



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO STWAVE
MEDIANTE MEDICIONES Y MODELACIÓN MATEMÁTICA
EN UN SECTOR UBICADO EN LA REGIÓN DE
VALPARAÍSO.**

Ariel Andrés Gallardo Yáñez

Abril 2015

APROBACIÓN

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO STWAVE MEDIANTE MEDICIONES Y MODELACIÓN MATEMÁTICA EN UN SECTOR UBICADO EN LA REGIÓN DE VALPARAÍSO.

Ariel Andrés Gallardo Yáñez

Comisión Revisora

José Beyá
Profesor guía

Nota

6.5

Firma

Mauricio Molina
Docente

6.7

Patricio Catalán
Revisor

5.4



DECLARACIÓN

Este trabajo, considerado tanto en su totalidad como alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, ni institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal; ya sea 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.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco mi familia, en especial a mis padres, Elba y Luis, hermanos, Eduardo, Alex y Víctor, por toda la ayuda y apoyo entregado a lo largo de toda mi vida. Definitivamente este logro no habría sido posible sin su permanente apoyo y preocupación.

A mis tíos, Sergio y María quienes siempre confiaron en mí.

A mi Abuela Celinda por su constante e incondicional apoyo.

A mi profesor guía José Beyá y a Mauricio Molina por su buena disposición y por sobre todo la confianza entregada.

A Andrés Puelma por brindar su tiempo y conocimientos para el desarrollo e investigación de este proyecto de titulación.

A mis compañeros de carrera Claudio Meza, Cesar Esparza, Rodrigo Leal y Janisse Ferrada, con quienes estudie, realice tareas, trabajos y en su amistad encontré el apoyo necesario para superar los momentos difíciles que viví a lo largo de esta carrera.

Gracias a Samanta por confiar en mí todos estos años, comprender mis ideales y el tiempo que no estuve con ella.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 GENERAL:.....	3
1.1.2 ESPECÍFICOS:.....	3
1.2 ALCANCES	3
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 EL OLEAJE.....	4
2.1.1 REPRESENTACIÓN DE UN ESTADO DE MAR.....	6
2.1.2 ESPECTRO SINTÉTICO DE OLEAJE	7
2.1.3 PARÁMETROS ESPECTRALES DEL OLEAJE	9
2.1.1 PROCESOS FÍSICOS DE TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE.....	10
2.2 PROPAGACIÓN DE ENERGÍA ESPECTRAL	12
2.3 MÉTODOS DE PROPAGACIÓN INDIRECTA DE ENERGÍA ESPECTRAL.....	13
2.3.1 PROPAGACIÓN MEDIANTE RECONSTRUCCIÓN ESPECTRAL	14
2.3.2 PROPAGACIÓN MEDIANTE PSEUDO ESPECTRAL	15
2.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO STWAVE.....	18
2.4.1 GENERALIDADES	18
2.4.2 SUPOSICIONES SOBRE LAS CUALES SE BASA EL MODELO.....	18
2.4.3 DATOS DE ENTRADA DEL MODELO	20
2.4.4 DATOS DE SALIDA DEL MODELO	21
2.4.5 LIMITACIONES DE STWAVE	22
2.5 DATOS DISPONIBLES DE OLEAJE	23
2.5.1 DATOS DE AGUAS SOMERAS A INTERMEDIAS	24
2.5.2 DATOS DE AGUAS PROFUNDAS	24
3. METODOLOGÍA DE LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO STWAVE.....	25
3.1 ANÁLISIS DE BATIMETRÍA	25
3.1.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	25
3.1.2 ÁREA APLICACIÓN	26
3.1.3 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE LA BATIMETRÍA	27
3.2 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE STWAVE	31
3.2.1 METODOLOGÍA CALIBRACIÓN.....	31
3.2.2 METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN	35
3.3 ESTADÍGRAFOS EMPLEADOS	35
3.4 SELECCIÓN CASOS REPRESENTATIVOS.....	36
3.5 CONFIGURACIÓN DEL MODELO STWAVE	39
4. RESULTADOS.....	41
4.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS BATIMETRÍAS	41
4.2 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO STWAVE	49
4.2.1 CASO 1: 2012/05/06 07:00 (UTC-0).....	49
4.2.2 CASO 2: 2012/05/13 16:00 (UTC-0).....	51
4.2.3 CASO 3: 2012/05/26 0:00 (UTC-0).....	52
4.2.4 CASO 4: 2012/07/08 14:00 (UTC-0).....	54
4.2.5 CASO 5: 2012/07/25 02:00 (UTC-0).....	55
4.3 RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELO STWAVE	58
5. CONCLUSIONES.....	65

6.	RECOMENDACIONES	67
7.	REFERENCIAS.....	69
8.	ANEXO 1: CAMPOS DE OLEAJE.....	71
9.	ANEXO 2: VALIDACIÓN DE STWAVE	75

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS TIPOS DE OLAS QUE EXISTEN EN LA SUPERFICIE DEL OCEANO Y DE LA ENERGÍA EN ELAS CONTENIDA. SILVA (2005)	4
FIGURA 2-2 : NOMENCLATURA BÁSICA DE UNA OLA. KAMPHUIS (2000).....	5
FIGURA 2-3: SERIE DE TIEMPO. ESTADO DE MAR. (SILVA 2005).	6
FIGURA 2-4: EJEMPLO DE UN ESPECTRO BIDIMENSIONAL $S(F, \theta)$	6
FIGURA 2-5: EJEMPLO DE UN ESPECTRO JONSWAP CON $\Gamma=1$. DONDE LA LÍNEA CONTINUA ES EL ESPECTRO SINTÉTICO, LA LÍNEA DISCONTINUA CON CÍRCULOS BLANCOS ES EL ESPECTRO MEDIDO Y LA LÍNEA ROJA MUESTRA LA FRECUENCIA PICO. GODA (2000).	8
FIGURA 2-6: EJEMPLO DE REFRACCIÓN DE UNA OLA PROPAGADA HACIA LA COSTA EN UNA BATIMETRÍA IRREGULAR. GODA (2000).	10
FIGURA 2-7: EJEMPLO DE ASOMERAMIENTO DE UNA OLA PROPAGÁNDOSE HACIA LA COSTA. LAS FLECHAS REPRESENTAN LA CELERIDAD DE GRUPO.	11
FIGURA 2-8: EJEMPLO DE OLEAJE DIFRACTADO.....	11
FIGURA 2-9: REPRESENTACIÓN ESPECTRAL DEL OLEAJE.....	14
FIGURA 2-10: RESUMEN DEL MÉTODO DE RECONSTRUCCIÓN ESPECTRAL. LOS PASOS 1 Y 2 SE REALIZAN SOLO UNA VEZ POR SITIO MIENTRAS QUE LOS PASOS 3 Y 4 SE REPITEN PARA CADA ESPECTRO DE ENTRADA. DOMÍNGUEZ (2011).	15
FIGURA 2-11: COEFICIENTES DE AGITACIÓN (K_A) EN EL DOMINIO DEL PERIODO PARA DIFERENTES DIRECCIONES. LAS LÍNEAS VERTICALES ROJAS REPRESENTAN EL INVERSO DE CADA UNA DE LAS 38 FRECUENCIAS (PERIODOS) DE UN ESPECTRO MEDIDO EN AGUAS PROFUNDAS.....	17
FIGURA 2-12: COEFICIENTES DE AGITACIÓN (K_A) EN EL DOMINIO DE LA DIRECCIÓN, PARA DIFERENTES PERIODOS .	17
FIGURA 2-13: LIMITACIÓN DEL RANGO DE ENTRADA DE DIRECCIONES EN EL MODELO STWAVE DE UN ESPECTRO, 'HALF-PLANE'. EL SECTOR SOMBREADO REPRESENTA LA PARTE DEL ESPECTRO QUE NO PROPAGADA.	22
FIGURA 2-14: UBICACIÓN REFERENCIAL DE LAS MEDICIONES CON BOYA Y ADCP.....	23
FIGURA 3-1: ÁREA DE APLICACIÓN DEL ESTUDIO BATIMÉTRICO. EN EL CUADRADO VERDE SE COMPARA EL LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO CON LAS CARTAS NÁUTICAS Y EN EL CUADRADO ROJO SE COMPARAN LAS CARTAS NÁUTICAS CON GEBCO Y ETOPO.....	26
FIGURA 3-2: MALLA (1). MAPAS DE VERILES CADA 20 M. DATOS BATIMÉTRICOS UTILIZADOS DE LAS CARTAS NÁUTICAS, ESPECÍFICAMENTE LA N°5112. LAS X REPRESENTAN LOS VECTORES DE PROFUNDIDAD.	28
FIGURA 3-3: MALLA (2). MAPAS DE VERILES CADA 20 M. DATOS BATIMÉTRICOS UTILIZADOS DEL LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO. LAS X REPRESENTAN LOS VECTORES DE PROFUNDIDAD.	28
FIGURA 3-4: MALLA (3). MAPAS DE VERILES CADA 100 M. DATOS BATIMÉTRICOS UTILIZADOS DE LAS CARTAS NÁUTICAS SHOA N° 4000, 5100 Y 5112. LAS X REPRESENTAN LOS VECTORES DE PROFUNDIDAD.....	29
FIGURA 3-5: MALLA (4). MAPAS DE VERILES CADA 100 M, CON DATOS BATIMÉTRICOS UTILIZADOS DE GEBCO. LAS X REPRESENTAN LOS VECTORES DE PROFUNDIDAD.	29
FIGURA 3-6: MALLA (5). MAPAS DE VERILES CADA 100 M. DATOS BATIMÉTRICOS UTILIZADOS DE ETOPO. LAS X REPRESENTAN LOS VECTORES DE PROFUNDIDAD.	30
FIGURA 3-7 NÚMERO DE CHEZY	34
FIGURA 3-8: ESPECTRO BIDIMENSIONAL CASO 1, 2012/05/06 07:00.....	37
FIGURA 3-9: ESPECTRO BIDIMENSIONAL CASO 2, 2012/05/13 16:00.....	37
FIGURA 3-10: ESPECTRO BIDIMENSIONAL CASO 3, 2012/05/26 00:00.....	38
FIGURA 3-11: ESPECTRO BIDIMENSIONAL CASO 4, 2012/07/08 14:00.....	38
FIGURA 3-12: ESPECTRO BIDIMENSIONAL CASO 5, 2012/07/25 02:00.....	39
FIGURA 3-13: POSICIÓN Y ORIENTACIÓN DE LAS MALLAS PARA EL MODELO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE.	40

FIGURA 4-1: MAPA DE COMPARACIÓN DE VERILES CADA 20 M, HASTA EL VERIL DE LOS 100 M DE LAS CARTAS NÁUTICAS (COLOR ROJO) CON EL LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO (COLOR NEGRO). LOS SECTORES A Y B PRESENTAN LAS DIFERENCIAS MÁS SIGNIFICATIVAS.	42
FIGURA 4-2: MAPA DEL SESGO DE LAS CARTAS NÁUTICAS V/S EL LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO. LOS SECTORES A Y B MUESTRAN LAS DIFERENCIAS MAS SIGNIFICATIVAS.	43
FIGURA 4-3: MAPA DE COMPARACIÓN DE VERILES CADA 100 M DE LAS CARTAS NÁUTICAS (COLOR NEGRO) CON LA GRILLA ETOPO (COLOR ROJO). EL SECTOR A PRESENTA LAS DIFERENCIAS MÁS SIGNIFICATIVAS.	44
FIGURA 4-4: MAPA DEL SESGO, CARTAS NÁUTICAS V/S ETOPO. EL SECTOR A PRESENTA LAS DIFERENCIAS MÁS SIGNIFICATIVAS.	45
FIGURA 4-5: MAPA DE COMPARACIÓN DE VERILES CADA 100 M DE LAS CARTAS NÁUTICAS (COLOR NEGRO) CON GEBCO (COLOR ROJO). LOS SECTORES A Y B PRESENTAN LAS DIFERENCIAS MÁS SIGNIFICATIVAS.	46
FIGURA 4-6: MAPA DEL SESGO, CARTAS NÁUTICAS V/S GEBCO. LOS SECTORES A Y B PRESENTAN LAS DIFERENCIAS MÁS SIGNIFICATIVAS.	47
FIGURA 4-7: COMPARACIÓN DE PROFUNDIDADES DE UNA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA ZONA EN ESTUDIO: A) UBICACIÓN SECCIÓN TRANSVERSAL; B) COMPARACIÓN DE PROFUNDIDADES DE LAS CARTAS NÁUTICAS (EN ROJO), GEBCO (MORADO), ETOPO (VERDE) Y EL LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO (AZUL); C) AMPLIACIÓN DEL RECTÁNGULO (HASTA LOS 100M DE PROFUNDIDAD).	48
FIGURA 8-1: CAMPO DE OLEAJE MODELADO PARA EL CASO 1: 2012/05/06 07:00.	72
FIGURA 8-2: CAMPO DE OLEAJE MODELADO PARA EL CASO 2: 2012/05/13 16:00.	72
FIGURA 8-3: CAMPO DE OLEAJE MODELADO PARA EL CASO 3: 2012/05/26 00:00.	73
FIGURA 8-4: CAMPO DE OLEAJE MODELADO PARA EL CASO 4: 2012/07/08 14:00.	73
FIGURA 8-5: CAMPO DE OLEAJE MODELADO PARA EL CASO 5: 2012/07/25 02:00.	74
FIGURA 9-1: COEFICIENTE DE ASOMERAMIENTO SEGÚN PERIODO Y DIRECCIÓN DE AGUAS PROFUNDAS.	76
FIGURA 9-2: CAMBIO EN LA DIRECCIÓN SEGÚN PERIODO Y DIRECCIÓN DE AGUAS PROFUNDAS.	76
FIGURA 9-3: ROSAS DEL OLEAJE MEDIDO (ADCP): A) DISPERSIÓN DIRECCIONAL DE ALTURA DE OLA DE H_{M0} . B) DISPERSIÓN DIRECCIONAL DEL PERIODO ENERGÉTICO T_E	77
FIGURA 9-4: ROSAS DEL OLEAJE MODELADO: A) DISPERSIÓN DIRECCIONAL DE ALTURA DE OLA DE H_{M0} . B) DISPERSIÓN DIRECCIONAL DEL PERIODO ENERGÉTICO T_E	77
FIGURA 9-5: CURVAS DE EXCEDENCIA DE ALTURA DE OLA H_{M0} SIMULADA Y MEDIDA EN TERRENO (ADCP).	80
FIGURA 9-6: CURVAS DE EXCEDENCIA DEL PERIODO ENERGÉTICO T_E SIMULADA Y MEDIDA EN TERRENO (ADCP). ...	80

LISTA DE TABLAS

TABLA 3-1: CARACTERÍSTICAS DE LAS MALLAS UTILIZADAS EN LA EVALUACIÓN DE LAS DIFERENCIAS DE LAS CARTAS NÁUTICAS	27
TABLA 3-2: CARACTERÍSTICAS DE LAS MALLAS UTILIZADAS EN LA EVALUACIÓN DE LAS DIFERENCIAS DE LAS CARTAS NÁUTICA DEL SHOA CON GEBCO Y ETOPO.	27
TABLA 3-3 PARÁMETROS DEL ESCENARIO BASE PARA LA CALIBRACIÓN.....	32
TABLA 3-4: CASOS SELECCIONADOS PARA LA CALIBRACIÓN POR EL MÉTODO “MDA” PARA EL PROYECTO UNDIMOTRIZ.	36
TABLA 3-5: DESCRIPCIÓN DE LAS MALLAS NUMÉRICAS USADAS EN LA MODELACIÓN.....	40
TABLA 4-1: PARÁMETROS ESTADÍSTICOS Y EL SESGO CON RESPECTO A LA MEDICIÓN, PARA TODOS LOS ESCENARIOS MODELADOS EN LA CALIBRACIÓN Y MEDICIÓN (ADCP). CASO 1.....	50
TABLA 4-2: PARÁMETROS ESTADÍSTICOS Y EL SESGO CON RESPECTO A LA MEDICIÓN, PARA TODOS LOS ESCENARIOS MODELADOS EN LA CALIBRACIÓN Y MEDICIÓN (ADCP). CASO 2.....	52
TABLA 4-3 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS Y EL SESGO CON RESPECTO A LA MEDICIÓN, PARA TODOS LOS ESCENARIOS MODELADOS EN LA CALIBRACIÓN Y MEDICIÓN (ADCP). CASO 3	53
TABLA 4-4 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS Y EL SESGO CON RESPECTO A LA MEDICIÓN, PARA TODOS LOS ESCENARIOS MODELADOS EN LA CALIBRACIÓN Y MEDICIÓN (ADCP). CASO 4.....	55
TABLA 4-5: PARÁMETROS ESTADÍSTICOS Y EL SESGO CON RESPECTO A LA MEDICIÓN, PARA TODOS LOS ESCENARIOS MODELADOS EN LA CALIBRACIÓN Y MEDICIÓN (ADCP). CASO 5.....	56
TABLA 4-6: PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE LOS ERRORES PORCENTUALES ABSOLUTOS EN LA ESTIMACIÓN DE LA ALTURA SIGNIFICATIVA ESPECTRAL. H_{M0}	60
TABLA 4-7: PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE LOS ERRORES PORCENTUALES ABSOLUTOS EN LA ESTIMACIÓN DEL PERÍODO ENERGÉTICO ESPECTRAL. T_E	61
TABLA 4-8: INDICADORES ESTADÍSTICOS DEL DESEMPEÑO DEL MODELO EN LA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE OLEAJE Y LA POTENCIA.	62
TABLA 9-1: TABLA DE INCIDENCIA. ALTURA SIGNIFICATIVA ESPECTRAL H_{M0} VS DIRECCIÓN MEDIA D_M PARA LA ESTADÍSTICA DEL OLEAJE DE LAS MEDICIONES (ADCP)	78
TABLA 9-2: TABLA DE INCIDENCIA. ALTURA SIGNIFICATIVA ESPECTRAL H_{M0} VS DIRECCIÓN MEDIA D_M PARA LA ESTADÍSTICA DEL OLEAJE PARA EL OLEAJE MODELADO.....	78
TABLA 9-3: TABLA DE INCIDENCIA. PERIODO ENERGÉTICO ESPECTRAL T_E VS DIRECCIÓN MEDIA D_M PARA LA ESTADÍSTICA DEL OLEAJE DE LAS MEDICIONES (ADCP)	79
TABLA 9-4: TABLA DE INCIDENCIA. PERIODO ENERGÉTICO ESPECTRAL T_E VS DIRECCIÓN MEDIA D_M PARA LA ESTADÍSTICA DEL OLEAJE MODELADO.....	79

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 6-1: CASO 1, ESPECTRO INTEGRADO EN LA DIRECCIÓN, PARA TODOS LOS ESCENARIOS CALIBRADOS, COMPARADOS CON EL ESPECTRO DE LA MEDICIÓN (ADCP).....	49
GRÁFICO 6-2: CASO 1, ESPECTRO INTEGRADO EN LA FRECUENCIA, PARA TODOS LOS ESCENARIOS CALIBRADOS, COMPARADOS CON EL ESPECTRO DE LA MEDICIÓN (ADCP).....	50
GRÁFICO 6-3: CASO 2, ESPECTRO INTEGRADO EN LA DIRECCIÓN, PARA TODOS LOS ESCENARIOS CALIBRADOS, COMPARADOS CON EL ESPECTRO DE LA MEDICIÓN (ADCP).....	51
GRÁFICO 6-4: CASO 2, ESPECTRO INTEGRADO EN LA FRECUENCIA, PARA TODOS LOS ESCENARIOS CALIBRADOS, COMPARADOS CON EL ESPECTRO DE LA MEDICIÓN (ADCP).....	51
GRÁFICO 6-5: CASO 3, ESPECTRO INTEGRADO EN LA DIRECCIÓN, PARA TODOS LOS ESCENARIOS CALIBRADOS, COMPARADOS CON EL ESPECTRO DE LA MEDICIÓN (ADCP).....	52
GRÁFICO 6-6: CASO 3, ESPECTRO INTEGRADO EN LA FRECUENCIA, PARA TODOS LOS ESCENARIOS CALIBRADOS, COMPARADOS CON EL ESPECTRO DE LA MEDICIÓN (ADCP).....	53
GRÁFICO 6-7: CASO 4, ESPECTRO INTEGRADO EN LA DIRECCIÓN, PARA TODOS LOS ESCENARIOS CALIBRADOS, COMPARADOS CON EL ESPECTRO DE LA MEDICIÓN (ADCP).....	54
GRÁFICO 6-8: CASO 4, ESPECTRO INTEGRADO EN LA FRECUENCIA, PARA TODOS LOS ESCENARIOS CALIBRADOS, COMPARADOS CON EL ESPECTRO DE LA MEDICIÓN (ADCP).....	54
GRÁFICO 6-9: CASO 5, ESPECTRO INTEGRADO EN LA DIRECCIÓN, PARA TODOS LOS ESCENARIOS CALIBRADOS, COMPARADOS CON EL ESPECTRO DE LA MEDICIÓN (ADCP).....	55
GRÁFICO 6-10: CASO 5, ESPECTRO INTEGRADO EN LA FRECUENCIA, PARA TODOS LOS ESCENARIOS CALIBRADOS, COMPARADOS CON EL ESPECTRO DE LA MEDICIÓN (ADCP).....	56
GRÁFICO 6-11: PORCENTAJE DE INCIDENCIA DEL ERROR PORCENTUAL ($E\% H_{M0}$). LA LÍNEA VERTICAL NEGRA INDICA EL CERO.....	59
GRÁFICO 6-12: GRÁFICO DE DISPERSIÓN PARA H_{M0} ADCP (MEDICIONES) Y H_{M0} MODELO. LÍNEA NEGRA Y ECUACIÓN INDICAN EL AJUSTE LINEAL QUE PASA POR CERO. LA LÍNEA VERDE INDICA LA SUB O SOBRESTIMACIÓN DE LOS DATOS AL TENER UN ÁNGULO DE 45°	59
GRÁFICO 6-13: PORCENTAJE DE INCIDENCIA DEL ERROR PORCENTUAL ($E\% T_E$). LA LÍNEA VERTICAL NEGRA INDICA EL CERO.....	60
GRÁFICO 6-14: GRÁFICO DE DISPERSIÓN PARA T_E ADCP (MEDICIONES) Y T_E MODELO. LÍNEA NEGRA Y ECUACIÓN INDICAN EL AJUSTE LINEAL QUE PASA POR CERO. LA LÍNEA VERDE INDICA LA SUB O SOBRESTIMACIÓN DE LOS DATOS AL TENER UN	61
GRÁFICO 6-15: PORCENTAJE DE INCIDENCIA, PARA D_M ADCP EN ROJO(MEDICIONES) Y D_M MODELO EN AZUL.	62
GRÁFICO 6-16: SERIES DE TIEMPO DE LAS MEDICIONES (ADCP) VS LO MODELADO CON CASO BASE: A) ALTURA SIGNIFICATIVA ESPECTRAL (H_{M0}). B) PERIODO ENERGÉTICO (T_E). C) DIRECCIÓN MEDIA (D_M).	63

1. INTRODUCCIÓN

El marco dentro del cual se desarrolla esta memoria es en el proyecto Catastro del Recurso Energético, asociado a oleaje para el apoyo a la evaluación de proyectos de generación de energía undimotriz, en adelante “Proyecto Undimotriz”, permitiendo evaluar energías renovables no convencionales, que permitan a Chile diversificar y ampliar su matriz energética, dado que casi el 70% del consumo energético primario y secundario en el país se satisface con combustibles fósiles (Rodríguez, 2006). En este escenario se hace indispensable para el desarrollo sustentable del país, la implementación de nuevas fuentes energéticas, que permitan suplir una demanda creciente y minimizar la dependencia de suministros externos y finalmente fomentar la producción de energías limpias, reduciendo de esta forma las emisiones de gases invernadero. Uno de estos tipos de fuentes alternativas de energía es la asociada al oleaje incidente en el litoral de Chile, recurso cuya evaluación es el objetivo del Proyecto Undimotriz.

En general, la documentación respecto a la caracterización del clima de oleaje es escasa y poco cuantitativa. Fundamentalmente esto se debe a la carencia a nivel país de una adecuada red de Boyas que midan el oleaje. La empresa Baird, junto con el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), realizaron un proyecto para la evaluación del clima de oleaje en Chile. A partir de este proyecto nace ‘Olas del Pacífico’, que fue creada a partir de una modelación ‘hindcasting’ con el modelo ‘NOAA-Wavewatch III’, calibrado con mediciones de las boyas de aguas profundas que posee el SHOA y datos de alturas satelitales. ‘Olas del pacífico’ ha evolucionado desde el año 2003 en sus versiones anteriores I, II, III y IV, con estadística de oleaje y espectros a lo largo de Chile continental. No obstante, en la actualidad esta información es de un alto costo y no está disponible en forma pública, lo que contribuye a la asimetría existente. Esto último es preocupante, pues el modelado de la propagación de oleaje es frecuente y común en proyectos de ingeniería marítima. Estas propagaciones tienen como objeto obtener estadísticas de climas de oleaje a nivel costero en uno o varios puntos de interés para el desarrollo de un proyecto.

En el caso de proyectos portuarios, la altura del oleaje tiene incidencia directa en la evaluación de solicitaciones estructurales, transporte de sedimentos, cotas y otros aspectos del diseño de obras marítimas. Sin embargo uno de los aspectos más sensibles, que puede incluso condicionar la inversión, es la evaluación de la disponibilidad operacional asociada a las condiciones del oleaje, las que inciden en la factibilidad de las maniobras, la eficiencia en la transferencia de carga y los riesgos de daño en elementos de amarre y atraque. Este trabajo de título, se centra específicamente en la calibración del modelo de oleaje STWAVE y la cuantificación de la incertidumbre asociada para la obtención del clima de oleaje a nivel costero, utilizando como medio de aplicación un sector ubicado en la V Región de Chile.

La información batimétrica corresponde a una combinación de datos de cartas náuticas SHOA, levantamientos realizados específicamente para el proyecto y datos batimétricos globales (ETOPO, GEBCO). Estos datos fueron sometidos a un detallado análisis de calidad que permitió corregir y elegir los datos más adecuados para el modelado del oleaje.

El Proyecto Undimotriz permitió obtener mediciones de terreno de batimetría y de oleaje en aguas relativamente profundas con una boya Triaxys y en aguas intermedias con un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Con dicha información se calibró el modelo STWAVE. La efectividad del modelo se determinó comparando sus resultados con las mediciones del oleaje en aguas intermedias y más cercanas a la costa.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 GENERAL:

Estudiar el clima de oleaje en un sector de la región de Valparaíso utilizando el modelo de oleaje STWAVE.

1.1.2 ESPECÍFICOS:

- Evaluar diferencias entre el uso de batimetrías de cartas náuticas del Shoa, levantamiento batimétrico, GEBCO y ETOPO.
- Calibrar y verificar el modelo STWAVE, para la propagación de oleaje desde aguas profundas hacia la costa en un sector de ubicado en la Región de Valparaíso.
- Analizar la calidad de la información de oleaje propagado hacia la costa, cuantificando su incertidumbre.

1.2 ALCANCES

- La propagación, con STWAVE utiliza como condición de borde los espectros direccionales de la boya Triaxys.
- La validación de la propagación de los espectros direccionales de oleaje, se hará en base a mediciones in-situ de espectros direccionales, cerca de la costa.
- El estudio no considera corrientes.
- La batimetría utilizada es la facilitada por el Proyecto Undimotriz (Levantamiento batimétrico), las cartas náuticas del Shoa, GEBCO y ETOPO.
- El modelo utilizado para la transferencia espectral será STWAVE, facilitado por "Coastal and Hydraulics Laboratory", (USACE-WES) a PRDW, Aldunate Vázquez, quien modificó el código fuente creando una nueva compilación.
- La transferencia Pseudo espectral de oleaje, se ejecutará mediante el software Transpec 3, desarrollado y proporcionados por PRDW, Aldunate Vázquez.
- Para la Calibración del modelo STWAVE se emplearán 5 espectros direccionales a partir de algoritmos desarrollados por el Proyecto Undimotriz.

2. MARCO TEÓRICO

En este apartado se presentan algunos conceptos y definiciones referentes al oleaje que faciliten la comprensión de los capítulos posteriores.

2.1 EL OLAJE

Las olas que se originan en el océano y se producen por diversas causas, entre estas causas se pueden señalar: las fuerzas gravitacionales que ejercen los astros como la luna y el sol sobre las masas de agua oceánicas, el viento, las tormentas, los maremotos, desprendimiento de masas de tierra, etc. Sin embargo, el viento constituye el agente que genera las olas más comunes. Es por esto que se suele decir que la energía que poseen las olas de mar es un derivado de la energía solar, ya que el viento se origina como consecuencia del desigual calentamiento que el sol produce en la superficie terrestre, y el viento, al actuar sobre el agua del mar le transmite energía y la pone en movimiento, produciendo ondulaciones en las capas superficiales que constituyen el oleaje que se observa en todas las aguas de los océanos. Una vez creadas las olas, tensiones gravitacionales y superficiales son activadas permitiendo que éstas se propaguen. Deán y Dalrymple (1991).

A continuación se observa un gráfico donde aparecen representados los tipos de olas según la fuerza perturbadora, restauradora y su periodo incluyendo la curva de energía asociada en cada caso particular.

