Percentil 50%	14	10.9	3.10
	Percentil 75%	14	11.4	2.60
Dir[°]	Max	255.45	306.00	50.55
	Min	220.00	216.00	4.00
	Promedio	247.09	244.66	2.43
	Desvest	4.70	13.27	8.56
	Percentil 25%	243.82	236	7.82
	Percentil 50%	245.06	242	3.06
	Percentil 75%	253.47	250	3.47

Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-16: Comparación excedencia modelo Mike21 BW y ADCP verano.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-6: Comparación estadística modelo Mike21 BW y ADCP verano.

		MIKE	ADCP	DIFERENCIA
Hs[m]	Max	2.26	2.17	0.09
	Min	0.23	0.54	0.31
	Promedio	1.21	1.23	0.02
	Desvest.	0.47	0.41	0.06
	Percentil 25%	0.91	0.89	0.02
	Percentil 50%	1.07	1.14	0.07
	Percentil 75%	1.58	1.52	0.06
Tp[s]	Max	24.00	22.00	2.00
	Min	10.00	2.00	8.00
	Promedio	15.21	12.15	3.06
	Desvest.	2.93	2.78	0.15
	Percentil 25%	14.00	10.60	3.40
	Percentil 50%	14.00	11.40	2.60
	Percentil 75%	16.00	14.10	1.90
Dir[°]	Max	260.24	321.00	60.76
	Min	222.56	197.00	25.56
	Promedio	245.71	255.21	9.49
	Desvest.	10.05	19.19	9.14
	Percentil 25%	247.74	252.00	4.26
	Percentil 50%	247.74	260.00	12.26
	Percentil 75%	247.16	284.00	36.84

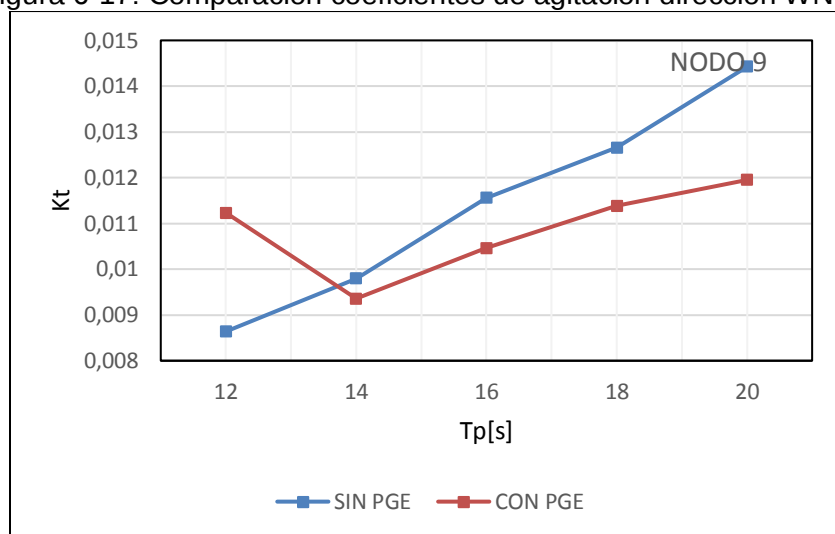
Fuente: Elaboración propia.

Al contrario del periodo de invierno, el gráfico de excedencia y la tabla de parámetros estadísticos, para la época de verano, presenta un muy buen ajuste de las alturas significativas, periodos y direcciones modeladas respecto al oleaje medido instrumentalmente.

6.2.6.2 Comparación resultados coeficientes de agitación

La dirección de propagación WNW presenta para periodos de 12 s un leve aumento de 0.002 unidades en los coeficientes de agitación para la condición futura, sin embargo, en los periodos mayores a 14 s, este presenta una disminución de hasta 0.0024 unidades en condiciones con proyecto PGE.

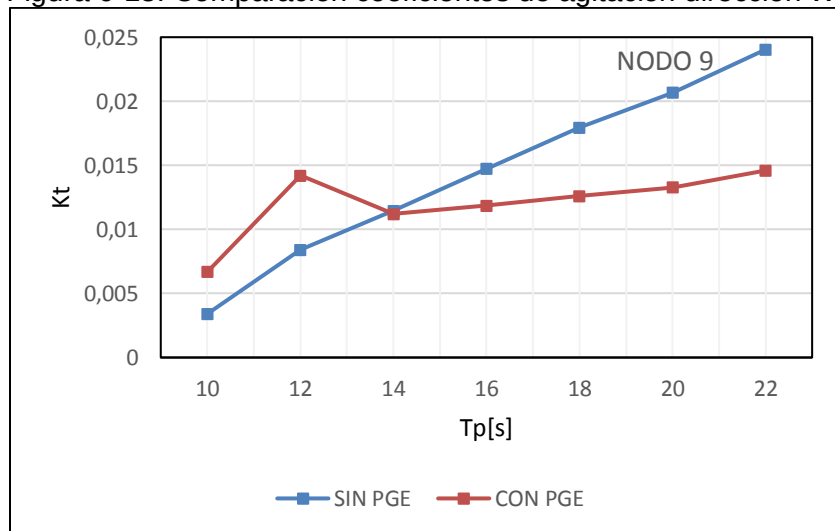
Figura 6-17: Comparación coeficientes de agitación dirección WNW.



Fuente: Elaboración propia.

La dirección W, presenta para periodos de 10 s y 12 s, un aumento de 0.003 y 0.006, respectivamente en los coeficientes de agitación para el escenario futuro, y para periodos mayores a 14 s este presenta una disminución de hasta 0.009 unidades.

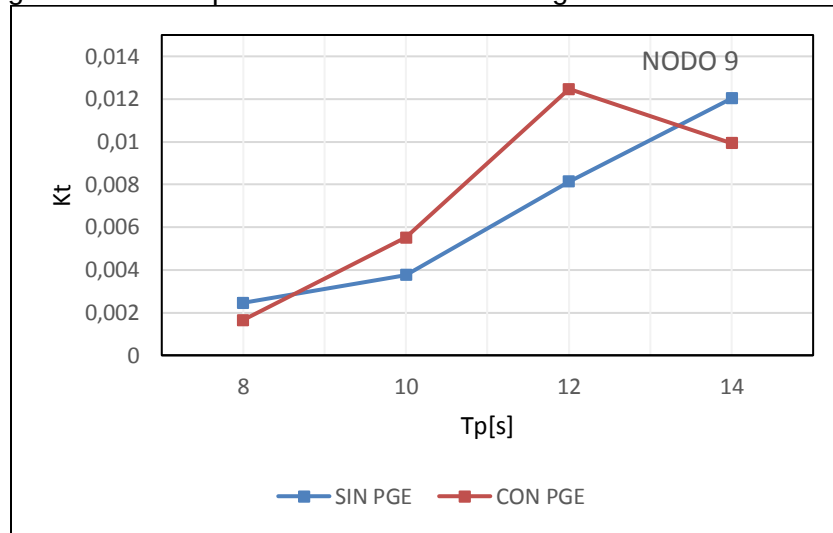
Figura 6-18: Comparación coeficientes de agitación dirección W.



Fuente: Elaboración propia.

Para el oleaje proveniente de la dirección WSW y periodos iguales a 8 s, el coeficiente de agitación disminuye en 0.0008 unidades, mientras que para el periodo 10 s, el coeficiente de agitación aumenta en 0.0017, también aumentando su valor para periodos de 12 s en 0.004, y para periodos igual a 14 s este disminuye 0.002, para la condición futura.

Figura 6-19: Comparación coeficientes de agitación dirección WSW.



Fuente: Elaboración propia.

6.2.7 COMPARACIÓN CLIMA DE OLEAJE 1980 A 2016, PARA AMBOS ESCENARIOS

Por medio de tablas de incidencia, y gráficos de no excedencia de altura significativa, se compararon ambos escenarios para 108119 estados de mar, los cuales se distribuyen entre periodos de 8 y 24 s, y alturas que van desde los 0 a los 0.08 m para la condición actual y de 0 a 0.09 m para la condición futura. Las alturas se agruparon en rangos cada 1 cm, y los datos obtenidos se encuentran corregidos, según lo dispuesto en el punto 6.2.6.1.

6.2.7.1 Condiciones actuales

Las condiciones de agitación para la situación actual se encuentran en el rango de alturas de oleaje entre 0 y 0.08 m, principalmente entre 0.01 y 0.02 m con un 55.86% de las alturas, seguido de alturas entre 0 y 0.01 m en un 29.1%. Los periodos peak del oleaje presentan una mayor concentración entre los 12 y 14 s, periodos que conjuntamente representan el 77.8% de los estados de mar, siendo el periodo 14 s el de mayor recurrencia, con un 46.58%.

Tabla 6-7: Incidencia altura significativa v/s periodo peak, nodo Puertecito sin PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.01	5187	6038	13897	5429	570	215	94	17	20	31467	29.104	100
	0.01-0.02		109	17844	34772	5260	1820	532	64		60401	55.865	70.896
	0.02-0.03			1749	8644	2423	522	88	8		13434	12.425	15.031
	0.03-0.04			203	1293	713	134	11	3		2357	2.180	2.605
	0.04-0.05			21	193	114	49	3			380	0.351	0.425
	0.05-0.06			4	24	29	6				63	0.058	0.074
	0.06-0.07				3	9	4				16	0.015	0.016
	0.07-0.08						1.00				1	0.001	0.001
	Total	5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119		
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018	100		
A%		4.797	10.483	41.669	88.245	96.679	99.223	99.896	99.982	100			

Fuente: Elaboración propia.

6.2.7.2 Condición futura

Para la condición futura con proyecto PGE se estima un leve aumento de 5% aproximadamente en la concentración de las alturas de oleaje significativo en los rangos que van entre 0.01 y 0.02 m, aproximadamente un 3% de aumento en el rango 0.02 y 0.03 m, y una disminución del 9% para alturas entre 0 y 0.01 m. Para el caso de los periodos peak, se mantiene el porcentaje de ocurrencia, pero con una concentración mayor en el rango 0 a 0.01 m, para 14 s, y una disminución para periodos de 12 s con altura de oleaje entre 0.01 y 0.1 s. El rango total de alturas se encuentra entre 0 y 0.09 m.

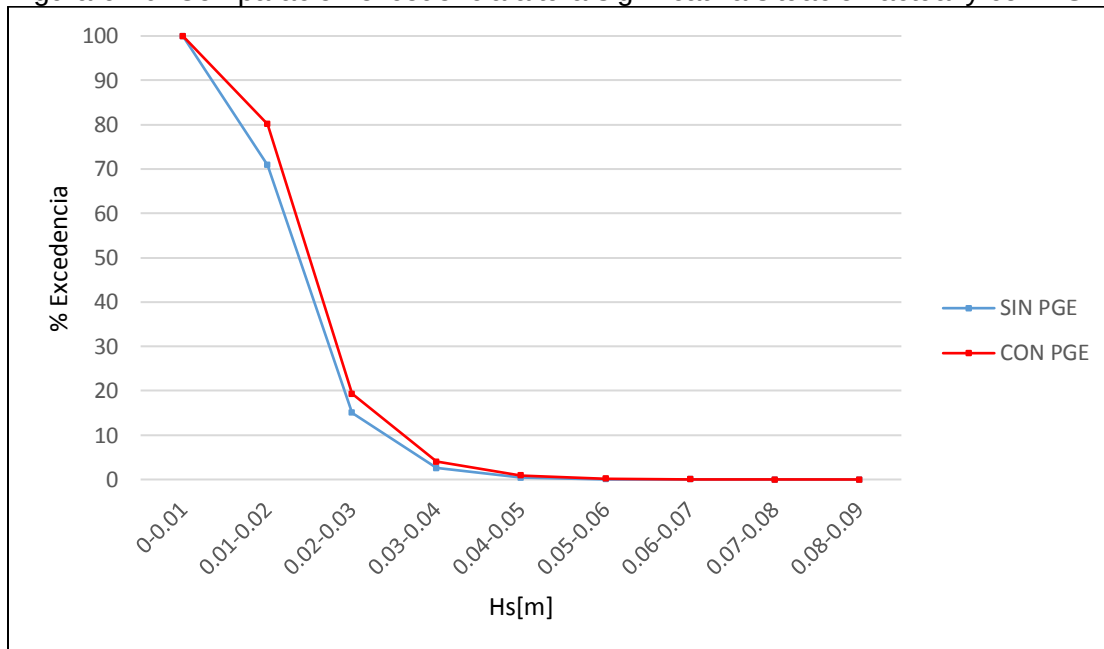
Tabla 6-8: Incidencia altura significativa v/s periodo peak, nodo Puertecito con PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.01	5187	4541	1604	7134	1587	947	407	73	20	21500	19.885	100
	0.01-0.02		1533	22273	34254	5784	1540	309	17		65710	60.776	80.115
	0.02-0.03		71	7154	7630	1498	223	12	2		16590	15.344	19.339
	0.03-0.04		2	1897	1168	210	34				3311	3.062	3.995
	0.04-0.05			616	152	34	6				808	0.747	0.932
	0.05-0.06			137	20	5	1				163	0.151	0.185
	0.06-0.07			25							25	0.023	0.034
	0.07-0.08			9.00							9	0.008	0.011
	0.08-0.09			3.00							3	0.003	0.003
	Total	5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119		
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018	100		
A%		4.797	10.483	41.669	88.245	96.679	99.223	99.896	99.982	100			

Fuente: Elaboración propia

Se comparan parámetros de excedencia para ambas condiciones, en las que se observa principalmente un leve aumento entre 1 y 9% de excedencia para altura en el rango 0.01 y 0.04 m, y en menor medida un aumento para alturas entre 0.04 y 0.08 m (< 0.5%), como se ve en la siguiente figura.

Figura 6-20: Comparación excedencia altura significativa situación actual y con PGE.



Fuente: Elaboración propia.

6.2.7.3 Operatividad sector Puertecito

En base al clima de oleaje definido en el Capítulo 6.2.7, y a los criterios definidos en el Capítulo 4.2.2, se estimó que para el sector de Puertecito la operatividad alcanza el 100% para el escenario actual y futuro, ya que dentro de la dársena no se registra oleaje mayor a los límites ya definidos para las embarcaciones que ahí operan. En la Tabla 6-9 se muestra la operatividad en Puertecito según la incidencia del oleaje sobre las embarcaciones en un escenario actual y futuro.

Tabla 6-9: Operatividad Puertecito.

ESLORA DE LA EMBARCACION [m]	SIN PGE		CON PGE	
	INCIDENCIA LATERAL	INCIDENCIA LONGITUDINAL	INCIDENCIA LATERAL	INCIDENCIA LONGITUDINAL
	%	%	%	%
4-10	100	100	100	100
10-16	100	100	100	100
20	100	100	100	100

Fuente: Elaboración propia.

6.3 MODELO DE RESONANCIA

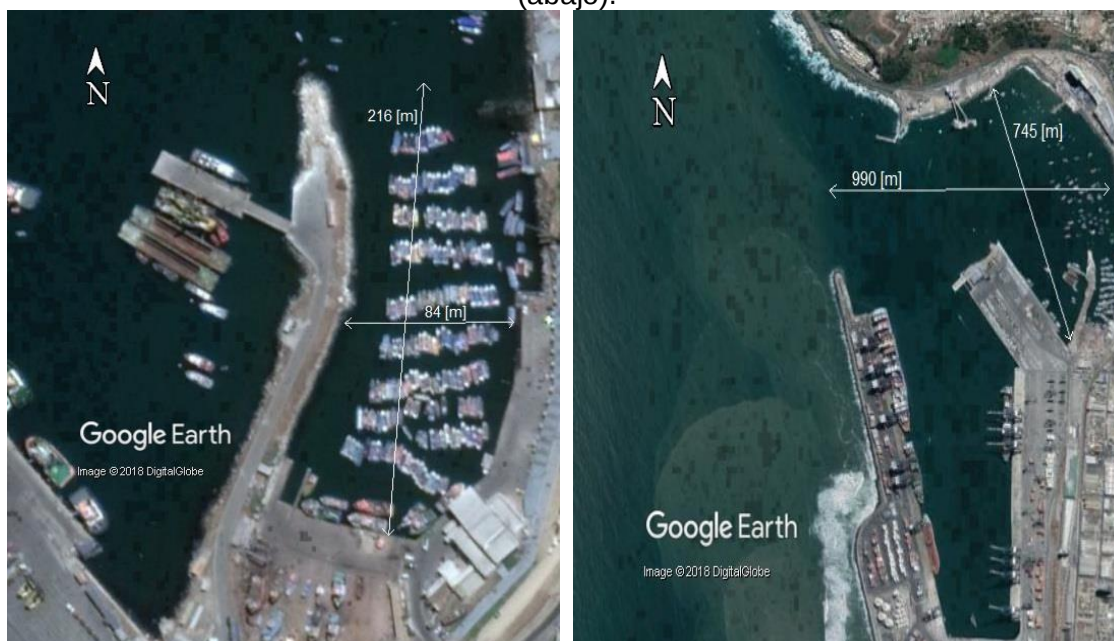
El análisis de resonancia se realizó por medio de dos metodologías de cálculo, la primera corresponde a una estimación preliminar de los modos resonantes por medio de ecuaciones paramétricas, que permiten tener una idea aproximada del comportamiento del oleaje de largo periodo en la zona de estudio. El segundo se realizó utilizando las ecuaciones de Boussinesq incluidas en el modelo de propagación de oleaje Mike21 BW, con el que es posible estimar de manera más precisa los periodos resonantes.

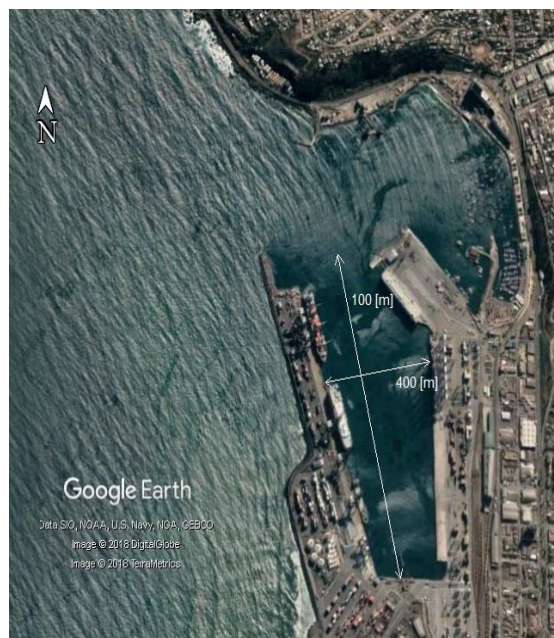
6.3.1 CÁLCULO PRELIMINAR MEDIANTE ECUACIONES PARAMÉTRICAS

La estimación preliminar de los periodos resonantes se realizó utilizando las ecuaciones presentadas por Rabinovich (2010), que suponen una profundidad constante y una geometría en planta definida.

Se analizaron secciones longitudinales y transversales en la dársena del sector de Puertecito, en la bahía donde se emplaza este sector, y en la dársena generada por los terminales STI y PCE (Figura 6-21).

Figura 6-21: Dimensiones dársena (izquierda), bahía (derecha) y dársena STI PCE (abajo).





Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes de Google earth.

Tabla 6-10: Periodos naturales obtenidos con ecuaciones paramétricas.

SECTOR	SECCIÓN	PERIODOS NATURALES [s]					
		L	d	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃
Dársena Puertecito	Longitudinal abierta	216	3.2	154	51	31	22
	Transversal cerrada	84	2.5	-	34	17	11
Bahía	Longitudinal abierta	990	30.0	231	77	46	33
	Transversal cerrada	745	17.0	-	115	58	38
Dársena terminales STI y PCE	Longitudinal abierta	1000	23.5	264	88	53	38
	Transversal cerrada	400	21	-	56	28	19
L: Longitud		d: Profundidad	T ₀ : Periodo Helmholtz		T _n : Periodo modo n		

Fuente: Elaboración propia.

Es posible ver en la Tabla 5-10 que los periodos resonantes obtenidos para la dársena del sector de Puertecito se encuentran en el rango de ondas largas hasta el segundo modo resonante para el análisis de sección longitudinal, sin embargo para la sección transversal estos periodos se encuentran dentro de este rango solo para el primer modo. Además este análisis se realizó para el sector de la bahía en donde se encuentra Puertecito, lugar que registró periodos en el rango de ondas largas, y en la dársena formada por los terminales STI y PCE, que registró periodos que se encuentran dentro del rango, exceptuando los modos 2 y 3 para la sección transversal.

6.3.2 MODELO NUMÉRICO DE RESONANCIA

El propósito de las simulaciones de onda larga fue analizar y comparar resultados ante dos escenarios: el primero representa el escenario actual del puerto de San Antonio, y la segunda corresponde a un escenario futuro, con proyecto PGE. Esta simulación se realizó propagando un espectro de ruido blanco, el cual según Gierlevsen (2001), “aunque no representa un estado natural del mar, puede revelar de manera eficiente los períodos de resonancia de los escenarios simulados. Los resultados de las simulaciones, no obstante, solo pueden usarse como base para una comparación general de los escenarios. Puesto que no proporcionan valores reales de desnivelación y velocidad, no se puede concluir sobre la base de las simulaciones de ruido blanco si las oscilaciones de período largo o la resonancia se desarrollarán o no en condiciones de ola natural. Esto debe investigarse utilizando un estado natural del mar”.

El espectro de ruido blanco aplicado abarcó períodos de 30 a 1000 s, con una densidad de energía de $0.1 \text{ m}^2/\text{Hz}$, simulado como ondas unidireccionales desde una paleta de generación ubicada en el borde oeste del modelo batimétrico. El periodo de simulación fue de 4 horas (Ota et al., 2010).

6.3.3 RESULTADOS

Los resultados fueron obtenidos en el nodo 9, correspondiente al sector de Puertecito, para los dos escenarios de simulación.

6.3.3.1 Análisis de bandas de frecuencia

Se seleccionaron 8 bandas de frecuencia para el análisis detallado de la energía de las olas, bandas que se muestran en la Tabla 6-11.

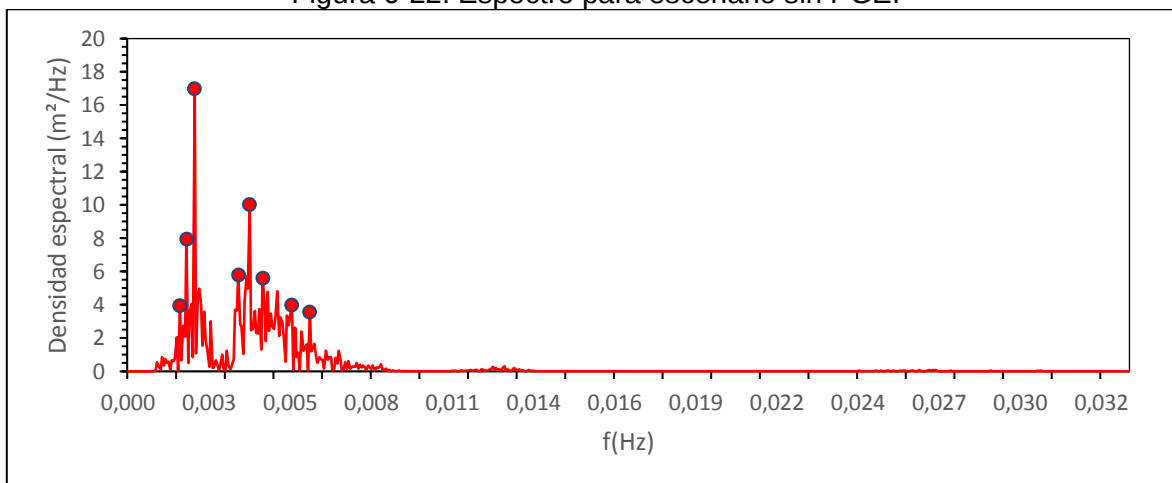
Tabla 6-11: Bandas de frecuencia analizadas.

