



**UNIVERSIDAD DE VALPARAISO**  
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y DE RECURSOS NATURALES  
INGENIERIA CIVIL OCEANICA

**“CARACTERIZACION DE OLEAJE E HIDRODINAMICA PARA LA OPERATIVIDAD  
EN PLAYA CALETA ABARCA, V REGION CHILE”**

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico

**JUAN CARLOS MERCADO CUELLAR**

Profesor Guía: Arnaldo Torres Contador

Profesor Co-Guía: Mario Cáceres Muñoz

Marzo 2010



# Presentación

El presente estudio de pre-grado es el fruto del trabajo de investigación para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico en el área hidráulica marítima; cuyo investigador principal y responsable es Juan Carlos Mercado Cuellar.

Juan Carlos Mercado Cuellar  
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería

Arnaldo Torres Contador  
Meteorólogo, Mag. en Ingeniería y Tecnología Ambiental

Mario Cáceres Muñoz  
Doctor of Philosophy y Mag. Ccias. mc. Oceanografía.

*La presente investigación se escribió en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X...*



## Aprobación

“CARACTERIZACION DE OLAJE E HIDRODINAMICA PARA LA OPERATIVIDAD EN PLAYA CALETA ABARCA, V REGION CHILE”

JUAN CARLOS MERCADO CUELLAR

### COMISION REVISORA

### CALIFICACIONES

*Nota*

*Firma*

Arnaldo Torres Contador  
Gerente  
MetOcean Solutions Chile Ltda.  
Profesor Guía

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Mario Cáceres Muñoz  
Profesor Adjunto, Universidad de Valparaíso  
Profesor Co-Guía

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Matías Quezada Labra  
Profesor Universidad de Valparaíso  
Baird & Associates S.A  
Miembro de Comité Memoria

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Viña del Mar, Marzo 2010.



## **Declaración**

Este trabajo o alguna de sus partes no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual del presente trabajo 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 propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a sus derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

Juan Carlos Mercado Cuellar  
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería



## Agradecimientos

Agradezco a Dios, creador de la madre naturaleza que nos acoge día a día en su belleza existencial. Entregando un cuerpo de agua llamado mar, que me inspira en cada instante de tiempo, a seguir amando el entorno natural

Mi amada familia en especial a mis padres Rosa Marisol y Juan Carlos, que supieron guiarme en una entorno confuso de opciones y decisiones que algunos le llaman vida. Gracias por darme Educación y Valores, herramientas fundamentales para comprender el entorno y de lo que realmente persigo. Gobernar es Educar...

Al conjunto de notas musicales que se pasean con ritmos atrayentes, que hipnotizan mi cuerpo que hace nada más que bailar y disfrutar sin pensar, conocida como Funk o música de sentir el entorno para seguir avanzando en la realidad.

A mi querida novia humanista Evelyn Andrea, que fue importante en el renacer de poder amar y ver la vida color rosa, en un palpitar de dos corazones en que me enseñó que  $1+1$  es igual 1. Destacando que te debo muchos besos, por cumplir un papel fundamental en la estructura de la presente investigación.

Si bien a esta persona no le puedo deber besos, estaré agradecido toda la vida por cumplir un rol fundamental en la realización del estudio, hablo del Maestro Mario Cáceres Muñoz, que semana a semana me guío para cumplir la metas propuestas.

Agradecer al dúo dinámico Arnaldo Torres y en especial a mi compadre Christopher Sáez, por todo el tiempo invertido en la realización del estudio y a lo compartido en lo personal.

Por el tiempo invertido en lo académico, como por lo ayudado en problemas personales, al Profesor y amigo Matías Quezada. De gran exigencia, y como no olvidarlo si fue el único que me mando a examen durante los años de carrera, haciéndome acordar lo que realmente puedo entregar.

Si bien, he agradecido hasta el momento a los que en gran medida contribuyeron directamente al trabajo presente. Existe un grupo de personas en la Universidad de Valparaíso que fueron importantes en mi crecimiento personal y visión de vida, los que no he querido dejar de nombrar. A los Académicos: Pedro Delgado, Hernán Vergara, René Astudillo, Rubén Castro, Felipe Casselli, Manuel Contreras, Marcelo Baeza e Ignacio Poblete. Sin olvidar a las bibliotecólogas y secretarías; Pamela, Jeanette, Jacqueline y Marjorie.

A todo la comunidad oceánica por las vibras positivas que daban color a las salas de clases y pasillos. En especial a mis compañeros Ivan Rojas, Patricio Opazo, Cristian Santander, Francisco Molteni,



María José Gangas, Richard Pereira, Juan Pablo Jorquera, Alejandro Vera, Eduardo Monsalve y Mauricio Molina (M&M). Y al amigo que se perdió en las telarañas del amor Rodrigo Peña.

Finalmente dar las gracias a Patricio Winckler, por las mejoras que provocó en el perfil del alumno de la carrera Ingeniería Oceánica, entregando gran parte de su tiempo a tal contribución.

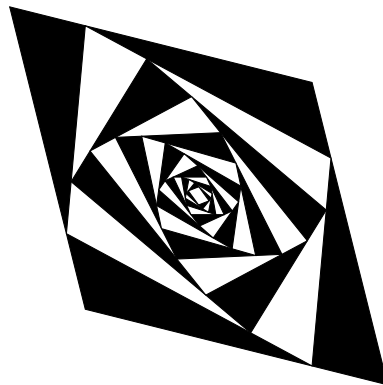
Juan Carlos Mercado Cuellar.  
Marzo 2010

*Valparaíso que me diste la virtud de admirar el mar y su belleza, que en noches bohemias me enseñaste lo que era la vida, tristeza, felicidad, pobreza y riqueza, y por qué no filosofía de vida en tierra de versos enloquecida entre cerros acoplados junto al mar, creador de versos en un vaivén de ir y venir...*



*“La teoría dice mucho,  
Pero en realidad no nos acerca  
en absoluto a los secretos del Viejo.  
Sea como fuese, yo estoy convencido  
de que Dios no juega a los dados”*

*Albert Einstein.*



*“Tu complejidad no lineal,  
es lo que me hace desear,  
desear tu conocimiento intenso radial,  
un día vuelves y vas pero sigues estando acá,  
tu infinitud distante me hace pensar,  
que la vida es bella por la magnitud que me muestras al pasar,  
tal vez algún día te logre entender de verdad,  
sino me quedara la nostalgia de vivir toda una vida admirándote al pasar.”*

JCMC.