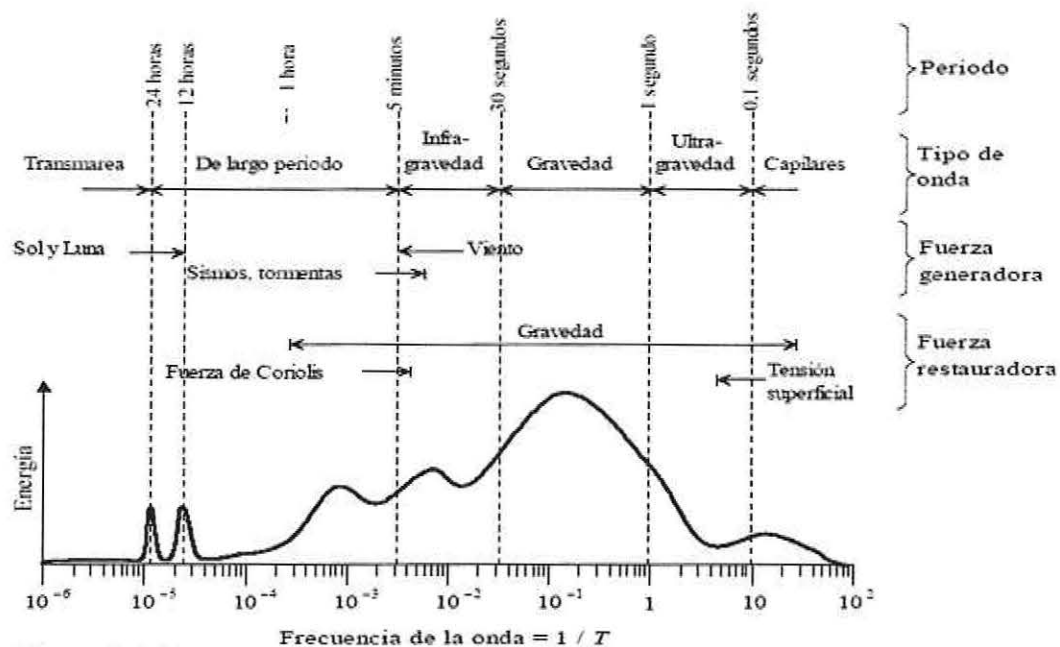


Figura 2-1: Representación esquemática de los tipos de olas que existen en la superficie del océano y de la energía en ellas contenida. Silva (2005)

La altura (H) se define como la distancia vertical entre la cresta y el valle o seno sucesivos de una ola determinada; por otra parte, la longitud de onda L es la distancia horizontal medida entre dos crestas o valles consecutivos. Otra característica importante de la ola está dada por su periodo (T), el cual se define como el tiempo que tarda en pasar dos crestas o dos valles consecutivamente por un punto fijo, y la celeridad (C) de la onda es la velocidad con la cual se desplaza la ola, tal como se define en la Figura 2-2.

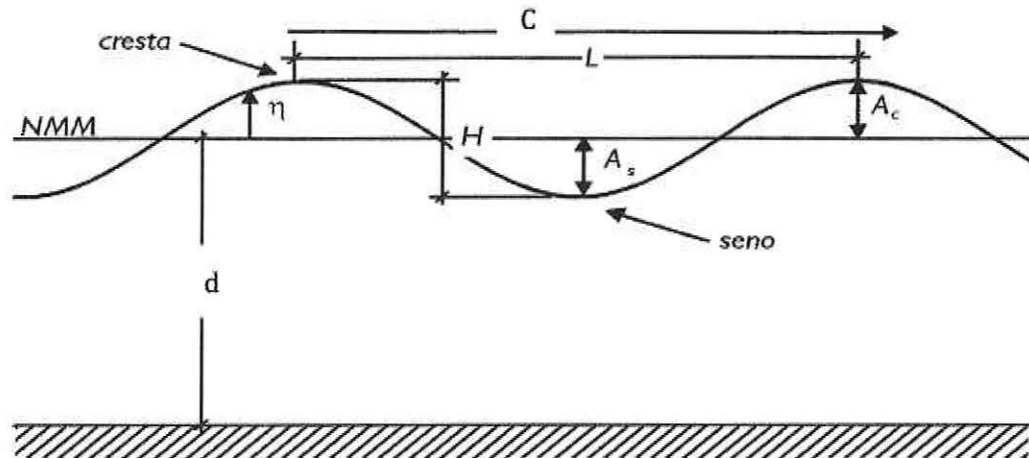


Figura 2-2 : Nomenclatura básica de una ola. Kamphuis (2000)

Donde:

- H: Altura de ola.
- η : Desplazamiento vertical de la superficie libre.
- L: Longitud de la ola.
- d: Profundidad.
- T: Periodo de la ola.
- A_c : Amplitud de la cresta de la ola, máximo desplazamiento vertical positivo respecto al nivel medio del mar (NNM).
- A_s : Amplitud del seno de la ola, máximo desplazamiento vertical negativo respecto al nivel medio del mar (NNM).

A partir del periodo (T) y la profundidad (d) según la Teoría Lineal del Oleaje (TLO) se obtiene la longitud de ola (L) y la celeridad es definida como el cociente entre la longitud y el periodo.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$C = L/T \quad \text{Ecuación 2}$$

2.1.1 REPRESENTACIÓN DE UN ESTADO DE MAR

Un estado de mar se define como aquella situación o periodo de tiempo en que debido a la inercia del fenómeno, se considera que existe un cierto equilibrio entre las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras que intervienen, lo cual produce que su manifestación permanezca aproximadamente en estado estacionario. Silva (2005).

En general, las formas adoptadas para la representación de un estado de mar son dos: en el dominio del tiempo (Figura 2-3) y en el dominio de la frecuencia y dirección (Figura 2-4). La primera considera las distribuciones estadísticas y los parámetros y distribuciones de las desnivelaciones instantáneas (η). La segunda forma, toma el estudio del espectro y sus propiedades en el dominio de la frecuencia, analizadas en el supuesto de que son variables aleatorias de un proceso estocástico y ergódico.

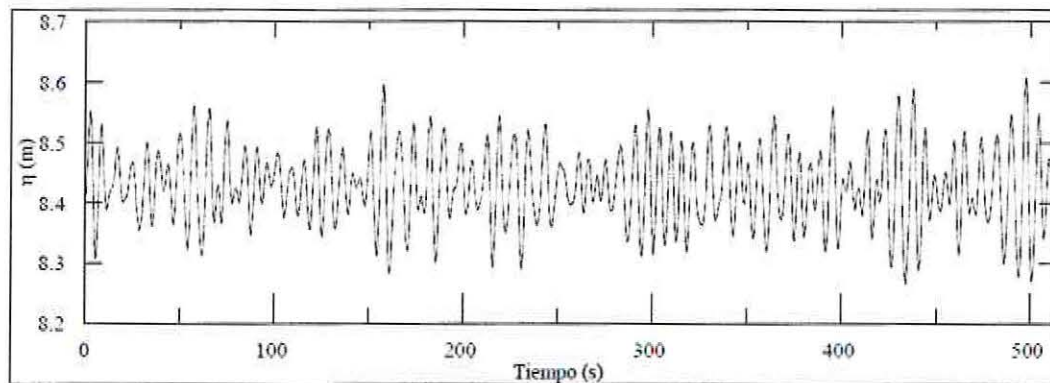


Figura 2-3: Serie de tiempo. Estado de mar. (Silva 2005).

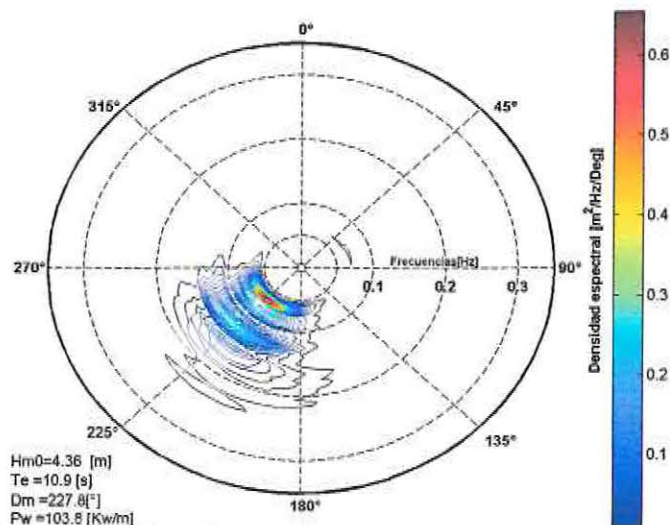


Figura 2-4: Ejemplo de un espectro bidimensional $S(f, \theta)$.

2.1.2 ESPECTRO SINTÉTICO DE OLEAJE

A través del análisis de una gran cantidad de espectros de oleaje se ha encontrado que éstos presentan características similares que pueden ser relacionadas mediante el empleo de parámetros físicos: velocidad, duración del viento y profundidad sobre la cual se propaga el oleaje.

Un espectro de oleaje puede ser generado sintéticamente por medio de los parámetros que caracterizan su desarrollo. Los espectros sintéticos están basados generalmente en uno o más parámetros. A continuación se describe el espectro sintético JONSWAP, que es el mayormente utilizado.

Hasselmann et al (1973) propusieron el espectro JONSWAP, el cual fue generado con datos medidos a finales de la década de los sesenta por un proyecto de medición de oleaje conocido como JONSWAP, por sus siglas en inglés (Joint North Sea Wave Project).

Este espectro fue generado para estados de mar formados por el viento, con fetch¹ limitado y para una profundidad de aguas profundas. La expresión que representa este espectro es:

$$E_{\text{JONSWAP}} = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \gamma \exp \left[\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right] \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde,

$$\alpha = 0.076 \left[\frac{g^2 F}{U_{10}^2} \right]^{-0.22} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$f_p = \left[\frac{g}{U_{10}} \right] \left[\frac{g^2 F}{U_{10}^2} \right]^{-0.33} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f < f_p \\ 0.09 & f \geq f_p \end{cases} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$1 \leq \gamma \leq 7 \quad \text{Ecuación 7}$$

g =aceleración de gravedad

F = Fetch

U_{10} =velocidad del viento a 10 m de altura.

¹Fetch: distancia sin obstrucciones sobre la cual el viento sopla a través de la superficie del agua

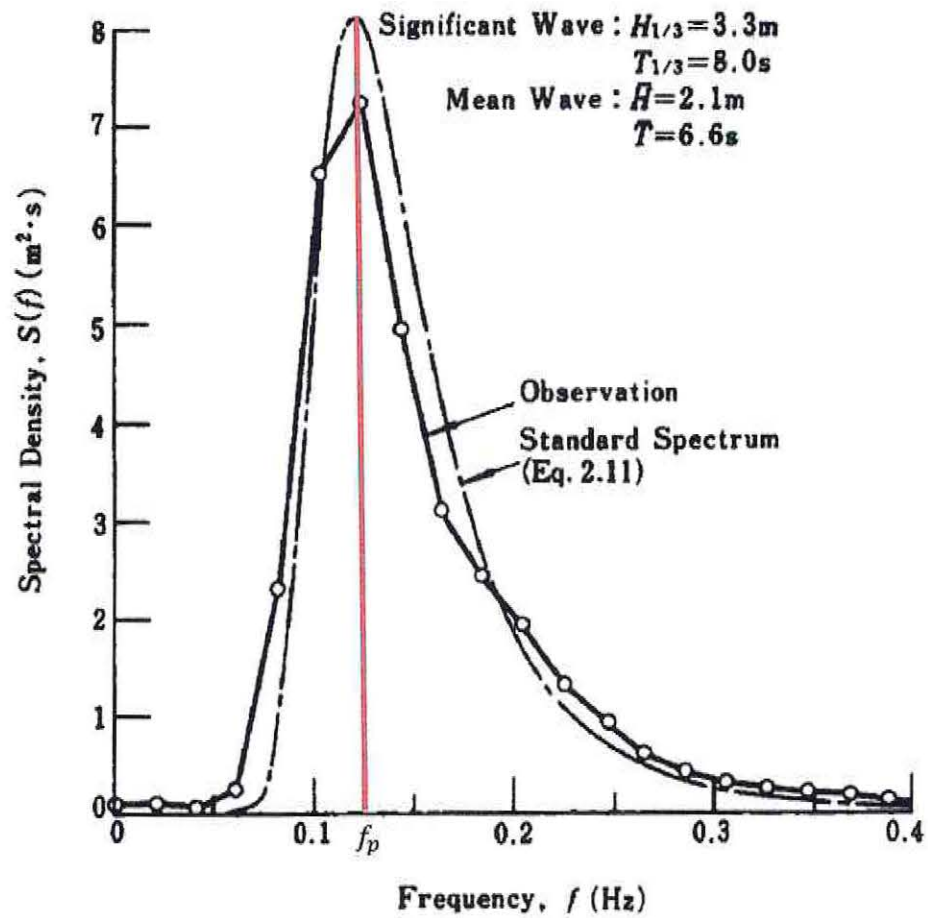


Figura 2-5: Ejemplo de un espectro JONSWAP con $\gamma=1$. Donde la línea continua es el espectro sintético, la línea discontinua con círculos blancos es el espectro medido y la línea roja muestra la frecuencia pico. Goda (2000).

2.1.3 PARÁMETROS ESPECTRALES DEL OLAJE

El espectro direccional del oleaje contiene gran cantidad de información que puede ser analizada mediante la introducción de una serie de parámetros que sirven para conocer las características principales de dicho espectro.

A continuación se detallan los parámetros utilizados en este trabajo.

La altura significativa espectral H_{m0} se obtiene en base a la integración del espectro direccional asumiendo que la función de densidad espectral se acerca a una distribución de tipo Rayleigh. Holthuijsen (2007).

$$H_{m0} = 4 * \sqrt{m_0} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde m_0 corresponde al momento de orden cero del espectro direccional $S(f, \theta)$. Se define el momento de orden n como:

$$m_n = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} f^n S(f, \theta) d\theta df \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde f es la frecuencia, θ es la dirección, n es el orden del momento calculado y $S(f, \theta)$ es la densidad espectral.

Como periodo característico del oleaje se consideró el periodo energético T_e , el cual, se define en la Ecuación 10, ya que, representa de mejor manera estados de mar donde existe aporte de energía proveniente de más de una frecuencia. Al contrario, el periodo peak T_p solo caracteriza de forma adecuada espectros unimodales, ya que, corresponde al inverso de la frecuencia que registra mayor aporte de energía.

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} = \frac{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} f^{-1} S(f, \theta) d\theta df}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} f^0 S(f, \theta) d\theta df} \quad \text{Ecuación 10}$$

La dirección media del oleaje D_m se define como:

$$D_m = \text{Atan} \left[\frac{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \text{sen}(\theta) S(f, \theta) df d\theta}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \text{cos}(\theta) S(f, \theta) df d\theta} \right] \quad \text{Ecuación 11}$$

2.1.1 PROCESOS FÍSICOS DE TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE

Durante la propagación del frente de ola desde aguas profundas hacia la costa, se producen una serie de cambios en la dirección, altura, periodo y longitud de onda de cada una de las olas, y por tanto del espectro bidimensional y sus parámetros H_{m0} , T_e y D_m . Estos cambios son debidos a diversos procesos físicos que influyen en el oleaje como la refracción, difracción y asomeramiento.

La refracción se produce por la influencia de los fondos en la propagación del frente del oleaje y provoca, siempre que la batimetría no sea perpendicular a la dirección del frente de olas, un cambio en la dirección y una variación en la altura de las olas. En todos los casos la refracción provoca que la dirección de propagación de las olas tienda a orientarse perpendicularmente a la batimetría.

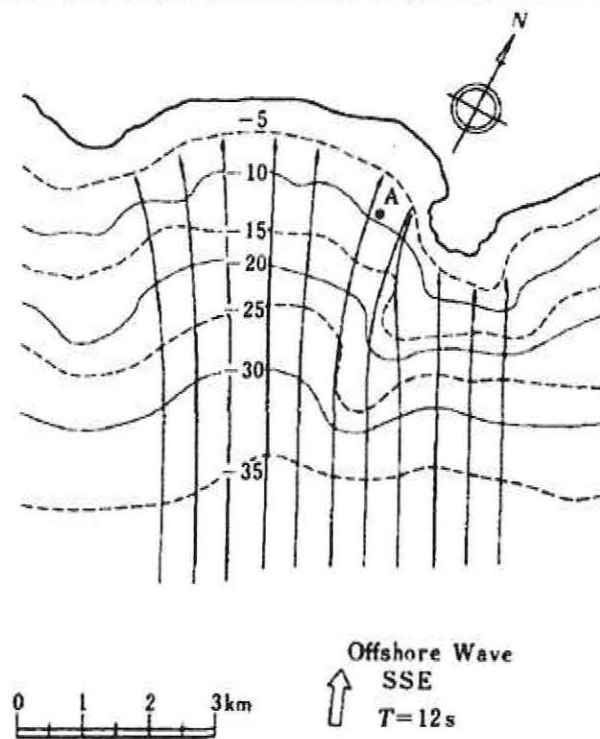


Figura 2-6: Ejemplo de refracción de una ola propagada hacia la costa en una batimetría irregular. Goda (2000).

El asomeramiento, también muy nombrado según su nombre anglosajón "shoaling", se produce al reducirse la profundidad y causa un aumento de la altura de ola y una disminución de la longitud de onda. La dirección de avance ni el periodo de la ola se ve afectada por este proceso físico.

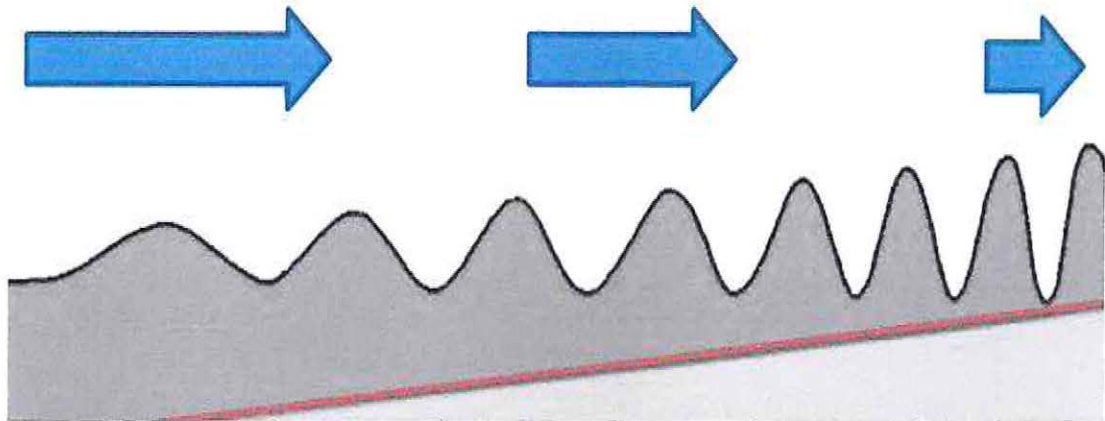


Figura 2-7: Ejemplo de asomeramiento de una ola propagándose hacia la costa. Las flechas representan la celeridad de grupo.

La difracción explica el modo en el que una ola se ve afectada por la interposición de un obstáculo aislado (por ejemplo: rocas, islas, rompeolas) en su avance hacia la costa. La presencia de este obstáculo provoca el cambio en la dirección de la ola.



Figura 2-8: ejemplo de oleaje difractado

2.2 PROPAGACIÓN DE ENERGÍA ESPECTRAL

Se realiza mediante la propagación del espectro direccional del oleaje, desde aguas profundas hacia aguas someras.

De acuerdo a lo propuesto por Holthuijzen (2007). Cada componente espectral de energía puede ser transferida caracterizando su variación direccional.

$$S(f, \theta_{on}) = (K_a(f, \theta))^2 * \frac{dS(\theta_{off})}{d\theta_{on}} S(f, \theta_{off}) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

k_a : Coeficiente de agitación (k_a) , asociado a un estado de mar. Este coeficiente se calcula multiplicando los efectos que sufre el oleaje como: asomeramiento, refracción, difracción, etc. durante su propagación.

θ_{on} : Dirección del estado de mar en aguas someras

θ_{off} : Dirección del estado de mar en aguas profundas

Para la obtención de k_a se usan modelos de oleaje de tipo regional. Estos modelos permiten resolver los efectos de refracción y asomeramiento, y en mayor o menor medida la difracción y la reflexión. Los modelos disponibles son muchos, tales como SWAN, MIKE SW, STWAVE, WAPO, OLUCA, XBEACH, ROMS, etc.

La propagación de energía espectral del oleaje desde aguas profundas hacia la costa, se traduce en el uso directo de los espectros direccionales de oleaje de aguas profundas como datos de entrada, adaptados al formato que cada software requiera. Esta metodología necesita del modelado de cada uno de las decenas de miles de estados de mar (cada uno representado por un espectro bidimensional) para obtener resultados a nivel local.

La ventaja de la propagación directa del espectro bidimensional (en adelante Full spec), permite tener en cuenta en la simulación procesos no lineales e interacción ola-ola, generación y disipación siempre y cuando el modelo usado aplique estos procesos. La desventaja es el tiempo y el gasto computacional requerido para modelar una estadística extensa.

2.3 MÉTODOS DE PROPAGACIÓN INDIRECTA DE ENERGÍA ESPECTRAL

Las metodologías indirectas consisten en utilizar modelos de propagación de oleaje para propagar desde aguas profundas espectros de altura de ola unitaria con diferentes periodos y direcciones, y luego, con los resultados, reconstruir los espectros completos en el sitio de interés asumiendo superposición lineal entre las ondas del estado de mar.

La necesidad de aplicar metodologías indirectas de propagación del oleaje, nace del gran tiempo que se debe invertir, para propagar al menos 20 años de estados de mar, del orden de meses considerando computadores de escritorio, Esto significa realizar aproximadamente 58400 simulaciones en el modelo de propagación espectral por cada localidad seleccionada, lo que tiene un costo computacional elevado considerando.

Supuestos principales en los que se basan las metodologías indirectas de propagación de oleaje:

- El oleaje de aguas profundas, como condición de borde, se puede considerar homogéneo en un dominio espacial suficientemente reducido.
- La interacción ola-ola se puede considerar despreciable entre aguas profundas y aguas someras cuando la distancia es suficientemente reducida.
- El aumento o inhibición de la energía del oleaje por efecto de la acción del viento local entre aguas profundas y someras es despreciable cuando la distancia es suficientemente reducida.
- El oleaje es una superposición lineal de ondas lineales, independientes, de distinto periodo que se propagan en distintas direcciones (que es lo que finalmente representa un espectro direccional) y que, por lo tanto, pueden ser propagadas hacia aguas someras de manera independiente y luego, sumadas para obtener el oleaje.

Otra forma de ver el punto anterior es que cada componente espectral o bin (Figura 2-9) de un espectro direccional de oleaje puede ser considerado como un espectro independiente, es decir, un espectro direccional que representa un estado de mar complejo, es la superposición lineal de pequeños espectros.

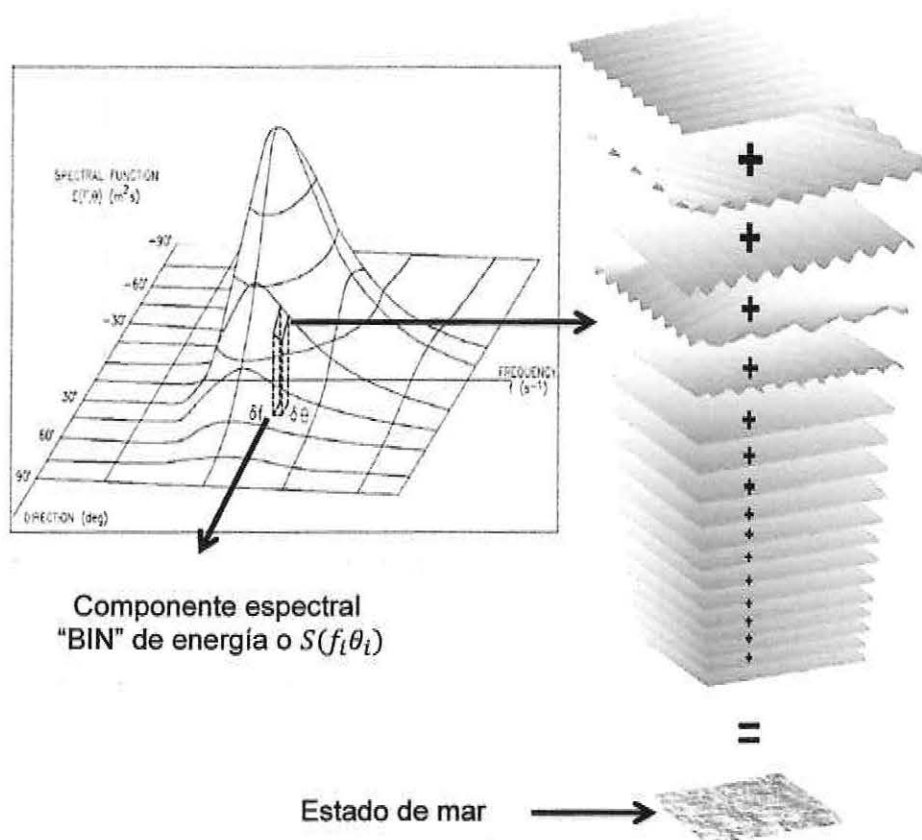


Figura 2-9: Representación espectral del oleaje

2.3.1 PROPAGACIÓN MEDIANTE RECONSTRUCCIÓN ESPECTRAL

El método de reconstrucción espectral detallado en la tesis de Domínguez (2011) consiste en propagar espectros sintéticos de oleaje de altura de ola unitaria con diferentes periodos y direcciones desde aguas profundas hacia la costa, y luego, con los resultados, reconstruir los espectros completos en el sitio de interés asumiendo superposición lineal, como se muestra en la Figura 2-10.

Para conseguir esto, primero se crean espectros de altura de ola unitaria U_i abarcando la mayor cantidad de casos posibles (combinaciones dirección-periodo) y se propagan de forma independiente en el modelo. Luego, se busca a través de un sistema de ecuaciones la solución por mínimos cuadrados, los coeficientes α_i que permiten reconstruir los espectros de aguas profundas R como combinación lineal de los espectros unitarios propagados U'_i . Finalmente, usando los coeficientes α_i encontrados, se combinan linealmente los espectros unitarios propagados U'_i para construir los espectros en el sitio de interés R' .

La aplicación de este método permite reconstruir un número indefinido de espectros, limitando la propagación en el modelo a unos pocos casos, lo que reduce considerablemente el costo computacional.

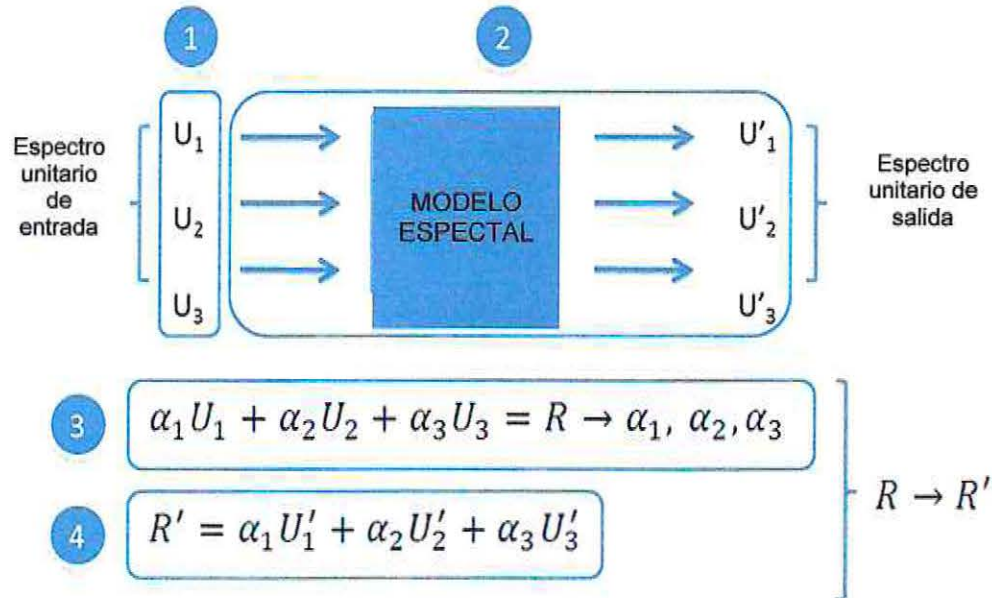


Figura 2-10: Resumen del método de reconstrucción espectral. Los pasos 1 y 2 se realizan solo una vez por sitio mientras que los pasos 3 y 4 se repiten para cada espectro de entrada. Domínguez (2011).

2.3.2 PROPAGACIÓN MEDIANTE PSEUDO ESPECTRAL

La base de la metodología es similar a la descrita en la de Reconstrucción espectral, siendo de hecho una metodología de propagación del oleaje local a partir de la superposición de resultados de la propagación independiente de frentes individuales

La metodología Pseudo espectral se basa en que cada estado de mar se subdivide en frentes independientes definidos por cada componente espectral ($S(f, \theta)$), cada uno con marcas de clase de frecuencia y dirección que definen el periodo pico y dirección media de un espectro sintético (ej.: JONSWAP), de altura unitaria, cuya esbeltez en el dominio de la frecuencia y dispersión angular en el dominio de la dirección, estén de acuerdo con el periodo o frecuencia característica.

La densidad espectral de los espectros sintéticos es ajustada para que la altura significativa espectral sea unitaria, es decir, $H_{m0} = 1.0$ m. Esta condición de oleaje de baja altura, y por lo tanto lineal en aguas profundas, permite que conserve su linealidad al ser propagado a aguas someras.

El número de espectros unitarios a modelar es dependiente del rango de frecuencias que presenten los espectros reales de aguas profundas (medidos o de modelos globales), los que comúnmente se discretizan en un número de 30 a 130 frecuencias. Sin embargo, esta metodología no requiere modelar casos de alturas unitarias con periodos asociados a cada una de las frecuencias del espectro, dado que en una gran cantidad de escenarios se ha demostrado que los resultados son interpolables en el dominio de la frecuencia. En la Figura 2-11 se presenta un ejemplo en el que las líneas verticales representan cada una de las 38 frecuencias de un espectro medido en aguas profundas, las que se superponen a curvas de atenuación de la altura del oleaje en función del periodo, dichas curvas presentan una discretización de 2s, para el rango de $T_p=4$ a 24s, correspondiente a 11 casos.

La misma situación se presenta en el dominio de la dirección (Figura 2-12), donde los espectros medidos pueden presentar una discretización de densidad espectral cada 2° o 3° , y en caso de los espectros de modelos cada 10° o 15° . En cambio, los resultados, dependiendo del escenario, pueden ser interpolados, por ejemplo, entre direcciones discretizadas cada 15° .

Las Figura 2-11 y Figura 2-12 son una simplificación grafica de las matrices de transformación unitaria, para fines gráficos, de los resultados de 143 casos modelados, donde cada punto representa un espectro de oleaje en el punto requerido en aguas someras. En esta metodología, dichos espectros de salida o locales son utilizados posteriormente como matrices de transformación del oleaje para la propagación de los espectros reales de oleaje de aguas profundas.