N° de Banda	Rango de frecuencia [Hz]	Rango de periodo [s]
1	0.00091-0.00178	1089-561
2	0.00178-0.00199	561-500
3	0.00199-0.00270	500-370
4	0.00270-0.00383	370-261
5	0.00383-0.00442	261-226
6	0.00442-0.00523	226-191
7	0.00523-0.00599	191-167
8	0.00599-0.033326	167-30

Fuente: Elaboración propia.

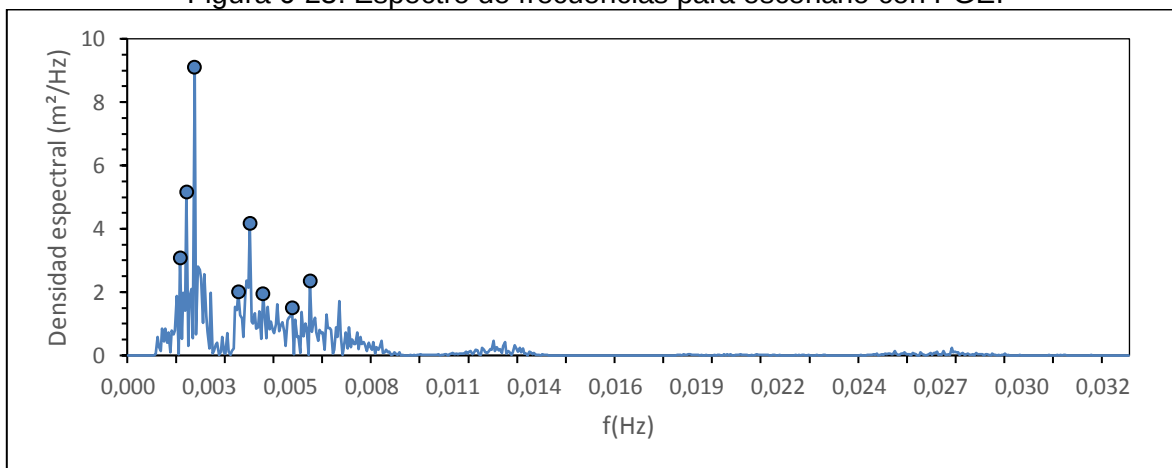
En la Figura 6-22 y Figura 6-23 se pueden ver los peaks correspondientes a cada banda de frecuencia analizada en los espectros para el escenario actual y futuro, y en la Figura 6-24 se comparan ambos escenarios.

Figura 6-22: Espectro para escenario sin PGE.



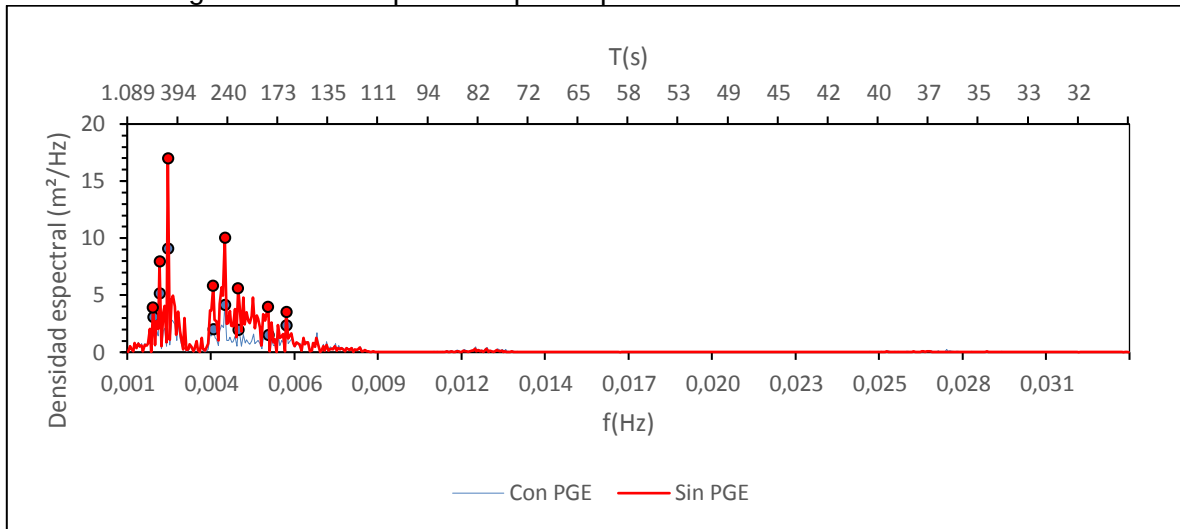
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-23: Espectro de frecuencias para escenario con PGE.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-24: Comparación peaks para cada banda de frecuencias.



Fuente: Elaboración propia.

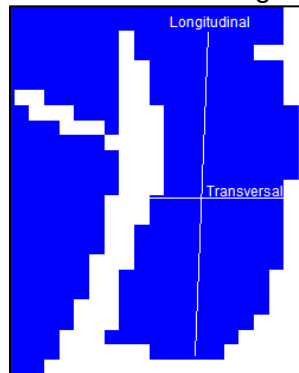
Como medida de la energía de la onda dentro de cada banda de frecuencia, se utilizó una amplitud de onda característica (a_c) definida como:

$$a_c = \sqrt{2m_0}$$

Donde m_0 es el momento de orden cero correspondiente al espectro de cada banda de frecuencia. Cabe mencionar que el valor de a_c no tiene interpretación física, si no que corresponde a una representación de la energía generada por el espectro de ruido blanco, cuya amplitud es arbitraria.

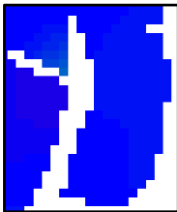
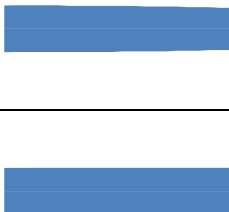
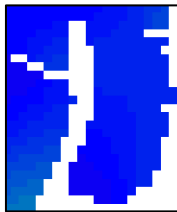
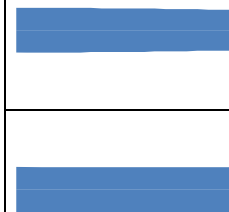
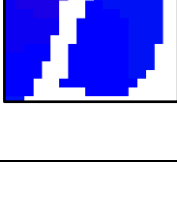
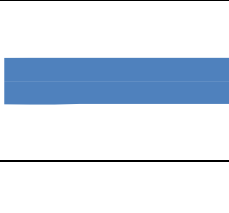
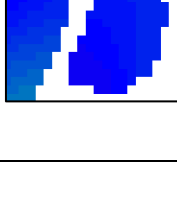
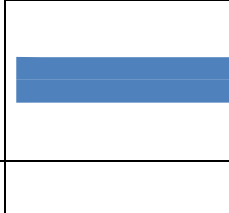
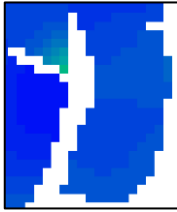
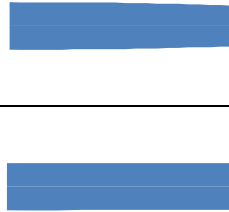
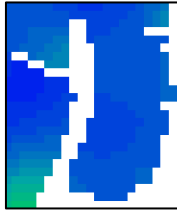
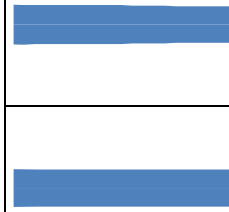
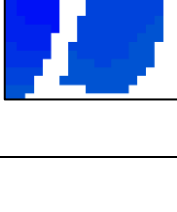
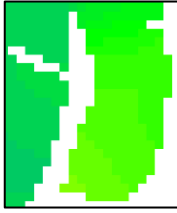
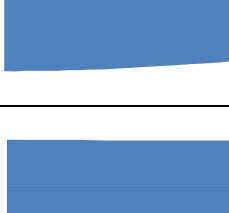
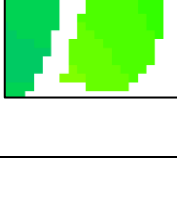
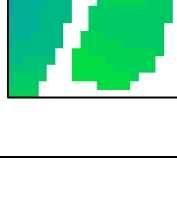
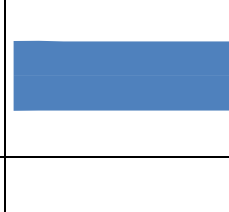
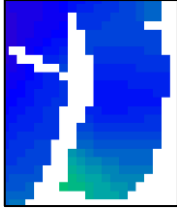
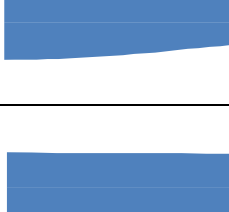
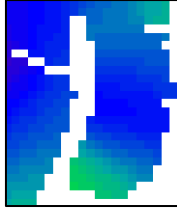
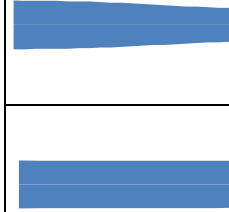
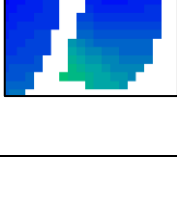
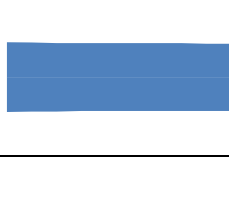
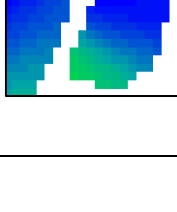
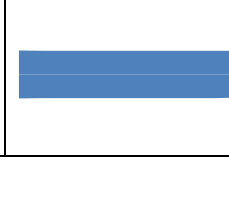
En la Tabla 6-12 se muestran los modos de oscilación, para cada banda de frecuencia, como envolvente de las elevaciones de la superficie, de manera longitudinal (de abajo a arriba) y transversal (de izquierda a derecha), junto con los niveles de energía dentro de la dársena, mientras que en la Figura 6-25 se presentan las líneas de extracción de datos de energía espectral.

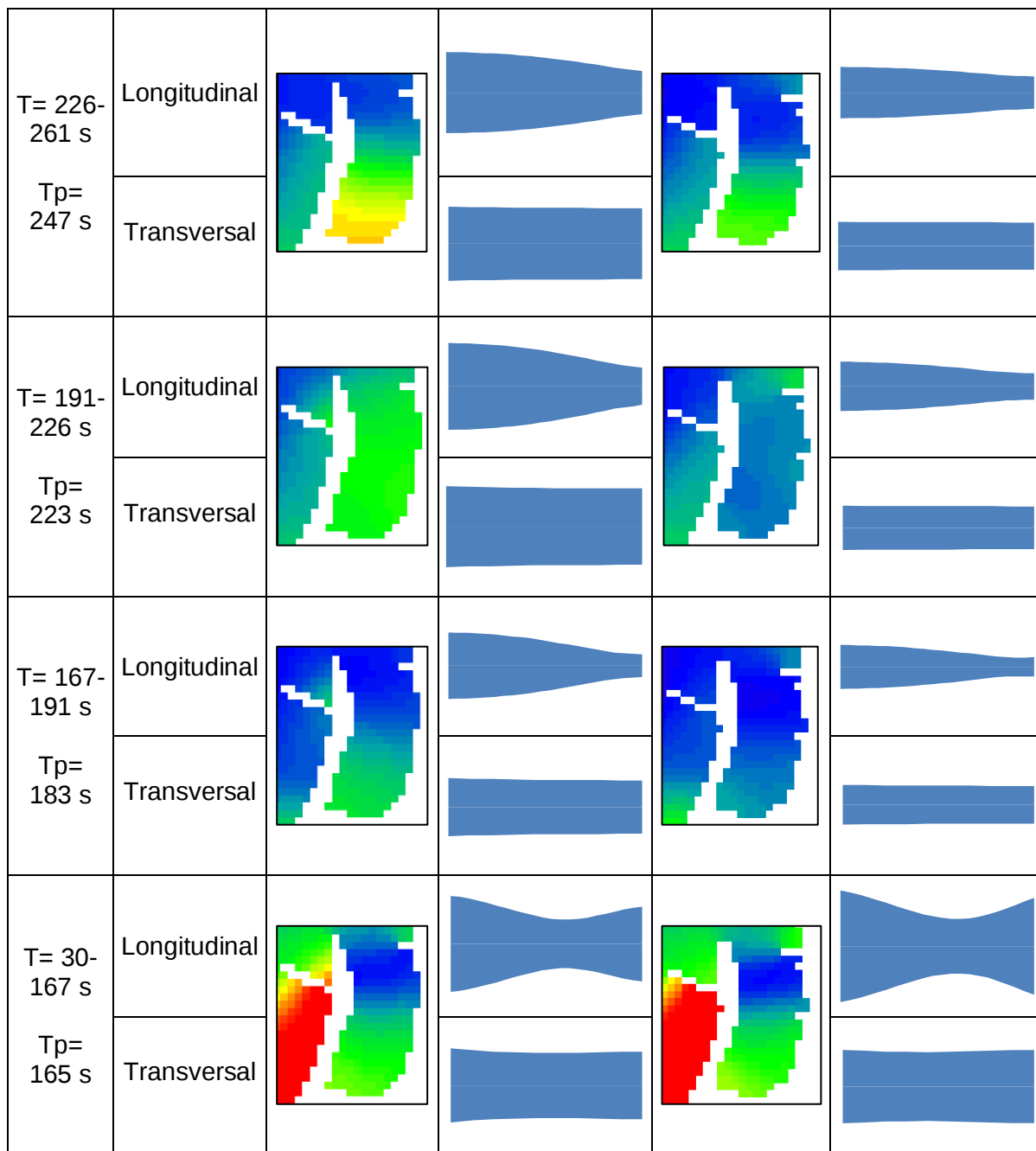
Figura 6-25: Líneas de extracción longitudinal y transversal.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-12: Envoltentes de elevación de superficie longitudinal y transversal, y energía espectral para escenario sin PGE y con PGE.

Periodo	Sección	Sin PGE		Con PGE	
T= 561- 1089 s Tp= 579 s	Longitudinal				
	Transversal				
T= 500- 561 s Tp= 514 s	Longitudinal				
	Transversal				
T= 370- 500 s Tp= 452 s	Longitudinal				
	Transversal				
T= 261- 370 s Tp= 272 s	Longitudinal				
	Transversal				



Fuente: Elaboración propia.

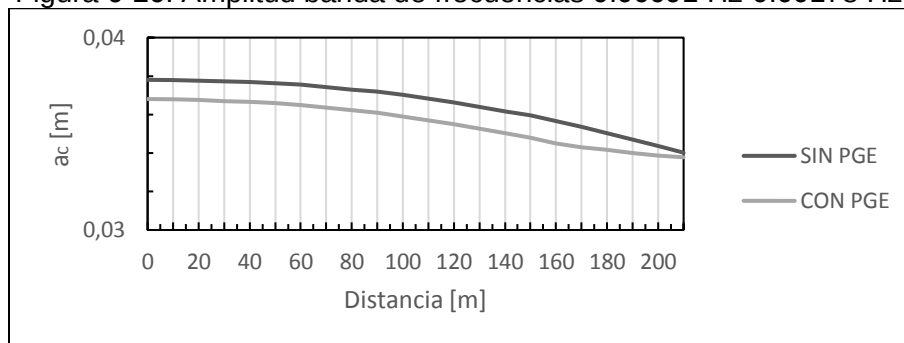
Los modos de vibrar solo se presentan de manera longitudinal, ya que para la sección transversal de la dársena se generan modos altos que provocarían solo movimientos verticales de manera homogénea en toda la sección, para el escenario actual. Para el escenario futuro los movimientos verticales se reducen, exceptuando para la banda de frecuencias entre 0.0059 y 0.0333 Hz., donde aumenta levemente la amplitud de la onda.

En el capítulo siguiente se aprecia de mejor manera la diferencia de amplitud para cada banda de frecuencia, de manera transversal y longitudinal.

6.3.3.2 Amplitud longitudinal

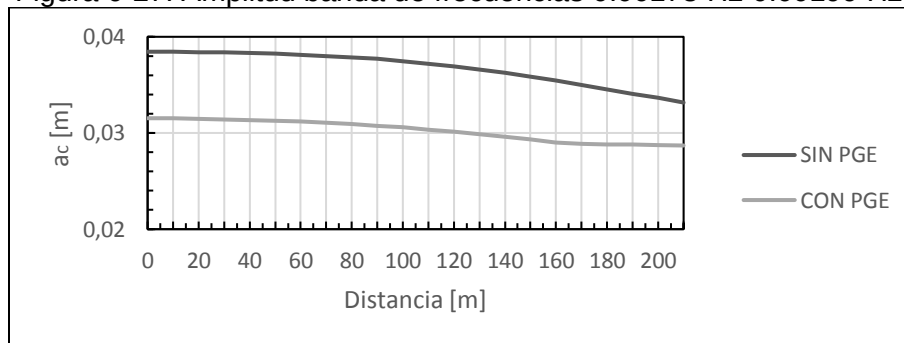
En el presente capítulo se muestra la amplitud característica (a_c), versus la distancia desde el fondo de la dársena hasta la bocana, para cada una de las bandas de frecuencia analizadas. Se puede ver que la energía del oleaje de periodo largo es generalmente mayor para la situación actual, excepto para la banda de frecuencias entre 0.00599 Hz-0.033326 Hz, donde la amplitud se incrementa levemente ($\approx 0,01$ m) para la condición futura.

Figura 6-26: Amplitud banda de frecuencias 0.00091 Hz-0.00178 Hz.



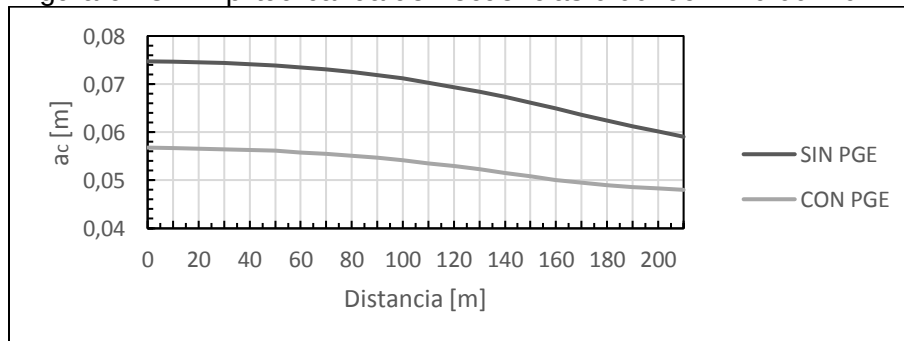
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-27: Amplitud banda de frecuencias 0.00178 Hz-0.00199 Hz.



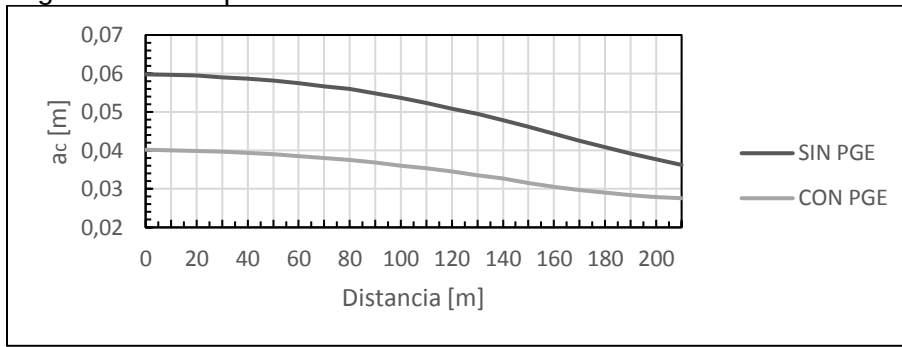
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-28: Amplitud banda de frecuencias 0.00199 Hz-0.00270 Hz.



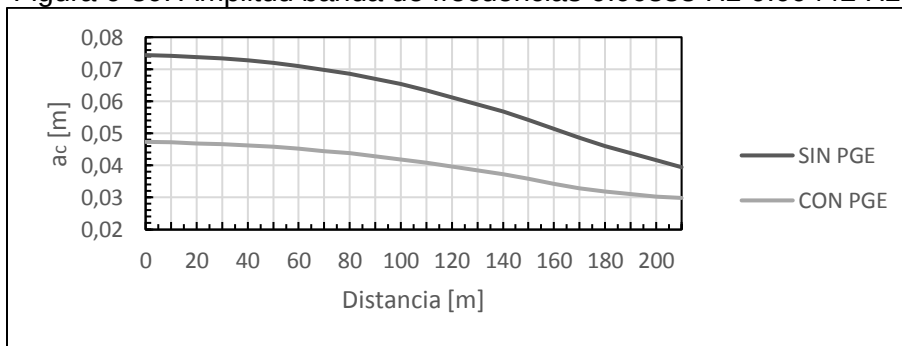
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-29: Amplitud banda de frecuencias 0.00270 Hz-0.00383 Hz.



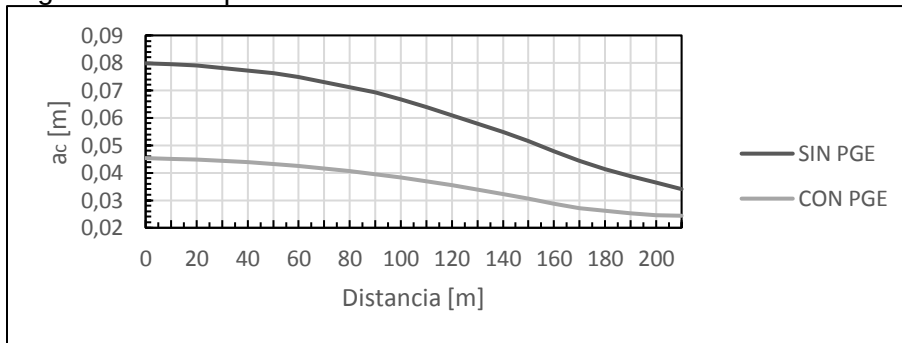
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-30: Amplitud banda de frecuencias 0.00383 Hz-0.00442 Hz.