## Resumen

La presente investigación tuvo por finalidad identificar áreas seguras y peligrosas para el nado de los bañistas, en función de los parámetros de ola y corriente estudiados.

El estudio se realizó mediante la propagación de olas y corrientes, con diversos modelos que logran obtener resultados de distribución de estas propiedades en la zona de estudio. Se realizó una primera validación de los resultados, comparándolos con los datos *in situ* de corriente medidos en el lugar de estudio.

Los datos *in situ* se obtuvieron mediante un correntómetro y un ADCP remolcado, los cuales se utilizaron para validar las magnitudes y direcciones. La implementación numérica que se desarrolló, aproximó de manera aceptable el campo de magnitudes de corrientes observado.

Se concluye que en gran parte del año, la playa Caleta Abarca en todas sus áreas es operable o apta para el baño, en función de los parámetros en estudio, especialmente en la temporada de Verano. Los resultados obtenidos son una primera aproximación respecto a la operatividad de Caleta Abarca, dado que en la investigación se utilizó solo un año de datos de oleaje.



## Abstract

*The aim of this study is to identify both safe and hazardous areas for swimmers in relation to the distribution of wave and current fields.*

*The study was developed by means of wave and current propagation models that show field distributions of these properties. A first validation of the results was obtained by comparing model hydrodynamic results with measured in situ current data.*

*In situ data was obtained by means of a currentmeter and a towed ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) which were used for validating current magnitudes and directions in the study area. Numeric implementation retrieved fair current approximations.*

*The conclusion is that most of the year Caleta Abarca beach is safe or suitable for swimming in all its areas, based on the studied properties, especially during the summer season.*



# Contenido

<b>Presentación</b>	<b>i</b>
<b>Aprobación</b>	<b>ii</b>
<b>Declaración</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>iv</b>
<b>Resumen</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>viii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1-1</b>
<b>2 Objetivos</b>	<b>2-1</b>
2.1 General . . . . .	2-1
2.2 Específicos . . . . .	2-1
<b>3 Marco teórico</b>	<b>3-1</b>
3.1 Oleaje . . . . .	3-1
3.1.1 Generalidades . . . . .	3-1
3.1.2 Teoría de olas . . . . .	3-3
3.2 Caracterización estadística del oleaje . . . . .	3-3
3.2.1 Corto plazo . . . . .	3-3
3.2.2 Mediano Plazo . . . . .	3-4
3.2.3 Largo plazo . . . . .	3-4
3.3 Oleaje espectral . . . . .	3-5
3.3.1 Definición . . . . .	3-5
3.3.2 Modelos espectrales . . . . .	3-5
3.3.3 Dispersión direccional . . . . .	3-7
3.3.4 Parámetros espectrales . . . . .	3-7
3.4 Propagación de oleaje . . . . .	3-9
3.4.1 Fenómenos asociados . . . . .	3-9
3.4.1.1 <i>Shoaling</i> (asomeramiento) . . . . .	3-9
3.4.1.2 Refracción . . . . .	3-9
3.4.1.3 Reflexión . . . . .	3-9
3.4.1.4 Difracción . . . . .	3-10
3.4.1.5 Rotura . . . . .	3-10
3.4.2 Métodos de propagación . . . . .	3-11
3.4.2.1 Parámetros de resumen . . . . .	3-11
3.4.2.2 Cuasi purista . . . . .	3-11



3.4.2.3	Cuasi purista modificado	3-12
3.4.2.4	Purista	3-12
3.4.3	Transferencia espectral	3-12
3.5	Modelos de propagación de oleaje	3-12
3.5.1	Generalidades	3-12
3.5.2	Modelo Parabólico	3-13
3.5.3	Modelo Elíptico	3-14
3.6	Hidrodinámica de playas	3-15
3.6.1	Corriente longitudinal	3-16
3.6.2	Corriente de retorno ( <i>rip current</i> ).	3-17
3.6.3	Corriente de resaca	3-18
3.7	Modelos de circulación costera	3-18
3.7.1	Generalidades	3-18
3.7.2	Modelado de las Corriente Costeras	3-19
3.8	Aspectos Biomecánicos en el nado	3-20
3.8.1	Flotación	3-21
3.8.2	Resistencia	3-21
3.8.3	Propulsión	3-22
<b>4</b>	<b>Metodología</b>	<b>4-1</b>
4.1	Materiales	4-1
4.1.1	Cartas náuticas	4-1
4.1.2	Base de datos de oleaje	4-2
4.1.3	Software	4-2
4.1.4	Sistema de procesamiento	4-3
4.1.5	Correntómetro	4-3
4.1.6	ADCP ( <i>Acoustic Doppler Current Profiler</i> )	4-3
4.1.7	CTD	4-4
4.2	Diseño metodológico	4-5
4.2.1	Caracterización de aguas profundas	4-5
4.2.2	Implementación numérica de aproximación ( <i>Stwave</i> )	4-5
4.2.3	Caracterización de la zona de transición	4-7
4.2.4	Implementación numérica zona de estudio (WAPO-COCO)	4-8
4.2.5	Caracterización de la zona de estudio	4-8
4.2.6	Caracterización de datos <i>In situ</i>	4-9
4.2.7	Validación	4-11
4.2.8	Desarrollo del criterio operativo del baño	4-11
4.2.9	Análisis operativo del baño	4-12
<b>5</b>	<b>Resultados obtenidos</b>	<b>5-1</b>
5.1	Caracterización de aguas profundas	5-1
5.2	Implementación numérica de aproximación ( <i>Stwave</i> )	5-2
5.3	Caracterización de la zona de transición	5-6
5.4	Implementación numérica zona de estudio (WAPO-COCO)	5-7
5.5	Caracterización de la zona de estudio	5-11
5.6	Caracterización de datos <i>In situ</i>	5-22
5.7	Validación	5-29
5.8	Desarrollo del criterio operativo del baño	5-34
5.9	Análisis operativo del baño	5-35
<b>6</b>	<b>Discusión</b>	<b>6-1</b>
6.1	Aproximación de oleaje al punto de transición	6-1