Las matrices de transformación del oleaje de altura unitaria permiten evaluar este proceso desde aguas profundas a algún punto en aguas intermedias sin necesidad de realizar simulaciones numéricas para cada estado de mar. El supuesto fundamental para la aplicación de éstas es que la energía del oleaje no se transfiere entre ondas de distintas frecuencia, es decir es un fenómeno fundamentalmente lineal en el dominio de las frecuencias.

En conclusión, las matrices de transformación del oleaje de altura unitaria se elaboran a partir de simulaciones de estados de mar monocromáticos de ancho de banda angosto en frecuencia y de energía unitaria. De esta manera, asumiendo que la transformación del oleaje es un proceso lineal que permite la superposición, se pueden elaborar matrices que transforman cada punto correspondiente a una frecuencia y dirección del espectro de aguas profundas en un punto de la misma frecuencia pero con energía y dirección modificada del espectro en un sector deseado.

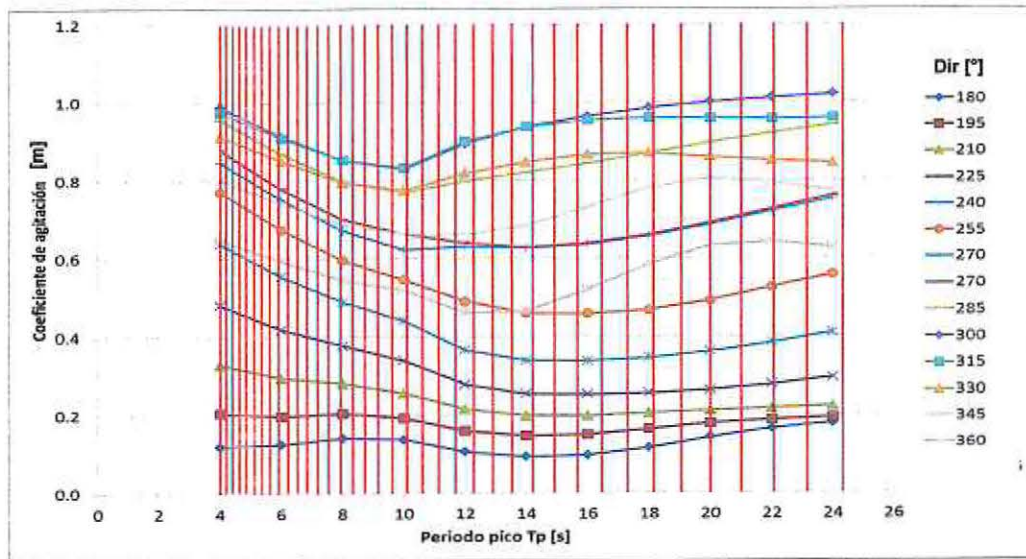


Figura 2-11: Coeficientes de agitación (K_a) en el dominio del periodo para diferentes direcciones. Las líneas verticales rojas representan el inverso de cada una de las 38 frecuencias (periodos) de un espectro medido en aguas profundas

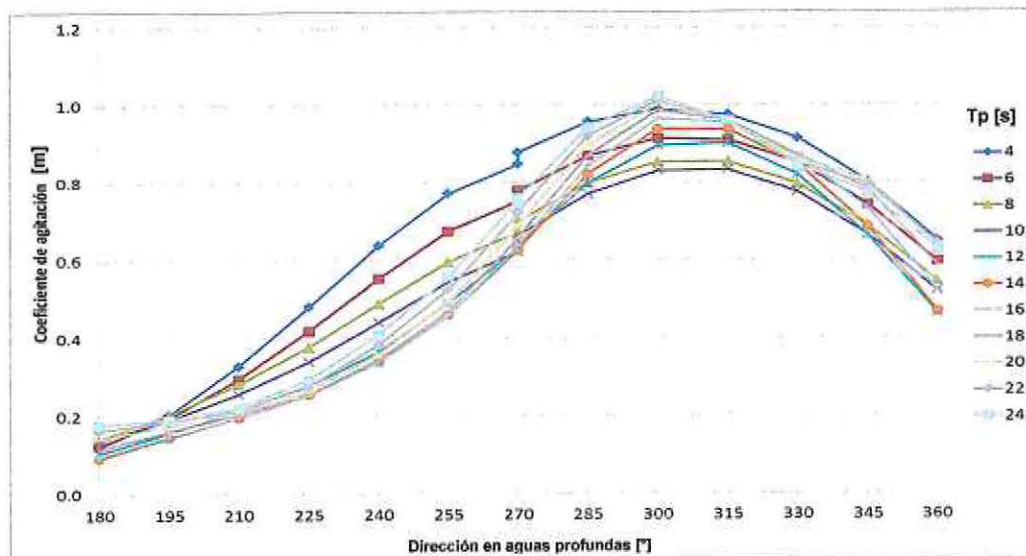


Figura 2-12: Coeficientes de agitación (K_a) en el dominio de la dirección, para diferentes periodos

Cabe mencionar, que en el presente estudio, se utilizaron las técnicas de propagación Full spec y Pseudo espectral.

La metodología de propagación Pseudo espectral del oleaje fue desarrollada por PRDW en 2003 y ha sido utilizada satisfactoriamente hasta la fecha.

2.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO STWAVE

2.4.1 GENERALIDADES

El modelo STWAVE (Steady-state spectral WAVE model) es un modelo del tipo parabólico, de diferencias finitas, espectral, promediado en la fase. Es un modelo de propagación espectral de ondas gravitacionales generadas por viento.

El modelo fue desarrollado por el "Coastal and Hydraulics Laboratory, U.S. Army Engineer Research and Development Center" del U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station (USACE-WES).

El propósito de la aplicación de STWAVE es cuantificar el cambio de los parámetros del oleaje (altura, periodo, dirección, forma espectral) entre aguas profundas, donde el campo de oleaje es bastante homogéneo en la escala de kilómetros, y aguas someras, donde el oleaje es fuertemente influenciado por variaciones en la batimetría, nivel del mar y la corriente. Los parámetros de oleaje pueden variar de manera significativa en zonas de aguas someras, en la escala de decenas o cientos de metros.

Las actuales tecnologías de medición de oleaje no pueden proveer de datos de oleaje a nivel de campos de alta resolución, sino sólo en puntos específicos. STWAVE simula el asomeramiento y la refracción del oleaje inducido por la batimetría y la corriente, el crecimiento inducido por el viento, la interacción ola a ola y whitecapping que redistribuyen y disipan la energía en un campo de oleaje.

Las ecuaciones gobernantes en STWAVE son resueltas de manera numérica, en una malla rectangular cartesiana utilizando metodologías de diferencias finitas. STWAVE opera en un sistema de coordenadas local, con el eje X orientado en dirección normal a la línea de costa y el eje Y, orientado a lo largo de ésta.

2.4.2 SUPOSICIONES SOBRE LAS CUALES SE BASA EL MODELO

a) PENDIENTE SUAVE Y REFLEXIÓN DESPRECIABLE

La versión de STWAVE utilizada es un modelo de medio plano 'half-plane', es decir, que la propagación de la energía se realiza sólo en el sentido de aguas afuera (aguas profundas) hacia la costa, barriendo un ángulo de $\pm 87.5^\circ$ desde el eje normal a la costa. El oleaje reflejado en la línea de costa o en singularidades de alta pendiente del fondo marino, viaja en sentido contrario, por lo tanto, no es considerado. También se despreja el oleaje reflejado en estructuras.

b) CONDICIONES ESPACIALMENTE HOMOGÉNEAS DEL OLAJE DE AGUAS PROFUNDAS

La variación espacial del espectro de oleaje a lo largo del borde de aguas profundas del dominio modelado, es pocas veces conocido, y se espera que dicha variación no sea significativa para dominios del orden de decenas o unos pocos cientos de kilómetros. El espectro de entrada de STWAVE puede ser constante a lo largo del borde del dominio, existiendo también la posibilidad de ingresar espectros distintos, utilizando distintas técnicas de interpolación entre ellos.

c) OLAJE, CORRIENTE Y VIENTO ESTACIONARIO

STWAVE está formulado como un modelo estacionario, lo que reduce los tiempos de cálculo y es apropiado para condiciones de oleaje que varían más lentamente que el tiempo que físicamente le toma al oleaje transitar por el dominio de simulación o grilla computacional. Para la generación de oleaje, el supuesto de estado estacionario significa que el viento permanece constante el tiempo suficiente para lograr condiciones de oleaje limitados por 'fetch', o plenamente desarrollados, es decir, el desarrollo del oleaje no está limitado por la duración del viento. El viento puede ser de magnitud y dirección constante o variable en el dominio del modelo.

d) REFRACCIÓN Y ASOMERAMIENTO LINEAL

STWAVE sólo incorpora refracción y asomeramiento sobre la base de oleaje lineal, es decir, que no representa asimetría en el oleaje. La precisión del modelo puede verse reducida para condiciones de oleaje de gran altura en aguas muy poco profundas.

e) DIFRACCIÓN

Se incluye en STWAVE, aunque de una manera simplificada, mediante el suavizado de la energía. Las ecuaciones suavizan los fuertes gradientes de oleaje que ocurren en zonas abrigadas. La formulación es altamente dependiente de la resolución de la grilla del dominio, lo que debilita la metodología.

f) CORRIENTE CONSTANTE EN LA COLUMNA

En el modelo, la interacción oleaje-corriente está fundamentada en el supuesto de que la velocidad de la corriente es constante en toda la columna de agua. De presentarse fuertes gradientes verticales en la corriente, la modificación del peralte y refracción del oleaje –por efecto de la corriente– no es representada en el modelo. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones, sobretudo en grandes extensiones, no hay disponibilidad de campos de corriente con caracterización 3D.

g) FRICCIÓN DE FONDO

La significancia de la fricción de fondo en la disipación del oleaje ha sido un tema de debate en la literatura relacionada con el modelado del oleaje. La fricción de fondo ha sido comúnmente utilizada como un factor de calibración para llevar los resultados de los modelos a alinearse con las mediciones de campo. Aunque la fricción de fondo está incorporada en STWAVE, es difícil determinar los coeficientes de fricción apropiados. Además, las distancias de propagación en aguas someras, donde la fricción de fondo podría inducir cambios en el oleaje, son relativamente cortas (cientos de kilómetros), de manera que la disipación acumulativa por este efecto es pequeña para valores de coeficientes de fricción dentro de los valores reales.

2.4.3 DATOS DE ENTRADA DEL MODELO

a) PARÁMETROS DEL MODELO

Los parámetros le indican al modelo qué opciones deben ser aplicadas a la simulación y las salidas del modelo. Los parámetros de entrada incluyen consideración de campos de viento y corriente, campos de rompiente, tensores de radiación, anidamiento de mallas, interpolación de espectros en el borde del dominio, set-up, fricción de fondo, y puntos especiales de salida (nodos), en los que no sólo se reportan los parámetros del oleaje resultante, como en el resto del dominio, sino que además incluye información espectral del oleaje.

b) BATIMETRÍA

Describe las dimensiones y espaciamiento de las mallas, así como la profundidad de cada celda del dominio. Se define en coordenadas planas y las celdas de agua se denotan con profundidad positiva. Los bordes pueden ser definidos como tierra (por ejemplo en bahías) o agua (en costas abiertas). Los bordes de agua, a diferencia de los de tierra, permiten la propagación del oleaje hacia dentro o fuera del dominio. El borde de aguas profundas puede ser parcial o completamente cerrado para casos de generación local –bahías o lagos–.

c) ESPECTRO DE OLAJE INCIDENTE, VIENTO Y NIVEL DEL MAR

El oleaje se especifica mediante espectros resultantes de otros modelos WAM, Wavewatch, etc. mediciones de campo (boyas), o bien, mediante espectros sintéticos generados a partir de parámetros estadísticos de oleaje. Se debe especificar el número de frecuencias y direcciones, así como la densidad de energía espectral. Cada espectro puede incluir parámetros adicionales de viento y nivel del mar (set-up).

d) CAMPOS DE CORRIENTE Y VIENTO

Si se selecciona la opción de incluir el efecto de la corriente, ésta puede ser definida mediante un campo constante o variable sobre el dominio.

2.4.4 DATOS DE SALIDA DEL MODELO

a) CAMPOS DE ALTURA, PERIODO Y DIRECCIÓN

Para cada espectro de entrada, el modelo proporciona el campo de altura H_{m0} , periodo pico y dirección media sobre todo el dominio.

b) ESPECTROS EN NODOS SELECCIONADOS

Para las celdas indicadas en los parámetros de simulación del modelo, éste proporciona los espectros direccionales de oleaje (dominios de frecuencia y dirección), los que pueden ser utilizados para la validación del modelo con mediciones locales, o bien, para alimentar otros modelos.

c) CAMPOS DE GRADIENTES DE TENSORES DE RADIACIÓN

Al seleccionar la correspondiente opción, el modelo proporciona las componentes X e Y de los gradientes, para todas las celdas del dominio. Estos tensores pueden ser utilizados como dato de entrada en modelos de circulación para el cálculo de corrientes litorales y set-up.

d) CAMPOS DE ÍNDICES DE ROMPIMIENTO

Para aplicaciones de transporte de sedimentos, navegación y diseño estructural, es útil conocer la ubicación de la rompiente. El índice de rompiente marca con 1 o 0 las celdas en las que ocurre rotura o no.

2.4.5 LIMITACIONES DE STWAVE

STWAVE es un modelo 'half-plane' (propaga la mitad del espectro). Además, respecto de la dirección, los extremos de dicha mitad del espectro pueden ser mal representados dependiendo de la frecuencia. La figura siguiente muestra de mejor manera la limitación del tipo half-plane.

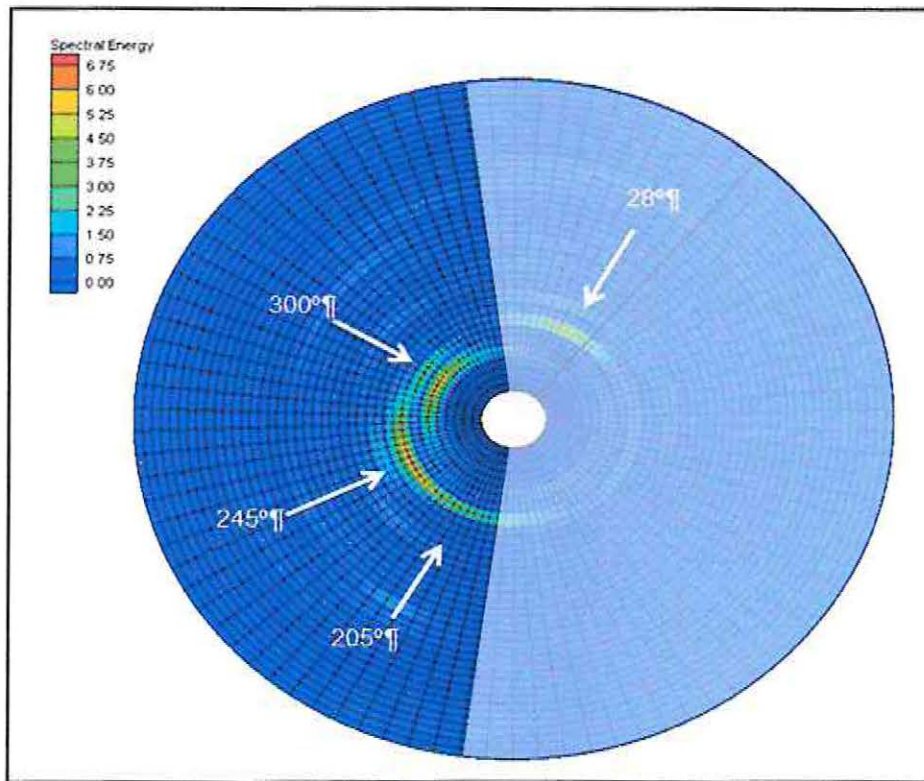


Figura 2-13: Limitación del rango de entrada de direcciones en el modelo STWAVE de un espectro, 'half-plane'. El sector sombreado representa la parte del espectro que no propagada.

Otra de las limitaciones de STWAVE es que debe trabajar con mallas orientadas en la dirección principal del oleaje. Esto produce errores cuando se modelan estados de mar con componentes multidireccionales.

2.5 DATOS DISPONIBLES DE OLAJE

Los datos disponibles para el estudio corresponden a mediciones in situ obtenidos en la Región de Valparaíso para el Proyecto Undimotriz.

La base de datos corresponde a una serie de tiempo de oleaje espectral de 4.032 estados de mar medidos ocurridos entre Mayo y Octubre del 2012 con datos de oleaje tomados cada una hora.

Los datos de oleaje se midieron en aguas relativamente profundas (150m) y en aguas intermedias a someras (20m). El oleaje de aguas profundas se midió utilizando una boya direccional Triaxys y los datos de aguas intermedias, también direccionales, con un ADCP Workhorse RDI-Teledyne.

La Figura 2-14 muestra solo una referencia espacial de la ubicación de las mediciones. Las coordenadas específicas quedan sujetas a la cláusula de confidencialidad del proyecto.

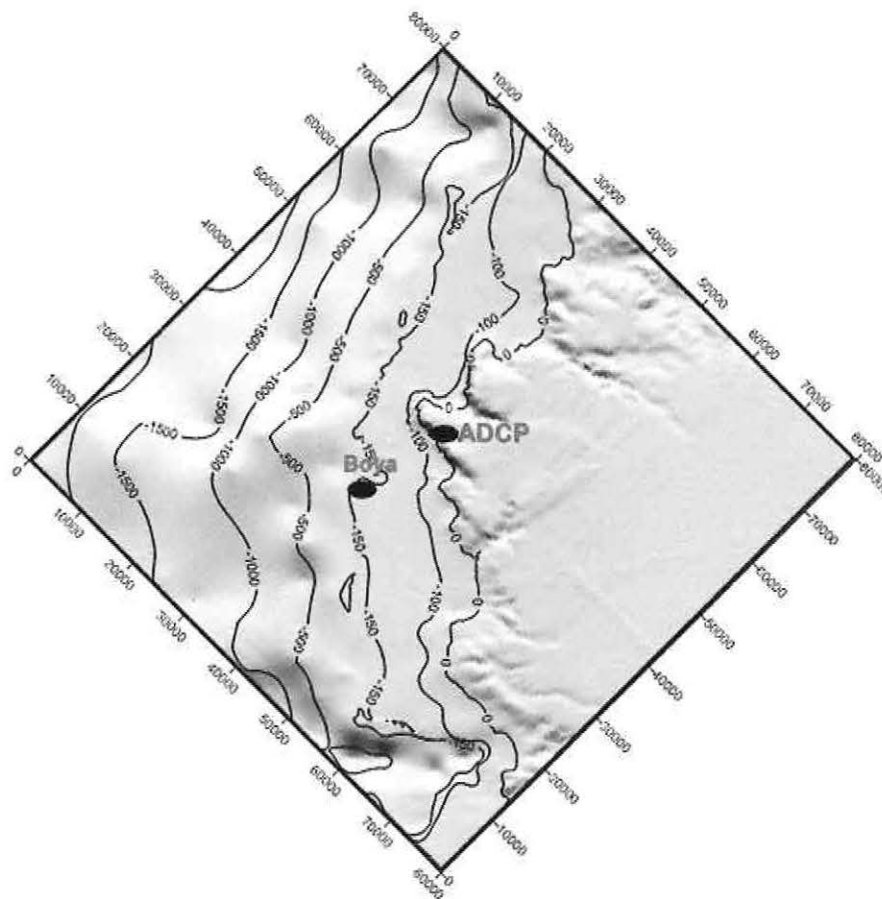


Figura 2-14: Ubicación referencial de las mediciones con Boya y ADCP. La estimación del error en las mediciones de oleaje, tanto de la boya como del ADCP es imposible de cuantificar. En este trabajo se calculan los errores asumiendo que la medición del ADCP y las Boyas es confiable.

2.5.1 DATOS DE AGUAS SOMERAS A INTERMEDIAS

Los datos en aguas someras son obtenidos mediante un ADCP, siglas de su nombre en inglés (Acoustic Doppler Current Profiler), fabricados por Teledyne RD Instruments. Éste instrumento es fondeado y mediante un sensor acústico permite obtener la variación de la superficie libre del oleaje, dirección del oleaje y corriente para un lapso de tiempo de 20 minutos a intervalos de 1 hora, con una frecuencia de 0.5 segundos. El ADCP entrega los datos recién mencionados en un archivo binario, el cual, mediante un post-procesamiento por medio del programa WAVES MON entregado por el fabricante se obtienen las series de tiempo de (H_{m0} , T_e y D_m) y los espectros direccionales ($S(f, \theta)$).

2.5.2 DATOS DE AGUAS PROFUNDAS

Los datos de aguas profundas fueron obtenidos utilizando boyas direccionales TRIAXYS, fabricadas por la empresa Canadiense Axys Technologies Inc. Estos instrumentos son instalados en la superficie del océano y anclados al fondo de este, permitiendo medir direcciones de oleaje mediante tres acelerómetros direccionales. Estos registran mediciones para un lapso de 35 minutos de duración a intervalos de 1 hora entre ellos, con una frecuencia de muestreo de 0.5 segundos. No es necesario un post-procesamiento de los datos, ya que, el instrumento entrega directamente series de tiempo de parámetros de resumen y espectros direccionales.

3. METODOLOGÍA DE LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO STWAVE

El método propuesto para la correcta ejecución del Proyecto Undimotriz, consistió en realizar un análisis exhaustivo de distintas fuentes batimétricas, luego se realizó la calibración del modelo y finalmente se realiza la validación del modelo.

3.1 ANÁLISIS DE BATIMETRÍA

La batimetría es la medición de las profundidades marinas para determinar la topografía del fondo del mar, siendo esencial tanto para la navegación, como para el modelado de la dinámica costera. Particularmente, la batimetría modifica la dirección y altura del oleaje a través del asomeramiento y la refracción. Por lo que es de gran importancia realizar un análisis batimétrico para el presente estudio.

El objetivo del análisis batimétrico es evaluar diferencias entre el uso de batimetrías de cartas náuticas del Shoa, levantamiento batimétrico realizado para el Proyecto Undimotriz, GEBCO y ETOPO.

3.1.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE

La información batimétrica corresponde a datos de cartas náuticas (SHOA), levantamientos realizados específicamente para el Proyecto Undimotriz y datos batimétricos globales (ETOPO, GEBCO) (Todos con sistema de referencia WGS84). A continuación se describen cada una de las fuentes batimétricas.

- a) **LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO:** Mediciones de batimetría de alta resolución, realizadas en el marco del Proyecto Undimotriz. Las mediciones abarcan hasta el veril de los 100m de profundidad.
- b) **CARTAS NÁUTICAS DEL SHOA:** Entregan información necesaria para una navegación segura, ya sea; los detalles de las costas, profundidades medidas y veriles, algunas características de los fondos del mar y las rutas de navegación establecidas, entre otros elementos. Para la utilización de esta data se digitalizaron facsímiles de las cartas náuticas del ATLAS HIDROGRÁFICO DE CHILE (2002), así como también se utilizó cartografía digital SHOA.
- c) **BATIMETRÍA ETOPO:** Creado por el Centro Nacional de Datos Geofísicos de la NOAA (NGDC) (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>), a partir de bases de datos digitales del fondo marino y elevaciones de tierra. La resolución de la cuadrícula de datos es de 1 minuto de arco (~1.8Km).

- d) BATIMETRÍA GEBCO: Es una base de datos de batimetría global desarrollado por el IHO (International Hydrographic Organization) (<http://www.GEBCO.net>). GEBCO que en sus siglas en inglés significa 'Carta Batimétrica General de Océanos', la resolución espacial es de 30 segundos de arco (~1km). La información batimétrica proviene de la combinación de sondeos de calidad controlada de buques y datos inferidos de mediciones de gravedad de satélites.

3.1.2 ÁREA APLICACIÓN

La siguiente figura ilustra las áreas de aplicación del estudio batimétrico.

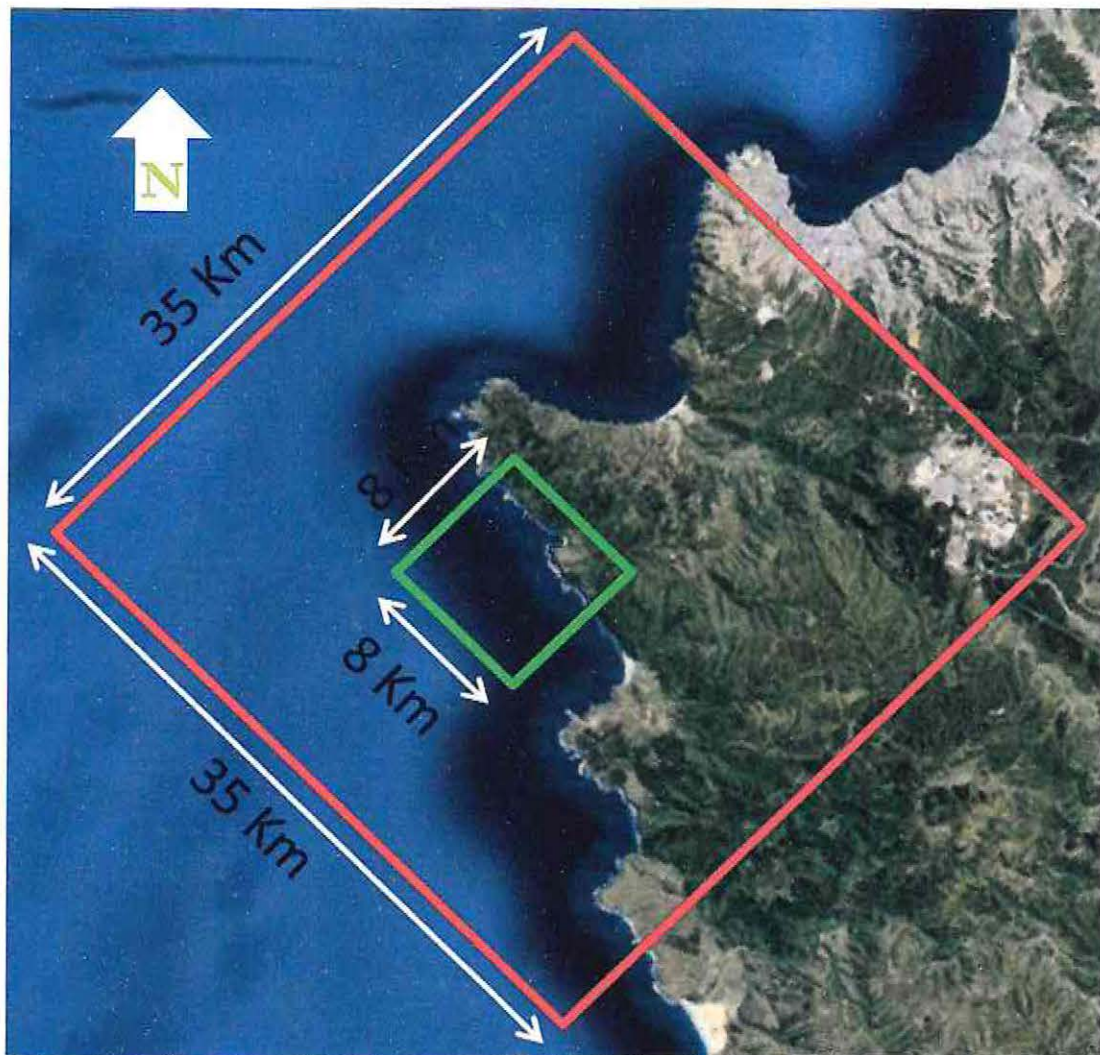


Figura 3-1: Área de aplicación del estudio batimétrico. En el cuadrado verde se compara el levantamiento batimétrico con las cartas náuticas y en el cuadrado rojo se comparan las cartas náuticas con GEBCO y ETOPO.

3.1.3 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE LA BATIMETRÍA

Para evaluar las diferencias de las cartas náuticas del SHOA con las batimetrías GEBCO y ETOPO se confeccionaron tres mallas independientes (ver Tabla 3-2), utilizando las mismas características en resolución (100m) y método de interpolación (Kriging). Adicionalmente se generaron dos mallas (ver Tabla 3-1) a menor escala para comparar el levantamiento batimétrico con las cartas náuticas.

Para la comparación de las fuentes batimétricas se usa un sistema de coordenadas locales (x,y).

Las características de las mallas se indican en la Tabla 3-1 y la Tabla 3-2.

Tabla 3-1: Características de las mallas utilizadas en la evaluación de las diferencias de las cartas náuticas del SHOA con el levantamiento batimétrico.

Parámetros Mallas	Cartas Náuticas Malla (1)	Levantamiento batimétrico Malla (2)
Tipo	Cuadrada	Cuadrada
Resolución espacial	25 m	25 m
Tamaño	8000 x 8000 m	8000 x 8000 m
Método de interpolación	Kriging	Kriging
Profundidad máxima	100 m	100 m
Superficie	8 Km ²	64 Km ²

Tabla 3-2: Características de las mallas utilizadas en la evaluación de las diferencias de las cartas náutica del SHOA con GEBCO y ETOPO.

Parámetros mallas	Cartas náuticas Malla (3)	GEBCO Malla (4)	ETOPO Malla (4)
Tipo	Cuadrada	Cuadrada	Cuadrada
Resolución espacial	100 m	100 m	100 m
Tamaño	35000 x 35000 m	35000 x 35000 m	35000 x 35000 m
Método de interpolación	Kriging	Kriging	Kriging
Profundidad máxima	700 m	700 m	700 m
Superficie	35 Km ²	35 Km ²	1225 Km ²

Desde la Figura 3-2 a la Figura 3-5 se presentan los vectores de profundidad de las bases de datos de las cartas náuticas, levantamiento batimétrico, ETOPO y GEBCO.