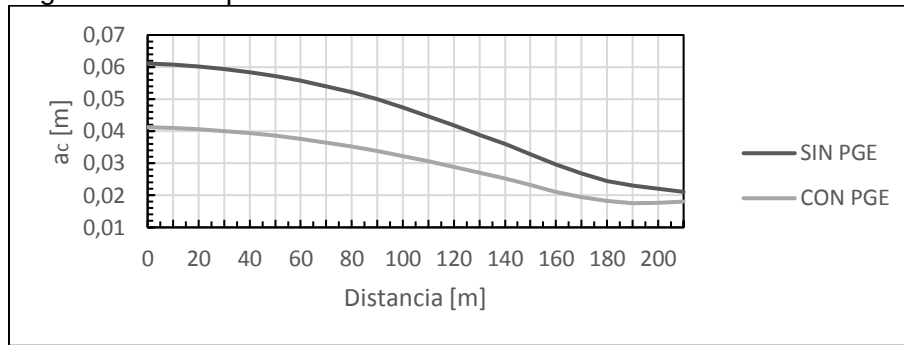
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-31: Amplitud banda de frecuencias 0.00442 Hz-0.00523 Hz.



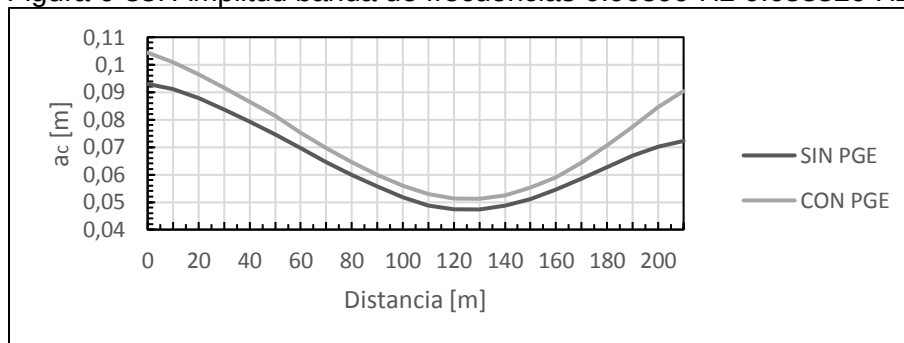
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-32: Amplitud banda de frecuencias 0.00523 Hz-0.00599 Hz.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-33: Amplitud banda de frecuencias 0.00599 Hz-0.033326 Hz.

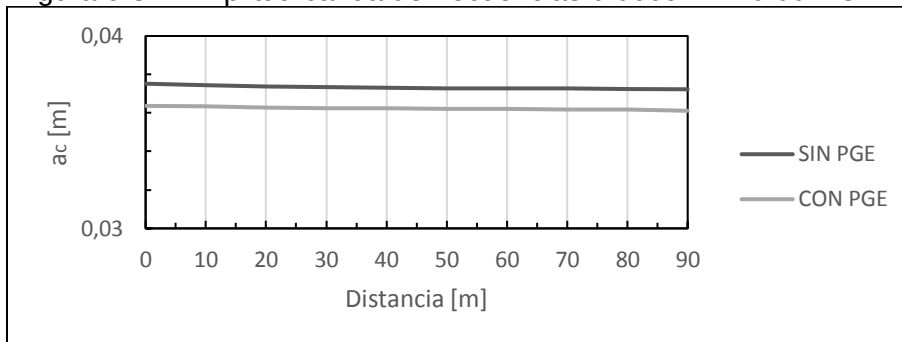


Fuente: Elaboración propia.

6.3.3.3 Amplitud transversal

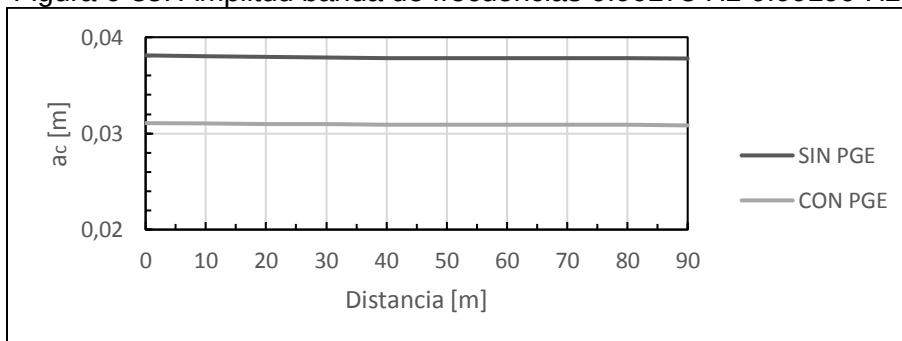
A continuación se presentan los gráficos de amplitud de las ondas de manera transversal a dársena.

Figura 6-34: Amplitud banda de frecuencias 0.00091 Hz-0.00178 Hz.



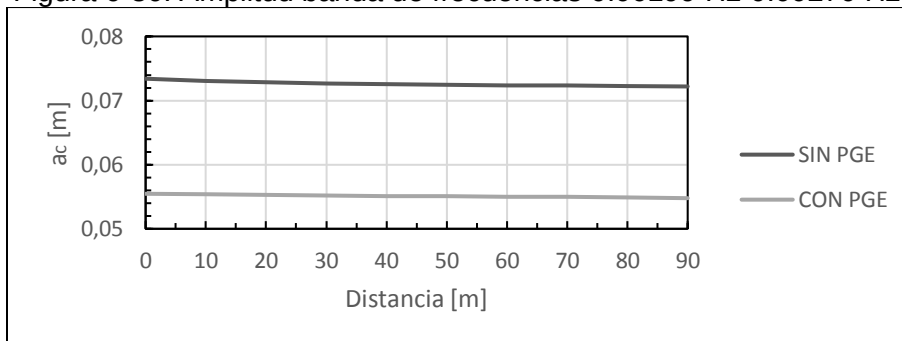
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-35: Amplitud banda de frecuencias 0.00178 Hz-0.00199 Hz.



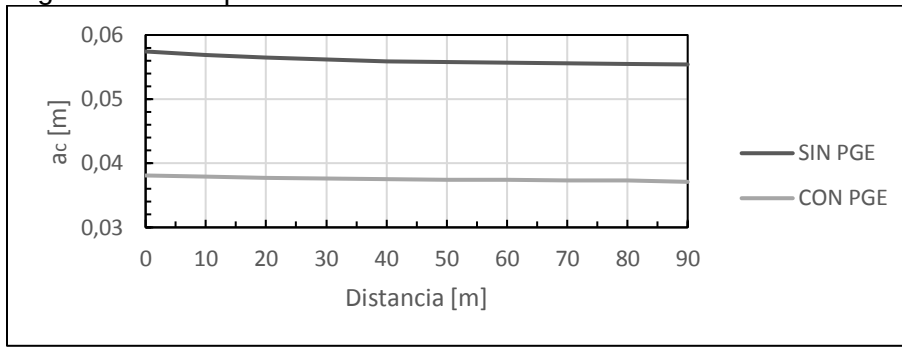
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-36: Amplitud banda de frecuencias 0.00199 Hz-0.00270 Hz.



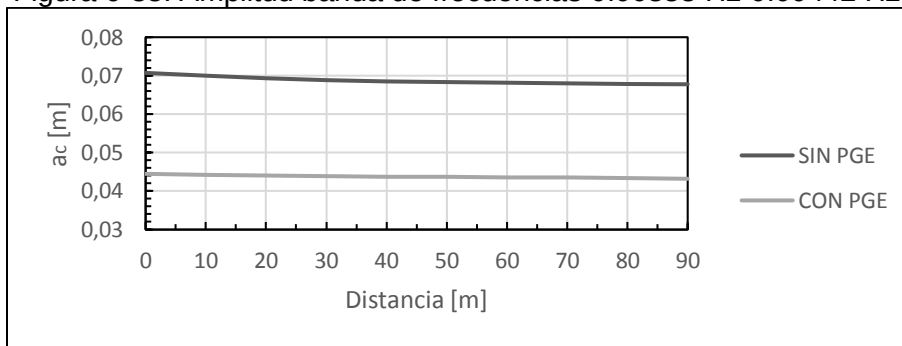
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-37: Amplitud banda de frecuencias 0.00270 Hz-0.00383 Hz.



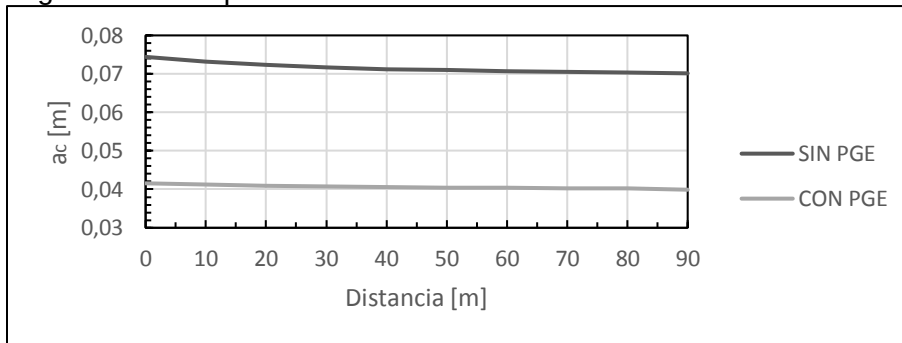
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-38: Amplitud banda de frecuencias 0.00383 Hz-0.00442 Hz.



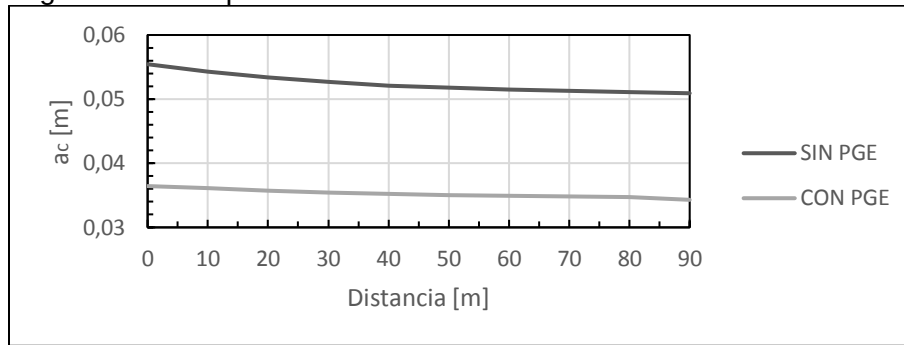
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-39: Amplitud banda de frecuencias 0.00442 Hz-0.00523 Hz.



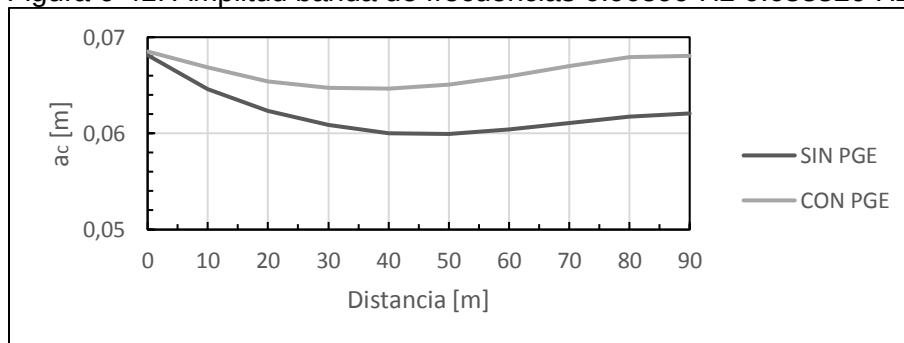
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-40: Amplitud banda de frecuencias 0.00523 Hz-0.00599 Hz.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-41: Amplitud banda de frecuencias 0.00599 Hz-0.033326 Hz.



Fuente: Elaboración propia.

6.3.3.4 Modos de vibrar

Los posibles modos de oscilación de período largo ilustrados en la Tabla 6-12 se describen a continuación en la Tabla 6-13:

Tabla 6-13: Análisis de modos de vibrar.

N° PEAK	FRECUENCIA [Hz]	PERIODO [s]	LONGITUD DE ONDA	MODO DE VIBRAR LONGITUDINAL
1	0.00173	579	2867	Modo alto, genera elevaciones verticales de la superficie.
2	0.00194	514	2546	Modo alto, genera elevaciones verticales de la superficie.
3	0.00221	452	2238	Primer modo de vibrar, con una muy baja oscilación, un antinodo en el fondo de la dársena, y nodo fuera de esta. Disminuye su amplitud característica, para el escenario futuro.
4	0.00367	272	1347	Segundo modo de vibrar, con una muy baja oscilación, un antinodo en el fondo de la dársena, y nodo fuera de esta. Disminuye su amplitud característica, para el escenario futuro.
5	0.00405	247	1223	Tercer modo de vibrar, con un antinodo en el fondo de la dársena, y nodo fuera de esta. La dimensión longitudinal de la dársena corresponde aproximadamente a 1/6 de la longitud de onda. Disminuye su amplitud característica, para el escenario futuro.
6	0.00448	223	1104	Cuarto modo de vibrar, con un antinodo en el fondo de la dársena, y nodo fuera de esta. La dimensión longitudinal de la dársena corresponde aproximadamente a 1/5 de la longitud de onda. Disminuye su amplitud característica, para el escenario futuro.

7	0.00546	183	906	Quinto modo de vibrar, modo dominante (Helmholtz), con un antinodo en el fondo de la dársena, y nodo en la bocana de esta. Las dimensiones longitudinales de la dársena corresponden aproximadamente a 1/4 de la longitud de onda. Disminuye su amplitud característica, para el escenario futuro.
8	0.00605	165	817	Sexto modo de vibrar, con un antinodo en el fondo, y un nodo dentro de la dársena, aproximadamente a 120 m desde el fondo. La dimensión longitudinal de la dársena es poco menos de 1/4 de la longitud de onda asociada a la frecuencia peak. En los dos antinodos aumenta alrededor de 0,01 m su amplitud característica, para el escenario futuro.

Fuente: Elaboración propia.

7. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el análisis de oleaje de corto periodo, permiten deducir que para el escenario futuro la agitación en Puertecito será levemente mayor en ciertos rangos de altura significativa de oleaje, con un máximo de 10% de aumento de excedencia para alturas entre 1 y 2 cm, y 4% para oleaje entre 2 y 3 cm, posiblemente debido a un fenómeno de reflexión en el cabezo del nuevo molo. No se registra una variación para alturas mayores (entre 3 y 9 cm). Sin embargo este aumento en la excedencia de alturas no representa una degradación de las condiciones de la dársena, ya que los registros de oleaje modelados para ambos escenarios mostraron una altura máxima de 9 cm, lo que permite establecer una operatividad actual de 100% para las naves que desarrollan sus actividades en Puertecito (entre 4 y 20 m de eslora), operatividad que se mantendrá luego de la construcción del proyecto PGE.

En cuanto al oleaje modelado de largo periodo, en los espectros obtenidos para el nodo Puertecito, se determinaron 8 periodos peak que permitieron definir y analizar 8 bandas de periodos. De este análisis se desprende que:

- Aquellos periodos comprendidos entre 500 y 1000 s solo generan una pequeña elevación de la superficie del agua, constante a lo largo y ancho de la dársena.
- Los dos primeros modos de oscilación corresponden a los periodos comprendidos entre 370 y 500 s, y entre 261 y 370 s, con periodos peak 452 s y 272 s respectivamente. Estos modos generan dentro de la dársena una oscilación longitudinal con una pequeña amplitud.
- El tercer y cuarto modo oscilante para las bandas entre 226 y 261 s, y 191 y 226 s con periodos peak 247 y 223 s respectivamente, genera una oscilación de la superficie del agua con longitud de onda 6 y 5 veces, respectivamente, la longitud de la dársena.
- El quinto modo de oscilar, para la banda entre 167 y 191 s presenta un periodo peak espectral de 183 s, que genera una oscilación con longitud de onda 4 veces la longitud de la dársena, un nodo en la bocana y un antinodo en el fondo. Este es el modo más dominante y se debe tener especial cuidado, ya que presenta un transporte de masa constante a través de la bocana. Este modo también es conocido como modo Helmholtz y puede provocar efectos resonantes dentro de la dársena.
- El sexto modo oscilante presenta un periodo peak en los 165 s, en una banda de 30 a 167 s, un nodo en los 130 m desde el fondo de la dársena, dos antinodos en la bocana y el extremo opuesto. Este modo de oscilar puede generar resonancia dentro de la dársena.
- Para el escenario futuro las condiciones de oscilación de las ondas largas dentro de la dársena de Puertecito, disminuye su nivel energético para los primeros cinco

modos, y aumenta levemente para el sexto modo oscilante, lo que sin embargo se traduce en una diferencia en un rango de milímetros a unos pocos centímetros de amplitud.

- Si bien el método propuesto por Rabinovic (2010), representa un modo práctico para hallar los periodos naturales dentro de la dársena, solo corresponde a una primera aproximación, ya que omite información relevante en los casos en que se presenta una configuración en planta, batimetría y condiciones de borde irregulares.
- El periodo peak del quinto modo de oscilar es cercano al periodo del modo Helmholtz obtenido mediante ecuaciones paramétricas, mientras que los restantes periodos naturales obtenidos con este último método mencionado, se registran en el espectro analizado con una muy baja energía, despreciable en comparación con el resto de los periodos identificados como peaks.

8. RECOMENDACIONES

Debido a que no se dispone de un registro de oleaje de largo periodo que permita calibrar de manera real como el sector se ve afectado por las ondas largas, se recomienda registrar ondas con periodos sobre 30 s, tanto fuera como dentro del puerto y con esto verificar la manera en que Puertecito se ve afectado por efectos resonantes, cuantificando los efectos adversos que este tendrá, como elevaciones sobre la cota de la explanada. Con estos registros se recomienda además estudiar el comportamiento de las ondas largas asociadas a grupos de onda que ingresan a la bahía, así como también propagar conjuntamente ondas de corto y largo periodo, para estudiar la transferencia de energía entre estas.

Se recomienda además realizar propagaciones con distintos niveles de marea, y analizar la sensibilidad de los resultados, tanto para oleaje de corto periodo (6 a 30 s), como para oleaje de largo periodo (>30 s).

9. REFERENCIAS

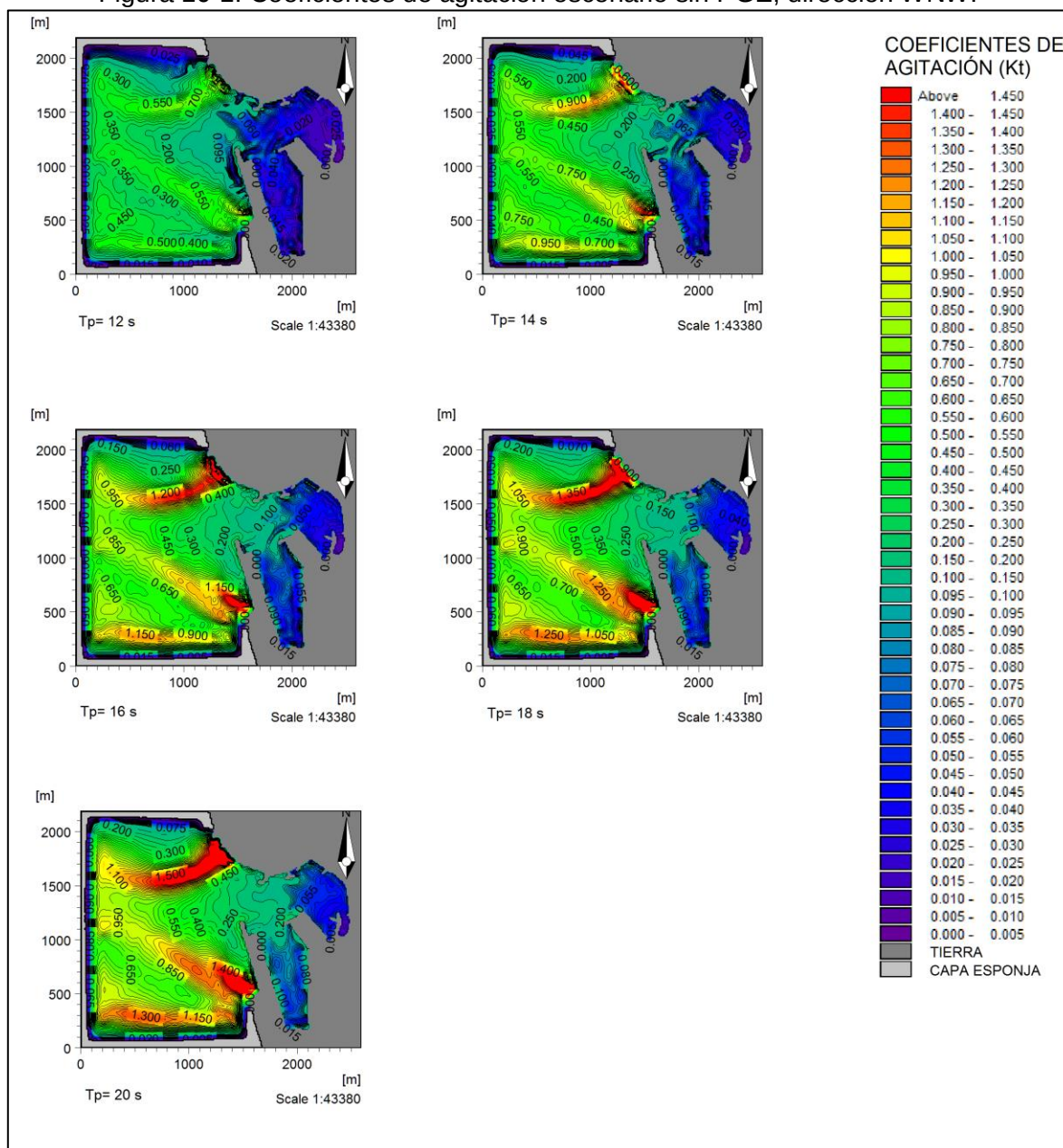
- Beyá J., Álvarez M., Gallardo A., Hidalgo H., Aguirre C., Valdivia J., Parra C., Méndez L., Contreras F., Winckler P., Molina M. (2016). *Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. Universidad de Valparaíso. Valparaíso, Chile.*
- Casarín, R. S. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje.*
- Coastal Engineering Research Center. (1984). *Shore protection manual.*
- Corporación de fomento y desarrollo de la pesca artesanal Puertecito. (2017). *Plan maestro de desarrollo 2017-2022.*
- Corporación de Fomento y Desarrollo de la Pesca Artesanal Puertecito. (2017). *Plan maestro de desarrollo 2017-2022.*
- Cortínez et al. (2014). *Diseño óptimo de estructuras portuarias para atenuar efectos resonantes por ondas largas.*
- Cosio, E. (2016). *Efectos en la agitación y resonancia de los sitios de atraque debido a la construcción del frente N°3, puerto de Iquique.*
- Dean & Dalrymple. (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientist.*
- Delft University of Technology. (2007). *SWAN user guide.*
- Delft University of Technology. (2009). *SWAN technical documentation.*
- DHI. (2007). *Mike 21BW short description.*
- DHI. (2007). *Mike21, Boussinesq wave model, User guide.*
- EPSA. (2013). *Plan maestro.*
- EPSA. (2017). Obtenido de Pagina web Puerto San Antonio:
<http://www.sanantonioport.cl/index1.html>
- Flores, C. (2010). *Aplicación de modelos numéricos para el estudio de agitación y resonancia en Valparaíso.*
- G.I.O.C. . (2000). *Documento de referencia Vol. 1.*
- Gierlevisen et al. (2001). *Wave disturbance modeling in the port of Sines, Portugal-with special emphasis on long period oscillations.*
- Guisado et al. (2010). *Los modelos de propagación de oleaje, simulación morfodinámica y las tig.*
- Kofoed-Hansen et al. (2005). *Simulation of long wave agitation in ports and harbors using a time domain.*
- Lira, J. (1933). *Puertos Chilenos.*