---

6.2	Propagación de oleaje a playa Caleta Abarca . . . . .	6-1
6.3	Datos <i>In situ</i> . . . . .	6-2
6.4	Operatividad playa Caleta Abarca . . . . .	6-2
<b>7</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>7-1</b>
7.1	Aproximación de oleaje al punto de transición . . . . .	7-1
7.2	Propagación de oleaje a playa Caleta Abarca . . . . .	7-1
7.3	Datos <i>In situ</i> . . . . .	7-1
7.4	Operatividad playa Caleta Abarca . . . . .	7-2
7.5	Alcance . . . . .	7-2
<b>8</b>	<b>Glosario</b>	<b>8-1</b>
<b>9</b>	<b>Referencias</b>	<b>9-1</b>
<b>10</b>	<b>Anexo</b>	<b>10-1</b>
10.1	Criterio de anidamiento (punto de transición) . . . . .	10-1
10.2	Caracterización de aguas profundas . . . . .	10-3
10.3	Caracterización de la zona de transición . . . . .	10-4
10.4	Implementación numérica zona de estudio (WAPO-COCO) . . . . .	10-5
10.5	Caracterización de la zona de estudio . . . . .	10-7
10.6	Validación . . . . .	10-12



## Lista de Tablas

4.1	Configuración mallas del modelo <i>Stwave</i> . Fuente: E.P. . . . .	4-7
4.2	Puntos del circuito del ADCP remolcado. Fuente: E.P. . . . .	4-9
4.3	Inicio y termino de los circuitos del ADCP remolcado. Fuente: E.P. . . . .	4-10
5.1	Propagación de oleaje en modelo WAPO, 58 casos. Fuente: E.P. . . . .	5-9
5.2	Resultados de los modelos en la zona área 1, 58 casos. Fuente: E.P. . . . .	5-12
5.3	Resultados de los modelos en la zona área 2, 58 casos. Fuente: E.P. . . . .	5-13
5.4	Porcentaje de corriente explicado por Marea. Fuente: E.P. . . . .	5-27
5.5	Desarrollo del criterio operable para playas. Fuente: E.P. . . . .	5-34
5.6	Porcentajes de alturas de olas en las áreas. Fuente: E.P. . . . .	5-36
10.1	Justificación del criterio de anidamiento en base al error promedio. Fuente: E.P. . . . .	10-1
10.2	Incidencia Periodo pico- Dirección pico, aguas profundas. Fuente: E.P. . . . .	10-3
10.3	Incidencia Periodo pico- Altura sig, aguas profundas. Fuente: E.P. . . . .	10-3
10.4	Incidencia Altura sig- Dirección pico, aguas profundas. Fuente: E.P. . . . .	10-3
10.5	Incidencia Periodo pico- Dirección pico, punto de transición. Fuente: E.P. . . . .	10-4
10.6	Incidencia Periodo pico- Altura sig, punto de transición. Fuente: E.P. . . . .	10-4
10.7	Incidencia Altura sig- Dirección pico, punto de transición. Fuente: E.P. . . . .	10-4
10.8	Incidencia Corriente longitudinal- Corriente transversal, área 1. Fuente: E.P. . . . .	10-10
10.9	Incidencia Altura sig- Corriente longitudinal, área 1. Fuente: E.P. . . . .	10-10
10.10	Incidencia Altura sig- Corriente transversal, área 1. Fuente: E.P. . . . .	10-10
10.11	Incidencia Corriente longitudinal- Corriente transversal, área 2. Fuente: E.P. . . . .	10-11
10.12	Incidencia Altura sig- Corriente longitudinal, área 2. Fuente: E.P. . . . .	10-11
10.13	Incidencia Altura sig- Corriente transversal, área 2. Fuente: E.P. . . . .	10-11
10.14	Incidencia U-V de datos <i>in situ</i> , 21-22 Diciembre. Fuente: E.P. . . . .	10-12
10.15	Incidencia U-V, Diciembre datos modelados. Fuente: E.P. . . . .	10-12