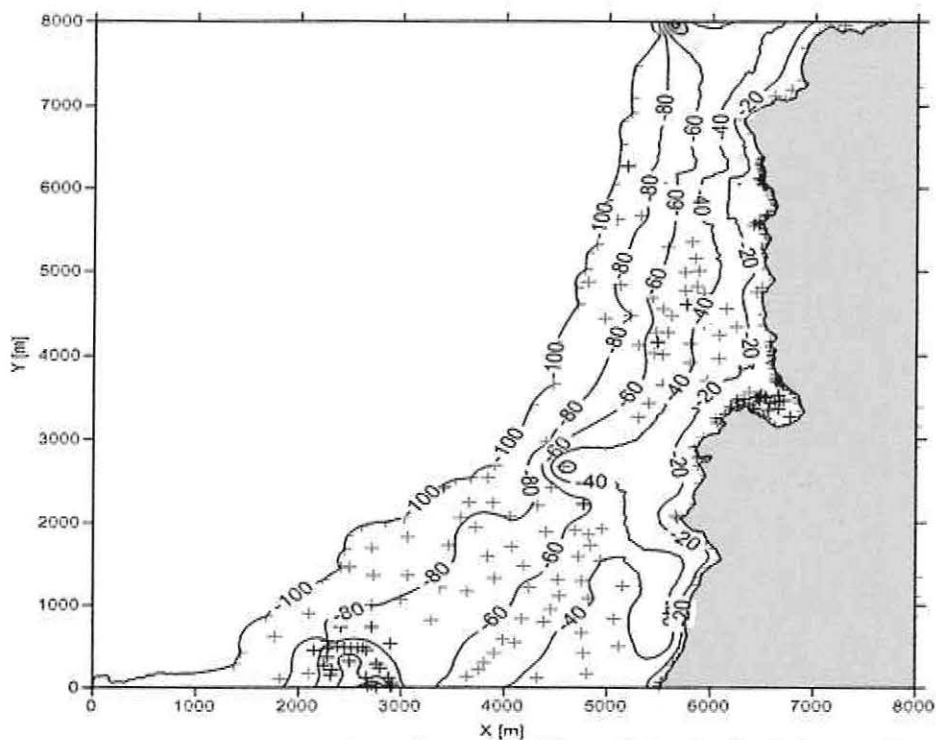


Figura 3-2: Malla (1). Mapas de veriles cada 20 m. Datos batimétricos utilizados de las Cartas Náuticas, específicamente la N°5112. Las x representan los vectores de profundidad.

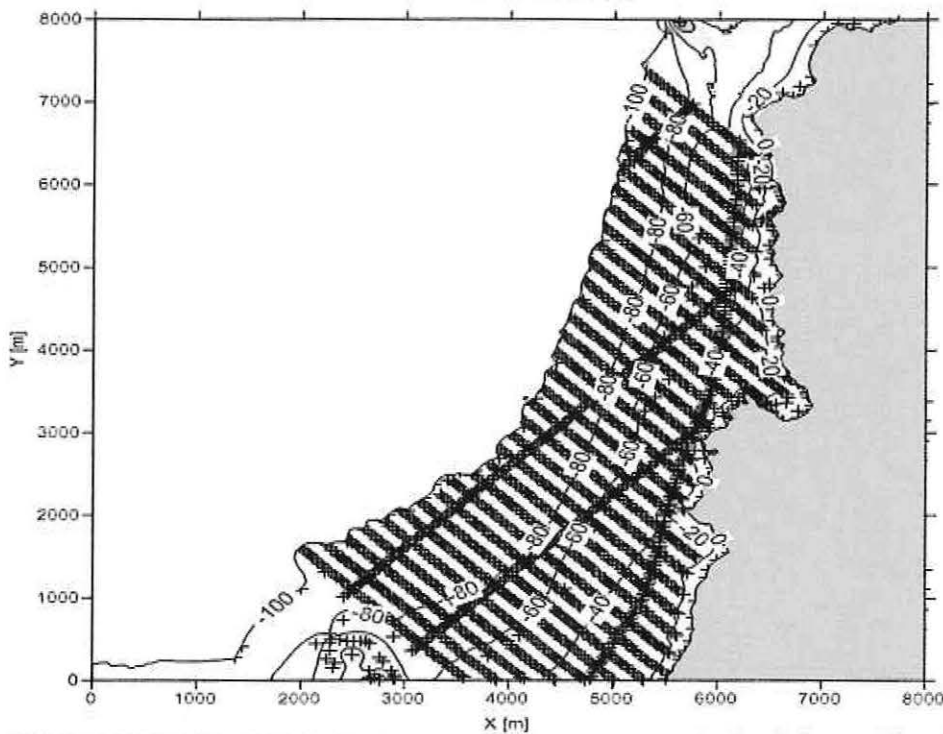


Figura 3-3: Malla (2). Mapas de veriles cada 20 m. Datos batimétricos utilizados del levantamiento batimétrico. Las x representan los vectores de profundidad.

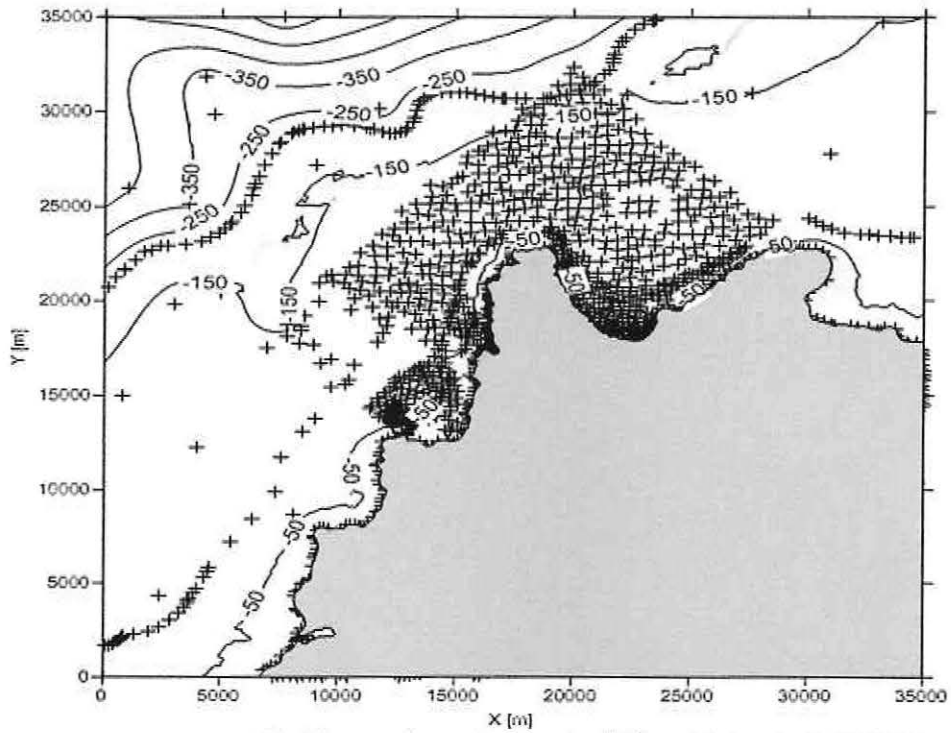


Figura 3-4: Malla (3). Mapas de veriles cada 100 m. Datos batimétricos utilizados de las Cartas náuticas SHOA N° 4000, 5100 y 5112. Las x representan los vectores de profundidad.

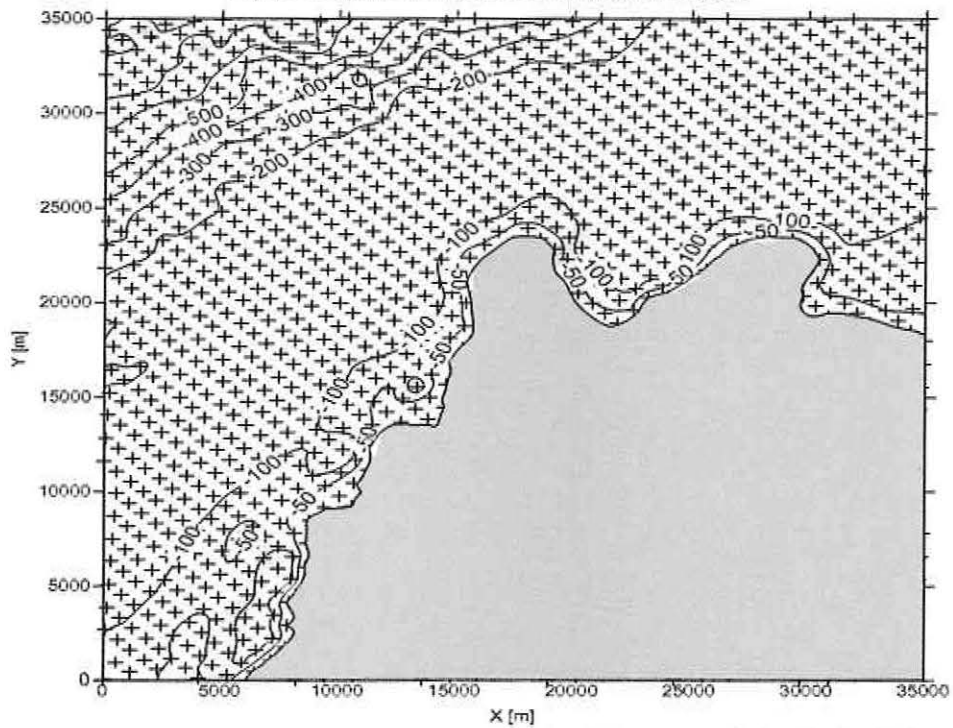


Figura 3-5: Malla (4). Mapas de veriles cada 100 m, con datos batimétricos utilizados de GEBCO. Las x representan los vectores de profundidad.

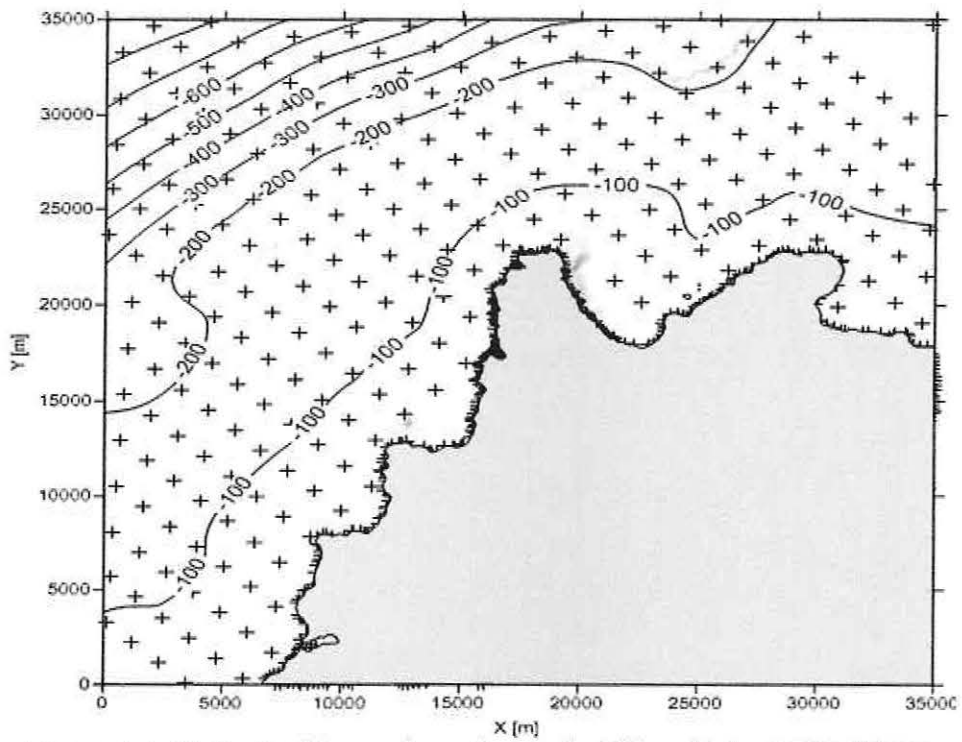


Figura 3-6: Malla (5). Mapas de veriles cada 100 m. Datos batimétricos utilizados de ETOPO. Las x representan los vectores de profundidad.

3.2 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE STWAVE

Para la calibración el equipo del proyecto escogió casos de estados de mar representativos de condiciones distintas de oleaje, medidos por la boya para ser propagados y comparados. El método escogido para la selección de los climas de oleaje corresponde al Maximun Dissimilitary Algorithm "MDA". También se compararon los resultados con cambios de fuentes de batimetría y de propagación espectral (Full spec y Pseudo espectral). Esta comparación nos indica cuál es el grado de error que se comete cuando se modela el oleaje en distintos escenarios de modelación. Los resultados se compararon con mediciones coincidentes por el ADCP.

3.2.1 METODOLOGÍA CALIBRACIÓN

La calibración del modelo se realizó contrastando los resultados de la modelación en el punto donde existían mediciones de oleaje con ADCP. Los parámetros de ajuste utilizados en el modelo STWAVE son:

- Variación de la resolución espacial de las mallas computacionales.
- Variación en el nivel del mar.
- Activación o desactivación de la opción de fricción de fondo en el modelo.
- Uso de diferentes fuentes de datos batimétricos.
- Aplicación de distintos métodos de transformación del oleaje (Full spec y Pseudo espectral)

A continuación se describe el proceso de calibración.

a) Escenario base

Se definió un escenario base de los parámetros de calibración a partir del cual evaluar los cambios que se produzcan en los resultados producto de las modificaciones a los parámetros de calibración. Cada variación de los parámetros de calibración conserva los parámetros del escenario base excepto por el parámetro variado. Este escenario está definido según la Tabla 3-3.

Tabla 3-3 Parámetros del escenario base para la calibración

Resolución mallas	Nivel del mar	Fricción	Batimetría	Metodología de propagación del oleaje
Malla3: 500m x 500m Malla 2: 100m x 100m Malla 1: 25m x 25m	NRS=0m	Sin fricción	Levantamiento Batimétrico realizado para el proyecto combinado con Cartas náuticas	Full Spec

b) Cambio de la resolución espacial de las mallas

Se varió la resolución de las mallas 1 y 2 a 10×10m para la malla 1 y a 50×50m para la malla 2.

c) Cambio en Nivel del mar

Al cambiar el nivel del mar en STWAVE se aumentan las profundidades en todo el dominio de simulación. Con el objeto de analizar las variaciones por este parámetro se varió el nivel del mar a 1 m y 2 m.

d) Escenario batimetría

La batimetría modifica la dirección y altura del oleaje a través de la refracción y asomeramiento. Existen distintas fuentes de información batimétrica disponibles para el proyecto con diferente cobertura y resolución espacial. Estas se indican a continuación:

- Cartas náuticas con el levantamiento batimétrico realizado para el proyecto
- Cartas náuticas
- GEBCO
- ETOPO

Algunas de las diferencias son importantes tal como por ejemplo, según la batimetría GEBCO, el punto donde se realizaron las mediciones con ADCP queda en tierra. En este caso se optó por mover el punto de extracción de datos del modelo en 1175 m hacia el oeste en una línea perpendicular a la costa hasta alcanzar la profundidad del ADCP que es de 20m.

e) Aplicación de metodología de propagación del oleaje Pseudo espectral.

Con objeto de evaluar el efecto que tienen en los resultados. En esta parte de la calibración se evalúan las diferencias de esta metodología con respecto al escenario base que considera simulaciones utilizando la metodología Full spec.

f) Variación de la opción de fricción de fondo

La disipación de energía por fricción del fondo marino, según el manual de STWAVE 5.0 es pequeña puesto que las distancias son relativamente cortas del orden de cientos de kilómetros y no alcanzan a inducir cambios significativos. EL modelo permite la incorporación de la fricción de fondo a partir de la definición de la rugosidad especificada a partir del coeficiente de Manning. Se simularon tres escenarios de fricción definidos a continuación:

- Fango, coeficiente de Manning variable según su profundidad, aplicados a las mallas 2 y 3.
- Arena, coeficiente de Manning variable según su profundidad, aplicados a las mallas 2 y 3.
- $n=0.036$ constante en mallas 2 y 3. Asumiendo una profundidad constante de 20m y un fondo marino de arena.

La metodología para obtener el coeficiente de Manning para el Fango y la Arena se realiza en dos pasos, primero según las profundidades de las mallas 2 y 3 se usa la Ecuación 13 y la Ecuación 14 para obtener mallas con el número de Chezy, ambas ecuaciones fueron derivadas de la Figura 3-7. Luego, mediante la Ecuación 15 se calculan campos de fricción variables de coeficientes de Manning según su profundidad.

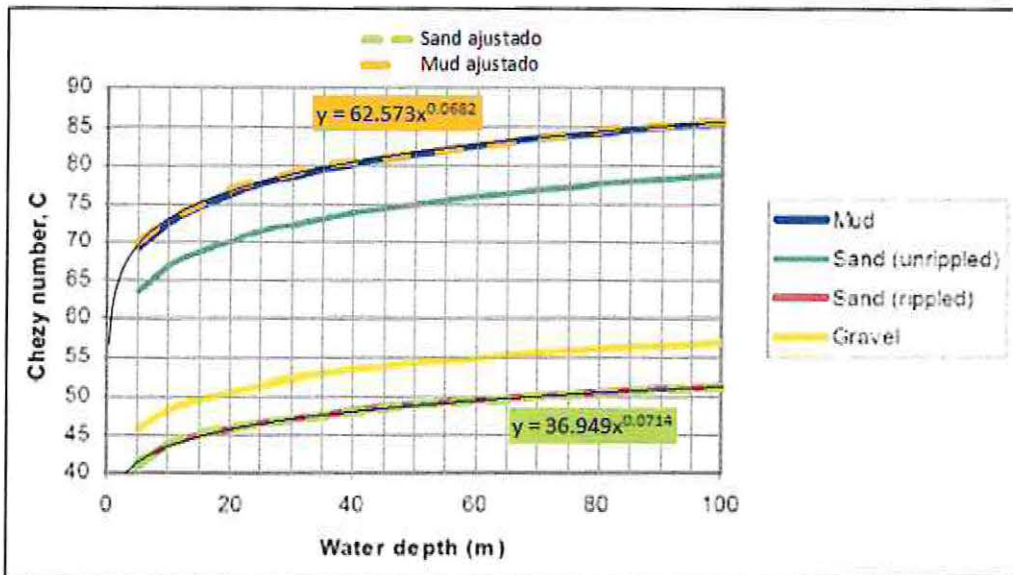


Figura 3-7 Número de Chezy
(Adaptado de Pinheiro L., Fortes C., Teixeira P. y Walkley M. (2010))

- Ecuación Número de Chezy "Arena":

$$C = 36.949d^{0.0714} \quad \text{Ecuación 13}$$

- Ecuación Número de Chezy "Fango":

$$C = 62.573d^{0.0682} \quad \text{Ecuación 14}$$

- Coeficiente de Manning:

$$n = \frac{d^{\frac{1}{6}}}{C} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

n: Coeficiente de Manning.
d: Profundidad.
C: Numero de Chezy.

3.2.2 METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN

La validación del modelo calibrado se evaluó comparando los resultados de las alturas de oleaje (H_{m0}) periodos energético (T_e) y direcciones medias (D_m) de las simulaciones que utilizaban como dato de entrada de oleaje de aguas profundas las mediciones de la boya Triaxys, con mediciones de oleaje a 20m de profundidad del ADCP cuyos períodos de registro eran coincidentes. Esta ventana de tiempo común neta es de aproximadamente 170 días. Las mediciones de oleaje y las salidas de las simulaciones corresponden a espectros bidimensionales cada 1 hora.

3.3 ESTADÍGRAFOS EMPLEADOS

Para identificar el error en la calibración se utiliza el Sesgo.

- Sesgo

$$\text{sesgo}(t) = (Y_{(t)}^{\text{Modelo}} - X_{(t)}^{\text{ADCP}}) \quad \text{Ecuación 16}$$

En la validación se añaden los siguientes estadígrafos:

- Error relativo porcentual

$$e\%(t) = \frac{X_{(t)}^{\text{ADCP}} - Y_{(t)}^{\text{Modelo}}}{X_{(t)}^{\text{ADCP}}} 100 \quad \text{Ecuación 17}$$

- Error relativo absoluto porcentual

$$|e\%(t)| = \frac{|X_{(t)}^{\text{ADCP}} - Y_{(t)}^{\text{Modelo}}|}{X_{(t)}^{\text{ADCP}}} 100 \quad \text{Ecuación 18}$$

- Error medio cuadrático

$$\text{RMS}(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (X_{(t)}^{\text{ADCP}} - Y_{(t)}^{\text{Modelo}})^2} \quad \text{Ecuación 19}$$

- Skill (habilidad de pronóstico)

$$SKILL(t) = 1 - \sqrt{\frac{\sum(X_n^{ADCP}(t) - Y_n^{Modelo})^2}{\sum(X_n^{ADCP})^2}} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde $X_n^{ADCP}(t)$ corresponde a la medición en aguas intermedias y Y_n^{Modelo} al resultado del modelo en la misma ubicación de la medición en el tiempo t , y N es la cantidad total de casos analizados.

Skill (Gallagher et al., 1998), es un índice que indica en qué grado el modelo representa los parámetros del oleaje. Los valores van desde $-\infty$ a 1 y dependiendo de su valor, se pueden presentar tres casos:

- Skill = 1 quiere decir que los errores entre lo generado y medido son cero.
- Skill = 0 quiere decir que la magnitud de los errores es comparable a los valores observados.
- Skill <0 quiere decir que la magnitud de los errores es mucho mayor a los valores observados.

3.4 SELECCIÓN CASOS REPRESENTATIVOS

La selección de los climas de oleaje se realizó utilizando el método MDA. Este método tiene por objetivo obtener los valores extremos y/o de mayor disimilitud dentro de la muestra, por lo que es adecuado para representar estados de climas extremos útiles para la validación de los modelos de propagación. Lucero et al., (2013).

Al aplicar el método MDA a los datos de la boya Triaxys en Curaumilla, se seleccionaron cinco espectros bidimensional, que se describen e ilustran en la Tabla 3-4 y Figura 3-8 a Figura 3-12.

Tabla 3-4: Casos seleccionados para la calibración por el método "MDA" para el Proyecto Undimotriz.

Nº	Clasificación	Hm0 [m]	Te [s]	Dm[°]	Ocurrencia [%]	FECHA (UTC-0)
1	Mar de Fondo W	1.26	11.00	258.80	1.96	2012/05/06 07:00
2	Mar de Fondo SW	3.17	15.9	220.20	14.82	2012/05/13 16:00
3	Oleaje local NNW	1.85	8.06	343.20	43.15	2012/05/26 00:00
4	Oleaje local SW	1.67	8.93	224.00	36.07	2012/07/08 14:00
5	Mar de Fondo SW	4.36	10.90	227.80	4.01	2012/07/25 02:00

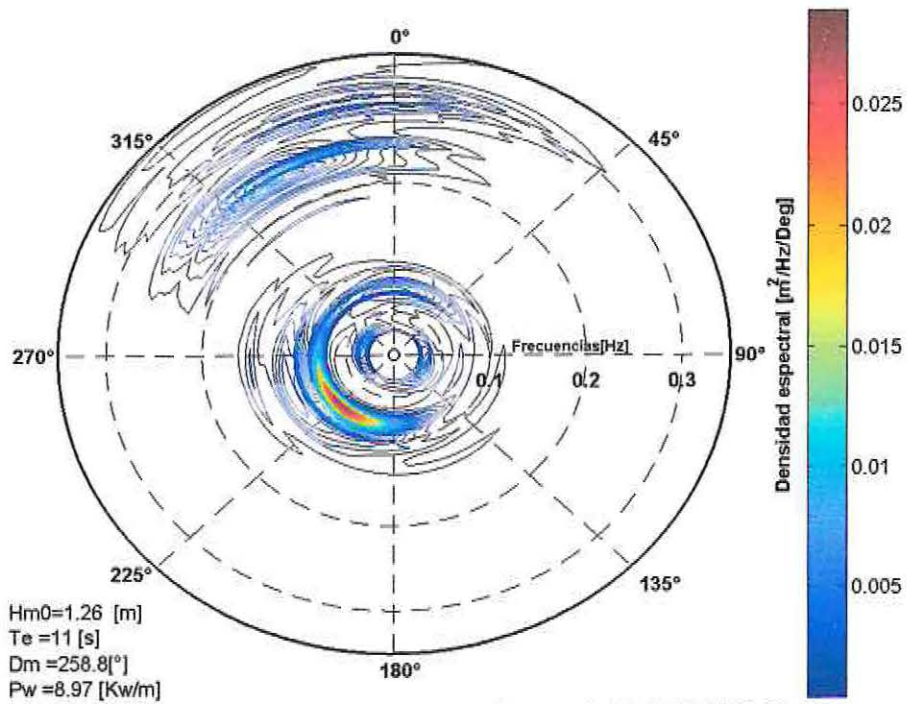


Figura 3-8: Espectro bidimensional caso 1, 2012/05/06 07:00.

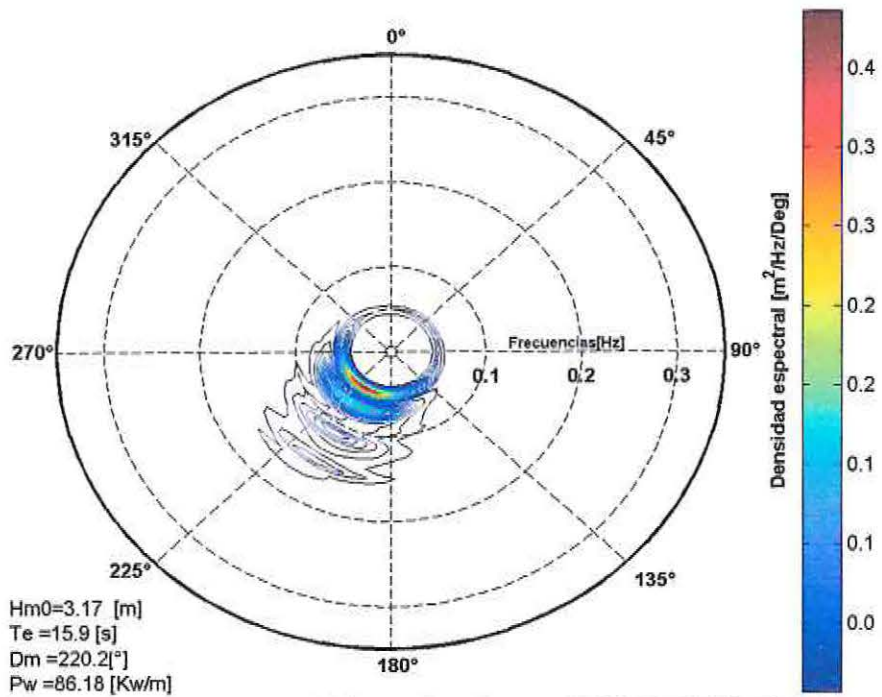


Figura 3-9: Espectro bidimensional caso 2, 2012/05/13 16:00.

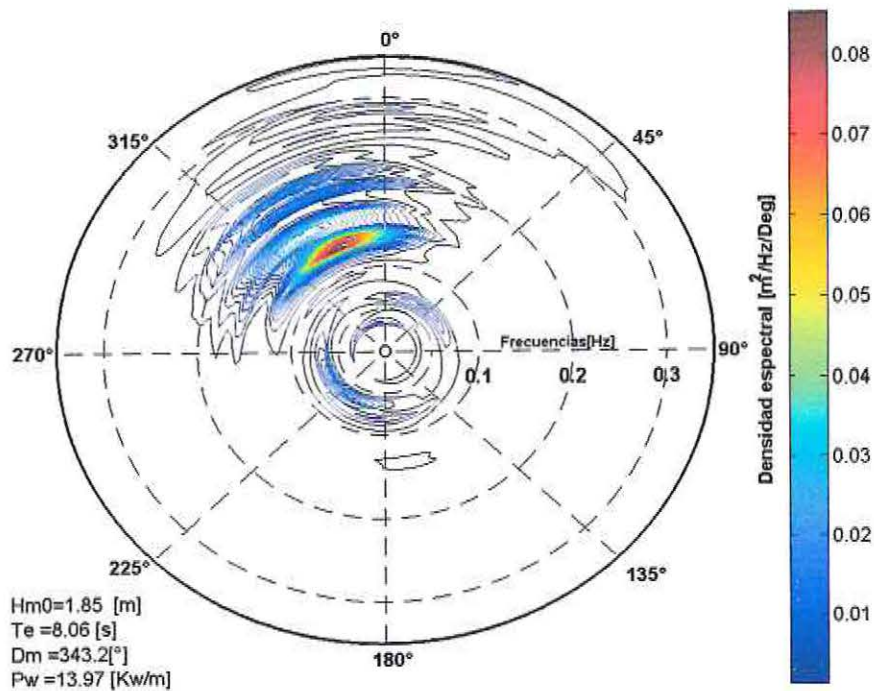


Figura 3-10: Espectro bidimensional caso 3, 2012/05/26 00:00.

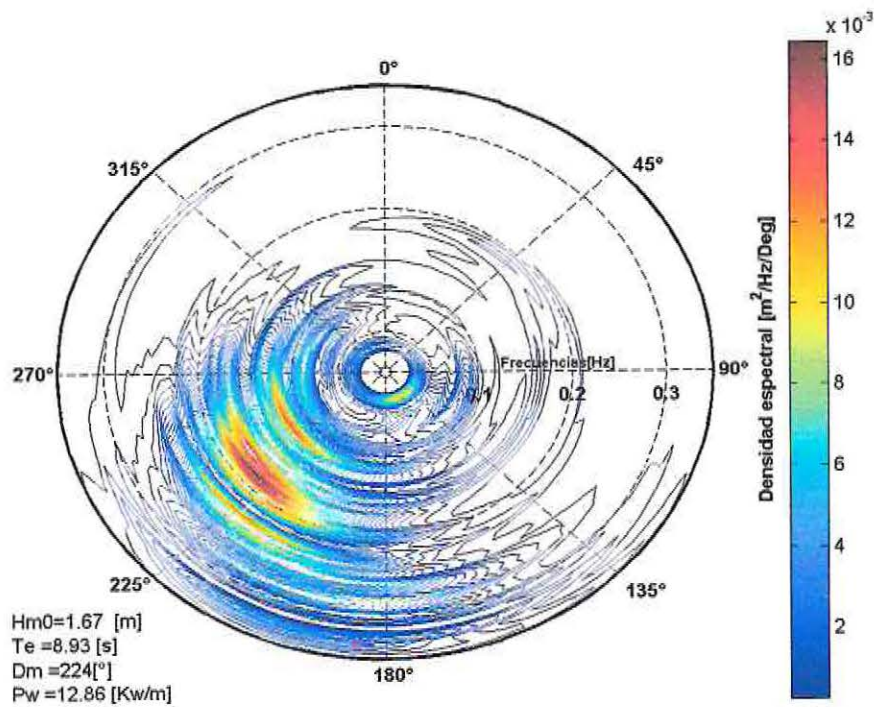


Figura 3-11: Espectro bidimensional caso 4, 2012/07/08 14:00.