- Ota et al. (2010). *On basic conditions for long-wave simulations in harbors by the Boussinesq model.*
- PIANC. (1995). *Criteria for movements of moored ships in harbours.*
- Rabinovich, A. (2010). *Seiches and Harbour Oscillations.*
- SHOA. (1999). *Publicación 3202, Instrucciones oceanográficas N°2, Metodo oficial para el cálculo de los valores no armonicos de la marea.*
- SHOA. (2005). *Publicación 3201, Instrucciones oceanográficas N°1, especificaciones tecnicas para mediciones y análisis oceanográficos .*
- Sierra & Lo Presti. (1998). *Estudio comparativo de criterios de rotura del oleaje regular.*
- Stuart, D. C. (2013). *Characterizing long wave agitation in the port of Ngqura using a Boussinesq wave model.*
- USACE . (2006). *Coastal engineering manual.*

10. ANEXOS

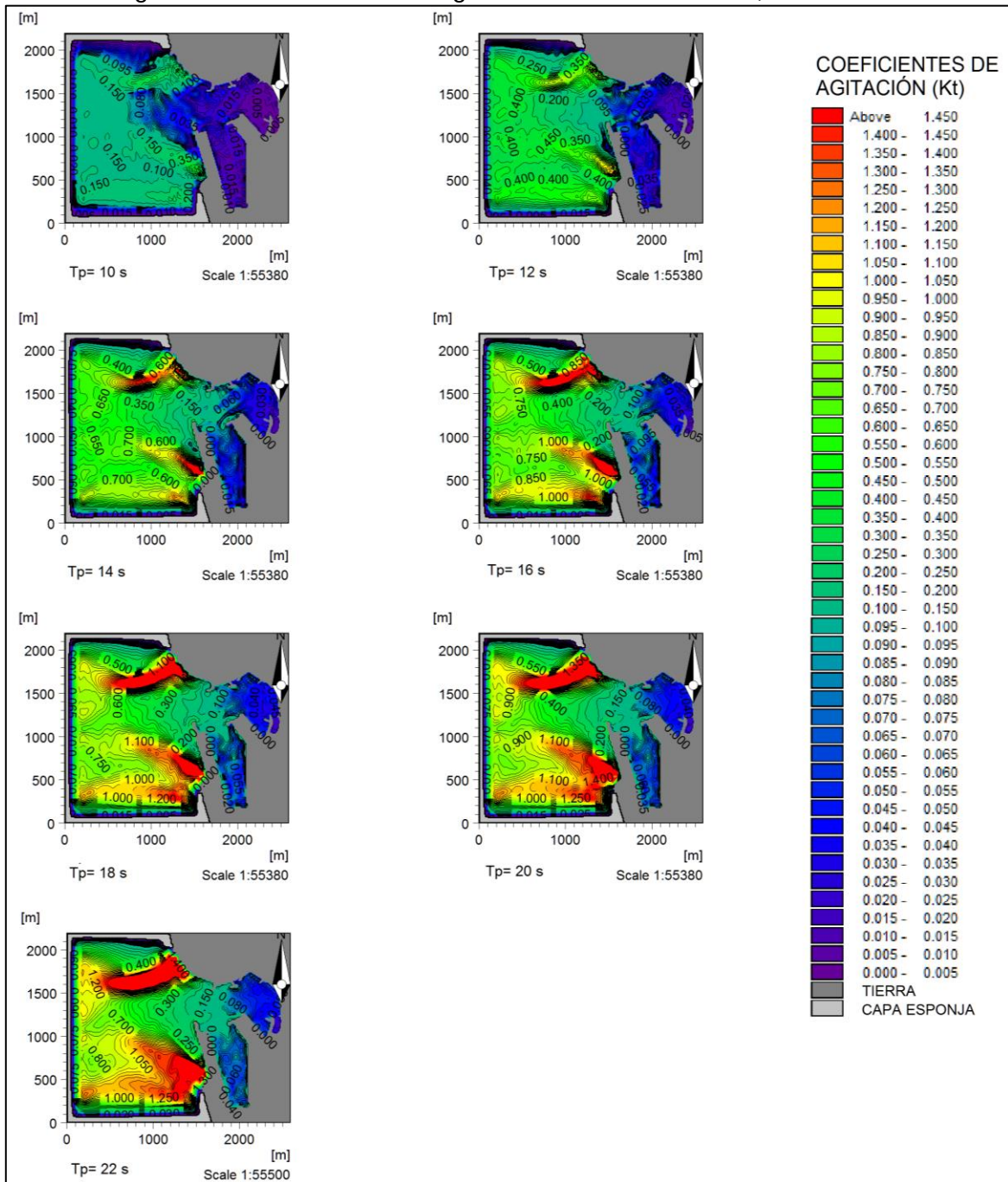
10.1 ANEXO A: DIAGRAMAS DE COEFICIENTE DE AGITACIÓN

Figura 10-1: Coeficientes de agitación escenario sin PGE, dirección WNW.



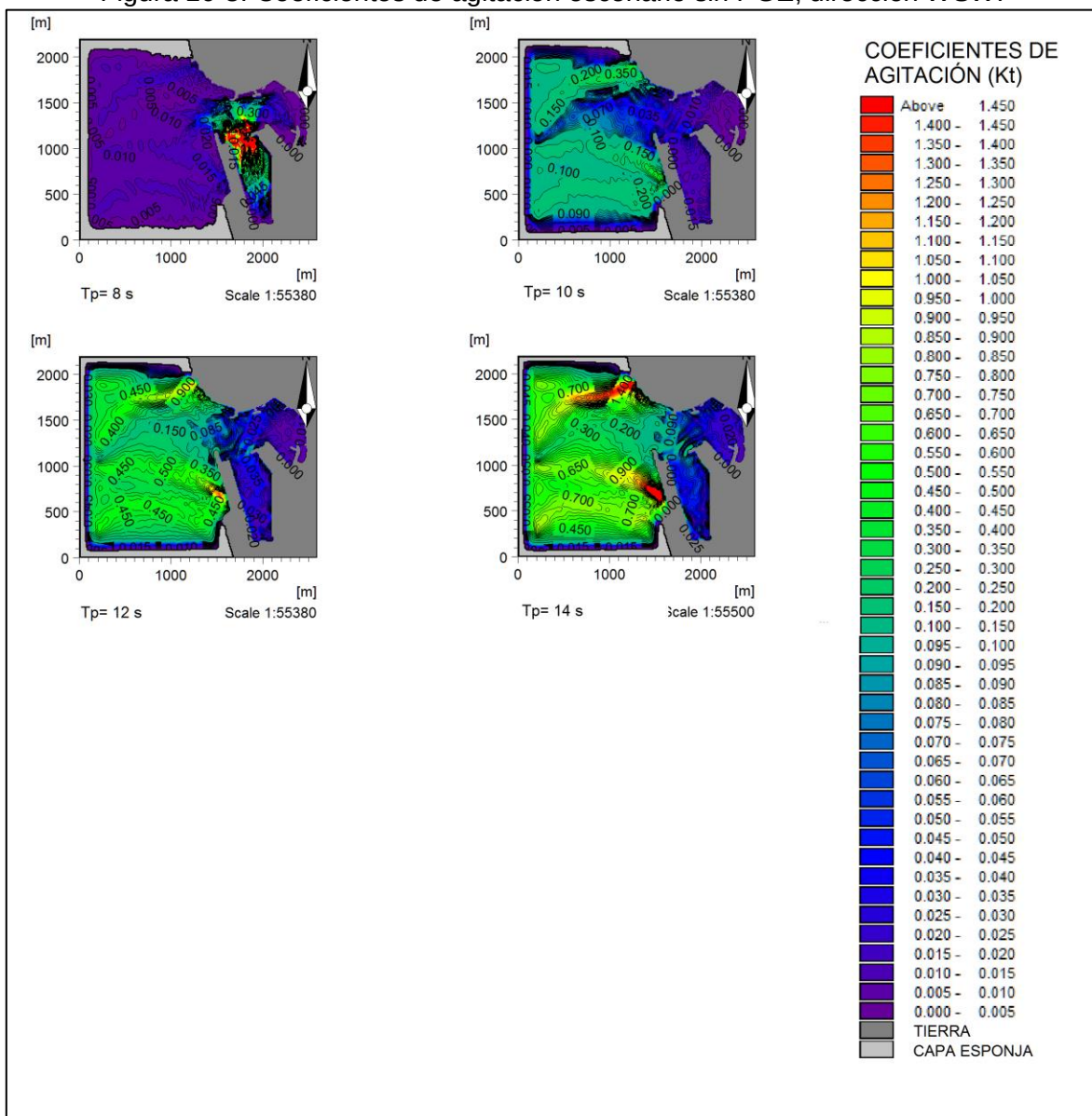
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-2: Coeficientes de agitación escenario sin PGE, dirección W.



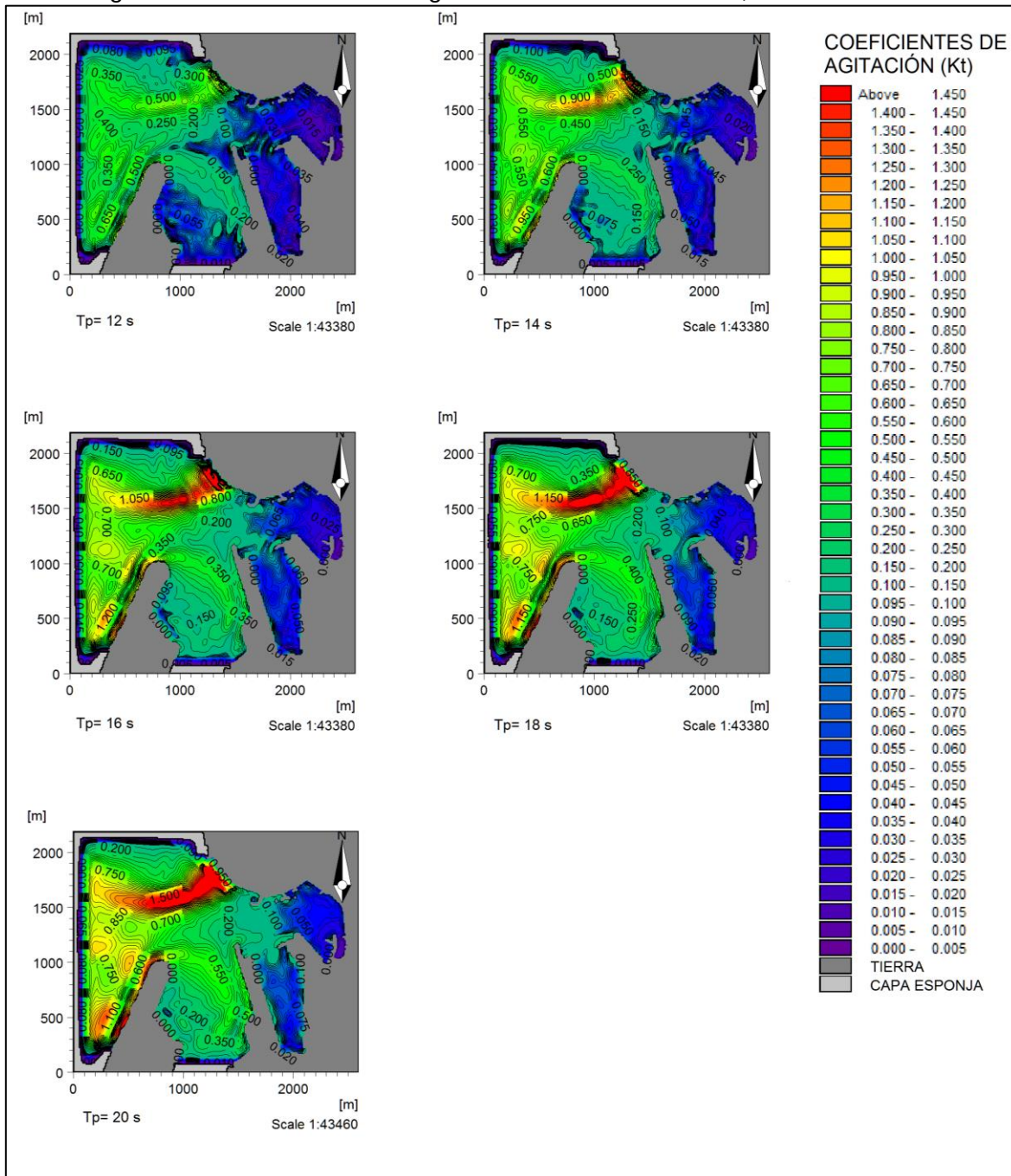
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-3: Coeficientes de agitación escenario sin PGE, dirección WSW.



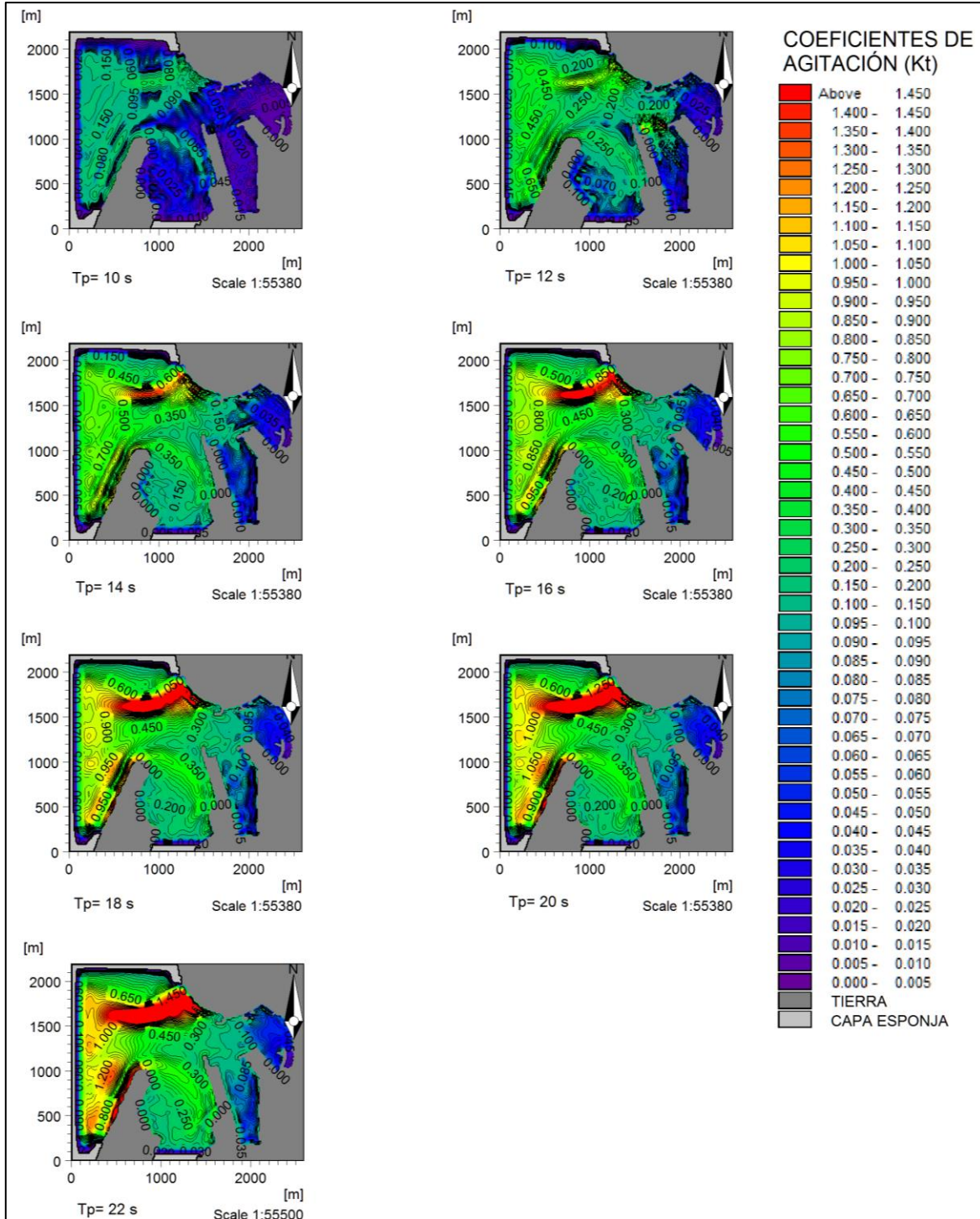
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-4: Coeficientes de agitación escenario con PGE, dirección WNW.



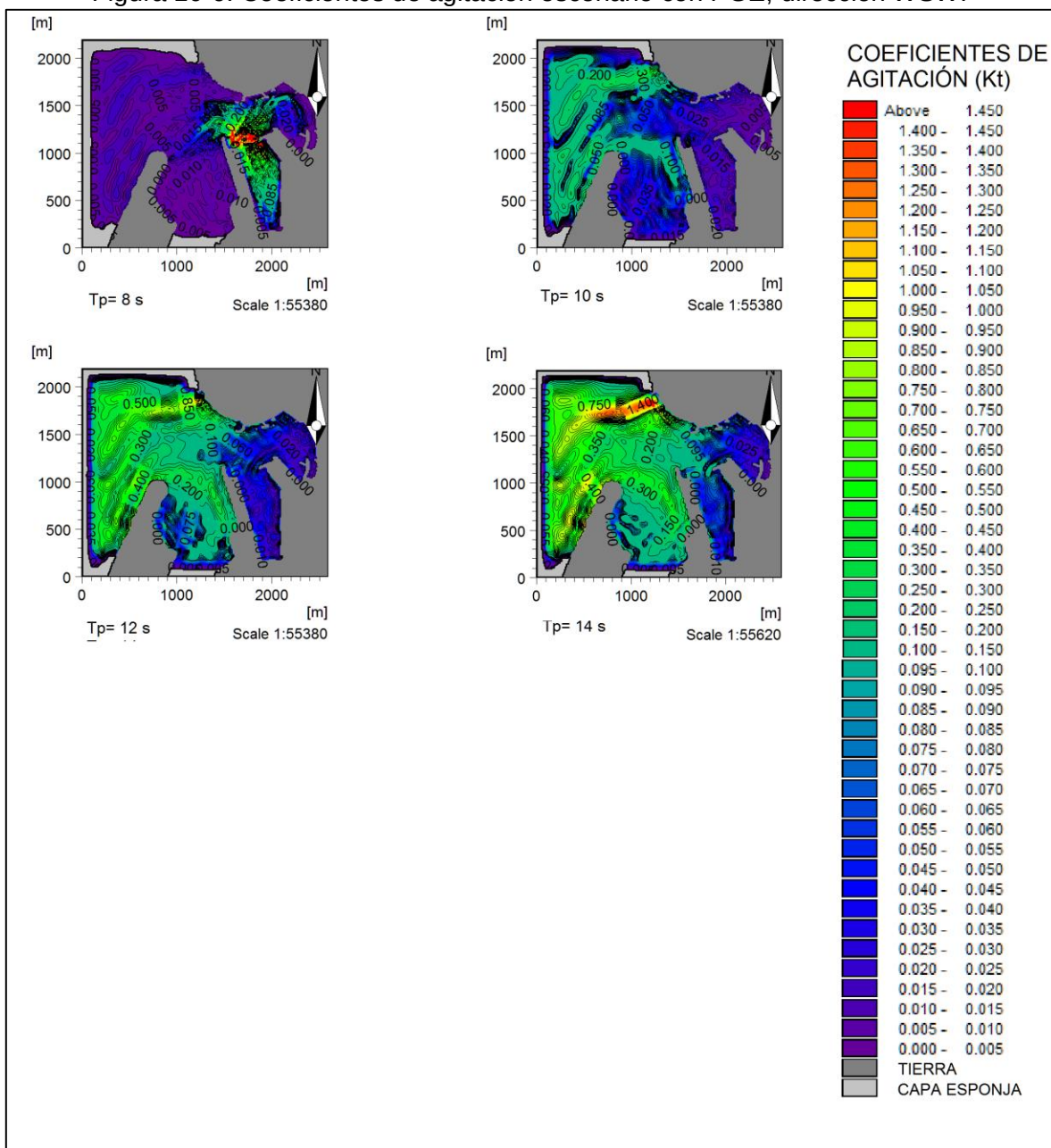
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-5: Coeficientes de agitación escenario con PGE, dirección W.



Fuente: Elaboración propia.

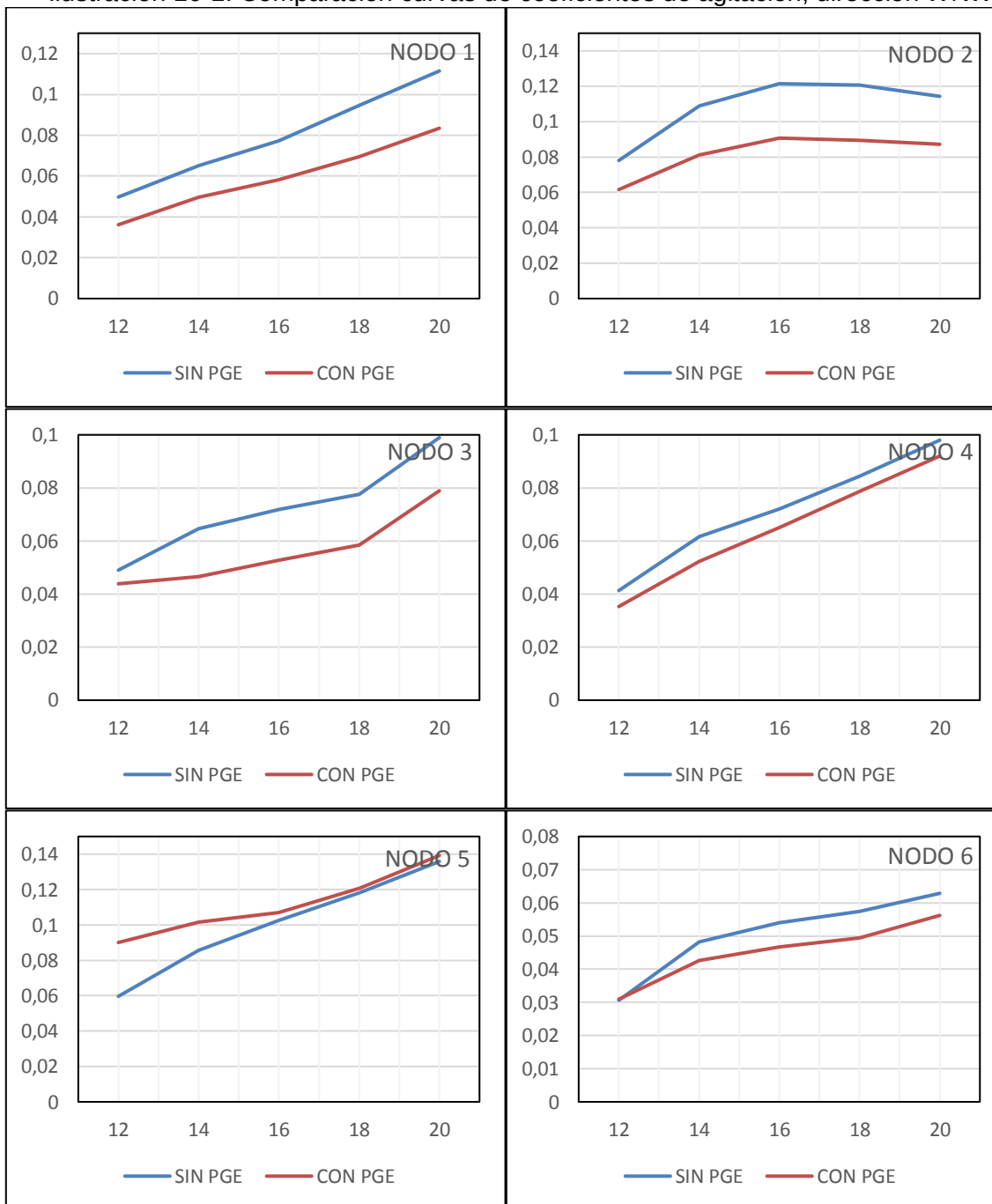
Figura 10-6: Coeficientes de agitación escenario con PGE, dirección WSW.