## Lista de Figuras

1.1	Playa Caleta Abarca, Bahía Valparaíso. Fuente: Elaboración Propia (E.P.) . . . . .	1-2
3.1	Caracterización de una onda. Fuente: <i>Guzmán [2006]</i> . . . . .	3-2
3.2	Teorías de olas. Fuente: <i>Coastal Engineering Manual [2002c]</i> . . . . .	3-3
3.3	Espectros en 2 dimensiones. Fuente: <i>Silva [2005]</i> . . . . .	3-5
3.4	Variación de $H_s/H_{m_0}$ en función de $\bar{d}$ . Fuente: <i>Coastal Engineering Manual [2002c]</i> . .	3-8
3.5	Tipos de rotura del oleaje. Fuente: [ <i>Coastal Engineering Manual [2003]</i> ] . . . . .	3-11
3.6	Tipos de corrientes cercanas a la playa. Fuente: <i>Quezada [2008]</i> . . . . .	3-16
3.7	Interacción de fuerzas en el nado. Fuente: <i>Llana [2002]</i> . . . . .	3-21
3.8	Presión de propulsión en el nado. Fuente: <i>Llana [2002]</i> . . . . .	3-22
4.1	Carta náutica N° 5111, Bahía y Puerto de Valparaíso. Fuente: SHOA . . . . .	4-1
4.2	Ubicación nodo de estadísticas en aguas profundas. Fuente: E.P. . . . .	4-2
4.3	Correntómetro tipo sensor data. Fuente: E.P. . . . .	4-3
4.4	ADCP tipo sentinel. Fuente: RDInstruments . . . . .	4-4
4.5	CTD tipo SBE-19. Fuente: Sea-Bird Electronics . . . . .	4-4
4.6	Esquema diseño metodológico. Fuente: E.P. . . . .	4-5
4.7	Demarcado de las áreas de implementación de los modelos. Fuente: E.P. . . . .	4-6
4.8	Configuración de mallas del modelo <i>Stwave</i> . Fuente: E.P. . . . .	4-7
4.9	Áreas en estudio de playa Caleta Abarca. Fuente: E.P. . . . .	4-9
4.10	Ruta de ADCP remolcado en playa Caleta Abarca. Fuente: E.P. . . . .	4-10
5.1	Curva de excedencia $H_s$ , aguas profundas. Fuente: E.P. . . . .	5-1
5.2	Rosas de oleaje, aguas profundas. Fuente: E.P. . . . .	5-2
5.3	Distribución conjunta $H_s$ - $T_p$ , aguas profundas. Fuente: E.P. . . . .	5-2
5.4	Batimetría para el modelo <i>Stwave</i> . Fuente: E.P. . . . .	5-3
5.5	Ejemplo de dirección y altura de ola del modelo <i>Stwave</i> . Fuente: E.P. . . . .	5-4
5.6	Funciones de transferencia al punto de transición. Fuente: E.P. . . . .	5-5
5.7	Curvas de $T_p$ y $H_s$ , zona de transición. Fuente: E.P. . . . .	5-6
5.8	Rosas de oleaje, zona de transición. Fuente: E.P. . . . .	5-7
5.9	Distribución conjunta $H_s$ - $T_p$ , zona de transición. Fuente: E.P. . . . .	5-7
5.10	Batimetría para el modelo WAPO y COCO. Fuente: E.P. . . . .	5-8
5.11	Modelado en la zona de estudio caso NW. Fuente: E.P. . . . .	5-10
5.12	Gráficas de ocurrencia, área 1. Fuente: E.P. . . . .	5-15
5.13	Gráficas de contorno, área 1. Fuente: E.P. . . . .	5-16
5.14	Serie de tiempo, área 1. Fuente: E.P. . . . .	5-17
5.15	Gráficas de ocurrencia, área 2. Fuente: E.P. . . . .	5-19
5.16	Gráficas de contorno, área 2. Fuente: E.P. . . . .	5-20
5.17	Serie de tiempo, área 2. Fuente: E.P. . . . .	5-21
5.18	Resultados CTD en la playa. Fuente: E.P. . . . .	5-22



5.19 Perfil de corriente del ADCP remolcado en la playa. Fuente: E.P. . . . .	5-23
5.20 Resultados ADCP remolcado en la playa. Fuente: E.P. . . . .	5-24
5.21 Resultado 1 del correntómetro ubicado en la playa. Fuente: E.P. . . . .	5-26
5.22 Resultado 2 del correntómetro ubicado en la playa. Fuente: E.P. . . . .	5-26
5.23 Diagrama de vector progresivo del correntómetro. Fuente: E.P. . . . .	5-27
5.24 Serie de marea, componente $U$ , $V$ y diagrama de trazos filtrados. Fuente: E.P. . . . .	5-28
5.25 Variación de los parámetros naturales. Fuente: E.P. . . . .	5-28
5.26 Validación por curvas de ocurrencia, componente $U$ . Fuente: E.P. . . . .	5-30
5.27 Validación por curvas de ocurrencia, componente $V$ . Fuente: E.P. . . . .	5-30
5.28 Validación 1 por ADCP remolcado y datos modelados. Fuente: E.P. . . . .	5-31
5.29 Validación 2 por ADCP remolcado y datos modelados. Fuente: E.P. . . . .	5-32
5.30 Validación 3 por ADCP remolcado y datos modelados. Fuente: E.P. . . . .	5-33
5.31 Tendencia de corrientes longitudinales y transversales en la playa. Fuente: E.P. . . . .	5-35
5.32 Análisis operacional, área 1. Fuente: E.P. . . . .	5-36
5.33 Análisis operacional, área 2. Fuente: E.P. . . . .	5-37
10.1 Esquema general de puntos en el veril de anidamiento. Fuente: E.P. . . . .	10-1
10.2 Funciones de transferencia respecto a la del punto de anidamiento. Fuente: E.P. . . . .	10-2
10.3 Modelado en la zona de estudio caso NNW. Fuente: E.P. . . . .	10-5
10.4 Modelado en la zona de estudio caso WNW. Fuente: E.P. . . . .	10-6
10.5 Alturas de olas modeladas en las áreas de estudio. Fuente: E.P. . . . .	10-7
10.6 Corrientes longitudinales modeladas en las áreas de estudio. Fuente: E.P. . . . .	10-8
10.7 Corrientes transversales modeladas en las áreas de estudio. Fuente: E.P. . . . .	10-9
10.8 Gráfica de excedencia altura de ola, área 1. Fuente: E.P. . . . .	10-10
10.9 Gráfica de excedencia altura de ola, área 2. Fuente: E.P. . . . .	10-11



# 1. Introducción

Existe en la actualidad abundante información sobre estudios de operatividad de puertos que se han realizado en terminales marítimos como los de Valparaíso y San Antonio, que identifican los porcentajes de tiempo operables de acuerdo a los usuarios (buques), en función de las condiciones naturales del área de trabajo.

La operatividad de playas para fines recreacionales, sin embargo, ha recibido menos atención. Las personas comienzan a ocupar playas definidas como aptas u operables para el baño, según el criterio de las autoridades. Por tanto la pregunta que cabe hacer es ¿bajo qué condiciones, parámetros y estudios técnicos se define una playa apta?, pudiendo responder en primera instancia que existen, según Directemar<sup>1</sup>, dos tipos de condiciones. Naturales, que hacen alusión a “...tener un fondo parejo y de pendiente suave, limpio sin restos de construcciones submarinas o especies náufragos, aguas salubres, oleajes suaves, escasas corrientes y sin roqueríos...”. Y en segundo lugar las Adquiridas, que condicionan a “...estar a cargo de un concesionario responsable, contar con elementos de seguridad, sistema de primeros auxilios y una dotación de salvavidas...”.

Por tanto para el caso de las condiciones adquiridas bastaría con un catastro de lo que existe en la playa. Por el contrario, para las condiciones naturales, específicamente en lo que se refiere a oleaje y corriente, son necesarios estudios técnicos orientados a determinar de forma objetiva las áreas de playa que son aptas y no aptas para el baño. Estos estudios en la actualidad son inexistentes en Chile. Hoy en día, la estimación y clasificación de las playas es competencia de la Capitanía de Puerto de la zona<sup>2</sup>, basándose fundamentalmente en la experiencia acumulada.