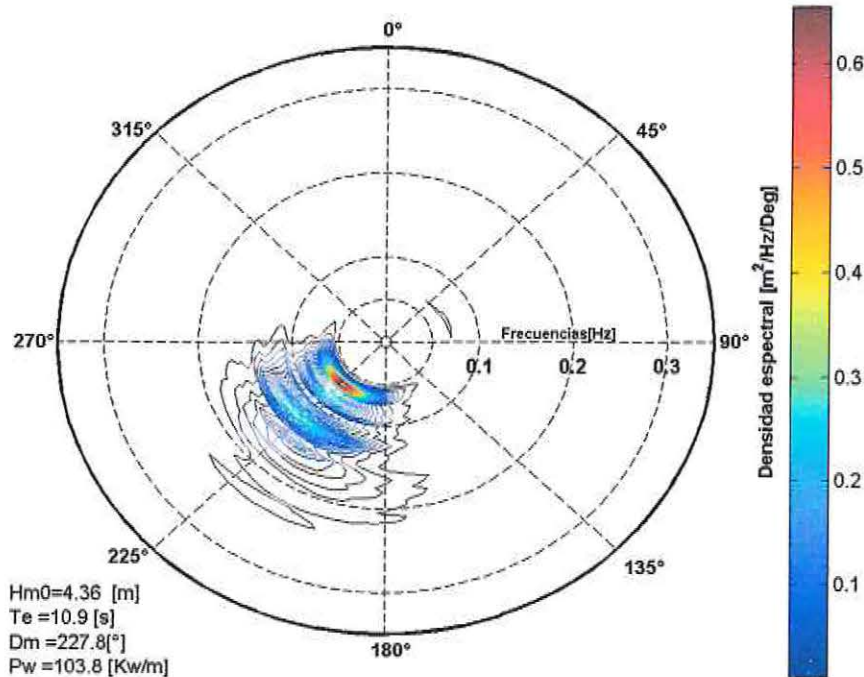


Figura 3-12: Espectro bidimensional caso 5, 2012/07/25 02:00.

3.5 CONFIGURACIÓN DEL MODELO STWAVE

Dadas las características del modelo que limita el rango de direcciones de incidencia del oleaje de entrada (half-plane), se utilizaron dos orientaciones de una misma malla numérica para modelar la batimetría. Esto con el objeto de abarcar completamente el rango de direcciones de incidencia del oleaje en aguas profundas y considerando la dispersión angular de la incidencia del oleaje.

Los bordes de entrada de la malla 3 (Figura 3-13) sobrepasan los 1.000m de profundidad con el objeto de que la propagación efectivamente se realice desde aguas profundas.

Para minimizar el gasto computacional se generaron 2 mallas anidadas a una tercera, tal que la malla más pequeña tenga una mayor resolución y logre reproducir de mejor manera los procesos físicos.

La Tabla 3-5 especifica las dimensiones y orientación de cada malla usada y la Figura 3-13 ilustra su posición y orientación.

La resolución de cada malla se determinará en la calibración del modelo.

Tabla 3-5: Descripción de las mallas numéricas usadas en la modelación.

N° malla	Dimensión [Km]	Orientación [°]
1	80 × 80	225° & 315°
2	35 × 35	225° & 315°
3	8 × 8	225° & 315°

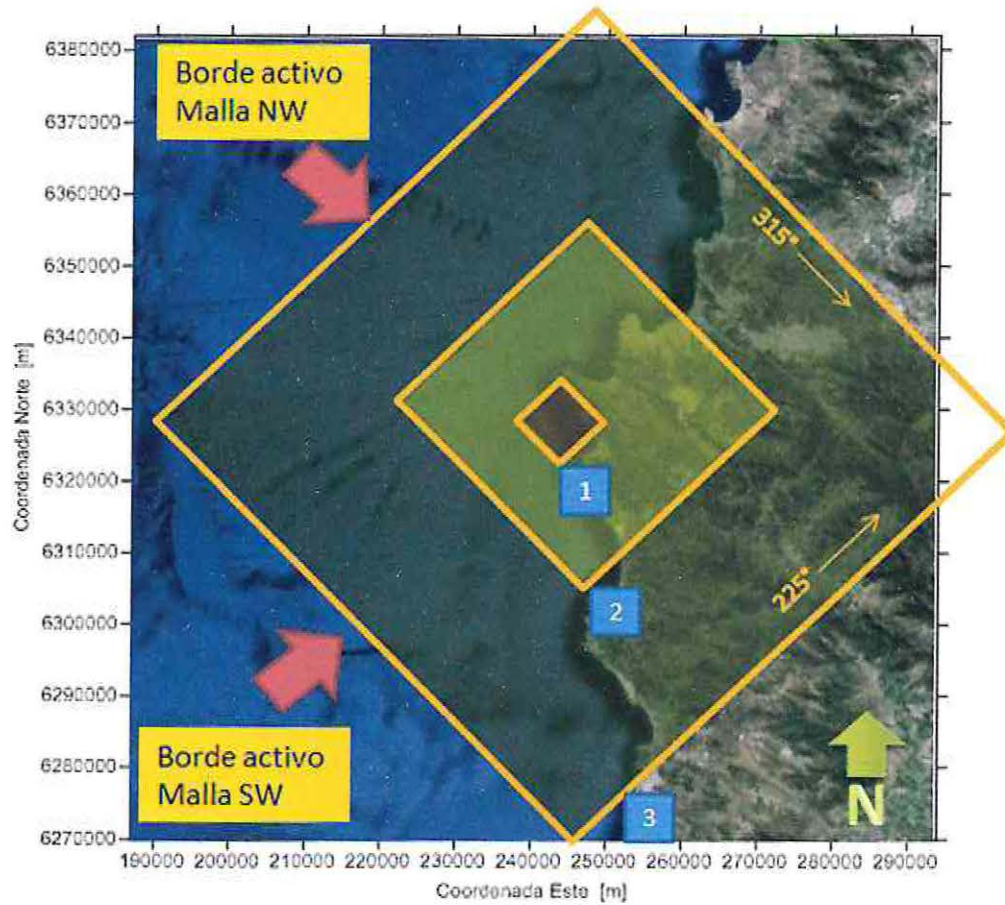


Figura 3-13: Posición y orientación de las mallas para el modelo de propagación de oleaje.

4. RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS BATIMETRÍAS

Se realizó un análisis comparativo para cuantificar e identificar las diferencias que tienen las bases de datos con respecto a la información que se considera más confiable con el objeto de evaluar el efecto de la utilización de ellas en los resultados de la modelación numérica del oleaje.

Los resultados se muestran mediante la comparación de veriles, estimación del sesgo y perfiles transversales a la línea de costa.

El sesgo se calcula, de acuerdo a la Ecuación 21.

$$\text{Sesgo} = d_{(x,y)} - d'_{(x,y)} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde,

$d_{(x,y)}$: Corresponde al nivel del fondo en la coordenada (x,y) de las cartas náuticas, mallas (1) y (3)

$d'_{(x,y)}$: Corresponde al nivel del fondo en la coordenada (x,y) de la malla (2) levantamiento batimétrico, malla (4) GEBCO y la malla (5) ETOPO.

Las Figura 4-1, Figura 4-3 y Figura 4-5, presentan una comparación de veriles, las Figura 4-2, Figura 4-4 y Figura 4-6 muestran la estimación del sesgo y la Figura 4-7 compara una sección transversal de todas las fuentes.

El mapa de veriles de la Figura 4-1 presenta una comparación de las cartas náuticas con el levantamiento batimétrico, hasta los 100 m de profundidad con veriles cada 20m, Se observa que las mayores diferencias se encuentran entre el veril de 40 m y 20 m y que los veriles de 100 m son semejantes. (La Figura 4-2 muestra el mapa del sesgo, donde las diferencias más importantes se encuentran en la zona A y B). La zona A presenta las mayores diferencias con un máximo de 74 m y la zona B el mínimo con -36 m. En general, las cartas náuticas presentan mayores profundidades que las cartas náuticas.

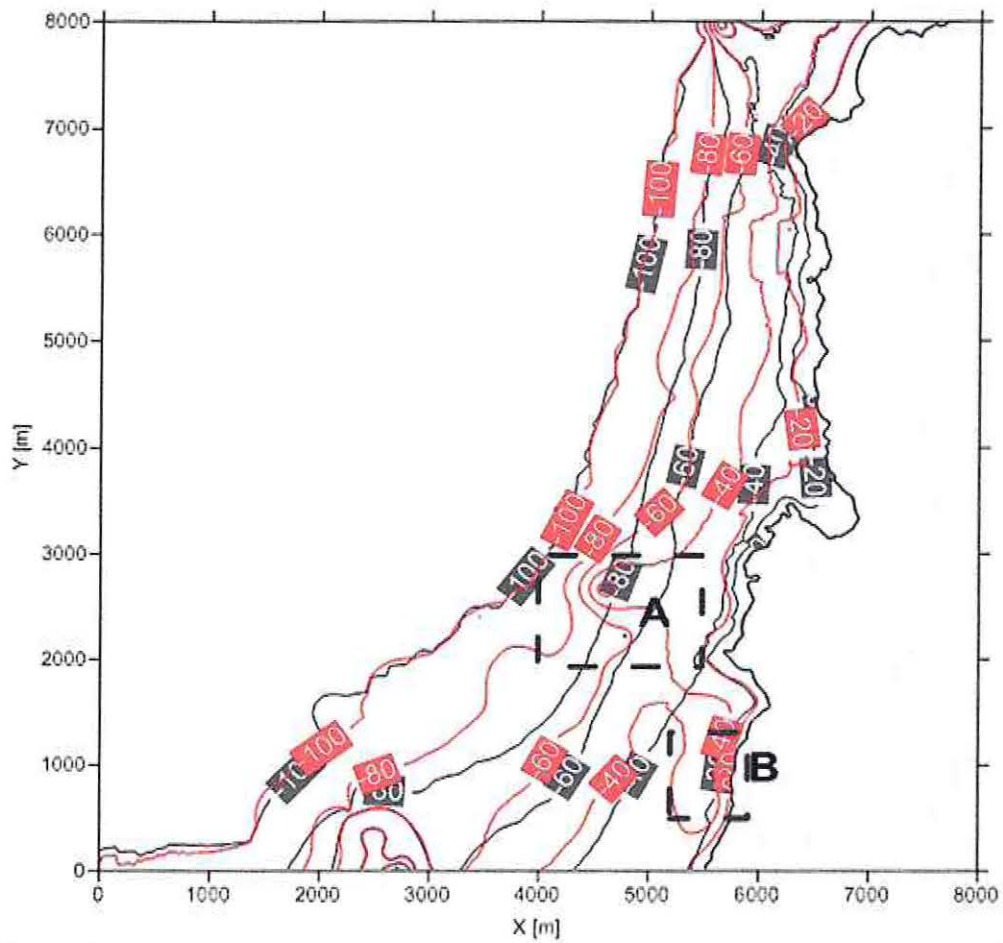


Figura 4-1: Mapa de comparación de veriles cada 20 m, hasta el veril de los 100 m de las cartas náuticas (color rojo) con el levantamiento batimétrico (color negro). Los sectores A y B presentan las diferencias más significativas.

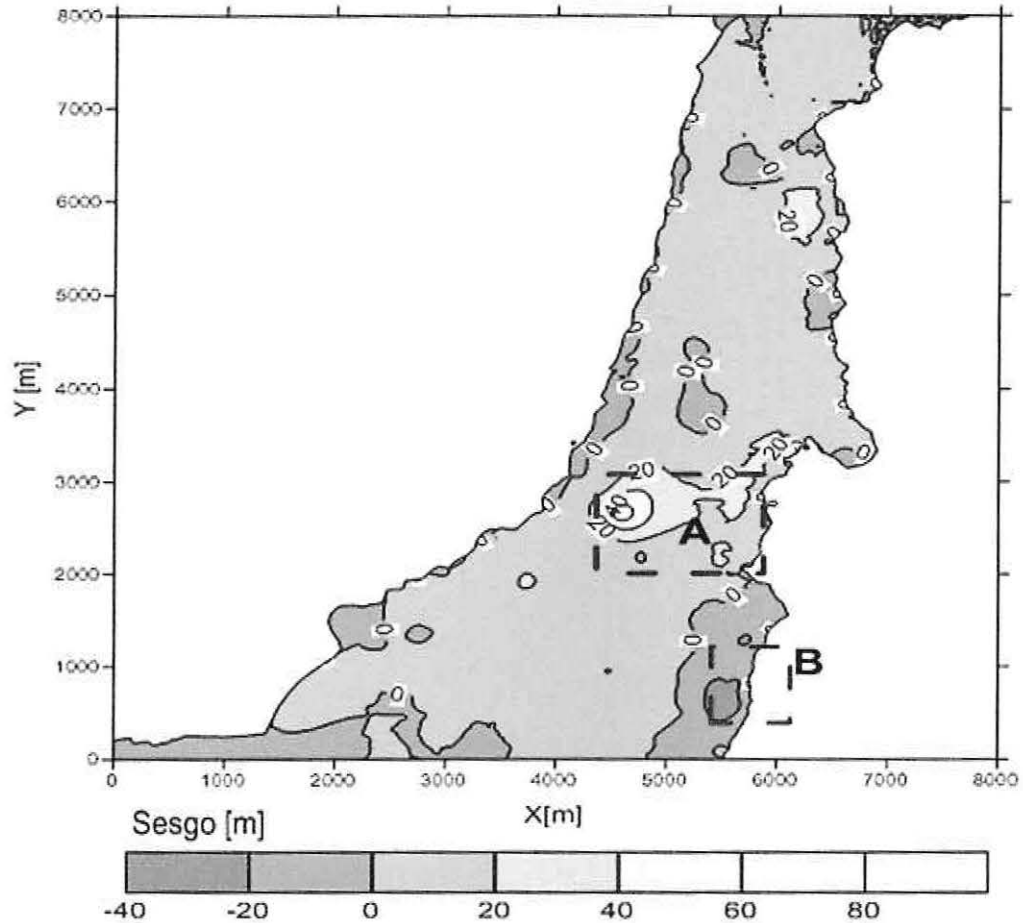


Figura 4-2: Mapa del sesgo de las cartas náuticas v/s el levantamiento batimétrico. Los sectores A y B muestran las diferencias más significativas.

La Figura 4-3 muestra un mapa de la comparación de veriles cada 100 m, generadas a partir de las cartas náuticas y de ETOPO. Se observa que los veriles de ETOPO tienden a ser rectos y paralelos a partir de los 200 m. El mapa del sesgo de la Figura 4-4 muestra que aproximadamente a partir del veril de los 100 m hacia aguas más profundas ETOPO presenta mayores profundidades que las cartas náuticas con la diferencia más importante en la zona A, donde hay una diferencia máxima de 300 m. En general ETOPO presenta mayores profundidades con diferencias significativas en aguas más profundas, en cambio, en profundidades menores a los 100 m, las diferencias son menores con un máximo de 50 m.

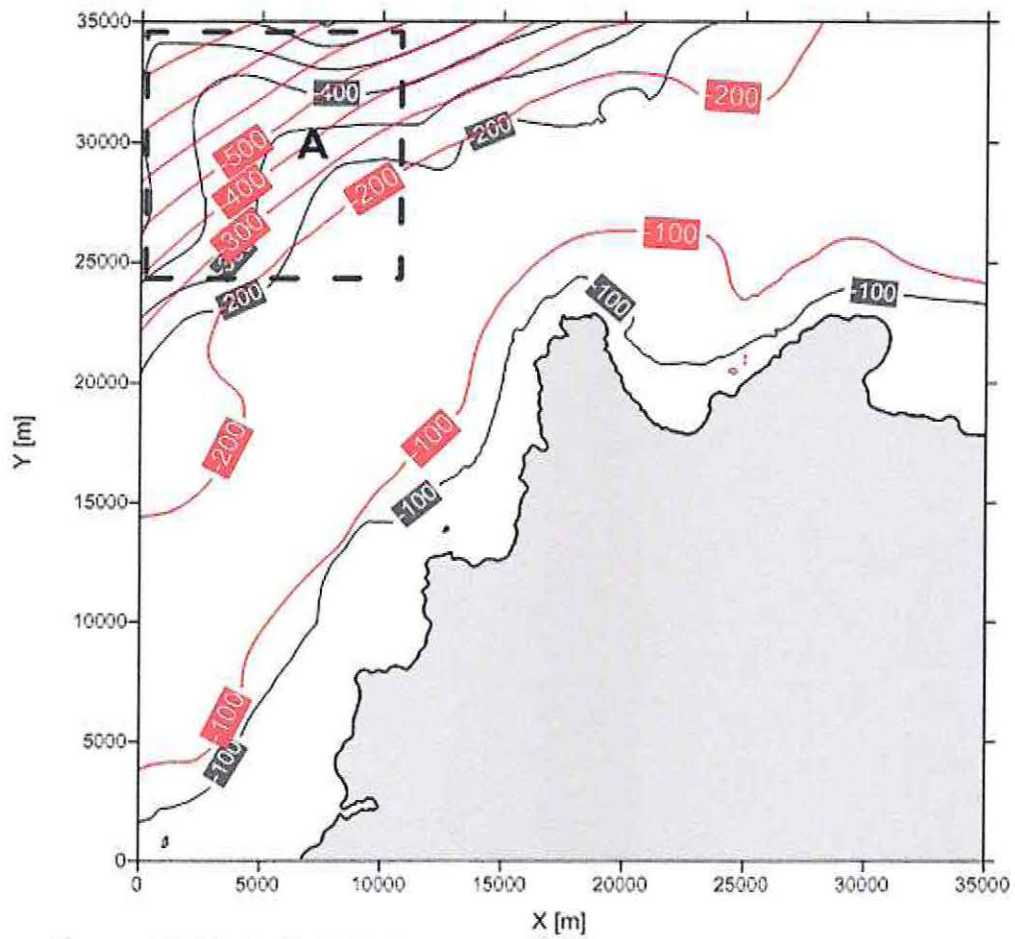


Figura 4-3: Mapa de comparación de veriles cada 100 m de las Cartas Náuticas (color negro) con la grilla ETOPO (color rojo). El sector A presenta las diferencias más significativas.

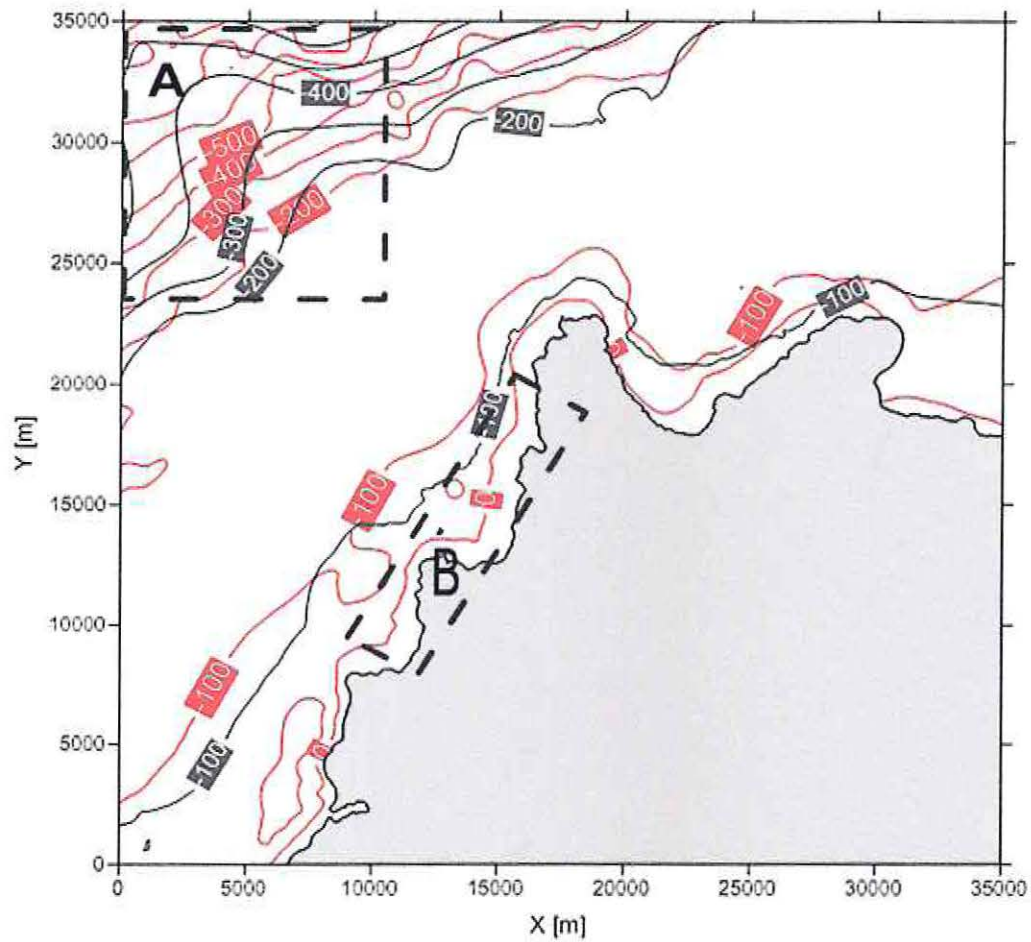


Figura 4-5: Mapa de comparación de veriles cada 100 m de las Cartas Náuticas (color negro) con GEBCO (color rojo). Los sectores A y B presentan las diferencias más significativas.

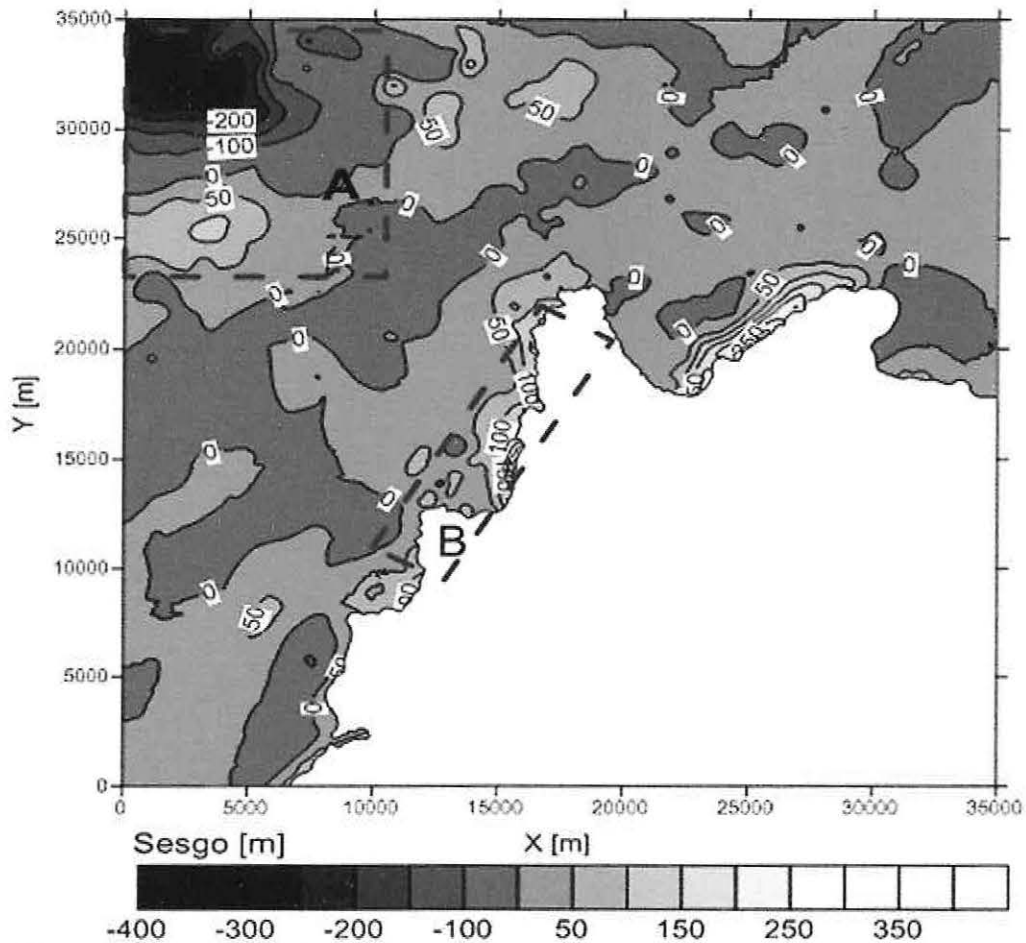


Figura 4-6: Mapa del Sesgo, Cartas Náuticas v/s GEBCO. Los sectores A y B presentan las diferencias más significativas.

En la Figura 4-7 se presenta a una sección transversal de todas las fuentes de datos batimétricos. La ubicación de la sección transversal se indica en la figura de la esquina superior derecha (a) y a su izquierda se muestra la comparación de las fuentes de batimetría empleadas (b) (hasta los 550 m de profundidad). El rectángulo rojo (c) muestra una ampliación en la figura, hasta los 100 m de profundidad. Se observa que aproximadamente a 1,8 km de la línea de costa, las cartas náuticas presentan diferencias importantes de hasta 400 m respecto de ETOPO y GEBCO, en profundidades mayores a los 100 m GEBCO y ETOPO son semejantes. También se observa en la ampliación, que las cartas náuticas con el levantamiento batimétrico tienen una menor diferencia que el resto, aproximadamente de 10 m. Además, a diferencia de GEBCO, ETOPO tiene menores diferencias respecto a las cartas náuticas. La mayor e importante diferencia, se registra en la línea de costa de GEBCO con un desfase hacia el este de aproximadamente 1,7 Km.

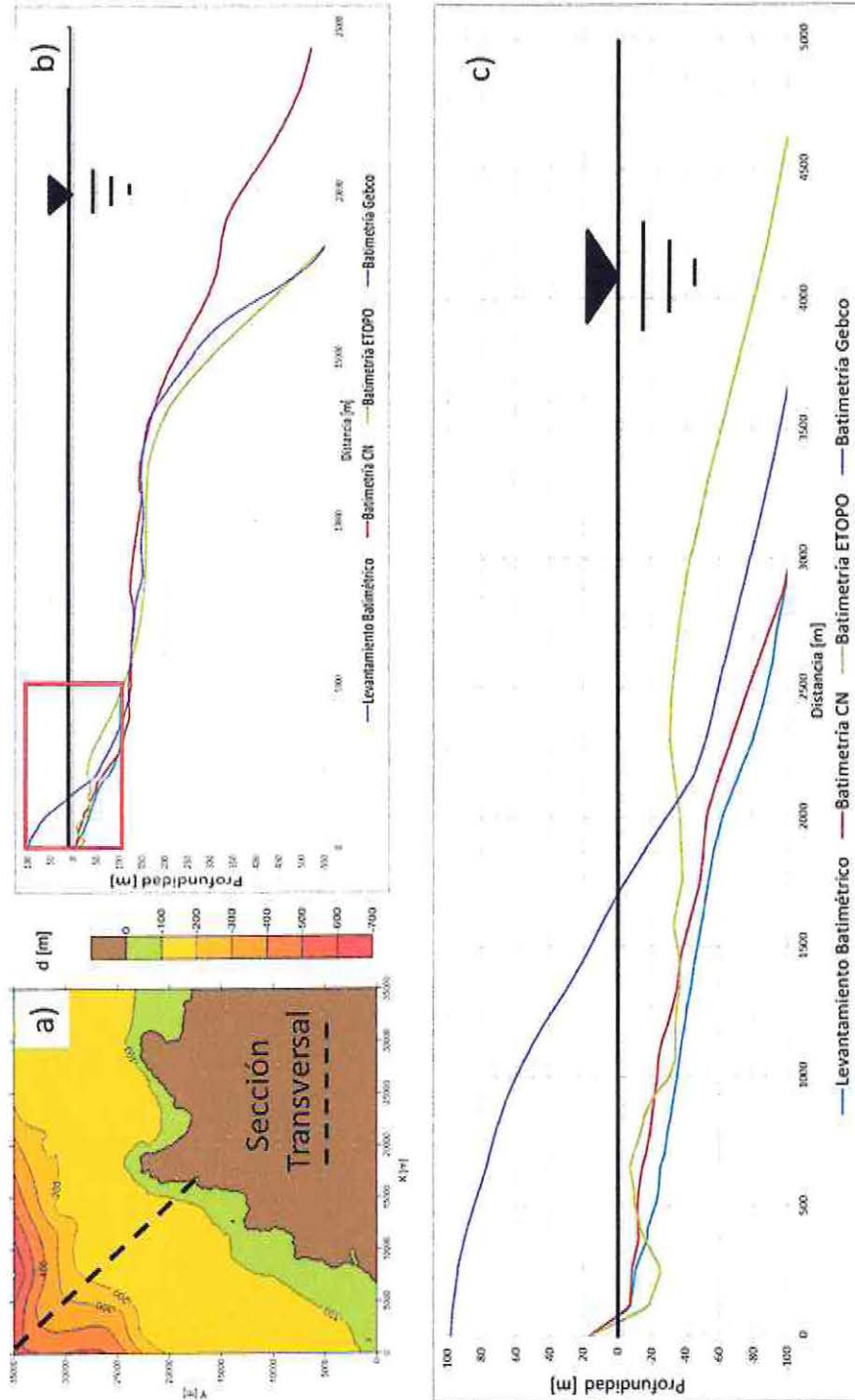


Figura 4-7: Comparación de profundidades de una sección transversal de la zona en estudio: a) Ubicación sección transversal; b) Comparación de profundidades de las Cartas Náuticas (en rojo), GEBCO (morado), ETOPO (verde) y el Levantamiento batimétrico (azul); c) Ampliación del rectángulo (hasta los 100m de profundidad).