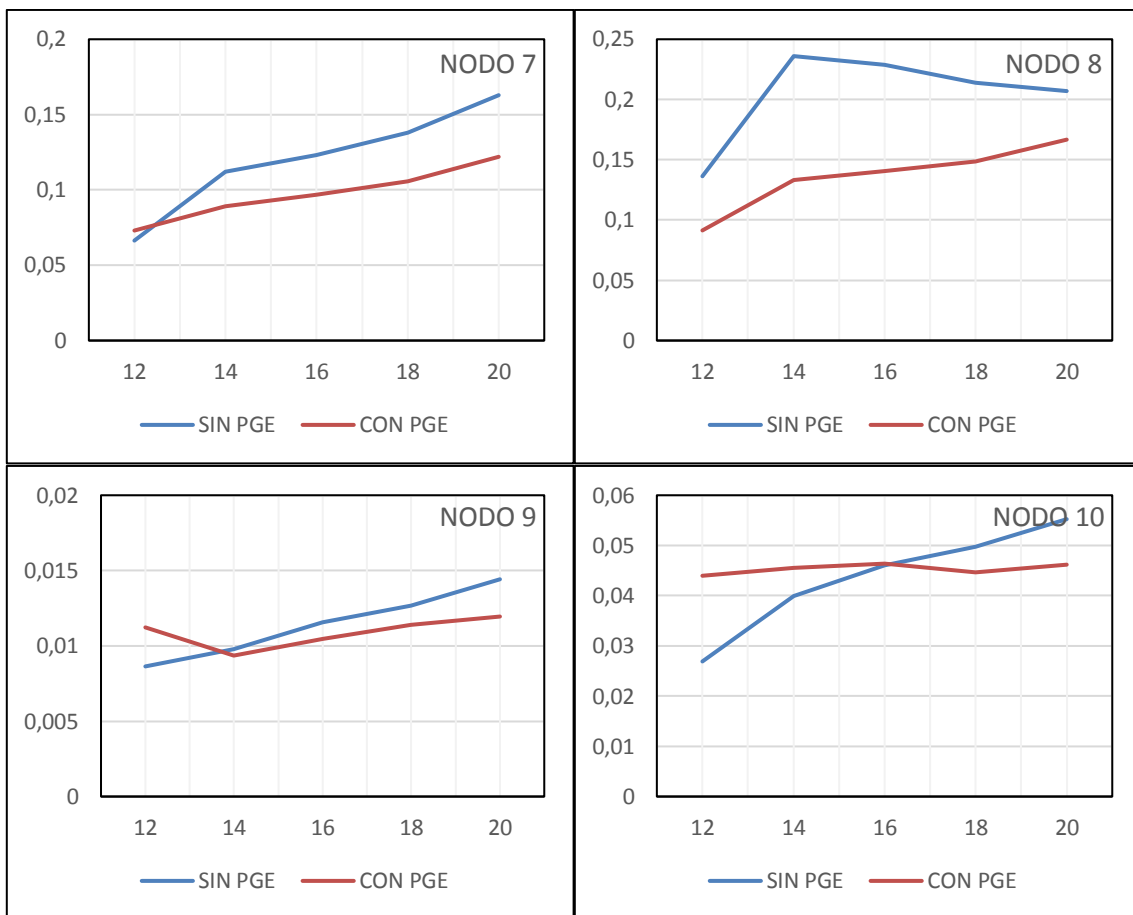


Fuente: Elaboración propia.

10.2 ANEXO B: CURVAS DE COEFICIENTES DE AGITACIÓN

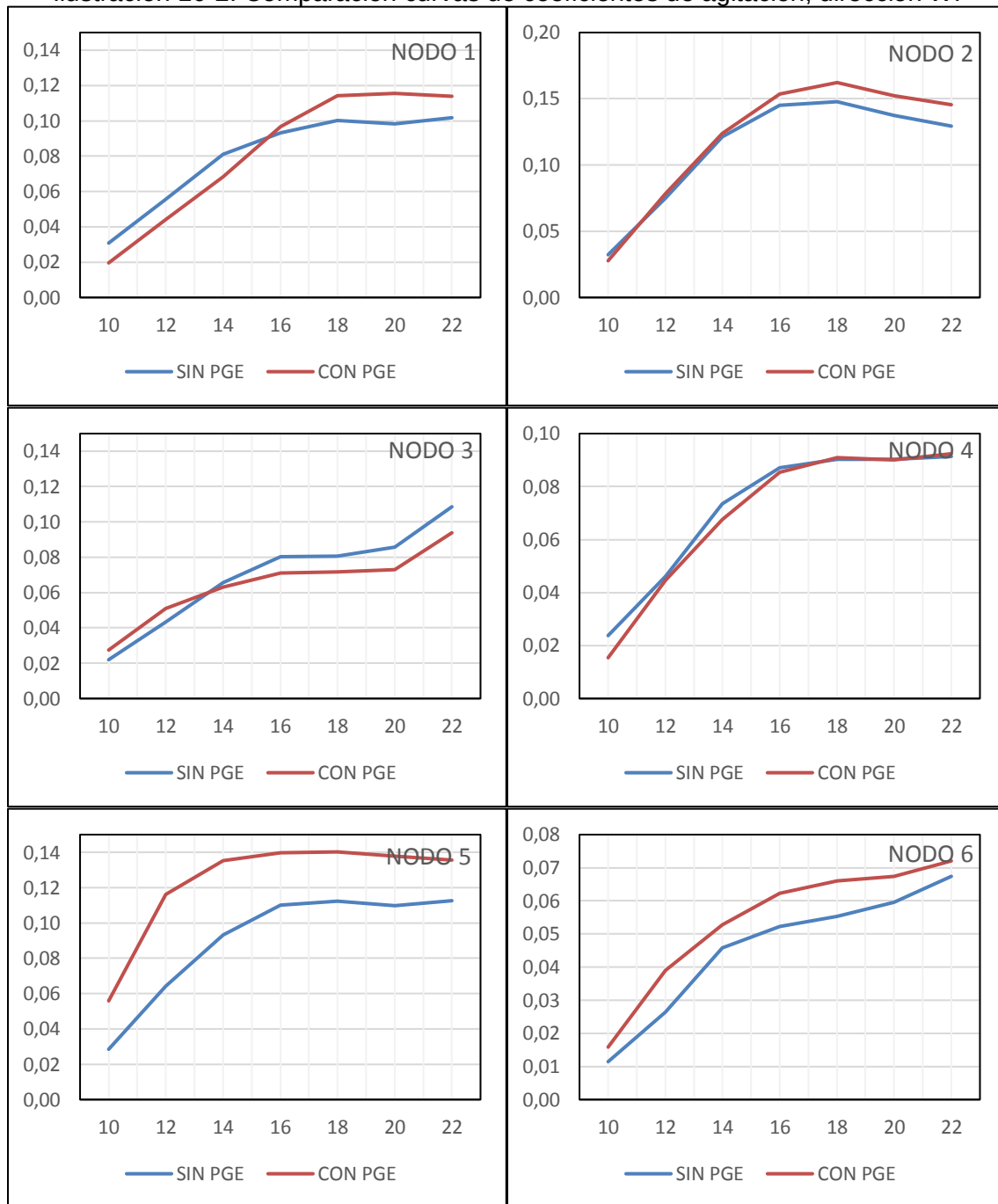
Ilustración 10-1: Comparación curvas de coeficientes de agitación, dirección WNW.

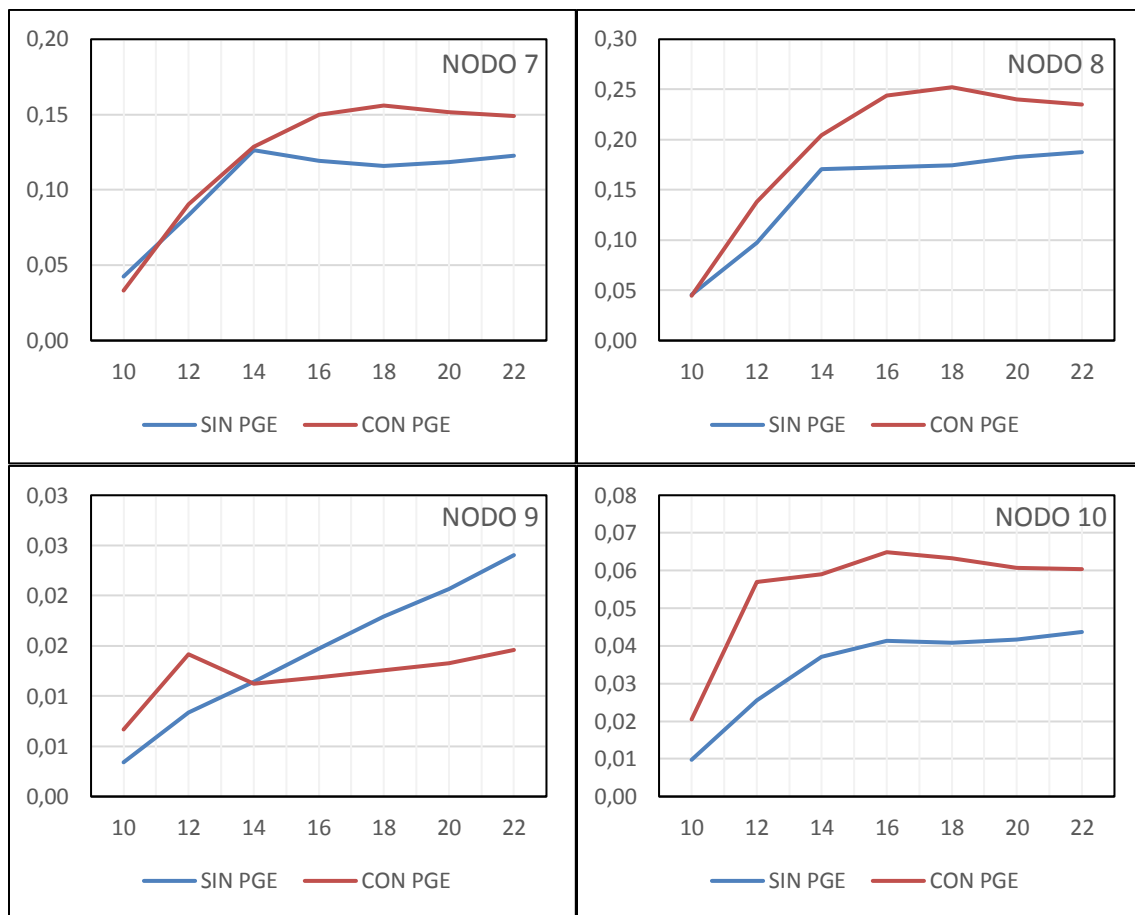




Fuente: Elaboración propia.

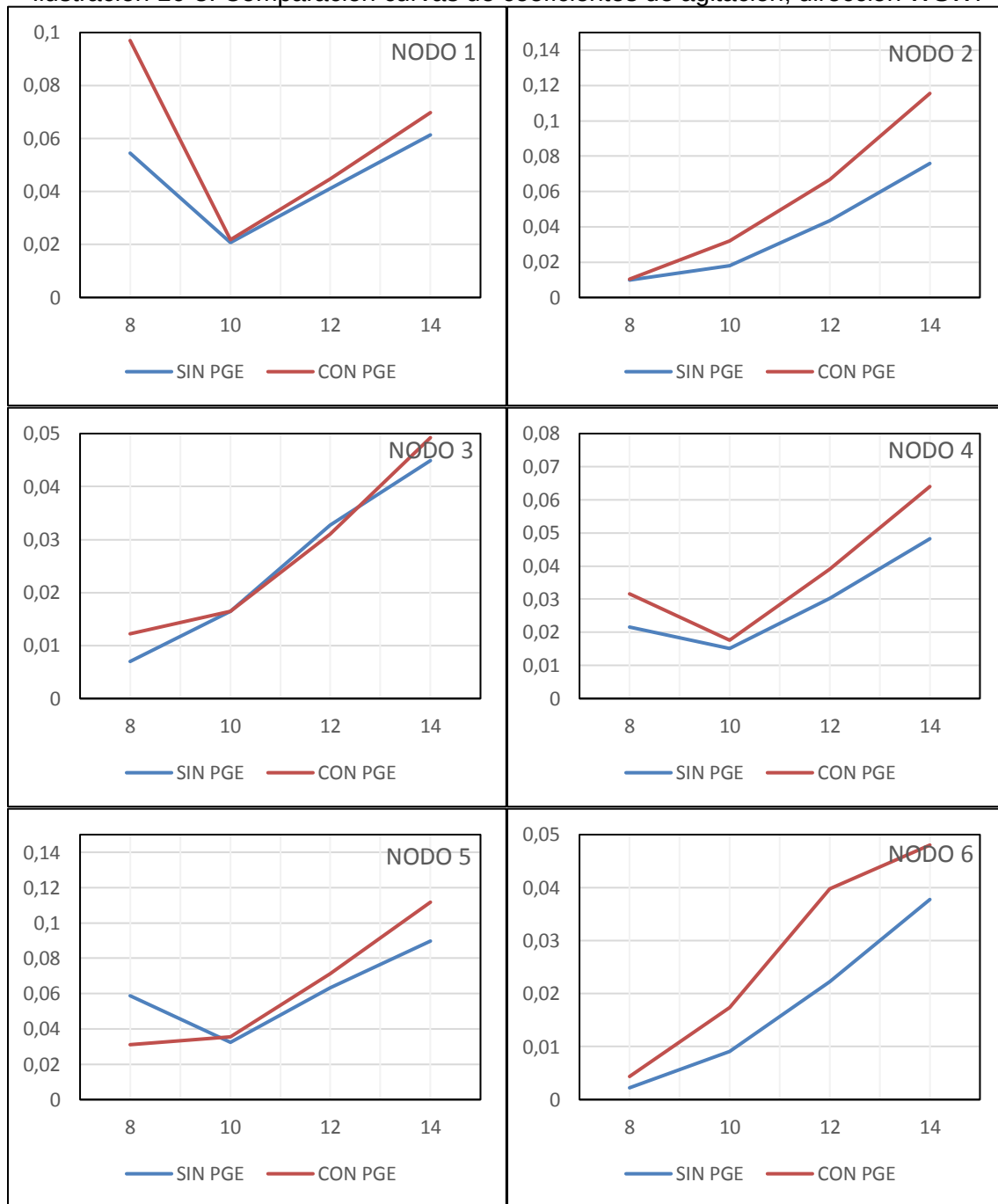
Ilustración 10-2: Comparación curvas de coeficientes de agitación, dirección W.

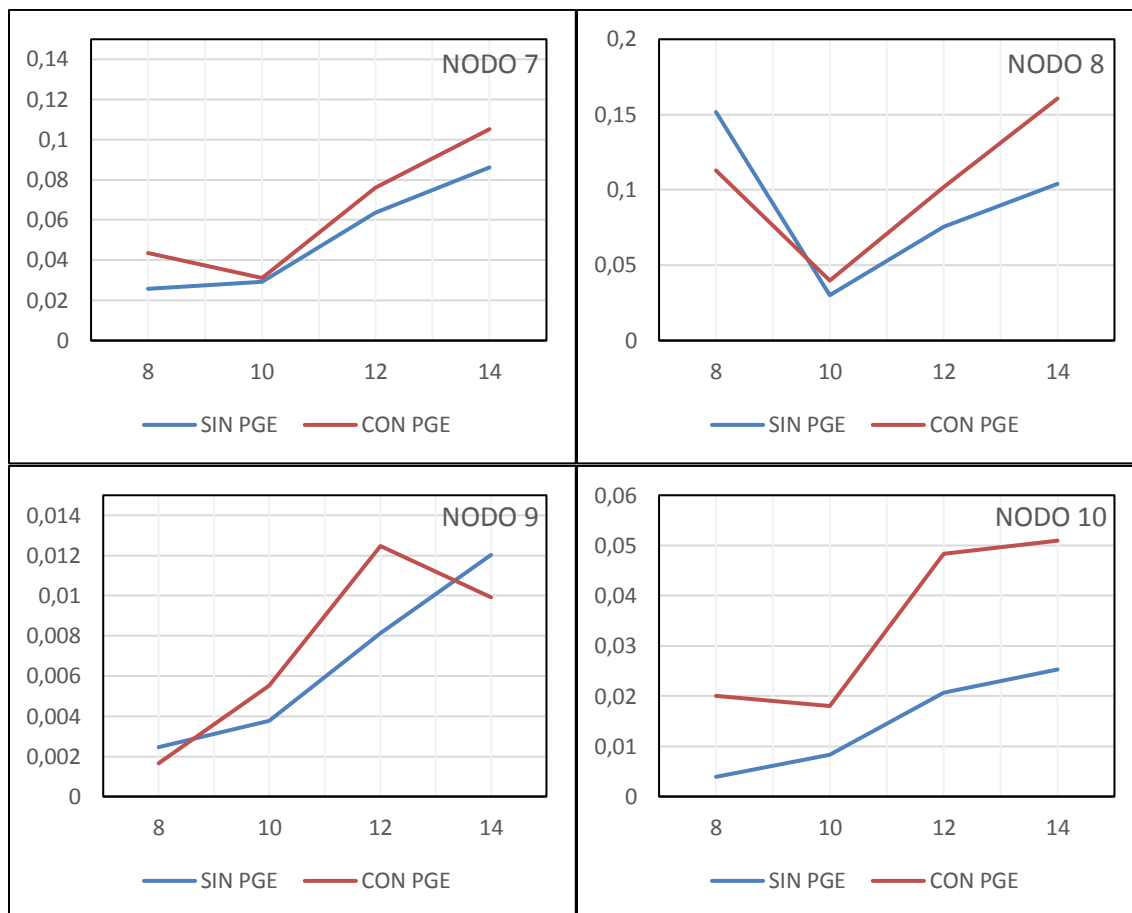




Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 10-3: Comparación curvas de coeficientes de agitación, dirección WSW.





Fuente: Elaboración propia.

10.3 ANEXO C: CLIMA DE OLEAJE EN SITIOS PERIODO 1980-2016

10.3.1 Clima de oleaje NODO 1

Tabla 10-1: Clima de oleaje NODO 1, escenario sin PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	696	5550	13852	1859	175	104	102	24	20	22382	20.70	100
	0.05-0.1	4027	586	17276	22928	3830	1733	545	62		50987	47.16	79.30
	0.1-0.15	462	11	2069	20478	3660	677	78	6		27441	25.38	32.14
	0.15-0.2	2		435	4005	1124	200	3			5769	5.34	6.76
	0.2-0.25			77	827	239	23				1166	1.08	1.42
	0.25-0.3			8	188	56	13				265	0.25	0.35
	0.3-0.35			1	62	23					86	0.08	0.10
	0.35-0.4				10	9	1				20	0.02	0.02
	0.4-0.45				1	2					3	0.003	0.003
	Total	5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119		
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018	100		
A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018			

Fuente: Elaboración propia.

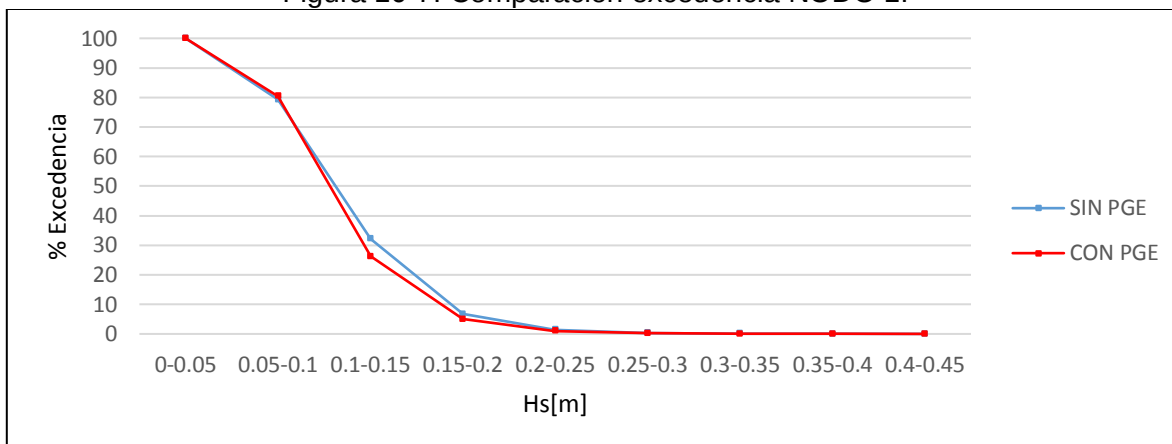
Tabla 10-2: Clima de oleaje NODO 1, escenario con PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	403	5972	11683	2691	224	85	62	20	20	21160	19.571	100
	0.05-0.1	612	175	20697	31744	3470	1332	523	62		58615	54.213	80.429
	0.1-0.15	2937		1220	13923	3743	996	118	10		22947	21.224	26.216
	0.15-0.2	996		112	1642	1282	267	23			4322	3.997	4.992
	0.2-0.25	228		6	295	276	50	2			857	0.793	0.994
	0.25-0.3	11			57	80	16				164	0.152	0.202
	0.3-0.35				6	27	4				37	0.034	0.050
	0.35-0.4					12					12	0.011	0.016
	0.4-0.45					4	1				5	0.005	0.005
	Total	5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119		
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018	100		
A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018			

Fuente: Elaboración propia.