Esta falta de estudios técnicos de oleajes y corrientes produce cierta incertidumbre para la seguridad de las playas, frente a la actividad de natación que efectúan los bañistas. La motivación de la presente investigación se focaliza en satisfacer esta necesidad de las ciudades balneario de Chile, efectuando estudios de oleaje y corrientes, con el fin de identificar si una playa es efectivamente segura en función de estos dos factores oceanográficos. Se generan sugerencias para parcelar la playa en zonas aptas y no aptas para el baño, delimitando los periodos anuales operativos.

El estudio operativo del baño se realizó en playa Caleta Abarca, situada en la región de Valparaíso comuna Viña del Mar, la cual presenta una alta presencia turística debido a su accesibilidad y ubicación a un costado del Hotel Sheraton Miramar. La playa fue clasificada como apta para el baño, en el período Estival 2008-2009 por la Capitanía de Puerto de Valparaíso<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>[www.directemar.cl](http://www.directemar.cl), visitada en noviembre del 2009.

<sup>2</sup>Información obtenida vía telefónica a Directemar año 2009. Armada de Chile, Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante. Errázuriz 537 Valparaíso. Chile.

<sup>3</sup>Para todos los efectos en la próximas figuras, E.P. se considera como Elaboración Propia.



Figura 1.1: Playa Caleta Abarca, Bahía Valparaíso. Fuente: Elaboración Propia (E.P.)

Debido a que en la zona de baño de playa Caleta Abarca se observa la presencia de quiebre de olas, los fenómenos de corrientes predominantes podrían ser causados por el oleaje. Por esta razón se utilizaron modelos de propagación de olas y de corrientes costeras, que son de libre distribución y con licencia autorizada para la Universidad de Valparaíso. Estos se enfocan a estudiar los parámetros de altura de ola y corrientes costeras debidas al oleaje, que afectan a los bañistas.

En este trabajo, se utilizó un año de oleaje espectral de propiedad de la Universidad de Valparaíso para fines académicos y datos *in situ* de corrientes en la playa en estudio. Estos fueron tomados por un correntómetro fijo y un perfilador acústico de corriente Doppler (ADCP), ambos facilitados por la Universidad de Valparaíso.

Dado a que se contó con sólo un año de oleaje para efectuar el estudio, se obtuvo una primera aproximación de la operatividad anual de playa Caleta Abarca, recomendando la utilización de 20 años de oleaje para un estudio más acabado.

A continuación se señalan los objetivos de la investigación, para luego en el capítulo del marco teórico, proceder a la explicación de las teorías y formulaciones relevantes. Siguiendo con los materiales y diseño metodológico a utilizar en el análisis de los fenómenos. Luego se caracteriza el medio, con la presentación de los resultados obtenidos y de esta forma realizar las discusiones, conclusiones y alcances correspondientes.



## **2. Objetivos**

### **2.1 General**

- Identificar áreas seguras y peligrosas para el nado de los bañistas en playa Caleta Abarca, en función de los parámetros de ola y corriente.

### **2.2 Específicos**

- Caracterizar el clima de oleaje en aguas profundas.
- Implementar un modelo numérico de aproximación de oleaje.
- Ejecutar una transferencia espectral.
- Caracterizar el clima de oleaje en el punto de transición de los modelos.
- Implementar un modelo numérico de oleaje en la zona de playa.
- Implementar un modelo numérico de corrientes en la zona de playa.
- Caracterizar el clima de oleaje en la zona de playa.
- Caracterizar las corrientes en la zona de playa.
- Validar el análisis.



## 3. Marco teórico

El tema central del presente estudio es la modalidad de caracterización de zonas aptas y no aptas para el baño en playa Caleta Abarca, en la cual se consideraron los siguientes tópicos.

La definición de olas, realizando caracterizaciones estadísticas cuya finalidad es obtener parámetros representativos del oleaje.

Identificación de los fenómenos naturales que influyen en el oleaje, los cuales disipan o aportan la energía necesaria para la transformación de éstas. Se explica en forma teórica el espectro de las olas, para entender el oleaje en términos energéticos a través de su forma espectral. Según como la energía se disperse dentro de la masa de agua, será la propagación de la ola. Se indican las teorías de propagación del oleaje existentes, a fin de entender los fenómenos asociados.

Se utilizaron modelos numéricos que reproducen el oleaje y su propagación. Estos modelos son simplificadores de la realidad, y su fin principal es obtener una representación numérica lo más real posible de la propagación del oleaje.

La distribución de las corrientes es abordada con la aplicación de modelos numéricos de corrientes costeras, dentro de los cuales se explica la implementación numérica a utilizar en la zona de estudio.

Los aspectos biomecánicos, que definen ciertos criterios del nado de las personas, también son estudiados para considerar apta la playa para el baño.

En las páginas siguientes se abordan en profundidad las temáticas mencionadas, con el objetivo de dejar claro las teorías a utilizar en los análisis y discusiones del problema.

### 3.1 Oleaje

#### 3.1.1 Generalidades

En el mar existen una serie de ondas, clasificadas según su período el cual tiene directa relación con los fenómenos que la producen. Considerando para el estudio la categoría de onda gravitatoria, que tiene por periodos ( $T$ ) y longitud de onda ( $L$ ) de 1 a 30 [s] y 1 a 3000 [m] respectivamente, [Documento de referencia [2000]].