4.2 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO STWAVE

Se realizó una comparación de los escenarios de calibración para cada estado de mar seleccionado con las mediciones de terreno. Se evaluaron tanto parámetros estadísticos (H_{m0} , T_e y D_m) como espectros. Los detalles se presentan a continuación:

Desde el Gráfico 4-1 al Gráfico 4-10 se muestra una comparación de los espectros integrados en frecuencias y direcciones para los distintos casos de calibración. Las Tabla 4-1 a la Tabla 4-5 presentan una comparación de los parámetros estadísticos.

El análisis de los resultados se presenta más adelante.

4.2.1 CASO1: 2012/05/06 07:00 (UTC-0)

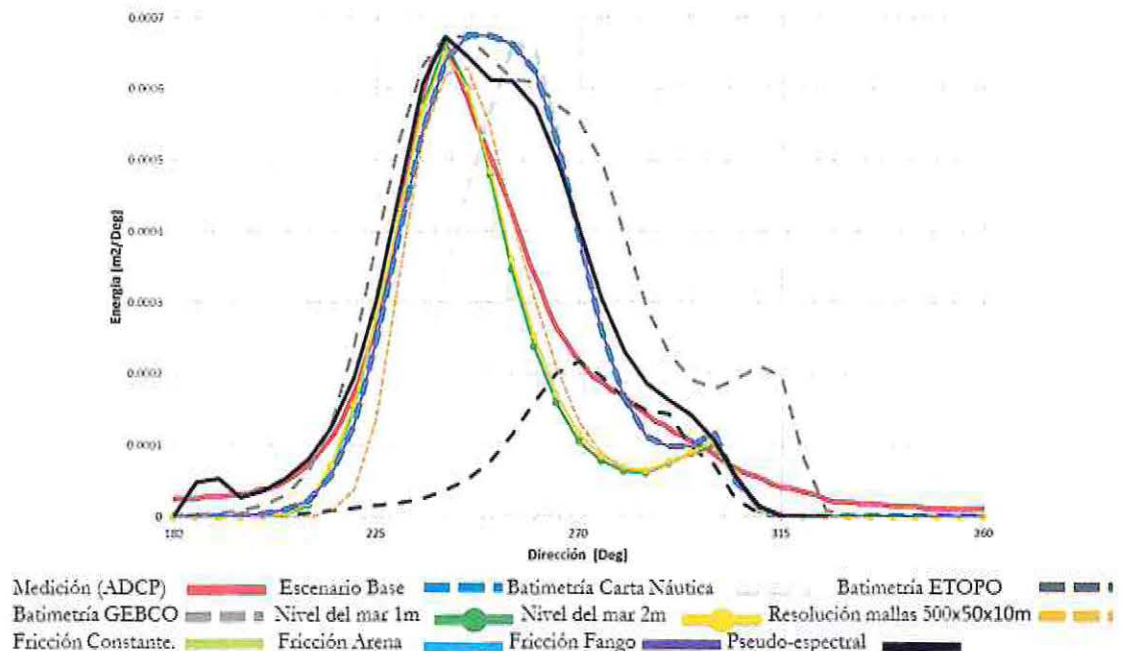


Gráfico 4-1: Caso 1, espectro integrado en la dirección, para todos los escenarios calibrados, comparados con el espectro de la medición (ADCP).

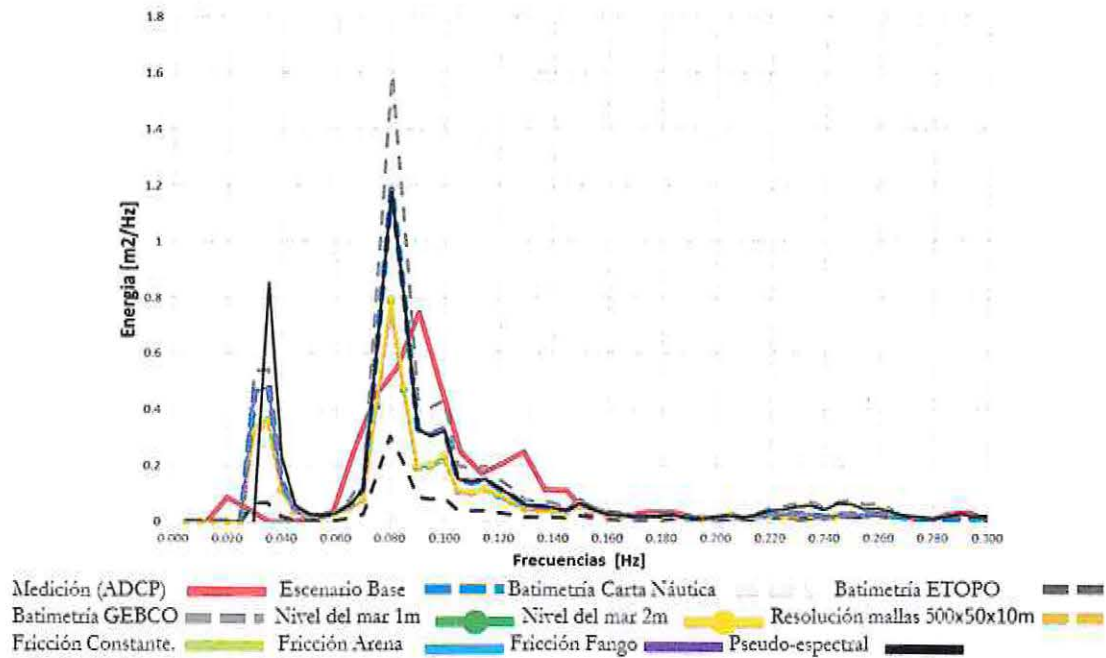


Gráfico 4-2: Caso 1, espectro integrado en la frecuencia, para todos los escenarios calibrados, comparados con el espectro de la medición (ADCP)

Tabla 4-1: Parámetros estadísticos y el sesgo con respecto a la medición, para todos los escenarios modelados en la calibración y medición (ADCP). Caso 1

Nº	Descripción	Hm0 [m]	Sesgo Hm0 [m]	Te [s]	Sesgo Te [s]	Dm [°]	Sesgo Dm [°]
--	Mediciones	0.72	-	11.41	-	248.21	-
1	Escenario base	0.72	0.00	13.92	2.51	252.68	4.47
2	Cartas Náuticas	0.61	-0.12	14.65	3.24	259.13	10.93
3	ETOPO	0.38	-0.35	11.27	-0.14	270.86	22.65
4	GEBCO	0.84	0.12	13.10	1.69	258.06	9.85
5	Nivel del mar 1m	0.61	-0.12	13.83	2.42	247.07	-1.14
6	Nivel del mar 2m	0.61	-0.11	13.73	2.32	247.48	-0.72
7	Res. mallas 500x50x10m	0.60	-0.13	13.80	2.38	250.41	2.21
8	Fricción CTE.	0.72	0.00	13.92	2.51	252.68	4.47
9	Fricción Arena	0.72	0.00	13.92	2.51	252.68	4.47
10	Fricción Fango	0.72	0.00	13.92	2.51	252.68	4.47
11	Pseudo espectral	0.79	0.07	15.50	4.09	250.48	2.27

4.2.2 CASO 2: 2012/05/13 16:00 (UTC-0)

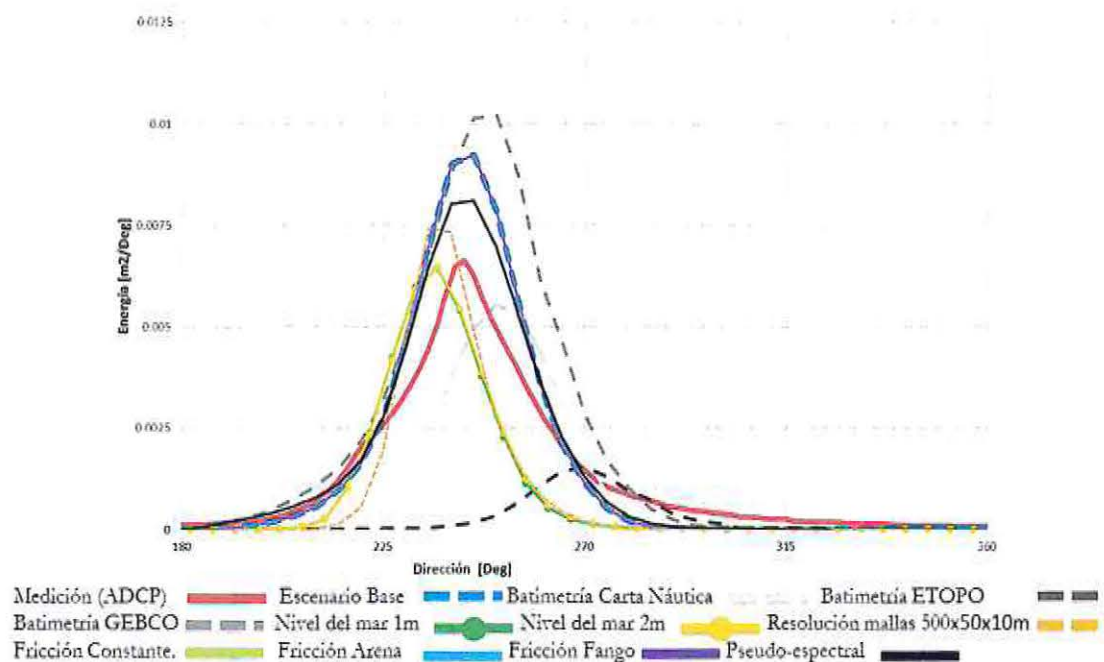


Gráfico 4-3: Caso 2, espectro integrado en la dirección, para todos los escenarios calibrados, comparados con el espectro de la medición (ADCP).

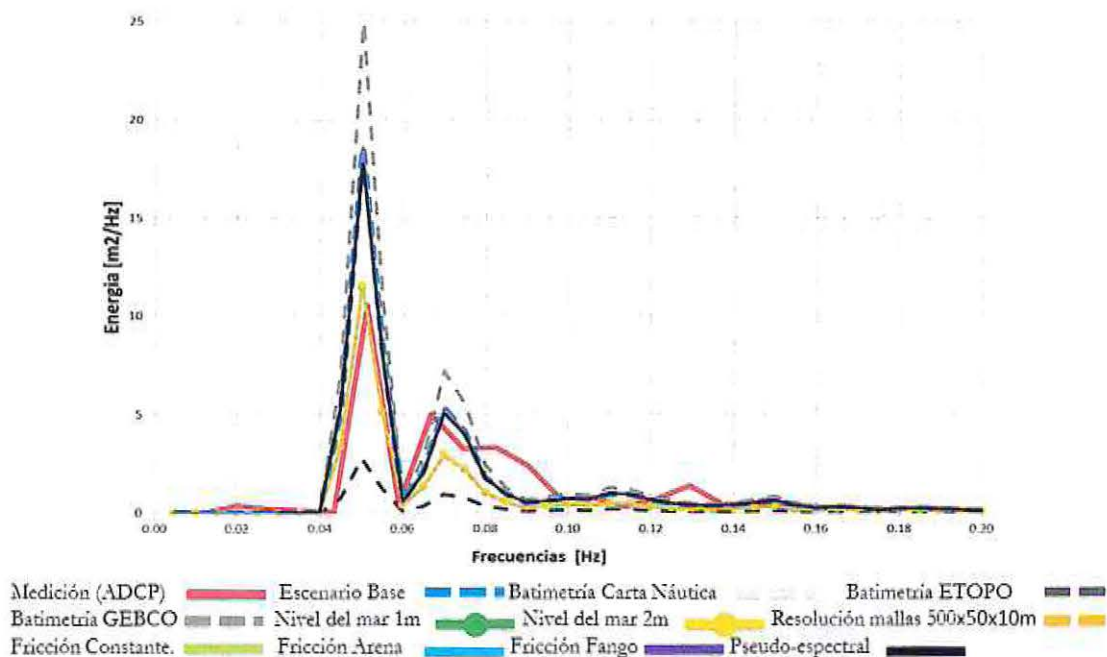


Gráfico 4-4: Caso 2, espectro integrado en la frecuencia, para todos los escenarios calibrados, comparados con el espectro de la medición (ADCP).

Tabla 4-2: Parámetros estadísticos y el sesgo con respecto a la medición, para todos los escenarios modelados en la calibración y medición (ADCP). Caso 2

Nº	Descripción	Hm0 [m]	Sesgo Hm0 [m]	Te [s]	Sesgo Te [s]	Dm [°]	Sesgo Dm [°]
--	Mediciones	2.04	-	14.45	-	245.93	-
1	Escenario base	2.15	0.11	16.11	1.66	243.14	-2.79
2	Cartas Náuticas	1.64	-0.40	16.62	2.17	252.02	6.09
3	ETOPO	0.86	-1.19	15.76	1.31	269.99	24.06
4	GEBCO	2.47	0.43	16.21	1.76	245.77	-0.16
5	Nivel del mar 1m	1.65	-0.39	16.39	1.94	235.42	-10.52
6	Nivel del mar 2m	1.66	-0.38	16.35	1.90	235.65	-10.28
7	Res. mallas 500x50x10m	1.63	-0.41	16.51	2.06	239.60	-6.33
8	Fricción CTE.	2.15	0.11	16.11	1.66	243.14	-2.79
9	Fricción Arena	2.15	0.11	16.11	1.66	243.14	-2.79
10	Fricción Fango	2.15	0.11	16.11	1.66	243.14	-2.79
11	Pseudo espectral	2.17	0.12	16.09	1.64	243.62	-2.32

4.2.3 CASO 3: 2012/05/260 0:00 (UTC-0)

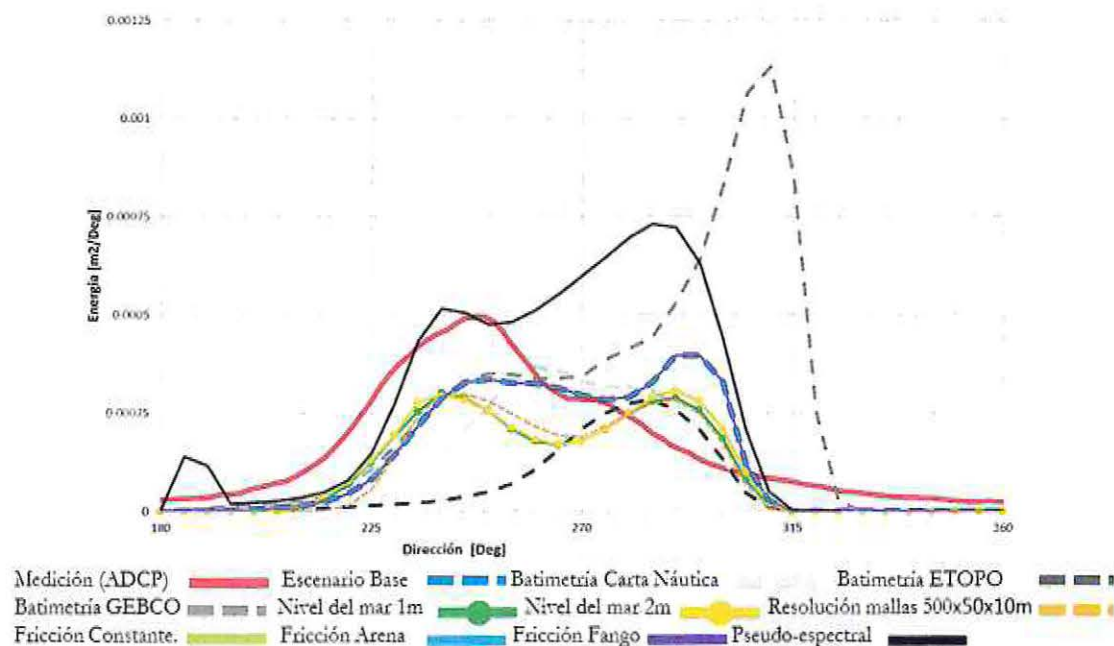


Gráfico 4-5: Caso 3, espectro integrado en la dirección, para todos los escenarios calibrados, comparados con el espectro de la medición (ADCP).

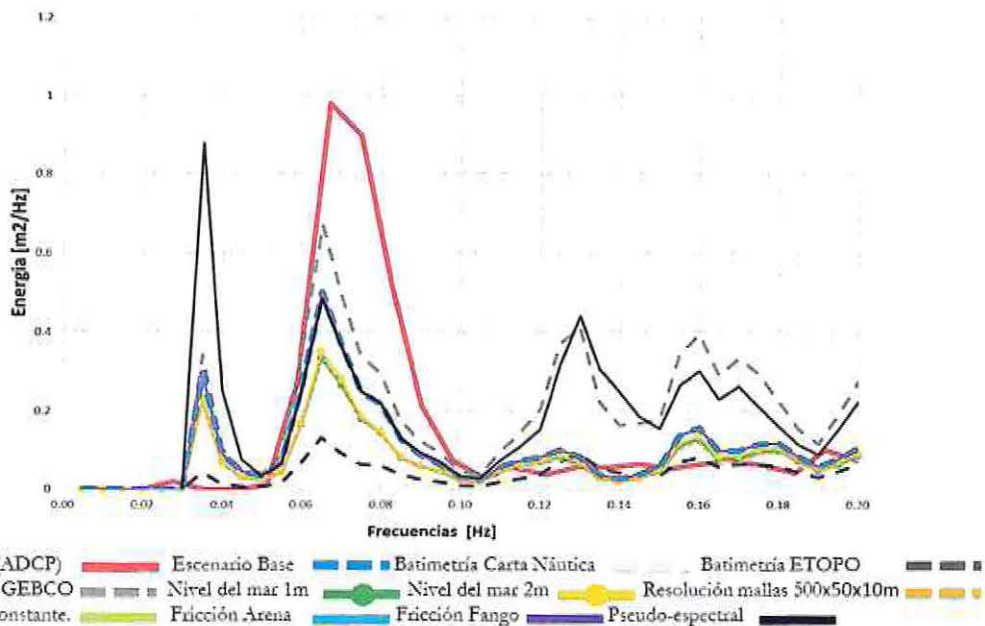


Gráfico 4-6: Caso 3, espectro integrado en la frecuencia, para todos los escenarios calibrados, comparados con el espectro de la medición (ADCP).

Tabla 4-3 Parámetros estadísticos y el sesgo con respecto a la medición, para todos los escenarios modelados en la calibración y medición (ADCP). Caso 3

Nº	Descripción	Hm0 [m]	Sesgo Hm0 [m]	Te [s]	Sesgo Te [s]	Dm [°]	Sesgo Dm [°]
--	Mediciones	0.76	-	10.91	-	253.75	-
1	Escenario base	0.63	-0.13	11.08	0.17	267.34	13.59
2	Cartas Náuticas	0.55	-0.21	11.09	0.18	269.17	15.43
3	ETOPO	0.53	-0.22	7.55	-3.36	263.05	9.31
4	GEBCO	1.32	0.57	7.80	-3.11	234.66	-19.08
5	Nivel del mar 1m	0.55	-0.20	10.57	-0.34	263.26	9.51
6	Nivel del mar 2m	0.56	-0.19	10.47	-0.44	263.71	9.96
7	Res. mallas 500x50x10m	0.55	-0.21	10.59	-0.32	264.92	11.17
8	Fricción CTE.	0.63	-0.13	11.08	0.17	267.34	13.59
9	Fricción Arena	0.63	-0.13	11.08	0.17	267.34	13.59
10	Fricción Fango	0.63	-0.13	11.08	0.17	267.34	13.59
11	Pseudo espectral	0.81	0.05	11.13	0.22	265.04	11.29

4.2.4 CASO 4: 2012/07/0814:00 (UTC-0)

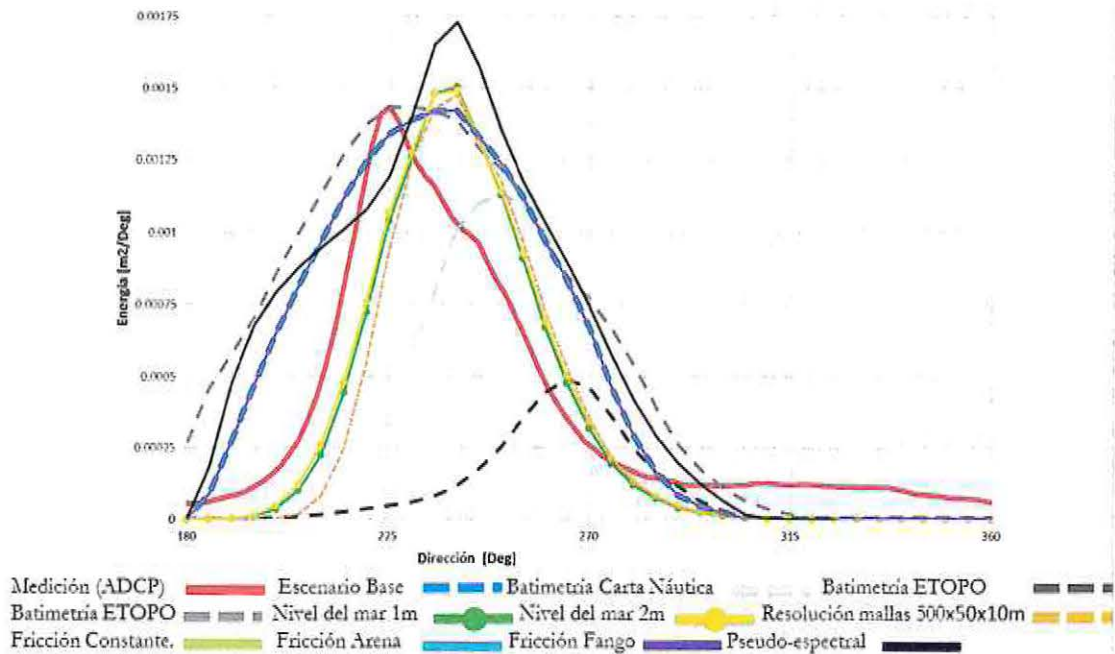


Gráfico 4-7: Caso 4, espectro integrado en la dirección, para todos los escenarios calibrados, comparados con el espectro de la medición (ADCP).

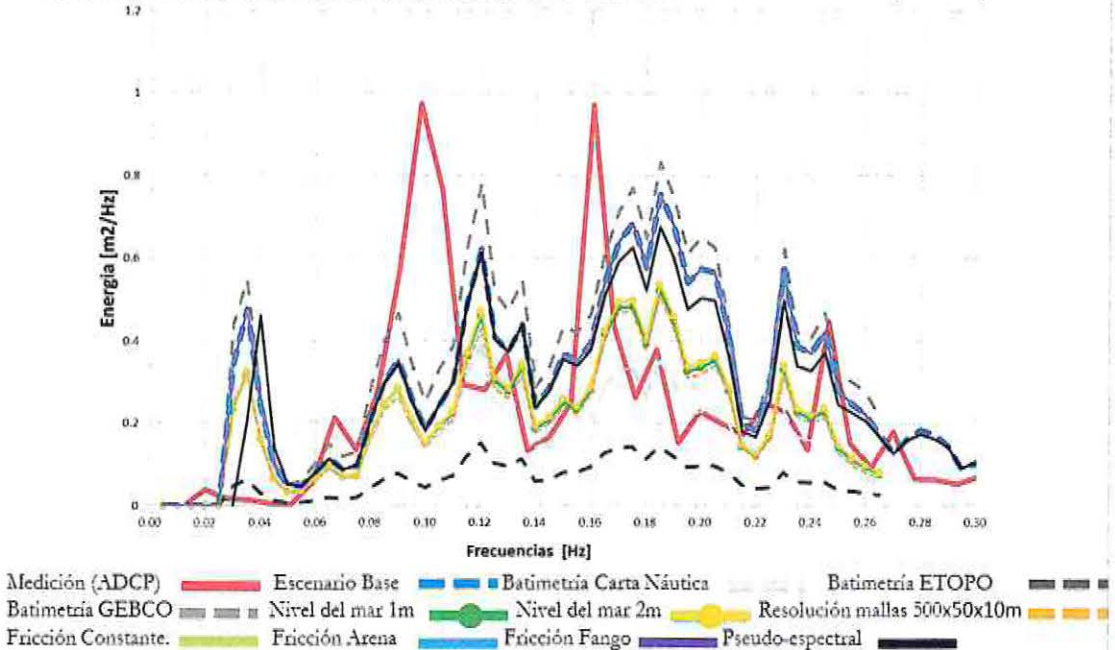


Gráfico 4-8: Caso 4, espectro integrado en la frecuencia, para todos los escenarios calibrados, comparados con el espectro de la medición (ADCP).

Tabla 4-4 Parámetros estadísticos y el sesgo con respecto a la medición, para todos los escenarios modelados en la calibración y medición (ADCP). Caso 4

Nº	Descripción	Hm0 [m]	Sesgo Hm0 [m]	Te [s]	Sesgo Te [s]	Dm [°]	Sesgo Dm [°]
--	Mediciones	1.10	-	7.42	-	239.40	-
1	Escenario base	1.21	0.11	7.71	0.28	235.66	-3.75
2	Cartas Náuticas	0.88	-0.22	8.84	1.42	249.93	10.53
3	ETOPO	0.53	-0.57	7.55	0.13	263.05	23.65
4	GEBCO	1.32	0.22	7.80	0.38	234.66	-4.74
5	Nivel del mar 1m	0.98	1.36	8.08	0.64	240.94	1.53
6	Nivel del mar 2m	1.00	-0.10	8.03	0.60	240.87	1.47
7	Res. mallas 500x50x10m	0.96	-0.14	8.16	0.74	243.20	3.80
8	Fricción CTE.	1.21	0.11	7.71	0.28	235.66	-3.75
9	Fricción Arena	1.21	0.11	7.71	0.28	235.66	-3.75
10	Fricción Fango	1.21	0.11	7.71	0.28	235.66	-3.75
11	Pseudo espectral	1.25	0.15	9.95	2.52	238.86	-0.54

4.2.5 CASO 5: 2012/07/25 02:00 (UTC-0)

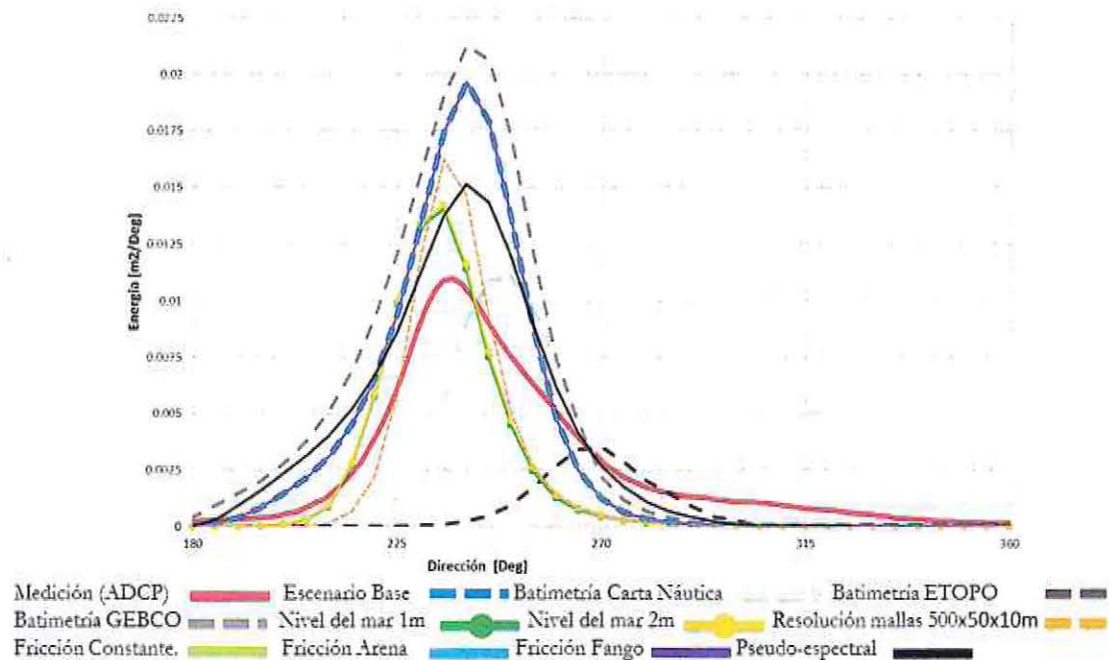


Gráfico 4-9: Caso 5, espectro integrado en la dirección, para todos los escenarios calibrados, comparados con el espectro de la medición (ADCP).

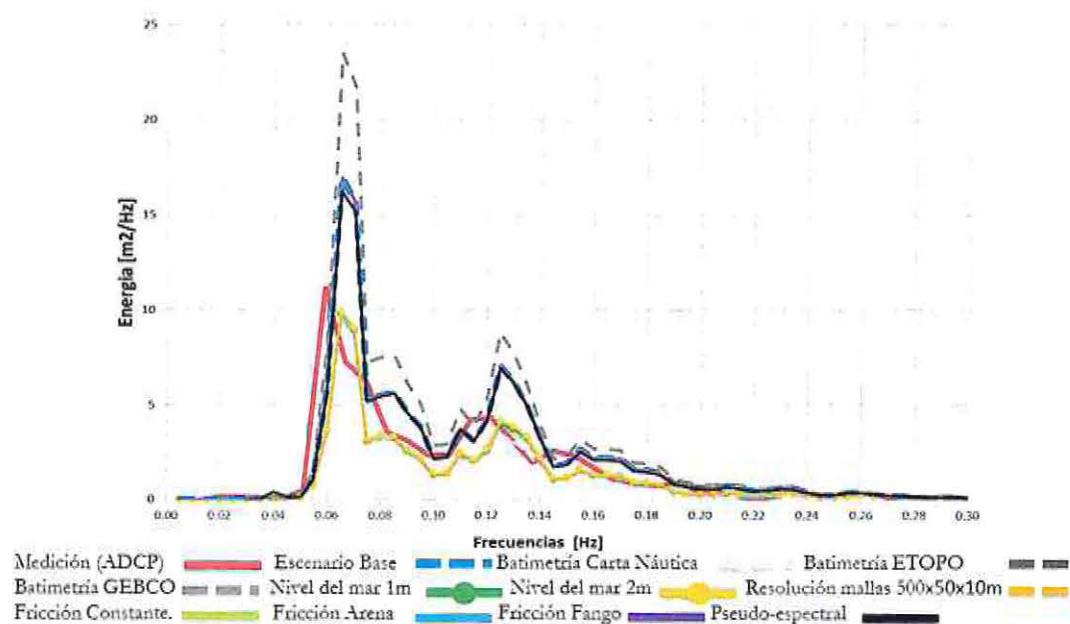


Gráfico 4-10: Caso 5, espectro integrado en la frecuencia, para todos los escenarios calibrados, comparados con el espectro de la medición (ADCP).