Comparación excedencia

Figura 10-7: Comparación excedencia NODO 1.



Fuente: Elaboración propia.

10.3.2 Clima de oleaje NODO 2

Tabla 10-3: Clima de oleaje NODO 2, escenario sin PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	5187	5533	11215	472	32	4	19	13	20	22495	20.806	100.000
	0.05-0.1		595	17345	8248	642	558	382	68		27838	25.748	79.194
	0.1-0.15		19	3255	16414	2968	1325	262	11		24254	22.433	53.447
	0.15-0.2			1303	15983	2724	549	58			20617	19.069	31.014
	0.2-0.25			432	6330	1713	214	6			8695	8.042	11.945
	0.25-0.3			109	1798	632	68	1			2608	2.412	3.903
	0.3-0.35			46	659	220	17				942	0.871	1.491
	0.35-0.4			10.00	271.00	112.00	13.00				406	0.376	0.620
	0.4-0.45			2.00	103.00	32.00	2.00				139	0.129	0.244
	0.45-0.5			1.00	43.00	26.00					70.00	0.065	0.116
	0.5-0.55				26.00	8.00	1.00				35.00	0.032	0.051
	0.55-0.6				6	5					11	0.010	0.018
	0.6-0.65				3	4					7	0.006	0.008
	0.65-0.7				2						2	0.002	0.002
	Total		5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119	
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018	100		
A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018			

Fuente: Elaboración propia.

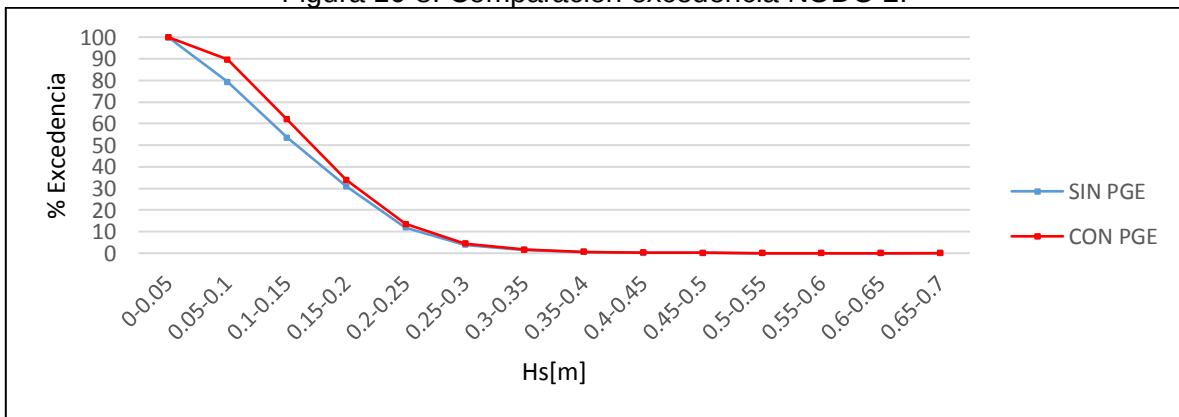
Tabla 10-4: Clima de oleaje NODO 2, escenario con PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	5187	4423	1483	68	32	11	24	13	20	11261	10.415	100
	0.05-0.1		1718	21656	5125	586	448	321	61		29915	27.669	89.585
	0.1-0.15		6	8348	18023	2492	1142	296	15		30322	28.045	61.916
	0.15-0.2			1585	16975	2735	711	64	3		22073	20.415	33.871
	0.2-0.25			465	7043	1913	236	21			9678	8.951	13.456
	0.25-0.3			130	1996	843	152	2			3123	2.888	4.504
	0.3-0.35			44	672	275	28				1019	0.942	1.616
	0.35-0.4			7.00	275.00	124.00	10.00				416	0.385	0.673
	0.4-0.45				119.00	62.00	10.00				191	0.177	0.289
	0.45-0.5				43	25	2				70	0.065	0.112
	0.5-0.55				18	15					33	0.031	0.047
	0.55-0.6				1	9	1				11	0.010	0.017
	0.6-0.65					5					5	0.005	0.006
	0.65-0.7					2					2	0.002	0.002
Total		5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119		
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018	100		
A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018			

Fuente: Elaboración propia.

Comparación excedencia

Figura 10-8: Comparación excedencia NODO 2.



Fuente: Elaboración propia.

10.3.3 Clima de oleaje NODO 3

Tabla 10-5: Clima de oleaje NODO 3, escenario sin PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	5187	6011	22946	6007	372	349	180	22	20	41094	38.008	100
	0.05-0.1		136	9577	30843	5064	1968	506	64		48158	44.542	61.992
	0.1-0.15			1054	11743	3027	378	40	6		16248	15.028	17.450
	0.15-0.2			120	1411	496	40	2			2069	1.914	2.422
	0.2-0.25			18	284	117	15				434	0.401	0.509
	0.25-0.3			2	47	31	1				81	0.075	0.107
	0.3-0.35			1	16	10					27	0.025	0.032
	0.35-0.4				6	1					7	0.006	0.007
	0.4-0.45				1.00						1	0.001	0.001
	Total		5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119	100
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018			
A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.02			

Fuente: Elaboración propia.

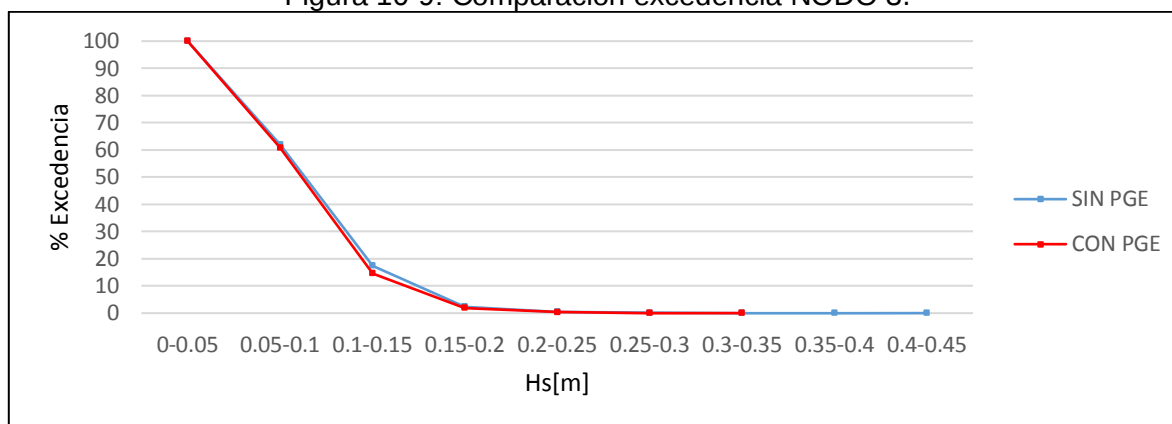
Tabla 10-6: Clima de oleaje NODO 3, escenario con PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	5187	5802	23507	6018	787	624	323	32	20	42300	39.124	100.000
	0.05-0.1		344	8292	33313	5749	1838	388	58		49982	46.229	60.876
	0.1-0.15		1	1608	9733	2218	262	17	2		13841	12.802	14.648
	0.15-0.2			259	1078	296	24				1657	1.533	1.846
	0.2-0.25			51	190	52	2				295	0.273	0.314
	0.25-0.3			1	26	14	1				42	0.039	0.041
	0.3-0.35					2					2	0.002	0.002
	Total	5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119		
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018	100		
A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018			

Fuente: Elaboración propia.

Comparación excedencia

Figura 10-9: Comparación excedencia NODO 3.



Fuente: Elaboración propia.

10.3.4 Clima de oleaje NODO 4

Tabla 10-7: Clima de oleaje NODO 4, escenario sin PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	5127	5964	24442	4254	258	192	153	40	20	40450	37.412	100
	0.05-0.1	60	183	7889	26400	4440	1896	522	51		41441	38.329	62.588
	0.1-0.15			1210	16675	3376	544	51	1		21857	20.216	24.258
	0.15-0.2			161	2395	812	94	2			3464	3.204	4.043
	0.2-0.25			15	486	168	22				691	0.639	0.839
	0.25-0.3			1	116	46	2				165	0.153	0.200
	0.3-0.35				30	13	1				44	0.041	0.047
	0.35-0.4				2	5					7	0.006	0.006
	Total	5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119		
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018	100		
A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018			

Fuente: Elaboración propia.

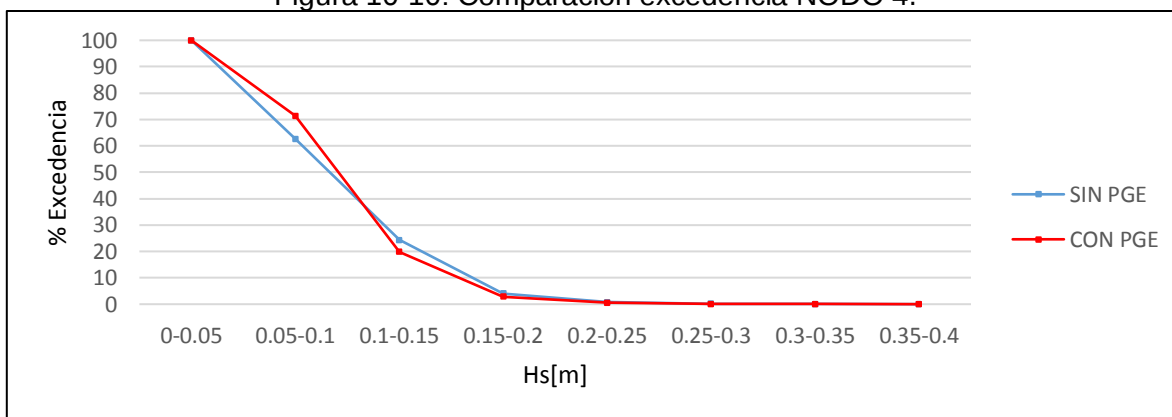
Tabla 10-8: Clima de oleaje NODO 4, escenario con PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	4094	6123	16906	3096	303	188	155	38	20	30923	28.601	100
	0.05-0.1	1093	24	15581	32061	4612	1882	521	52		55826	51.634	71.399
	0.1-0.15			1109	13288	3280	553	50	2		18282	16.909	19.765
	0.15-0.2			115	1577	718	104	2			2516	2.327	2.856
	0.2-0.25			7	269	149	21				446	0.413	0.529
	0.25-0.3				64	40	2				106	0.098	0.117
	0.3-0.35				3	12	1				16	0.015	0.018
	0.35-0.4					4					4	0.004	0.004
	Total	5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119		
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018	100.0		
A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018			

Fuente: Elaboración propia.

Comparación excedencia

Figura 10-10: Comparación excedencia NODO 4.



Fuente: Elaboración propia.

10.3.5 Clima de oleaje NODO 5

Tabla 10-9: Clima de oleaje NODO 5, escenario sin PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	560	4329	2143	259	67	52	61	20	20	7511	6.947	100
	0.05-0.1	3926	1810	24116	15871	2246	1365	530	63		49927	46.178	93.053
	0.1-0.15	688	8	6292	23660	3955	1001	119	9		35732	33.049	46.875
	0.15-0.2	13		933	8186	2096	266	17			11511	10.647	13.826
	0.2-0.25			174	1663	504	42	1			2384	2.205	3.180
	0.25-0.3			57	492	167	18				734	0.679	0.975
	0.3-0.35			2	150	48	6				206	0.191	0.296
	0.35-0.4			1	52	19	1				73	0.068	0.105
	0.4-0.45				16	11					27	0.025	0.038
	0.45-0.5				7	5					12	0.011	0.013
	0.5-0.55				2						2.00	0.002	0.002
	Total		5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119	
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018	100		
A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018			

Fuente: Elaboración propia.

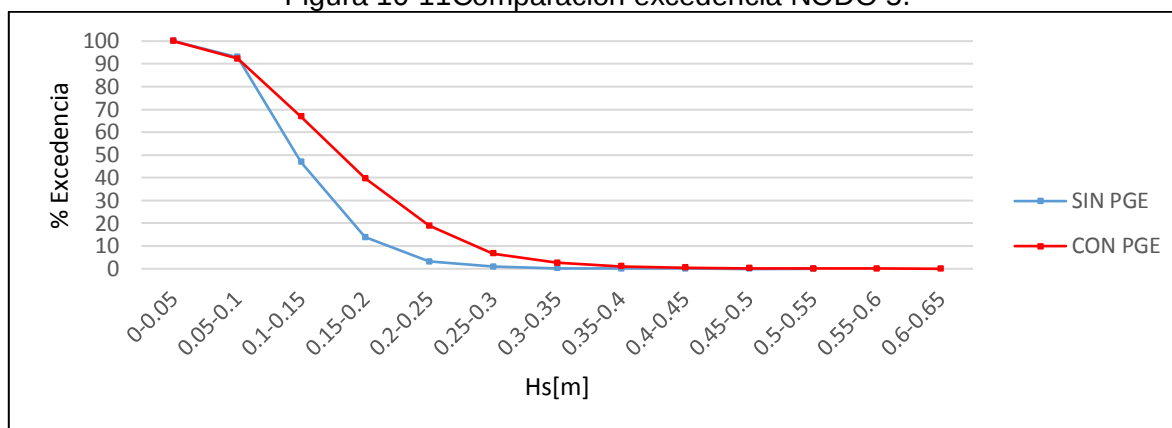
Tabla 10-10: Clima de oleaje NODO 5, escenario con PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	4181	2999	981	49	32	11	14	13	20	8300	7.677	100
	0.05-0.1	1006	2772	18047	3859	835	646	365	68		27598	25.526	92.323
	0.1-0.15		327	9142	15038	3174	1342	284	10		29317	27.115	66.798
	0.15-0.2		47	2799	16332	2661	477	58	1		22375	20.695	39.682
	0.2-0.25		2	1408	10000	1595	213	6			13224	12.231	18.987
	0.25-0.3			742	3164	502	35	1			4444	4.110	6.756
	0.3-0.35			350	1152	169	15				1686	1.559	2.646
	0.35-0.4			154	429	86	10				679	0.628	1.087
	0.4-0.45			47	179	31	1				258	0.239	0.459
	0.45-0.5			36	92	17	1				146	0.135	0.220
	0.5-0.55			11	41	9					61	0.056	0.085
	0.55-0.6			1	20	6					27	0.025	0.029
	0.6-0.65				3	1					4	0.004	0.004
	Total		5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119	
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018	100		
A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018			

Fuente: Elaboración propia.

Comparación excedencia

Figura 10-11 Comparación excedencia NODO 5.



Fuente: Elaboración propia.

10.3.6 Clima de oleaje NODO 6

Tabla 10-11: Clima de oleaje NODO 6, escenario sin PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	5187	6147	31260	17927	2764	1472	544	81	20	65402	60.491	100
	0.05-0.1			2356	30147	5774	1218	182	11		39688	36.708	39.509
	0.1-0.15			97	2032	513	55	2			2699	2.496	2.802
	0.15-0.2			5	213	60	6				284	0.263	0.305
	0.2-0.25				29	7					36	0.033	0.043
	0.25-0.3				9						9	0.008	0.009
	0.3-0.35				1						1	0.001	0.001
	Total	5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119	100	
R%	4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018				
A%	100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018				

Fuente: Elaboración propia.

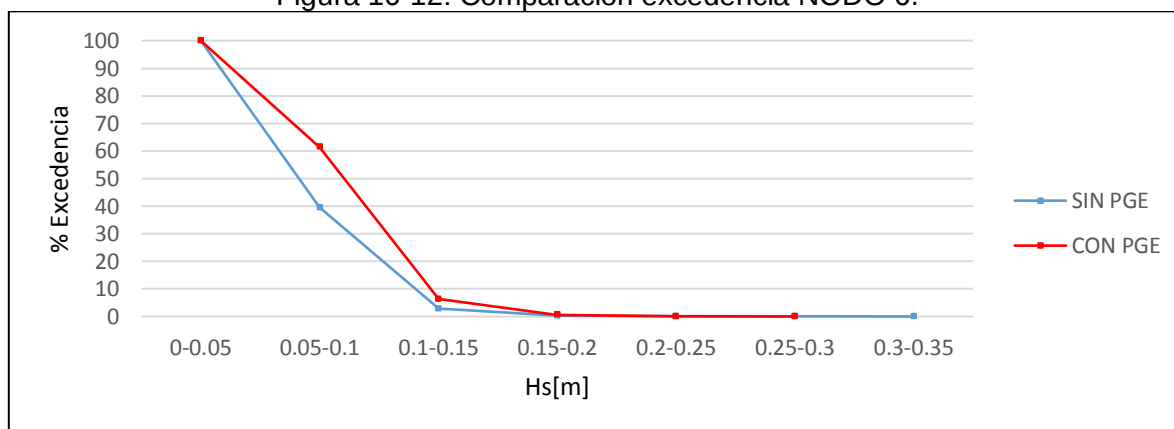
Tabla 10-12: Clima de oleaje NODO 6, escenario con PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	5187	6120	17105	10491	1463	890	421	74	20	41771	38.634	100
	0.05-0.1		27	15905	35406	6204	1641	301	18		59502	55.034	61.366
	0.1-0.15			657	4004	1264	200	6			6131	5.671	6.332
	0.15-0.2			51	404	153	19				627	0.580	0.661
	0.2-0.25				51	29	1				81	0.075	0.081
	0.25-0.3				2	5					7	0.006	0.006
	Total	5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119	100	
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018			
A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018			

Fuente: Elaboración propia.

Comparación excedencia

Figura 10-12: Comparación excedencia NODO 6.



Fuente: Elaboración propia.

10.3.7 Clima de oleaje NODO 7

Tabla 10-13: Clima de oleaje NODO 7, escenario sin PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	4845	4216	1906	182	47	41	44	14	20	11315	10.465	100
	0.05-0.1	342	1818	22064	6967	1593	1216	479	68		34547	31.953	89.535
	0.1-0.15		110	7196	15628	3846	1117	173	10		28080	25.971	57.582
	0.15-0.2		3	1711	16271	2414	284	30			20713	19.158	31.611
	0.2-0.25			585	7658	838	63	2			9146	8.459	12.453
	0.25-0.3			180	2256	227	19				2682	2.481	3.994
	0.3-0.35			53	812	94	7				966	0.893	1.513
	0.35-0.4			22	348	39	3				412	0.381	0.620
	0.4-0.45			1.00	128.00	10.00	1.00				140	0.129	0.239
	0.45-0.5				60.00	8.00					68.00	0.063	0.109
	0.5-0.55				29.00	2.00					31.00	0.029	0.046
	0.55-0.6				12						12	0.011	0.018
	0.6-0.65				5						5	0.005	0.006
	0.65-0.7				1						1	0.001	0.002
	0.7-0.75				1						1	0.001	0.001
Total		5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119	100	
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018			
A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018			

Fuente: Elaboración propia.

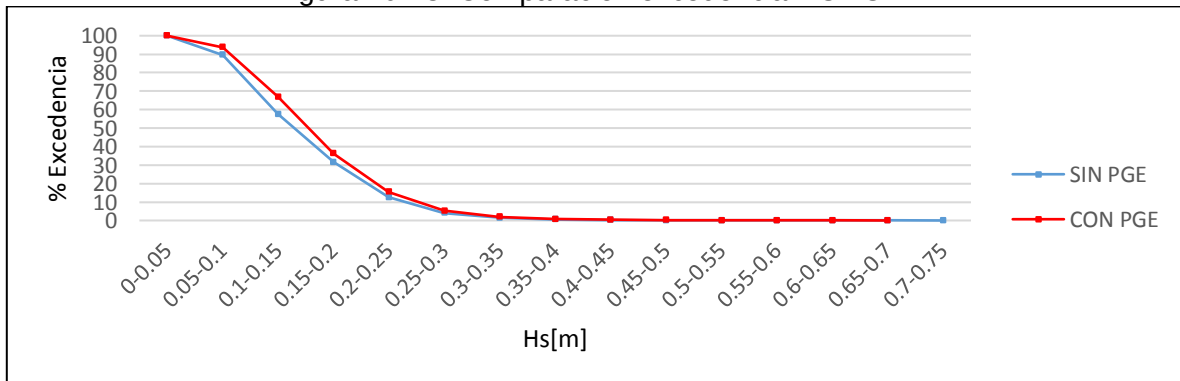
Tabla 10-14: Clima de oleaje NODO 7, escenario con PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	1620	4309	663	69	32	3	13	13	20	6742	6.236	100
	0.05-0.1	3501	1813	17151	5064	627	488	312	54		29010	26.832	93.764
	0.1-0.15	66	25	12162	16591	2712	1252	318	21		33147	30.658	66.933
	0.15-0.2			2464	16554	2732	636	62	4		22452	20.766	36.275
	0.2-0.25			836	8231	1794	208	21			11090	10.257	15.509
	0.25-0.3			305	2437	758	120	2			3622	3.350	5.252
	0.3-0.35			85	830	256	24				1195	1.105	1.902
	0.35-0.4			41.00	348.00	114.00	10.00				513	0.474	0.796
	0.4-0.45			10.00	135.00	44.00	8.00				197	0.182	0.322
	0.45-0.5			1	71	27	1				100	0.092	0.140
	0.5-0.55				22	9					31	0.029	0.047
	0.55-0.6				6	8	1				15	0.014	0.018
	0.6-0.65					4					4	0.004	0.005
	0.65-0.7					1					1	0.001	0.001
	Total		5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119	
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018	100		
A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018			

Fuente: Elaboración propia.

Comparación excedencia

Figura 10-13: Comparación excedencia NODO 7.



Fuente: Elaboración propia.

10.3.8 Clima de oleaje NODO 8

Tabla 10-15: Clima de oleaje NODO 8, escenario sin PGE.

		Tp[s]									R%	A%		
		8	10	12	14	16	18	20	22	24			Total	
Hs[m]	0-0.05	403	4031	703	63	31	2		13	20	5266	4.871	100	
	0.05-0.1	17	1966	16971	2650	220	219	144	19		22206	20.538	95.129	
	0.1-0.15	458	140	11596	7608	1586	1023	366	50		22827	21.113	74.591	
	0.15-0.2	1779	10	2554	11609	2793	873	154	8		19780	18.295	53.478	
	0.2-0.25	1676		1033	12564	2089	355	46	2		17765	16.431	35.183	
	0.25-0.3	545		454	8858	1377	185	16			11435	10.576	18.752	
	0.3-0.35	247		217	3685	569	54	1			4773	4.415	8.176	
	0.35-0.4	57		88	1527	217	13	1			1903	1.760	3.762	
	0.4-0.45	5		50	749	104	16				924	0.855	2.001	
	0.45-0.5			17	407	59	5				488.00	0.451	1.147	
	0.5-0.55			15	218	30	2				265.00	0.245	0.696	
	0.55-0.6			7	133	20	3				163	0.151	0.450	
	0.6-0.65			5	102	8	1				116	0.107	0.300	
	0.65-0.7			5	41	9					55	0.051	0.192	
	0.7-0.75			2	41	5					48	0.044	0.142	
	0.75-0.8				33	1					34	0.031	0.097	
	0.8-0.85				19						19	0.018	0.066	
	0.85-0.9			1	12						13	0.012	0.048	
	0.9-0.95				2						2	0.002	0.036	
	0.95-1				2						2	0.002	0.034	
	1-1.05				8						8	0.007	0.032	
	1.05-1.1				5						5	0.005	0.025	
	1.1-1.15				6						6	0.006	0.020	
	1.15-1.2				6						6	0.006	0.015	
	1.2-1.25				1.00						1	0.001	0.009	
	1.25-1.3				4.00						4	0.004	0.008	
	1.3-1.35				3						3	0.003	0.005	
	1.4-1.45				1						1	0.001	0.002	
	1.45-1.5				1						1	0.001	0.001	
	Total		5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119		
	R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018	100		
	A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018			

Fuente: Elaboración propia.