Las propiedades de las ondas gravitatorias consideradas como oleaje se observan en la Figura 3.1, las que se definen a continuación, [Guzmán [2006]]:

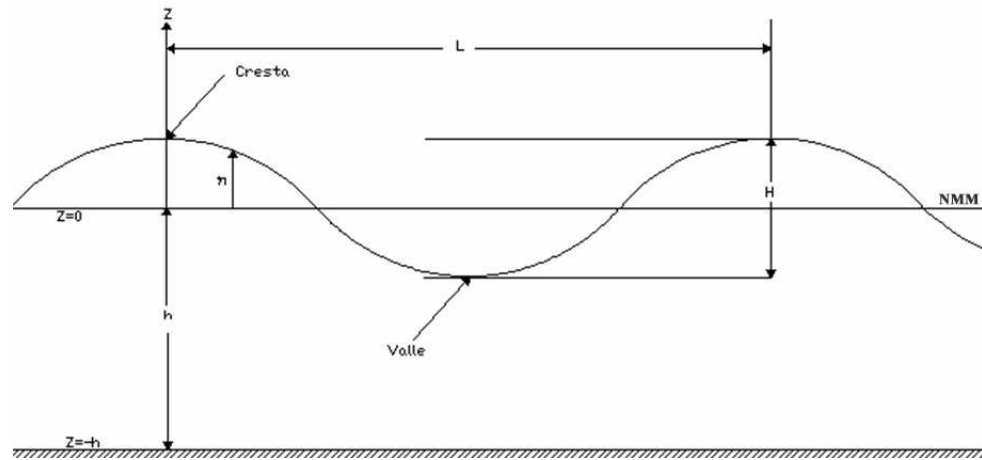


Figura 3.1: Caracterización de una onda. Fuente: Guzmán [2006]

Considerando la siguiente nomenclatura:

- $\eta$  : desnivelación instantánea de la ola.
- $L$  : longitud de la ola.
- $T$  : período de la ola.
- $T_p$  : período pico que se asocia con la mayor energía.
- $f$  : frecuencia de la ola.
- $f_p$  : frecuencia pico que se asocia con la mayor energía.
- $h$  ó  $d$  : profundidad.
- $H$  : altura de la ola desde el valle hasta la cresta.
- $K$  : número de ola.
- $C$  : celeridad.
- $C_g$  : celeridad de grupo.
- $z$  : eje vertical que tiene su origen en el nivel medio de agua.
- $x$  : eje horizontal que apunta en la dirección de propagación del oleaje.
- $t$  : tiempo.

Se pueden distinguir tres tipos de clasificaciones de profundidad relativa para el oleaje. Aguas someras si  $h/L < 1/25$  (el oleaje interactúa con el fondo); aguas intermedias si  $1/25 < h/L < 1/2$  (el oleaje comienza a interactuar con el fondo); y aguas profundas si  $h/L > 1/2$  (el oleaje no interactúa con el fondo).

En el mar se pueden distinguir dos tipos principales de oleaje llamados *Sea* y *Swell*. El oleaje *Sea* es generado localmente por el viento; se caracteriza por tener ondas de mayor altura y direcciones similares a la del viento local. Y el oleaje tipo *Swell*; también originado por el efecto del viento, es una onda que ha viajado largas distancias, disipando energía por fricción interna y transfiriendo energía de las frecuencias más altas a las de menor frecuencia, obteniendo un tren de oleaje más ordenado que el tipo *Sea*, con periodos de ola mayores y alturas de olas menores, [Kamphuis [2000]].



### 3.1.2 Teoría de olas

Las teorías de oleaje se pueden clasificar en lineales y no lineales. La teoría lineal del oleaje (TLO) o teoría de la pequeña amplitud, desarrollado por Airy (1845), es una formulación fácil de aplicar con una aproximación razonable de las características de la ola y con una amplia gama de parámetros. En el caso de las teorías no lineales, que han desarrollado una mejor descripción del oleaje, se presentan formulaciones como la onda cnoidal, ondas solitarias y las teorías de Stokes. Todas estas teorías han sido desarrolladas de acuerdo al flujo potencial, [Coastal Engineering Manual [2002c]].

En la Figura 3.2 se observan las teorías de oleaje, en donde se pueden ver diferencias, característica de las teorías (a) y los rangos que se deben utilizar (b).

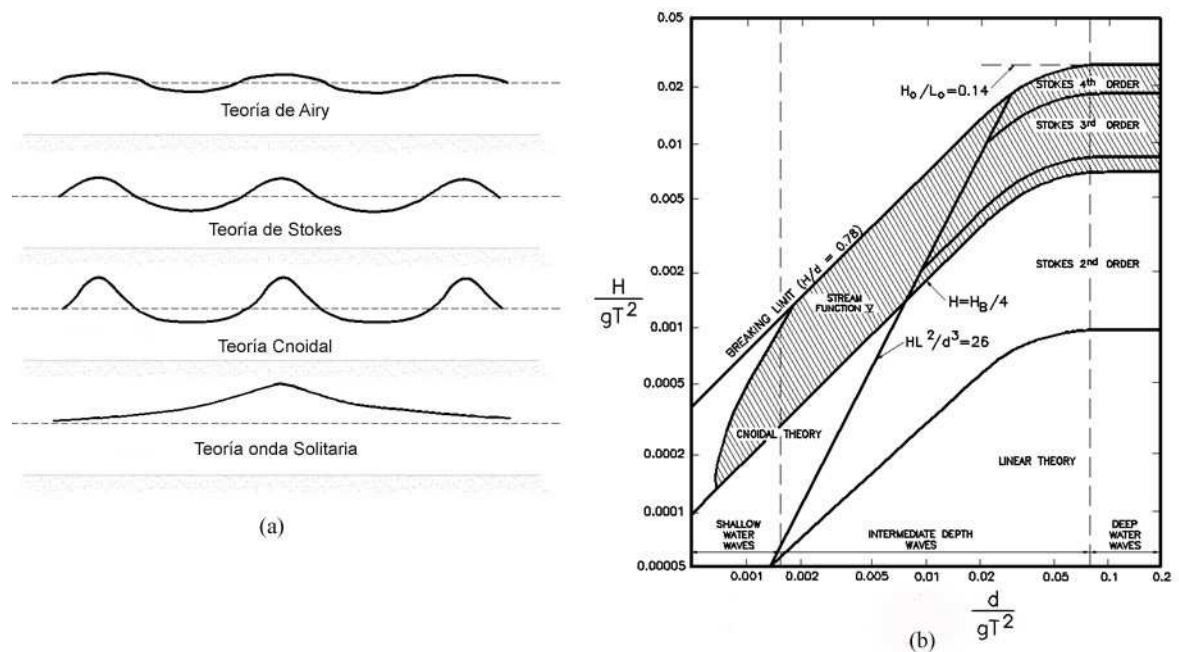


Figura 3.2: Teorías de olas. Fuente: Coastal Engineering Manual [2002c]

## 3.2 Caracterización estadística del oleaje

La superficie del mar tiene variaciones estadísticas según las escalas temporales y espaciales. Por tanto dependiendo del objetivo en estudio, el análisis estadístico del oleaje se clasifica en tres tipos, corto, mediano y largo plazo. A continuación se describe brevemente cada uno de ellos.