Tabla 4-5: Parámetros estadísticos y el sesgo con respecto a la medición, para todos los escenarios modelados en la calibración y medición (ADCP). Caso 5

Nº	Descripción	Hm0 [m]	Sesgo Hm0 [m]	Te [s]	Sesgo Te [s]	Dm [°]	Sesgo Dm [°]
--	Mediciones	2.84	-	11.10	-	247.24	-
1	Escenario base	3.21	0.37	10.60	-0.50	237.80	-9.45
2	Cartas Náuticas	2.32	-0.52	11.02	-0.08	249.14	1.90
3	ETOPO	1.29	-1.55	10.70	-0.41	269.12	21.88
4	GEBCO	3.66	0.81	10.80	-0.30	236.91	-10.34
5	Nivel del mar 1m	2.46	-0.38	10.62	-0.49	235.08	-12.16
6	Nivel del mar 2m	2.49	-0.36	10.58	-0.52	235.19	-12.05
7	Res. mallas 500x50x10m	2.41	-0.44	10.68	-0.43	238.29	-8.96
8	Fricción CTE.	3.21	0.37	10.60	-0.50	237.80	-9.45
9	Fricción Arena	3.21	0.37	10.60	-0.50	237.80	-9.45
10	Fricción Fango	3.21	0.37	10.60	-0.50	237.80	-9.45
11	Pseudo espectral	3.23	0.39	10.65	-0.46	239.86	-13.88

A partir del proceso de calibración realizado se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Al incluir en el modelo mareas de 1 y 2 m, los resultados presentan un patrón de compartimiento similar, subestimando H_{m0} con un error (sesgo) máximo de 0.39 m para el caso 2.
- La variación que incluye mallas más finas presentan resultados más pobres para H_{m0} , sin embargo en los casos 1, 2 y 5 los espectros muestran formas más cercanas a la medición.
- El desempeño del modelo es más deficiente cuando se utiliza la batimetría ETOPO en comparación con la Carta Náutica y GEBCO. Si bien, GEBCO tiene mejores resultados que ETOPO, esto solo es una cancelación de errores puntual, pues en el sector en estudio, el punto de extracción de oleaje fue modificado debido al desplazamiento existente en la línea de costa de aproximadamente 1,7km (Figura 4-7). Esto se explica ya que el modelo en general tiende a sobre estimar la altura del oleaje, efecto que se ve aminorado al modificar el punto de extracción de datos, que en el caso de GEBCO tuvo que cambiarse ya que la ubicación del ADCP quedaba en tierra.
- Al simplificar la propagación del oleaje mediante la metodología de transformación Pseudo espectral no se observan cambios significativos en los parámetros estadísticos. Sin embargo, el desempeño es más deficiente en la representación espectral y de T_e .
- Activar la fricción de fondo en el modelo no produce un impacto significativo en los resultados.
- El modelo tiene en general peores resultados para los parámetros T_e y D_m en comparación con H_{m0} . En general el desempeño en cuanto a la representación espectral es pobre.
- Suponiendo que los datos de las mediciones son confiables, al utilizar el escenario base con la metodología Pseudo espectral, los errores (sesgo) máximos producto de la modelación se estiman en 0.37m para H_{m0} , 2.5s en T_e y de 14° en la D_m .
- El modelo tiene un mejor desempeño con los parámetros espectrales de oleaje (H_{m0} , T_e y D_m) al utilizar el escenario base, Por otro lado ningún escenario de modelación es capaz de representar de manera adecuada las formas espectrales de los 5 casos seleccionados.

4.3 RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELO STWAVE

Producto del proceso de calibración se verificó que era conveniente y adecuado utilizar los modelos con sus parámetros de configuración por defecto, utilizando la metodología Pseudo espectral y datos batimétricos combinados entre sondeos realizados para el proyecto, cartas náuticas SHOA y datos globales GEBCO y ETOPO, utilizados en ese mismo orden jerárquico de acuerdo a su confiabilidad.

A continuación se presentan los resultados correspondientes a los errores encontrados para los parámetros H_{m0} , T_e y D_m .

El análisis estadístico del error se realiza en base al error relativo porcentual (Ecuación 17) y al valor absoluto de éste (Ecuación 18).

El análisis estadístico realizado corresponde a porcentajes de incidencia, diagramas de dispersión, promedios, medianas y percentiles.

En los Gráfico 4-11 y Gráfico 4-13, se presenta la incidencia del error relativo de las simulaciones para H_{m0} y T_e y también se muestran los diagramas de dispersión que contrastan los resultados de la modelación con los datos medidos (ADCP). (Gráfico 4-12 y Gráfico 4-14).

Las Tabla 4-6 y Tabla 4-7 muestran los parámetros estadísticos de los errores relativos porcentuales en la estimación de la altura significativa espectral y el periodo energético.

El Gráfico 4-15 muestra una comparación de los porcentajes de ocurrencia direccional, D_m .

Finalmente, la comparación de las series de tiempo de H_{m0} , T_e y D_m se presentan en el Gráfico 4-16.

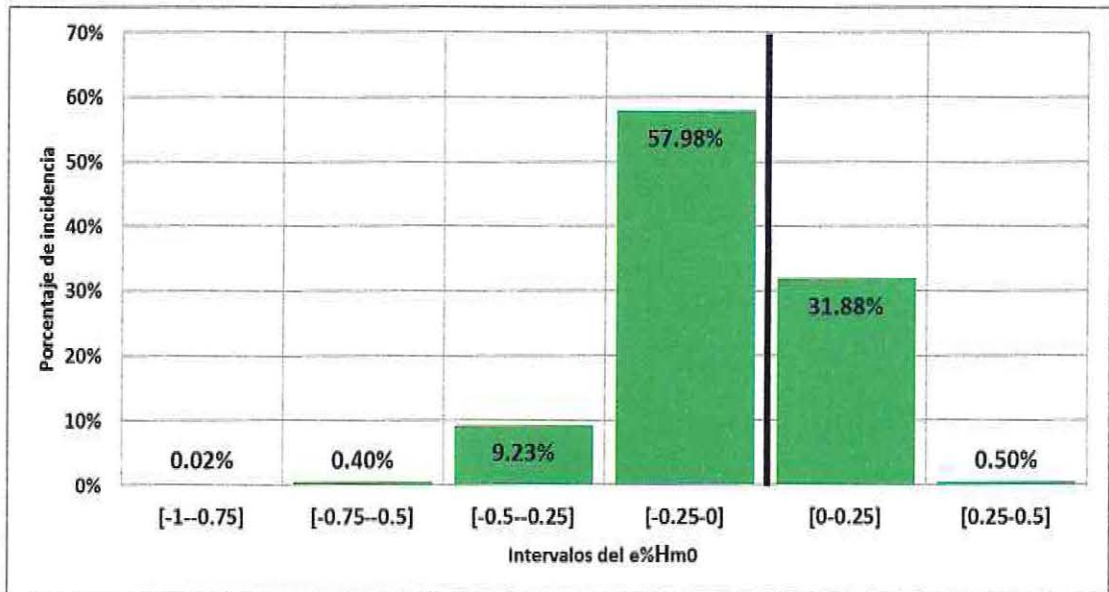


Gráfico 4-11: Porcentaje de incidencia del error porcentual (e% H_{m0}). La línea vertical negra indica el cero.

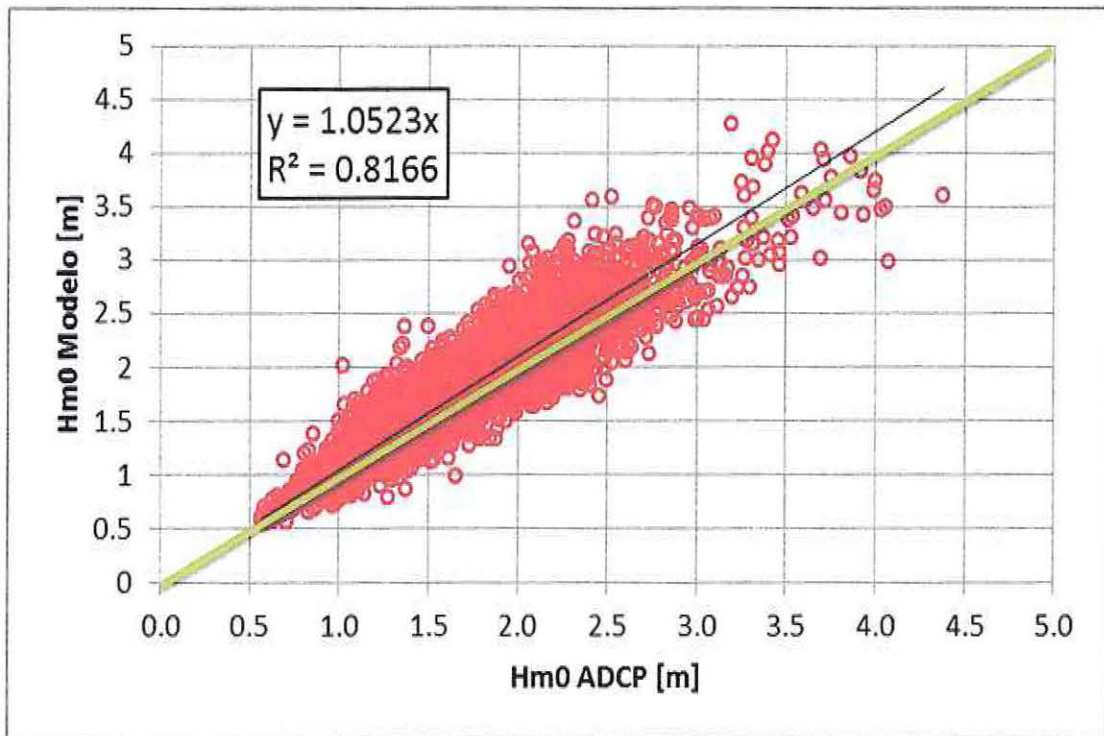


Gráfico 4-12: Gráfico de dispersión para H_{m0} ADCP (mediciones) y H_{m0} modelo. Línea negra y ecuación indican el ajuste lineal que pasa por cero. La línea verde indica la sub o sobrestimación de los datos al tener un ángulo de 45°

Tabla 4-6: Parámetros estadísticos de los errores porcentuales absolutos en la estimación de la altura significativa espectral, H_{m0} .

Parámetro	e% H_{m0}
e% H_{m0} máximo	41%
e% H_{m0} mínimo	-97%
e% H_{m0} promedio	-7%
mediana e% H_{m0}	-6%
percentil 5% e% H_{m0}	-31%
percentil 95% e% H_{m0}	15%
promedio e% H_{m0} $H_{m0}>3m$	4%
promedio e% H_{m0}	12%
mediana e% H_{m0}	10%
promedio e% H_{m0} $H_{m0}>3m$	10%
percentil 95% e% H_{m0}	31%

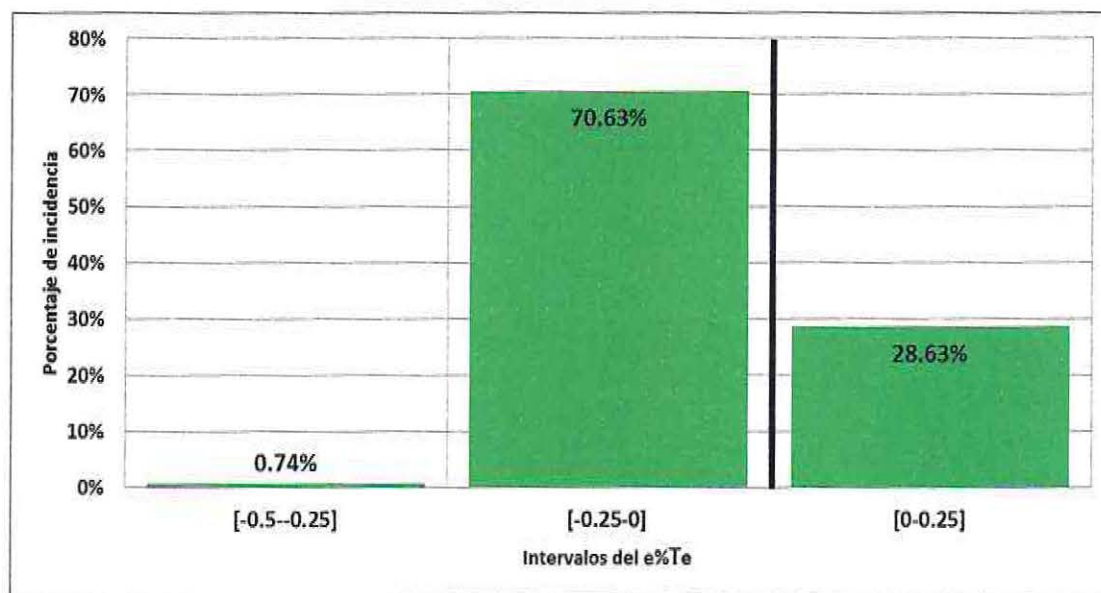


Gráfico 4-13: Porcentaje de incidencia del error porcentual (e% T_e). La línea vertical negra indica el cero.

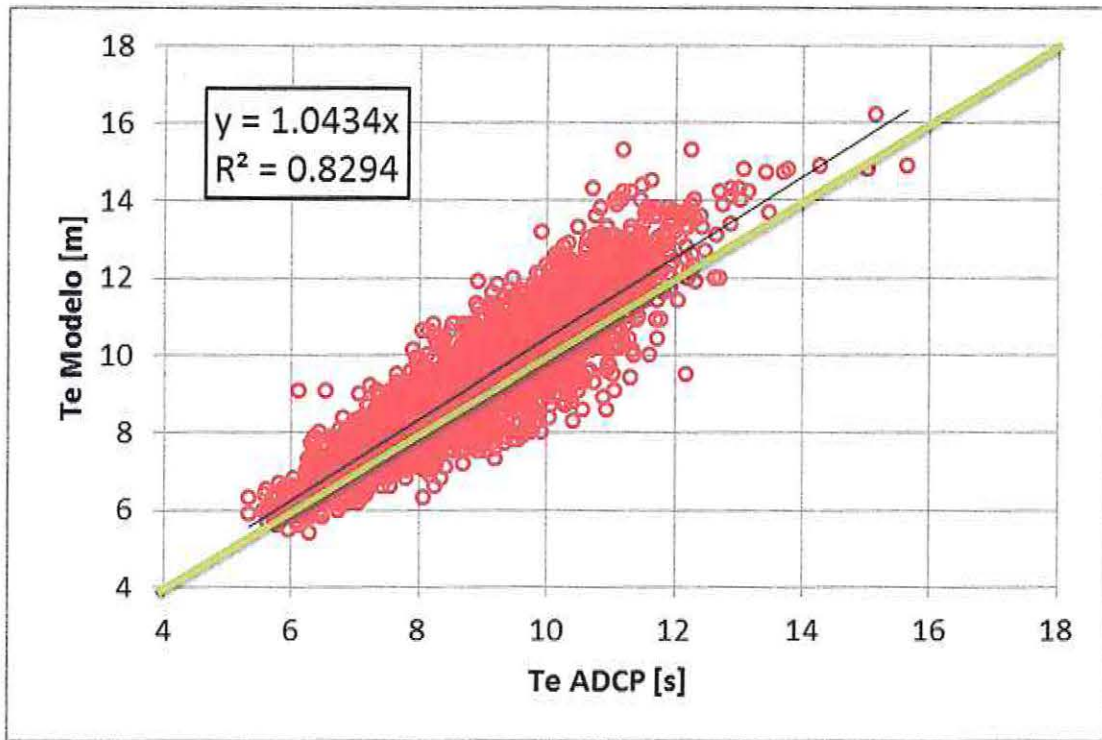


Gráfico 4-14: Gráfico de dispersión para T_e ADCP (mediciones) y T_e modelo. Línea negra y ecuación indican el ajuste lineal que pasa por cero. La línea verde indica la sub o sobrestimación de los datos al tener un ángulo de 45°

Tabla 4-7: Parámetros estadísticos de los errores porcentuales absolutos en la estimación del período energético espectral, T_e .

Parámetro	Error T_e
e% T_e máximo	22%
e% T_e mínimo	-49%
e% T_e promedio	-4%
mediana T_e e%	-4%
percentil 5% e% T_e	-17%
percentil 95% e% T_e	8%
promedio e% T_e $H_m0 > 3m$	-4%
promedio e% T_e	7%
mediana e% T_e	6%
promedio e% T_e $H_m0 > 3m$	7%
percentil 95% e% T_e	17%

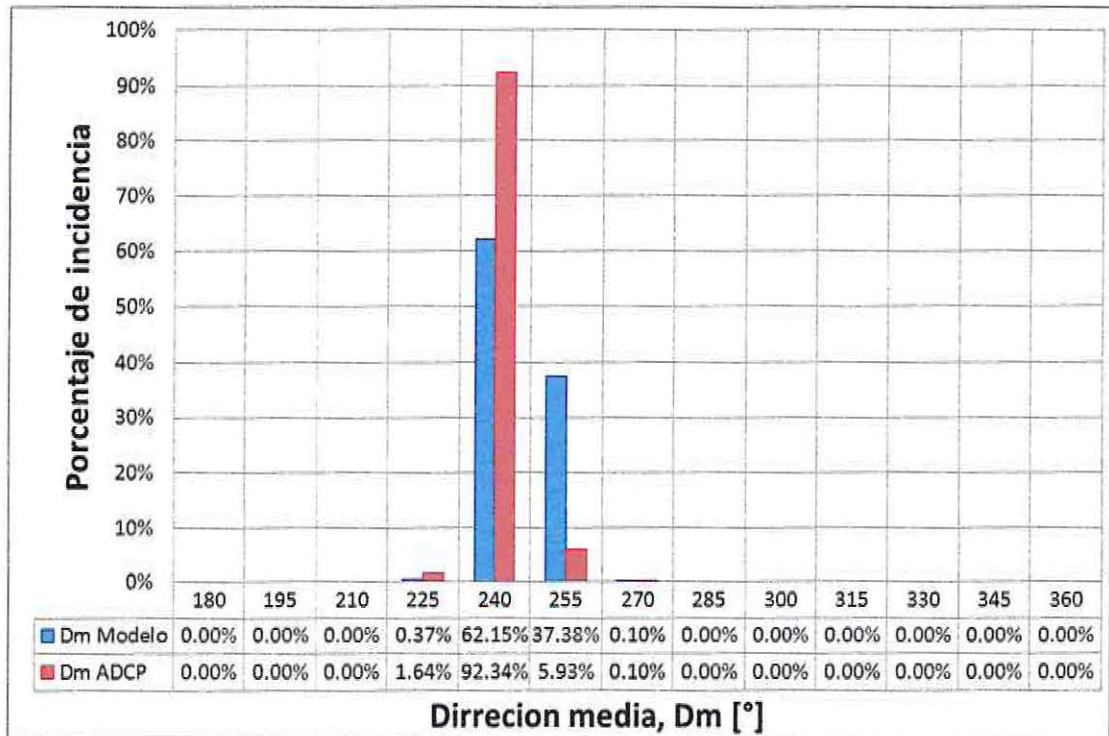


Gráfico 4-15: Porcentaje de incidencia, para D_m ADCP en rojo(mediciones) y D_m modelo en azul.

Tabla 4-8: Indicadores estadísticos del desempeño del modelo en la estimación de los parámetros estadísticos de oleaje.

	Hm0 [m]	Te [s]	Dm [°]
RMS	0.26	0.80	8.51
Skill	0.86	0.91	0.62
R²	0.81	0.82	-

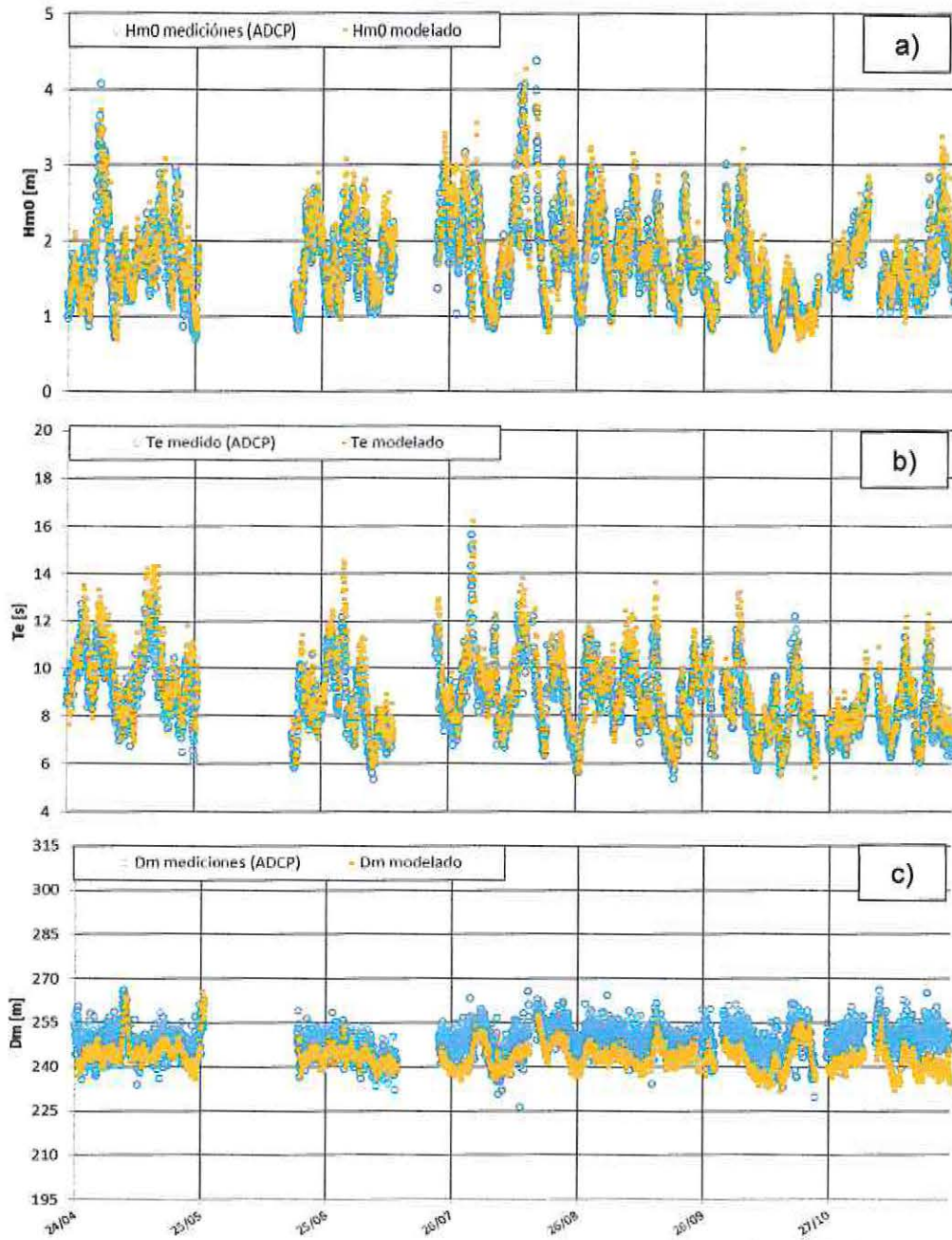


Gráfico 4-16: Series de tiempo de las mediciones (ADCP) vs lo modelado con caso Base: a) altura significativa espectral (H_{m0}). b) periodo energético (T_e). c) dirección media (D_m).

A partir del proceso de validación realizado se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- En la Gráfico 4-11 se muestra el porcentaje de incidencia del error relativo para la altura significativa espectral. Se observa que los datos modelados presentan un sesgo hacia los valores negativos con un 67.61% de incidencia, indicando que en promedio el modelo sobrestima el oleaje. Este sesgo aumenta en los periodos energéticos espectrales con un 71.37% de incidencia (ver Gráfico 4-13).
- Los diagramas de H_{m0} (Gráfico 4-12) y T_e (Gráfico 4-14) muestran coeficientes de correlación iguales a $R^2= 0.81$ y 0.82 , respectivamente. Además, las pendientes se aproximan a 1.0. Sin embargo lo modelado muestra una ligera sobrestimación aproximadamente de un 5% para ambos parámetros estadísticos.
- En la Tabla 4-6 se muestra que la mediana del error relativo absoluto $|e\%_{H_{m0}}|$ es de 10% y que el 95% de los casos el error relativo absoluto es de 31%.
- El análisis del error en el período energético (Tabla 7-1) se presenta que la mediana del error relativo absoluto es de un 6% y que el 95% de los casos el error relativo absoluto es de un 17%.
- El Gráfico 4-15 muestra una comparación de los porcentajes de ocurrencia direccional. Se observa que las direcciones medias no son reproducidas de forma adecuada a través del modelo, pues, aproximadamente el 30% de los datos modelados presentan diferencias cercanas a 20° .
- La comparación visual de las series de tiempo en el Gráfico 4-16 , indica que el modelo es capaz de reproducir de manera aceptable los distintos estados de mar, incluso los eventos más energéticos.
- Con los resultados expuestos en la Tabla 4-8 es posible afirmar que para H_{m0} y T_e el modelo es capaz de representar de buena manera las mediciones (Skill o habilidad de pronóstico sobre 0.8). Sin embargo los resultados de la dirección media no son tan alentadores ($RMS=8.51^\circ$), por lo que en investigaciones futuras se recomienda calibrar STWAVE solo para las direcciones.

5. CONCLUSIONES

Luego de realizar un análisis de distintas bases de datos de batimetrías, calibrar el modelo STWAVE y finalmente verificar los resultados del modelado se concluye que:

- Relativo al Proyecto Undimotriz

El trabajo realizado cumplió con lo requerido en la calibración y validación del modelo STWAVE dentro de las restricciones de tiempo y recursos humanos, establecidos en el Proyecto Undimotriz y fue fundamental para el desarrollo en dicha etapa.

- Relativo al Análisis de Batimetría

El uso de las batimetrías GEBCO, para el modelado numérico del oleaje se debe restringir solo a aguas profundas ya que, está presenta diferencias de hasta 150 m cerca de la línea de costa, respecto a las cartas náuticas del SHOA. Además presenta un desfase hacia el Oeste de aproximadamente 1.7 Km lo que explicaría las grandes diferencias existentes.

La batimetría ETOPO presenta menores diferencias que GEBCO cerca de la línea de costa con diferencias máximas de hasta 50 m.

- Relativo a la Calibración

Se determinó que el escenario Base es el que logra representar de mejor manera los parámetros estadísticos de oleaje con una diferencia (sesgo) máxima en el caso 5 de 0.37 m para la altura significativa espectral (H_{m0}), correspondiente al 4.01% de los datos, para el periodo energético (T_e) la diferencia máxima es de 2.51 s correspondiente al 1.96% de los casos y para la dirección media (D_m) el caso 3 tiene la mayor diferencia con 13.59° , correspondiente al 43.15% de los datos. Sin embargo se debe mencionar que ningún escenario logro representar de forma adecuada los 5 casos seleccionados.

La metodología Pseudo espectral respecto a la Full spec tienen diferencias poco significativas en comparación con los demás escenarios. Para lograr cumplir con los tiempos establecidos en el Proyecto Undimotriz se utilizó el escenario Base con la metodología Pseudo espectral ya que, esta afecta muy poco en los resultados y reduce los tiempos de simulación enormemente.

- Relativo a la Validación

Al comparar las mediciones con los parámetros estadísticos modelados (H_{m0} , T_e y D_m), para un periodo de tiempo de 170 días con un total de 4032 estados de mar. Se determina que, el modelo es capaz de modelar de buena manera estos parámetros, pues para la altura significativa espectral y el periodo energético el error es de un 5% aproximadamente, para la dirección media el error es de aproximadamente el 30% de los datos modelados ya que, tienen diferencias de aproximadamente 20° , respecto de las mediciones.

6. RECOMENDACIONES

A raíz de este estudio surgen una las siguientes recomendaciones que apuntan a mejorar el desarrollo del modelado numérico del oleaje desde aguas profundas hacia la costa.

Existen 3 aspectos fundamentales para modelar el oleaje desde aguas profundas hacia la costa:

- Se debe tener un dominio del modelo de oleaje a usar, tal que este conocimiento permita al especialista abordar cada problema que se presente durante la propagación del oleaje.
- Se debe realizar un análisis batimétrico detallado, que logre disminuir la incertidumbre del modelado producto de los efectos del fondo marino.
- Se debe contar con la mejor calidad posible de mediciones de oleaje tanto en aguas profundas como dato de entrada para el modelo como también en aguas someras o intermedias para realizar la verificación de los resultados.

Se recomienda aplicar la siguiente regla para completar una malla batimétrica:

- Preferir levantamientos batimétricos.
- Completar la información faltante con datos de las Cartas Náuticas.
- Completar la información faltante utilizando las batimetrías GEBCO en profundidades mayores a 500 m y ETOPO en profundidades inferiores.
- Digitalizar la línea de costa utilizando la información de las cartas náuticas apoyada con fotografías aéreas para el caso de rocas e islotes.

Se Recomienda aplicar el modelo STWAVE en un escenario que considera:

- Fricción de fondo desactivada.
- Nivel de marea =0 NRS.
- Resolución de las mallas (500x100x25m).
- Utilizar una metodología de transformación de oleaje ya que esta afecta muy poco los resultados de los parámetros H_{m0} , T_e y D_m y reduce los tiempos de simulación enormemente.