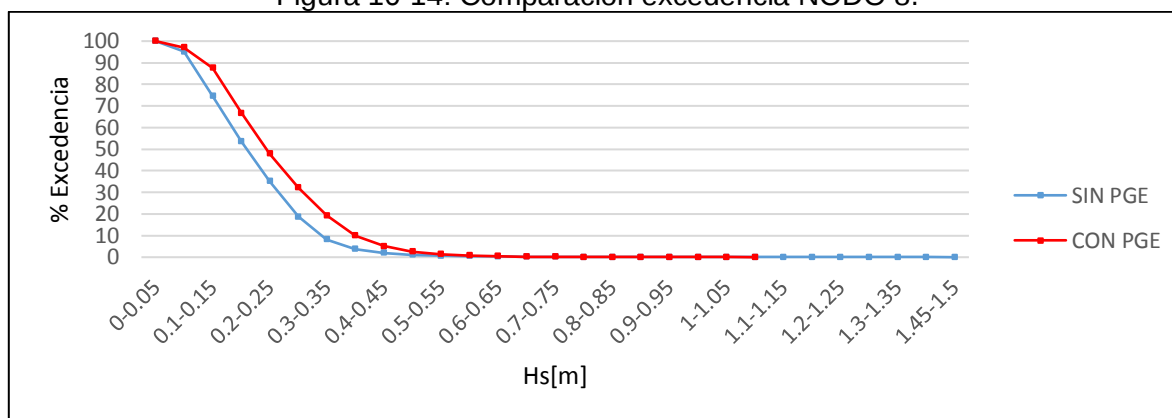
Tabla 10-16: Clima de oleaje NODO 8, escenario con PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	403	2513	106	34	31	1		13	20	3121	2.887	100
	0.05-0.1	230	3464	6099	393	32	44	55	5		10322	9.547	97.113
	0.1-0.15	2067	161	15359	3844	436	345	241	46		22499	20.809	87.566
	0.15-0.2	1929	9	7293	9011	1189	673	260	18		20382	18.851	66.757
	0.2-0.25	446		2486	11217	1931	786	98	8		16972	15.698	47.906
	0.25-0.3	108		1095	10554	1723	385	41	2		13908	12.864	32.208
	0.3-0.35	4		654	7828	1393	229	26			10134	9.373	19.344
	0.35-0.4			320.00	3788.00	1069.00	116.00	5.00			5298	4.900	9.971
	0.4-0.45			166.00	1771.00	630.00	115.00	1.00			2683	2.482	5.071
	0.45-0.5			77	857	273	22	1			1230	1.138	2.590
	0.5-0.55			25	458	157	13				653	0.604	1.452
	0.55-0.6			27	261	87	6				381	0.352	0.848
	0.6-0.65			11	143	70	8				232	0.215	0.496
	0.65-0.7				81	33	5				119	0.110	0.281
	0.7-0.75				63	18	2				83	0.077	0.171
	0.75-0.8				31	18					49	0.045	0.094
	0.8-0.85				14	12					26	0.024	0.049
	0.85-0.9				8	3	1				12	0.011	0.025
	0.9-0.95				2	6					8	0.007	0.014
	0.95-1					2					2	0.002	0.006
	1-1.05					4					4	0.004	0.005
	1.05-1.1					1					1	0.001	0.001
Total		5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119	100	
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018			
A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018			

Fuente: Elaboración propia.

Comparación excedencia

Figura 10-14: Comparación excedencia NODO 8.



Fuente: Elaboración propia.

10.3.9 Clima de oleaje NODO 10

Tabla 10-17: Clima de oleaje NODO 10, escenario sin PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	5187	6147	31592	29898	5095	2258	689	92	20	80978	74.897	100
	0.05-0.1			2051	19683	3831	474	39			26078	24.120	25.103
	0.1-0.15			74	719	176	19				988	0.914	0.983
	0.15-0.2			1	48	16					65	0.060	0.069
	0.2-0.25				9						9	0.008	0.009
	0.25-0.3				1						1	0.001	0.001
	Total	5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119	100	
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018			
A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018			

Fuente: Elaboración propia.

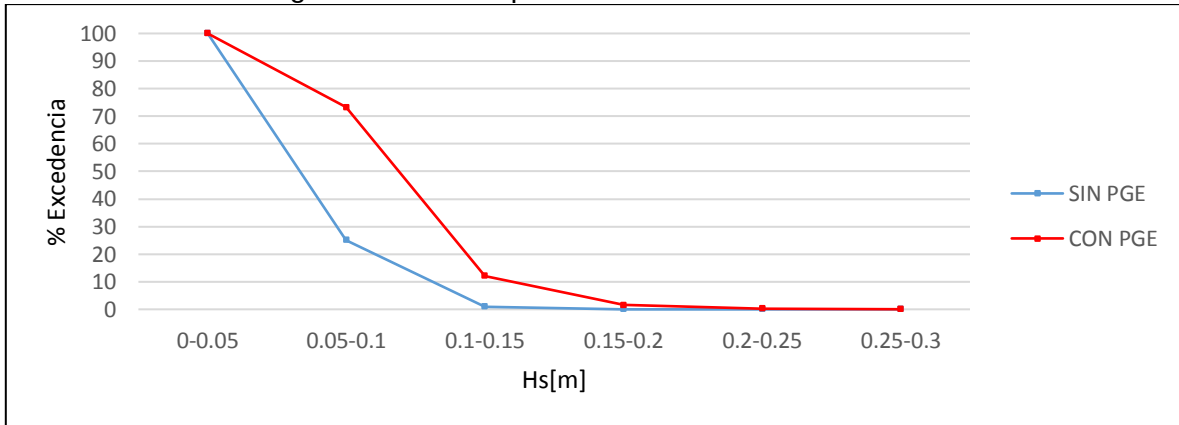
Tabla 10-18: Clima de oleaje NODO 10, escenario con PGE.

		Tp[s]										R%	A%
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	Total		
Hs[m]	0-0.05	5163	6039	7940	6905	1263	1036	541	82	20	28989	26.812	100
	0.05-0.1	24	108	22738	35361	6114	1534	185	10		66074	61.112	73.188
	0.1-0.15			2487	7217	1520	165	2			11391	10.536	12.076
	0.15-0.2			468	728	175	15				1386	1.282	1.540
	0.2-0.25			74	135	39	1				249	0.230	0.258
	0.25-0.3			11	12	7					30	0.028	0.028
	Total	5187	6147	33718	50358	9118	2751	728	92	20	108119	100	
R%		4.797	5.685	31.186	46.576	8.433	2.544	0.673	0.085	0.018			
A%		100	95.203	89.517	58.331	11.755	3.321	0.777	0.104	0.018			

Fuente: Elaboración propia.

Comparación excedencia

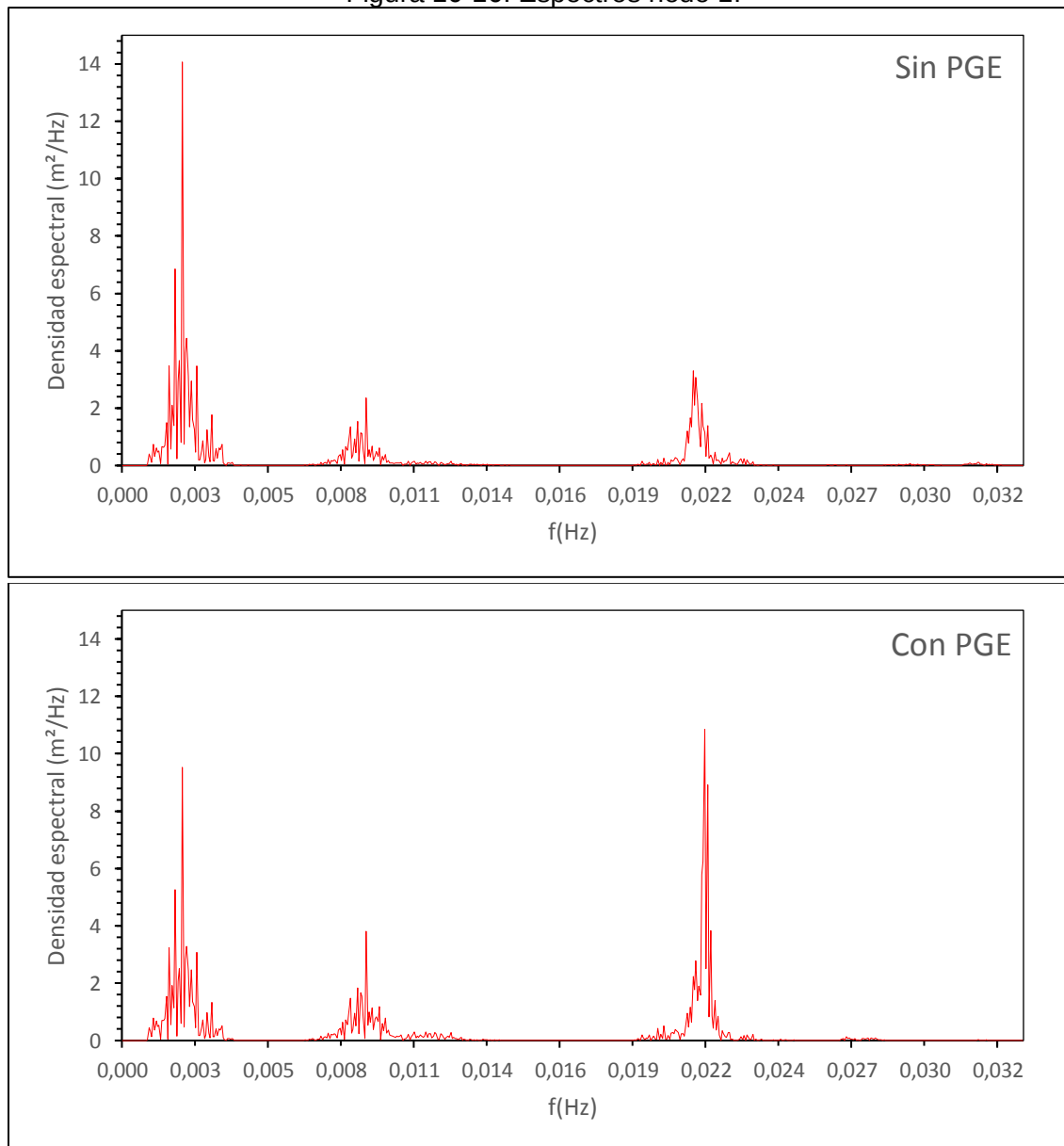
Figura 10-15: Comparación excedencia NODO 10.



Fuente: Elaboración propia.

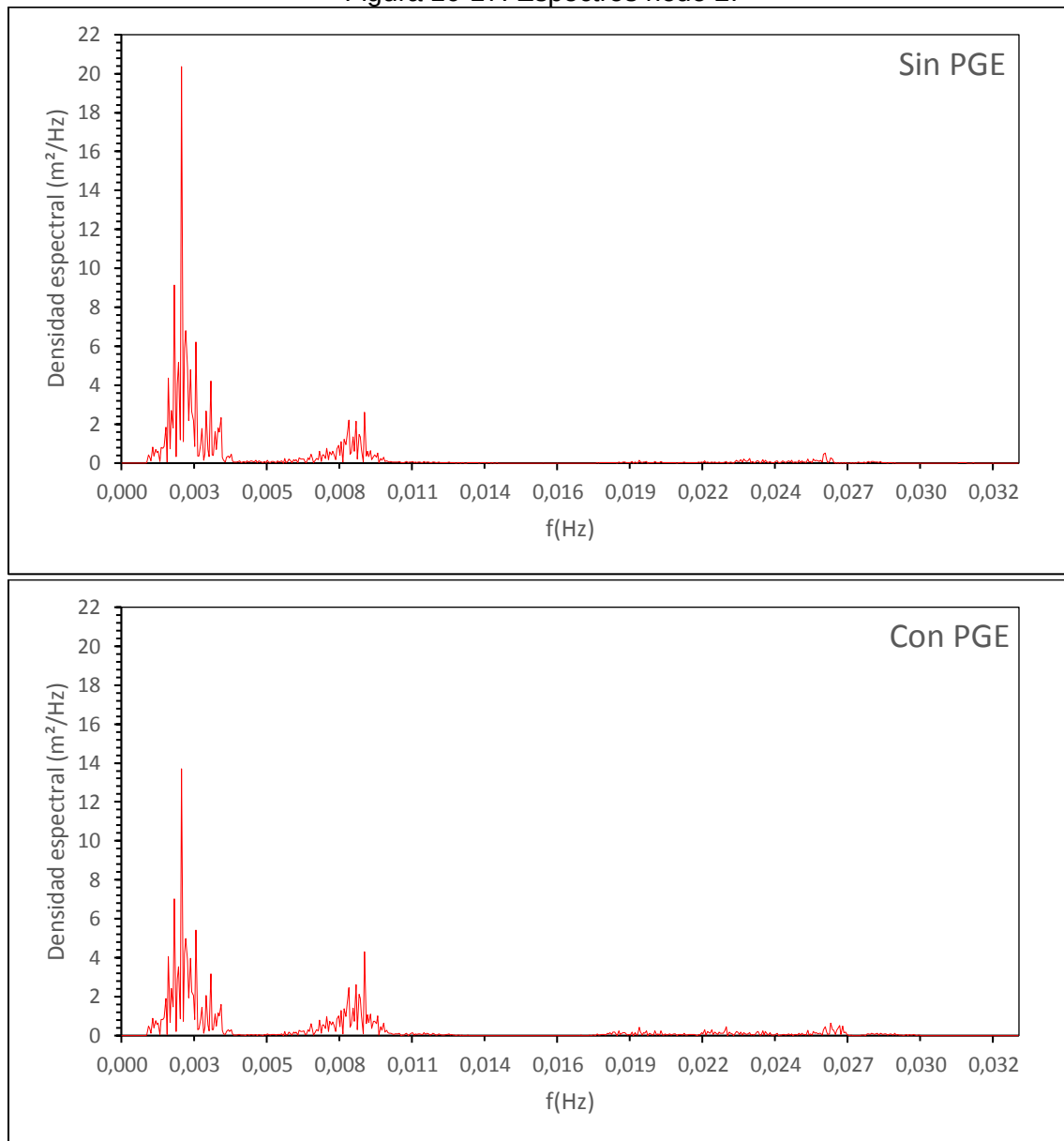
10.4 ANEXO D: ESPECTROS ONDAS LARGAS NODOS DE CONTROL

Figura 10-16: Espectros nodo 1.



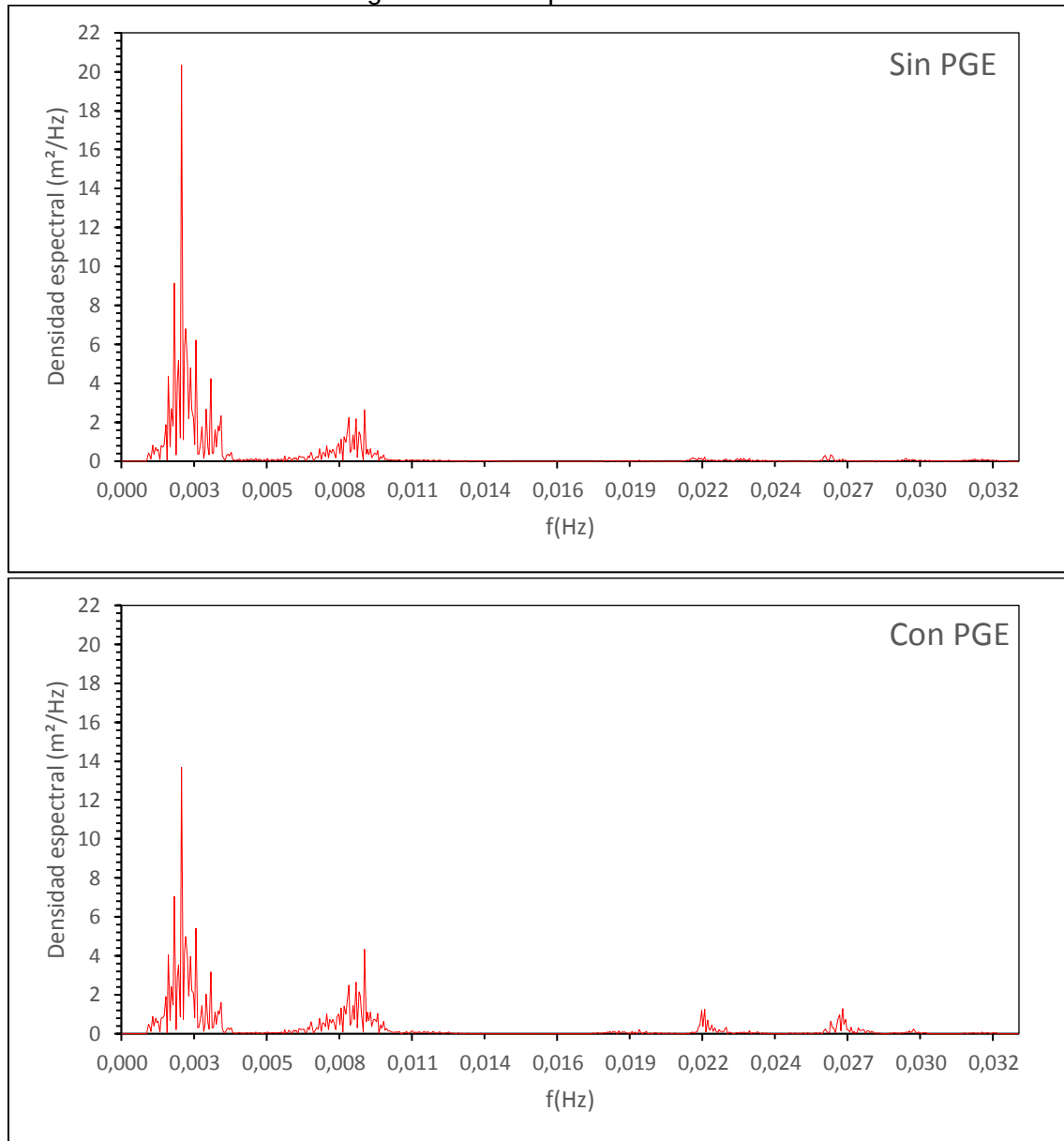
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-17: Espectros nodo 2.



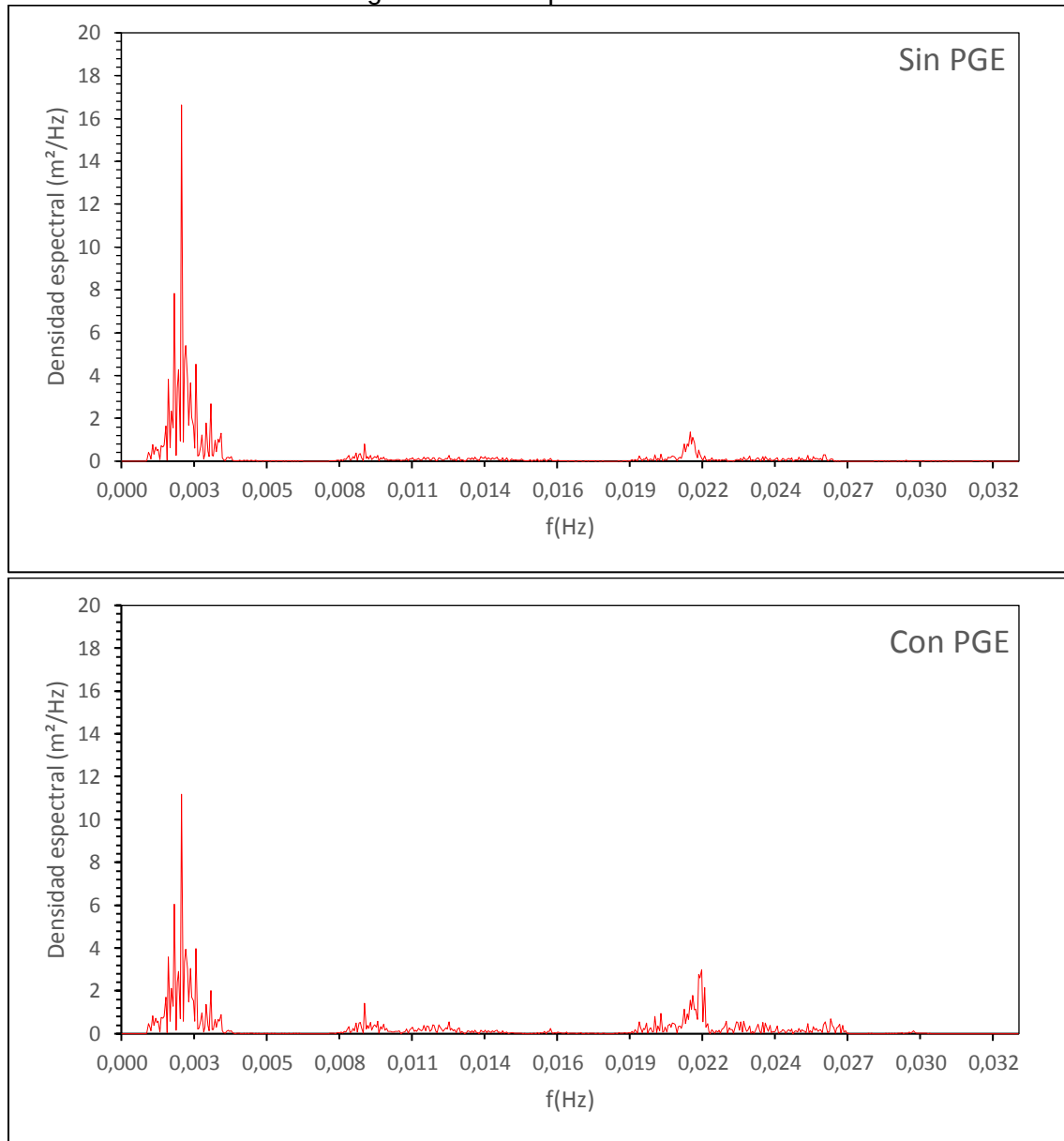
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-18: Espectros nodo 3.