### 3.2.1 Corto plazo

El oleaje en un punto determinado de la costa se caracteriza por ser un proceso irregular, con variabilidad en alturas de olas, periodos y direcciones. Es por ello que nace la definición de “estado de mar”, el cual consiste en representar el oleaje en un intervalo de tiempo a través de parámetros de oleaje. Estos son calculados mediante el procesamiento de datos de olas presentes en una parte del intervalo seleccionado, asumiendo que es un proceso ergódico.



El procesamiento de datos de oleaje o señal de oleaje, debe contener una serie de pasos como la corrección del nivel medio del mar (NMM), discretización de la señal de oleaje, evaluación de parámetros y determinación de la dirección del oleaje. Pudiendo ocupar diferentes metodologías de estimación, [Silva [2005]].

Con respecto a las distribuciones, se tiene que para la altura de ola se presenta una distribución Rayleigh, cuya formulación es la Ecuación 3.1. Para el caso del período se tiene la Ecuación 3.2 formulada por Bretschneider en 1969, [Coastal Engineering Manual [2002c]].

$$F(H) = 1 - e^{-2\left(\frac{H}{H_s}\right)^2} \quad (3.1)$$

$$p(T) = 2.7 \frac{T^3}{T} e^{-0.675\tau^4}; \quad \tau = \frac{T}{T} \quad (3.2)$$

### 3.2.2 Mediano Plazo

Tiene como objetivo reproducir el oleaje en las condiciones reinantes, lo cual interesa para determinar el clima operacional, bajo ciertos criterios.

El estudio estadístico se efectúa a través de regímenes medios, rosas de oleaje y tablas de incidencia. Para el caso de los regímenes medios, se busca la función de distribución estadística que estime de mejor forma el tiempo en que una altura de ola no exceda un valor determinado. Las funciones estadísticas más utilizadas son, [Ingeniería Marítima [2002]]:

- Función Lognormal:

$$F(x) = \frac{1}{B\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{x} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-A}{B}\right)^2} dx \quad (3.3)$$

- Función Exponencial:

$$F(x) = 1 - e^{-B(x-A)} \quad (3.4)$$

- Función Weibull:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-A}{B}\right)^c} \quad (3.5)$$

Las rosas de oleaje presentan la intensidad y frecuencia de la aparición de algún parámetro de oleaje respecto a su dirección, quedando definido por la dirección de donde vienen (Barlovento). Siendo de utilidad práctica dado que entrega una idea rápida del tipo de oleaje existente. En cambio la tabla de incidencia entrega con mayor detalle el fenómeno, pudiendo asociar los parámetros de oleaje de manera cruzada.

### 3.2.3 Largo plazo

Éste análisis tiene por objetivo la caracterización de los eventos extremos, buscando determinar los valores esperables de los parámetros en los próximos 50 ó 100 años, con el fin de diseñar alguna obra marítima determinada en función del riesgo y vida útil, los cuales pueden ser definidos por la ROM 02.90, [M.O.P.U. [1990]].

Uno de los métodos más utilizados es el de los valores pico, que selecciona el evento extremo a través de máximos anuales o series de duraciones parciales. En cuanto a la funciones de distribución



de probabilidad para el clima extremo, se tienen las formulaciones de Lognormal, Exponencial, Weibull, Gumbel y Frechet, [Enginyeria Marítima [2002]].

### 3.3 Oleaje espectral

#### 3.3.1 Definición

Es la representación de la energía del oleaje irregular asociada a cada frecuencia y dirección, en el que la forma del espectro depende de las condiciones externas de generación del oleaje: velocidad del viento, fetch, tiempo de generación, batimetrías, etc.

El espectro se puede desarrollar tanto en una o en dos dimensiones, ya sea con la energía en función de la frecuencia y/o dirección.

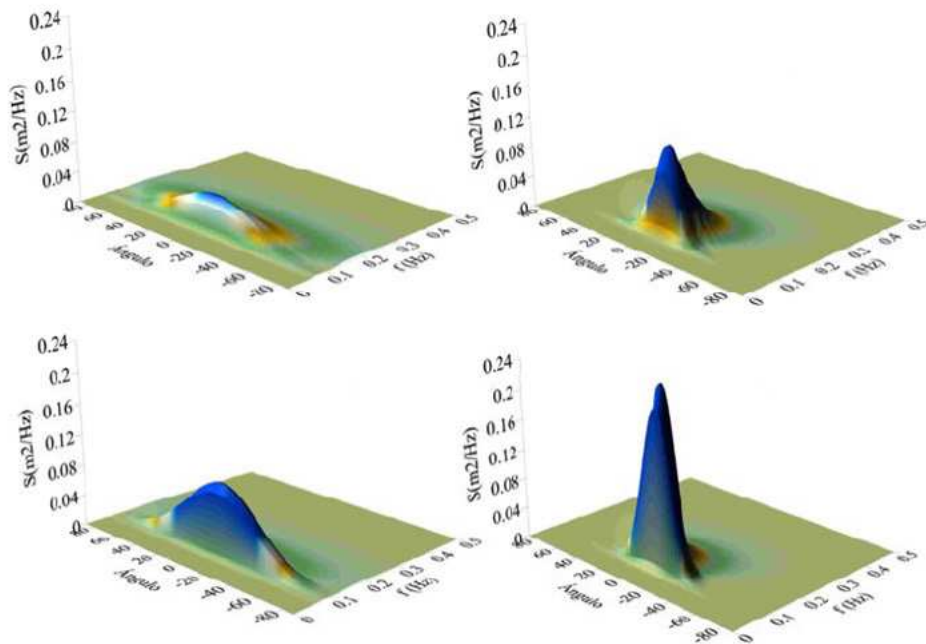


Figura 3.3: Espectros en 2 dimensiones. Fuente: Silva [2005]

La importancia del oleaje espectral es su contribución al entendimiento y representación del mar, mediante la forma de distribución de energía que tenga éste, pudiendo detectar bimodalidades del oleaje u otros fenómenos de interés según el estudio.