Para este estudio el error de la medición no fue cuantificado en aguas profundas ni en aguas intermedias. El error medio según Rørbæk y Andersen

(2000) puede ser del orden del 5% para H_{m0} y T_e , aunque otros estudios (ej. Hoitink y Schroevers, 2004) muestran que puede ser de hasta un 20% dependiendo de la configuración de los equipos. En estudios futuros, es recomendable realizar mediciones en el mismo punto con dos instrumentos similares o diferentes para estimar las diferencias entre sus resultados. Adicionalmente se recomienda utilizar una metodología Pseudo espectral de oleaje ya que esta afecta muy poco en los resultados y reduce los tiempos de simulación significativamente.

7. REFERENCIAS

Batimetría ETOPO1 (Global Relief Model). Disponible en web: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global> (fecha visita: Octubre 2011).

Batimetría GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans). Disponible en web: <http://www.GEBCO.net> (fecha visita: Octubre, 2013).

Cartas de Navegación (síntesis para estudiantes). Disponible en web: http://www.shoa.cl/Vaul/Vaul/meteonavegacion/Cartas_de_Navegacion.f (fecha visita: Octubre, 2013).

Dominguez J., (2011). Analysis of spectral wave energy transfer methodologies from deep to shallow water. Trabajo de título, Pontificia Universidad Católica de Chile. (24-40.pp.)

Gallagher E., Elgar S., y Guza R., (1998). Observations of sand bar evolution on a natural beach, J. Geophys. (3203–3215pp).

Goda Y., (2000). Random seas and design of maritime structures. Advances series on ocean engineering, vol 15, World Scientific Publishing Co, (27-29;37pp).

Holthuijsen L. H., (2007). Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge University Press. (387pp.).

SHOA., (2005). Publicación N° 3201. Instrucciones oceanográficas N° 1: Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, disponible en web <http://www.shoa.cl/servicios/descargas/pdf/pub3202.pdf> (fecha visita: marzo 2014).

Hoitink A., Schroevers M. 2004. Validation of ADCP surface wave measurements in a shelf sea". OCEANS '04. MTTTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04 (Volume:3).

Kamphui J., (2000). Introduction to Coastal Engineering and Management. (21-29.pp)

McKee S., et all., (2001). STeady-state spectral WAVE model User's Manual for STWAVE, (Version: 3.0)

Lucero R., Catalán P., (2013). Selección de climas de oleaje mediante métodos de agrupamiento.

Maseel, S., (1996). Ocean wave surface: Their physics and prediction. Advance series on ocean engineering. Volumen 11. (471.pp).

Monsalve., (2010). Desarrollo e implementación de un modelo de transferencia espectral de oleaje en bahía Valparaíso. Trabajo de título, Universidad de Chile. (20-23.pp).

Nicolau del Roure, F. (2006). Comparación metodológica de transferencias de oleaje. Trabajo de título, Universidad de Chile. (18-22.pp)

Silva R., (2005). Análisis y descripción estadística de oleaje. Serie de docencia SD/49, Instituto de ingeniería UNAM, Universidad Nacional Autónoma de México, disponible en web previa inscripción. (3-13.pp)

Rodríguez G., (2006), Situación energética que enfrenta Chile. Disponible en web: <http://www.eiq.cl/pproust/cyt/chile-energia.pdf> (fecha visita: Noviembre, 2013).

Rørbæk K., Andersen H. (2000). Evaluation of Wave Measurements with an Acoustic Doppler Current Profiler. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition.

Pinheiro L., Fortes C., Teixeira P. y Walkley M.A. (2010). Bouss3w nonlinear wave propagation model. Bottom friction implementation. (7-8.pp).

8. **ANEXO 1: CAMPOS DE OLAJE**

A continuación se presentan los campos de oleaje para la altura de ola significativa espectral y dirección media del oleaje para los casos seleccionados para la calibración.

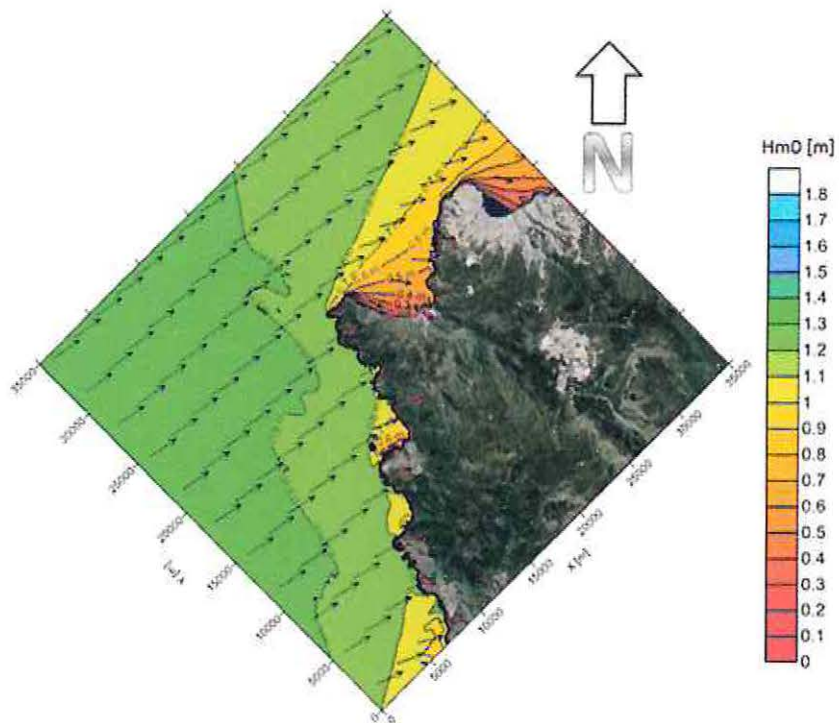


Figura 8-1: Campo de Oleaje modelado para el caso 1: 2012/05/06 07:00.
Malla 2, orientación SW

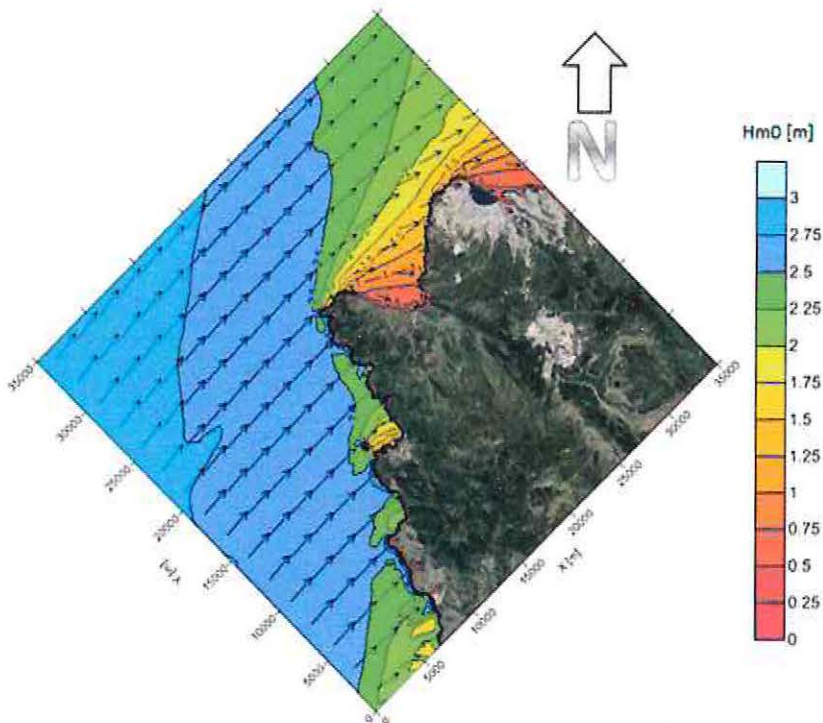


Figura 8-2: Campo de Oleaje modelado para el caso 2: 2012/05/13 16:00.
Malla 2, orientación SW

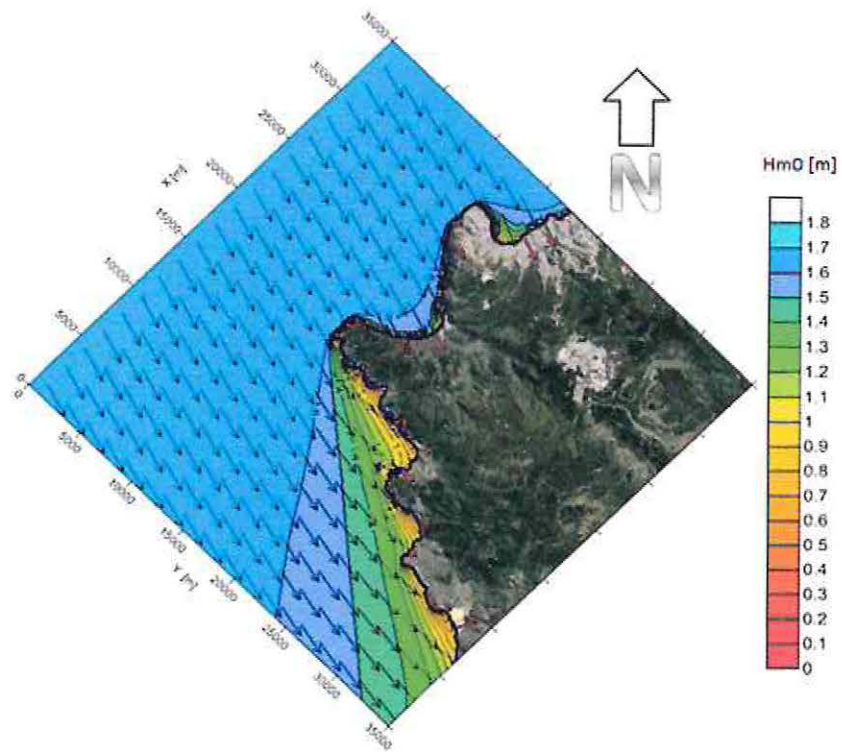


Figura 8-3: Campo de Oleaje modelado para el caso 3: 2012/05/26 00:00.
Malla 2, orientación NW

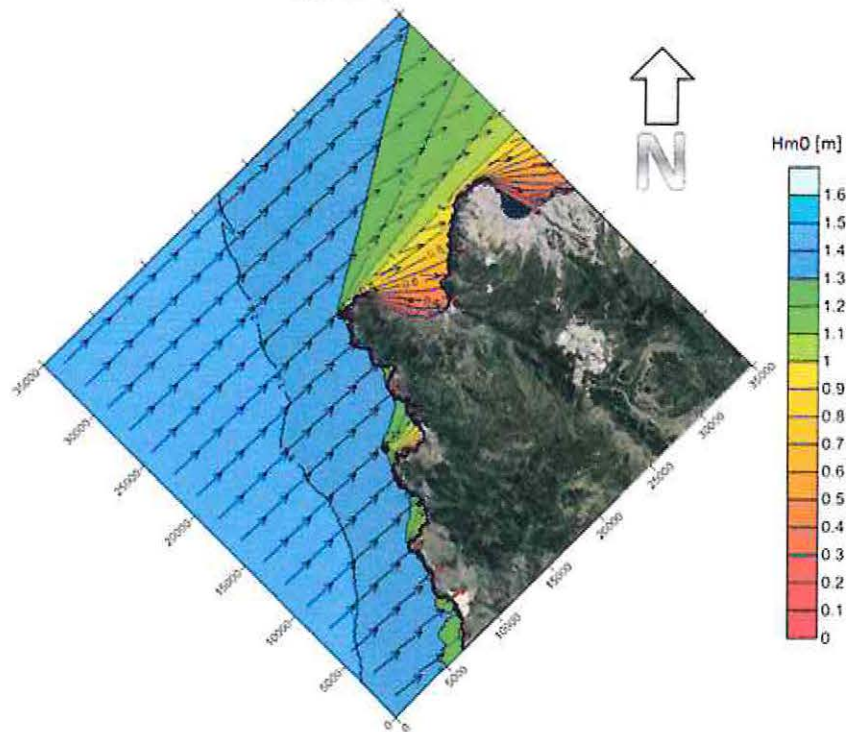


Figura 8-4: Campo de Oleaje modelado para el caso 4: 2012/07/08 14:00.
Malla 2, orientación SW

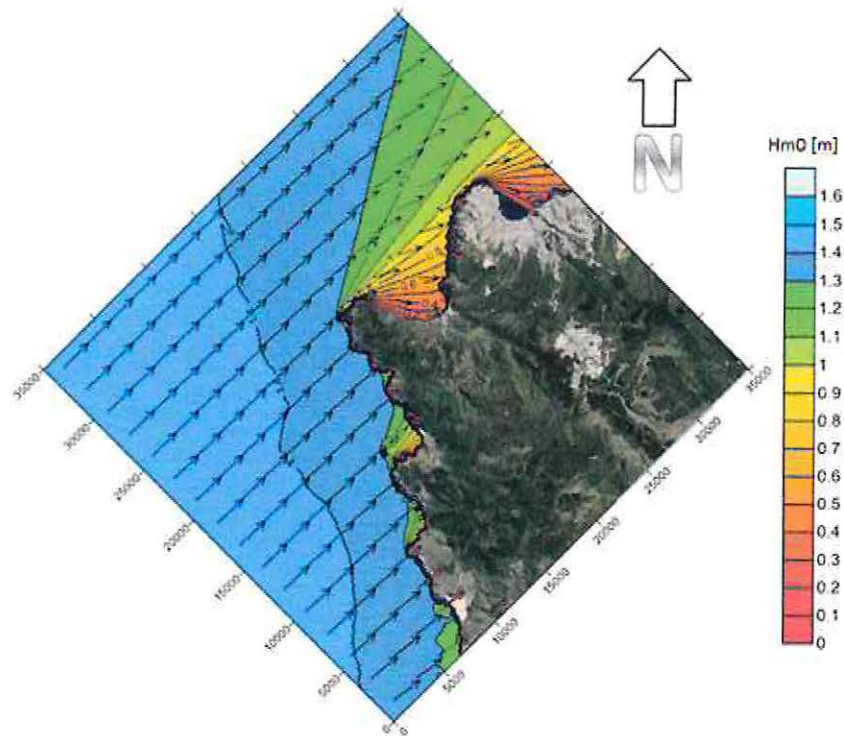


Figura 8-5: Campo de oleaje modelado para el caso 5: 2012/07/25 02:00.
Malla 2, orientación SW

9. **ANEXO 2: VALIDACIÓN DE STWAVE**

En este anexo primero se presentan de manera gráfica, las matrices de transformación del oleaje utilizadas para el modelado de los estados de mar desde aguas profundas hacia el sitio en estudio.

Luego, se presentan rosas de oleaje, tablas de incidencia y curvas de no excedencia del oleaje modelado en la validación y el oleaje medido en terreno. (ADCP).

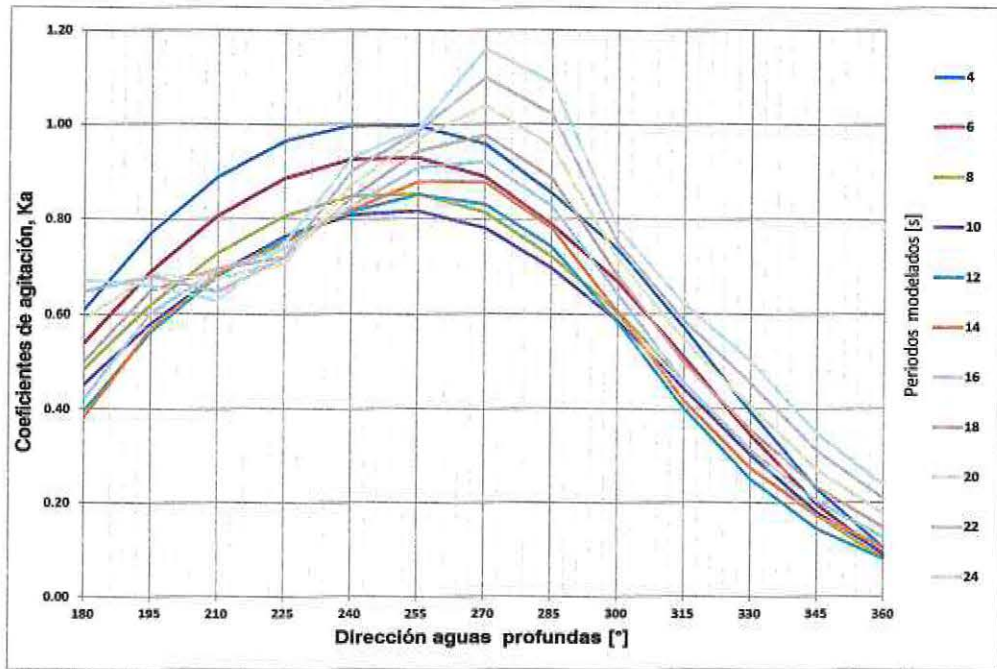


Figura 9-1: Coeficiente de asomeramiento según periodo y dirección de aguas profundas.

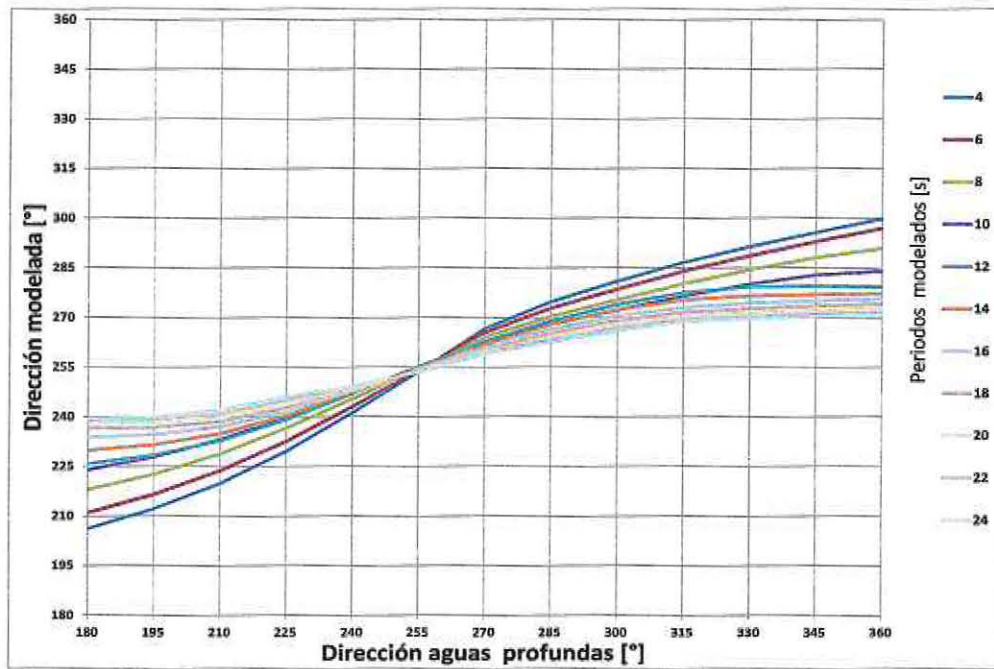


Figura 9-2: Cambio en la dirección según periodo y dirección de aguas profundas.

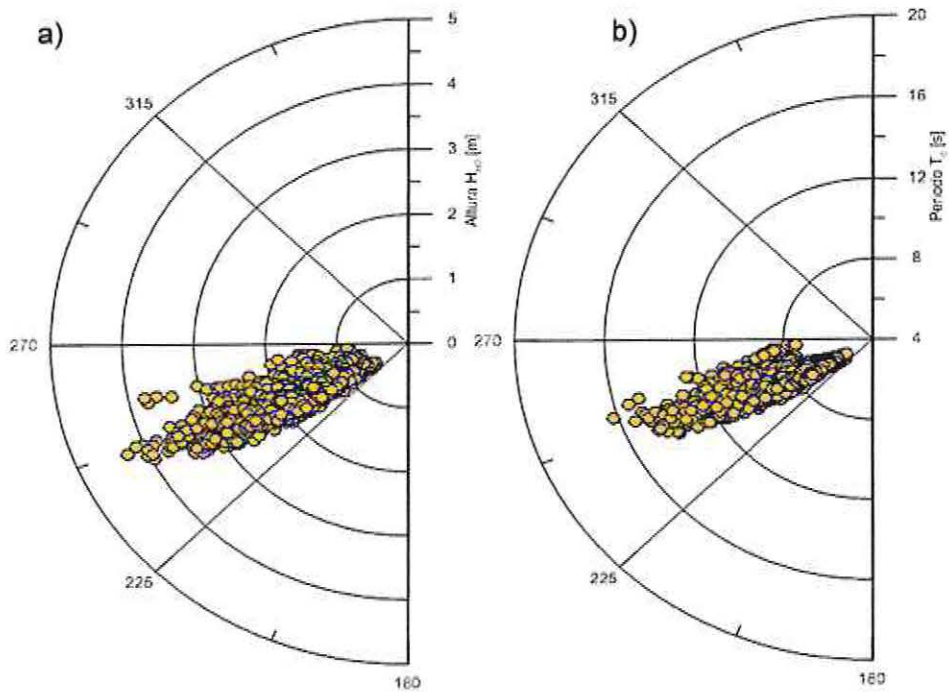


Figura 9-3: Rosas del oleaje medido (ADCP): a) dispersión direccional de altura de ola de H_{m0} . b) dispersión direccional del periodo energético T_e .

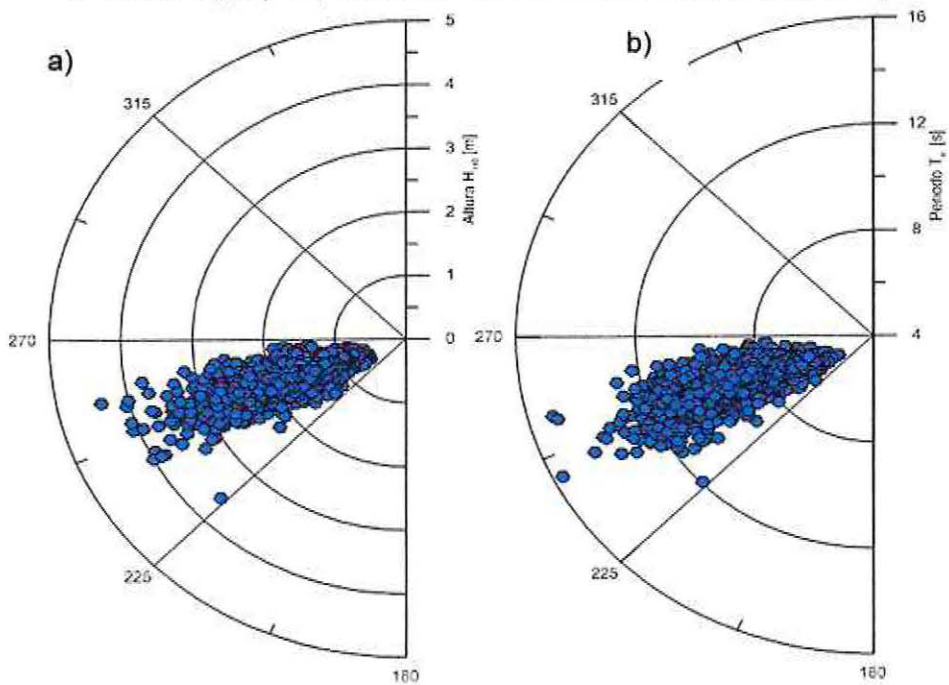


Figura 9-4: Rosas del oleaje modelado: a) dispersión direccional de altura de ola de H_{m0} . b) dispersión direccional del periodo energético T_e .

Tabla 9-1: Tabla de incidencia. Altura significativa espectral H_{m0} vs dirección media D_m para la estadística del oleaje de las mediciones (ADCP)

H_{m0} [m]	Dirección D_m [°]				Total	Total [%]
	<180	225-240	240-255	255-270		
0.5-1		23	245	24	292	7.24%
1-1.5		102	1110	97	1309	32.47%
1.5-2		26	1216	113	1355	33.61%
2-2.5		11	707	86	804	19.94%
2.5-3			182	22	204	5.06%
3-3.5		1	39	8	48	1.19%
3.5-4		1	12	3	16	0.40%
4-4.5			2	2	4	0.10%
Total	0	164	3513	355	4032	
Total [%]	0.00%	4.07%	87.13%	8.80%		

Tabla 9-2: Tabla de incidencia. Altura significativa espectral H_{m0} vs dirección media D_m para la estadística del oleaje para el oleaje modelado.

H_{m0} [m]	Direcciones [°]				Total	Total [%]
	<180	225-240	240-255	255-270		
0.5-1		62	187	18	267	6.62%
1-1.5		260	749	25	1034	25.64%
1.5-2		382	1020	17	1419	35.19%
2-2.5		134	699	2	835	20.71%
2.5-3		63	311	4	378	9.38%
3-3.5		4	71	2	77	1.91%
3.5-4			15	3	18	0.45%
4-4.5			4		4	0.10%
Total	0	905	3056	71	4032	
Total [%]	0.00%	22.45%	75.79%	1.76%		

Tabla 9-3: Tabla de incidencia. Periodo energético espectral T_e vs. dirección media D_m para la estadística del oleaje de las mediciones (ADCP)

T_e [s]	Direcciones [°]				Total	Total [%]
	<180	225-240	240-255	255-270		
4-6		11	31		42	1.04%
6-8		95	1261	74	1430	35.47%
8-10		36	1562	201	1799	44.62%
10-12		21	618	75	714	17.71%
12-14		1	37	5	43	1.07%
14-16			4		4	0.10%
Total	0	164	3513	355	4032	
Total %	0.00%	4.07%	87.13%	8.80%		

Tabla 9-4: Tabla de incidencia. Periodo energético espectral T_e vs. dirección media D_m para la estadística del oleaje modelado.

T_e [s]	Direcciones [°]				Total	Total [%]
	<180	225-240	240-255	255-270		
4-6		27	2		29	0.72%
6-8		539	633	15	1187	29.44%
8-10		284	1362	44	1690	41.91%
10-12		55	819	9	883	21.90%
12-14			215	3	218	5.41%
14-16			24		24	0.60%
16-18			1		1	0.02%
Total	0	905	3056	71	4032	
Total %	0.00%	22.45%	75.79%	1.76%		

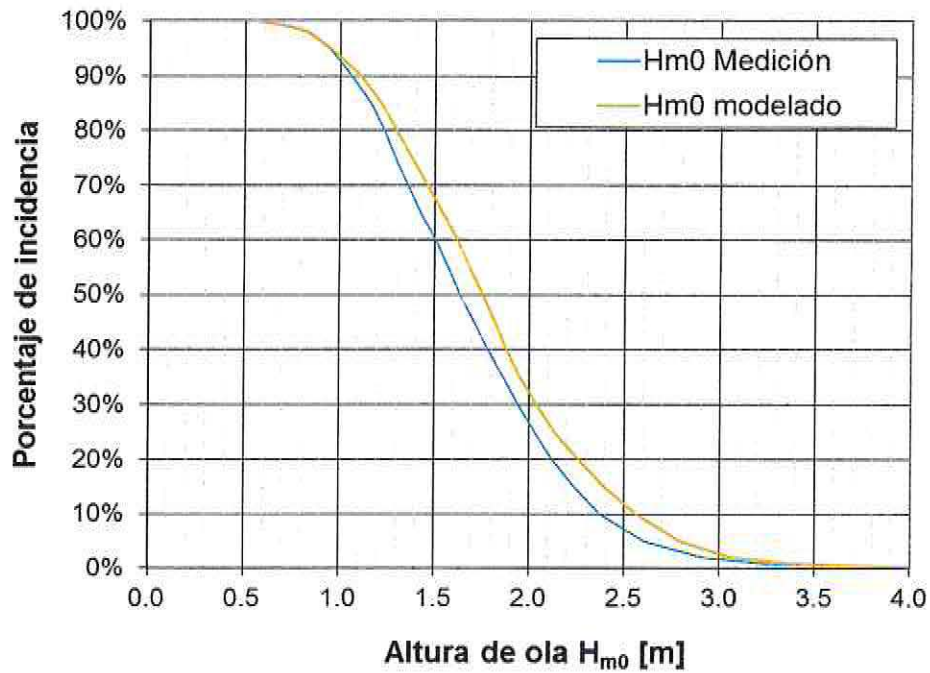


Figura 9-5: Curvas de excedencia de altura de ola H_{m0} simulada y medida en terreno (ADCP).

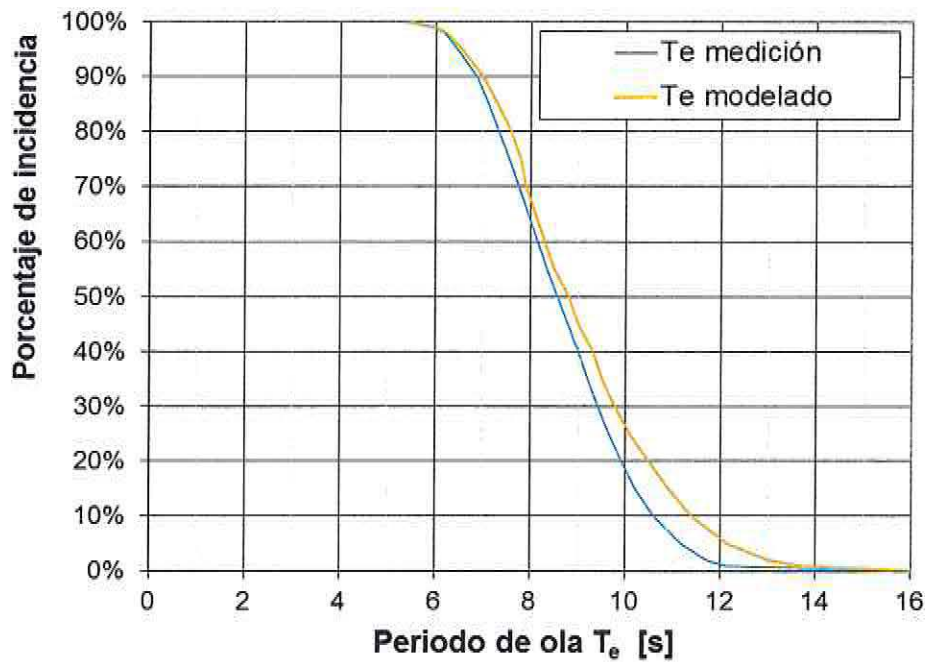


Figura 9-6: Curvas de excedencia del periodo energético T_e simulada y medida en terreno (ADCP).