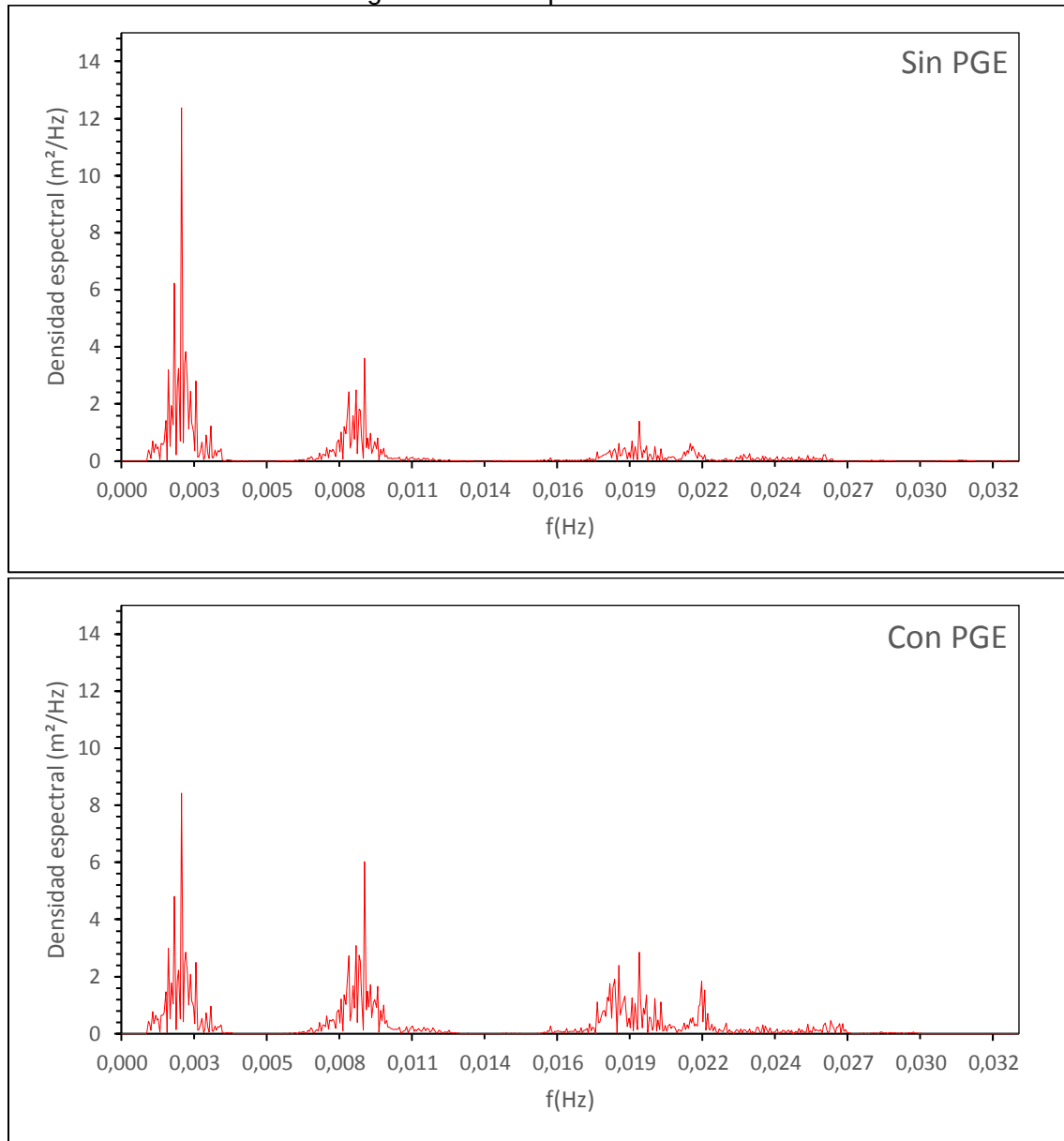
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-19: Espectros nodo 4.



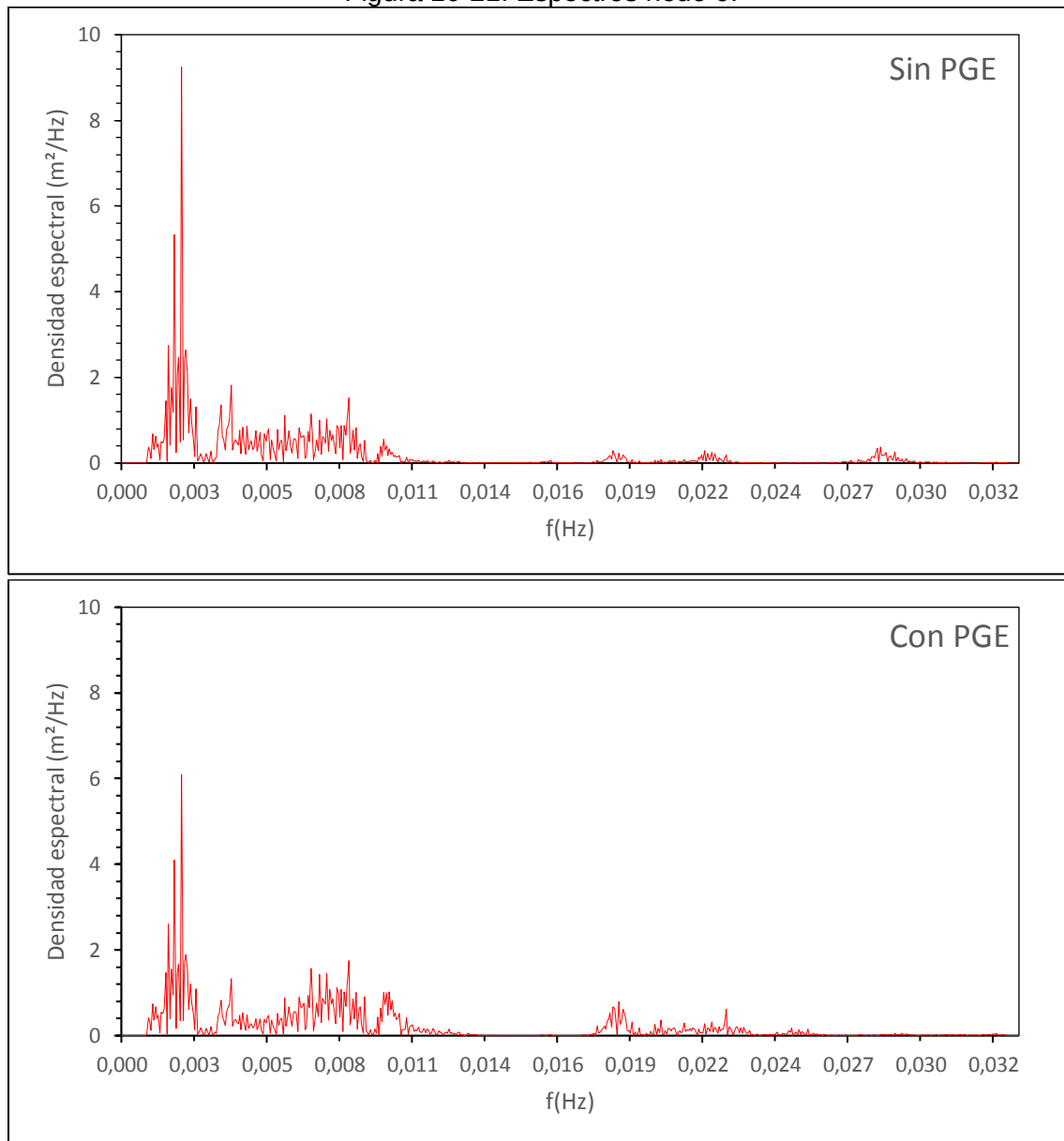
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-20: Espectros nodo 5.



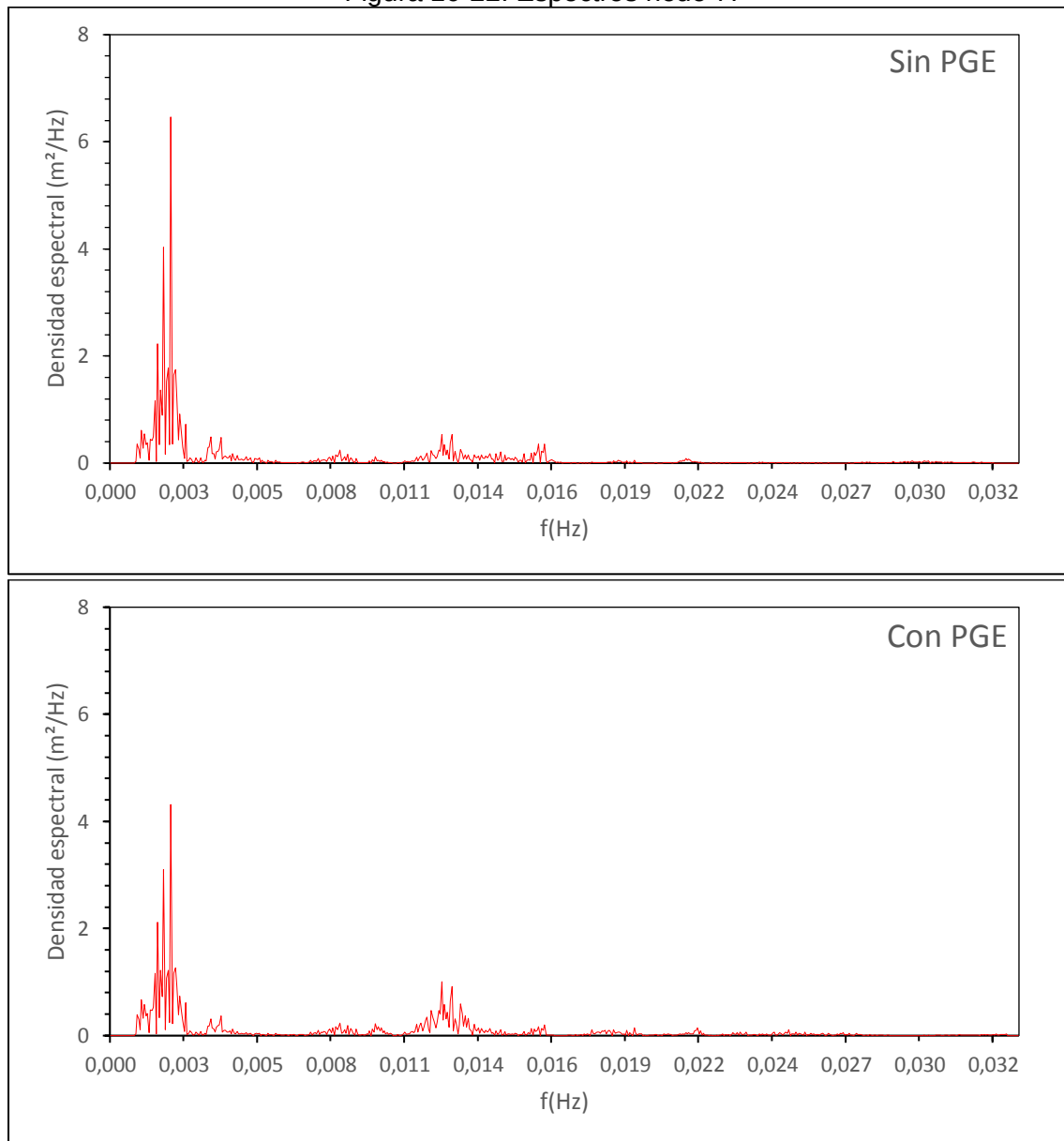
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-21: Espectros nodo 6.



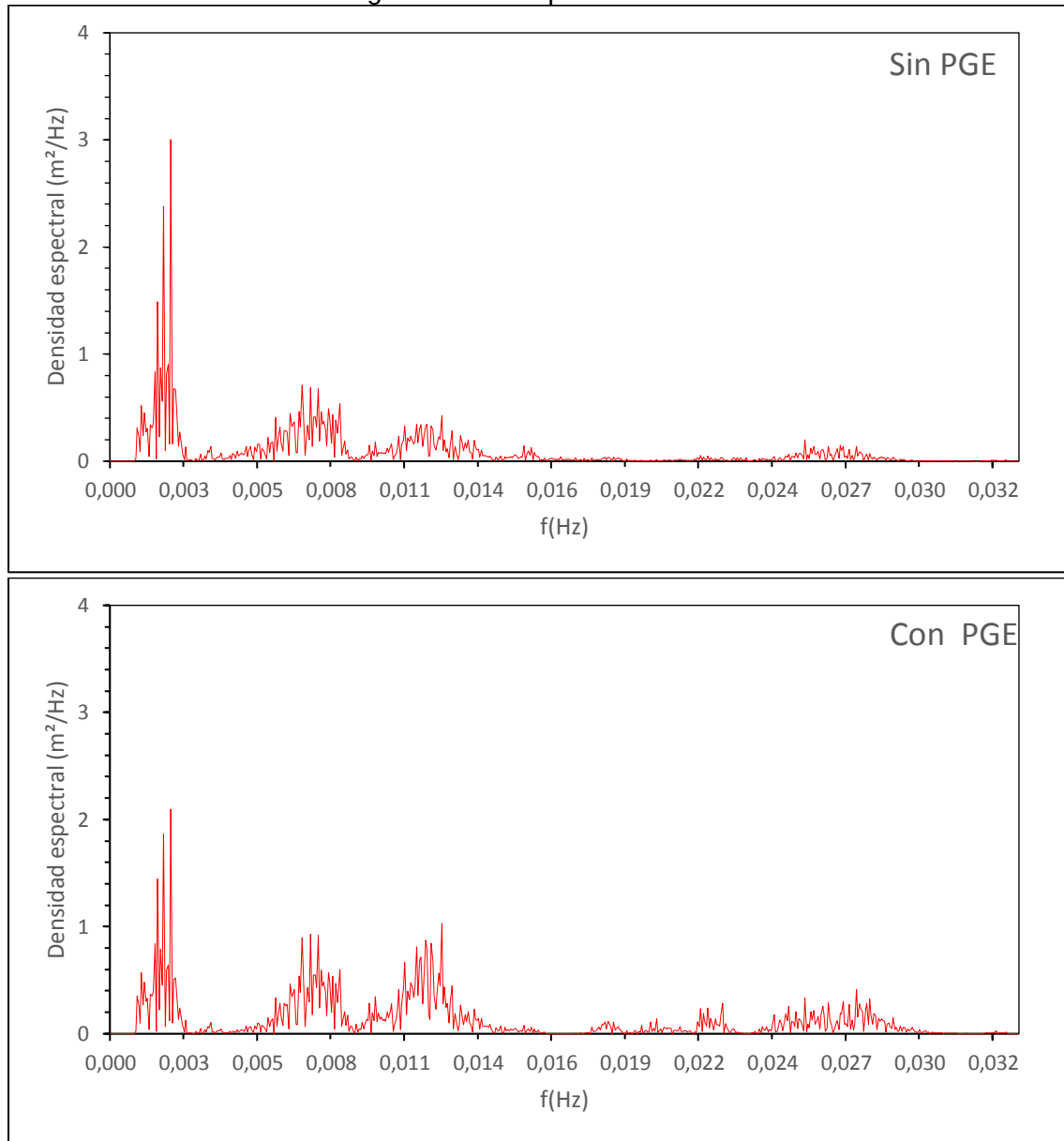
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-22: Espectros nodo 7.



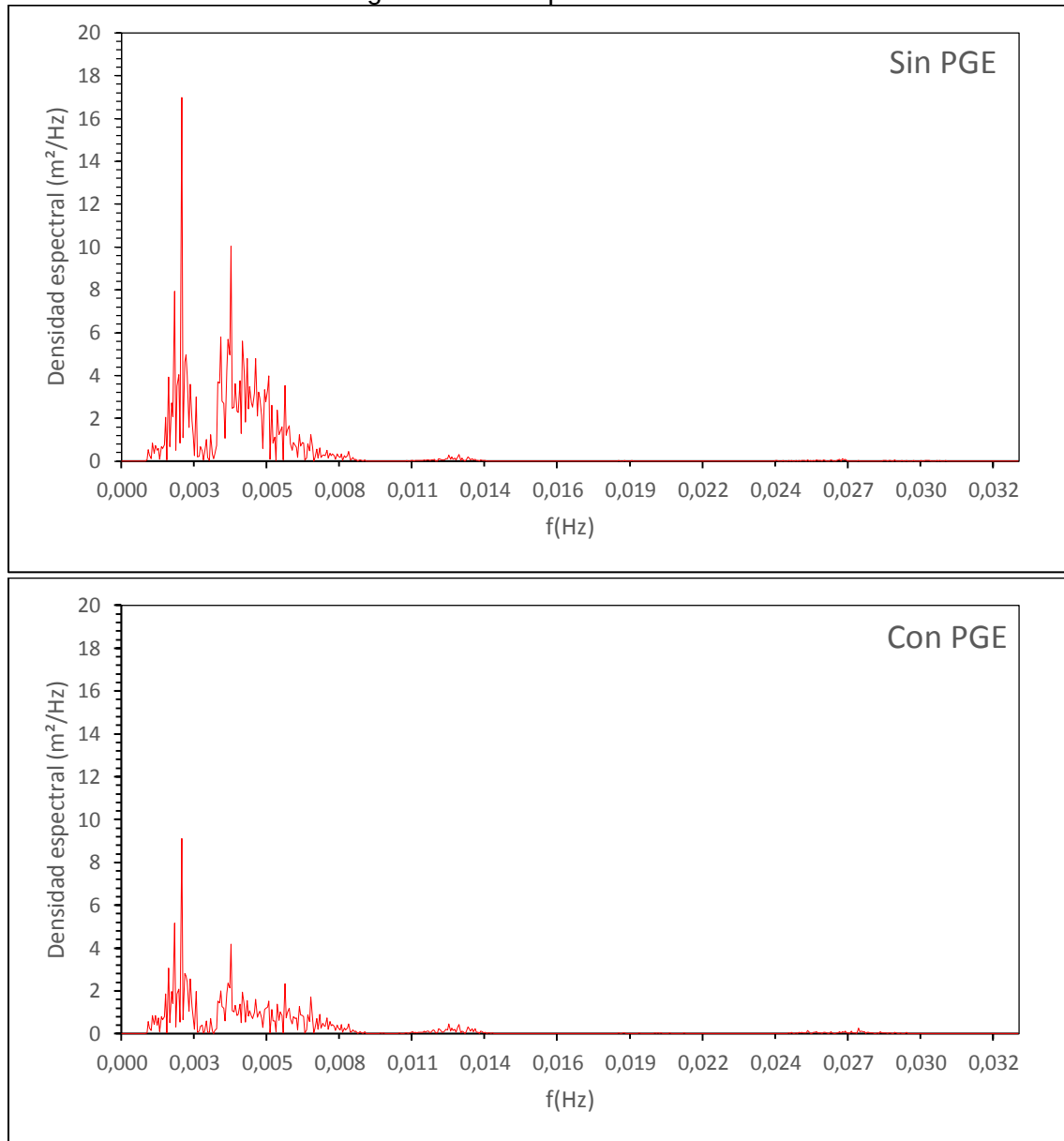
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-23: Espectros nodo 8.



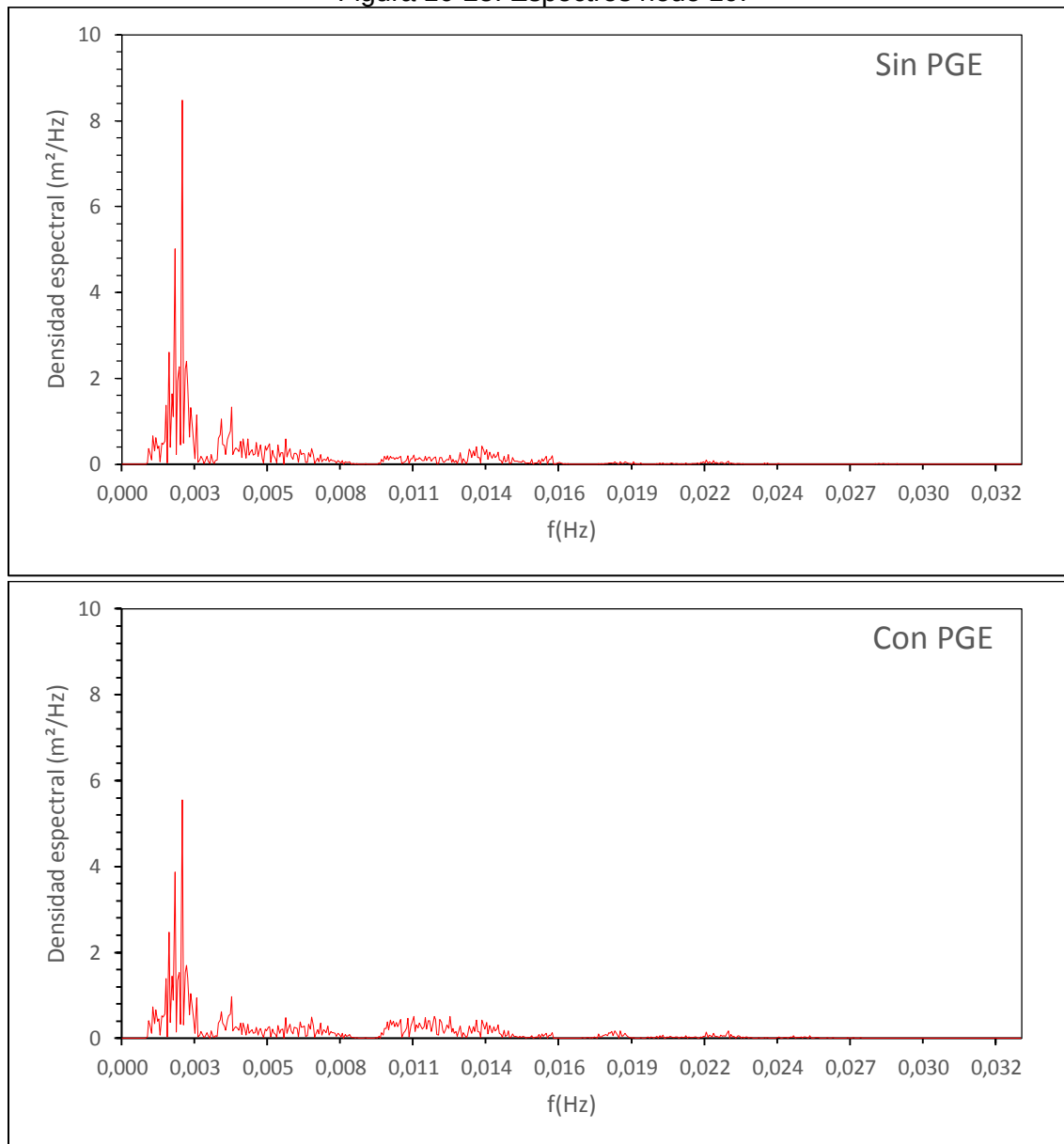
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-24: Espectros nodo 9.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10-25: Espectros nodo 10.



Fuente: Elaboración propia.