#### 3.3.2 Modelos espectrales

La forma de un espectro varía considerablemente dependiendo de los factores ya mencionados; sin embargo, la forma del mismo no es arbitraria ya que existen propiedades físicas del oleaje que están representadas en él. Por tanto un espectro de oleaje puede ser generado sintéticamente en función de los fenómenos que caracterizan su desarrollo.



Existen una serie de espectros sintéticos en función de las frecuencias, algunos de estos son; Modelo de Phillips, incluye parámetros de frecuencia, gravedad, velocidad del viento y fetch; Espectro de Neumann, en función de la velocidad del viento; Espectro Pierson-Moskowitz, para mar completamente desarrollado generado por viento; Espectro de Bretschneider, asume espectro de banda estrecha con distribución tipo Rayleigh; Espectro de Kitaigorodskii-Toba, depende de la frecuencia y Fetch; Espectro de Krylov, tiene como base la frecuencia media; Espectro de Ochi-Hubble, representa un doble pico espectral; Espectro JONSWAP, considera viento, fetch limitado y profundidad de agua indefinida; Espectro TMA, para aguas poco profundas, [Silva [2005]].

El caso del espectro JONSWAP, que está formado por viento, fetch limitado y profundidad de agua indefinida, se representa por:

$$S_j(f) = \alpha' g^2 f^{-5} (2\pi)^{-4} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}} \gamma e^{\left[\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right]} \quad (3.6)$$

Donde:

- $\gamma$  : factor de forma pico del espectro, cuyo valor normalmente es 3.3.
- $\sigma$  : ancho de la base del espectro antes ( $\sigma_A$ ) y después ( $\sigma_B$ ) de la frecuencia pico. Los valores más habituales son  $\sigma_A = 0.07$  y  $\sigma_B = 0.09$ .
- $\alpha'$  : factor de escala y está asociado con la energía total del espectro.

$$\alpha' = 0.076(\bar{x}')^{-0.22}$$

Se ha observado que la frecuencia pico del espectro está relacionada también con el fetch y la velocidad del viento, tal que:

$$f_p = 3.5 \left(\frac{g}{U_{10}}\right) (\bar{x}')^{-0.33}; \quad \bar{x}' = \frac{g x'}{U_{10}^2} \quad (3.7)$$

Con:

- $x'$  : fetch.
- $U_{10}$  : velocidad del viento a 10 [m] sobre la superficie.

Finalmente para el espectro TMA, para aguas poco profundas, se asume la validez del espectro tipo JONSWAP, expresado en función del número de ola ( $k$ ), y se incluye el siguiente factor de transformación:

$$\phi(\omega_h) = \tanh^2(kh) \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right) \quad (3.8)$$

Donde:

$$\omega_h = 2\pi f \left(\frac{h}{g}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

En que  $k$  y  $f$  se relacionan a partir de la relación de dispersión,

$$(2\pi f)^2 = gk \tanh(kh) \quad (3.10)$$

Por lo que el espectro queda definido por:

$$S_{TMA} = S_j \phi(\omega_h) \quad (3.11)$$



### 3.3.3 Dispersión direccional

El espectro direccional describe el estado de mar resultante de la superposición de las componentes, con distintas direcciones de propagación. Por tanto representa la distribución de energía del oleaje en función de la dirección ( $\theta$ ), que se expresa por:

$$S(\omega, \alpha) = S(\omega)D(\alpha, \omega, p_1, p_2, \dots) \quad (3.12)$$

Donde  $S(\omega, \alpha)$  es la función de densidad espectral del oleaje direccional y  $D(\alpha; \omega)$  es la función de distribución direccional, también llamada función de distribución angular o distribución angular. Los parámetros  $p_1, p_2$  están relacionados con el tipo de distribución propuesto.

En general las distribuciones direccionales pueden ser de tipo Normal, o bien del tipo Cosine-power, la cual presenta la siguiente formulación, [Massel [1996]]:

$$D(\alpha) = \frac{2}{\pi} \cos^2(\alpha); \quad -\frac{\pi}{2} \geq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$$

$$D(\alpha; s) = \frac{2^{2s-1} \Gamma^2(s+1)}{\pi \Gamma(2s+1)} \cos^{2s} \left( \frac{\alpha - \alpha_0}{2} \right); \quad -\pi \leq \alpha \leq \pi \quad (3.13)$$

Donde  $\alpha_0$  es la dirección principal de la propagación de la frecuencia pico,  $\Gamma()$  es la función gamma planteada por Abramowitz & Stegun (1975), y  $s$  una función empírica dada por Hasselman en el año 1980, [Documento de referencia [2000]]:

$$s = s_p \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^\mu \quad (3.14)$$

### 3.3.4 Parámetros espectrales

La forma de un espectro de ondas, se expresa generalmente en términos de los momentos de la distribución, que se pueden definir como:

$$m_n = \int_0^\infty f^n E(f) df \quad (3.15)$$

El cual servirá para evaluar los parámetros espectrales siguientes, [Guide to wave analysis and forecasting [1998]]:

- **Anchura espectral:**

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (3.16)$$

Si  $\varepsilon$  tiende a cero ( $\varepsilon \rightarrow 0$ ) el espectro es de banda estrecha, por el contrario si tiende a uno ( $\varepsilon \rightarrow 1$ ) es un espectro de oleaje con todas las componentes.

Además se ha demostrado que el parámetro  $\nu$ , es una buena alternativa en vez de utilizar el parámetro  $\varepsilon$ , debido a que este último es sensible a  $m_4$ .

$$\nu = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1} \quad (3.17)$$



- **Altura de ola espectral:**

$$H_{m_0} = 4\sqrt{m_0} \quad (3.18)$$

- **Promedio del 10% de las olas más altas:**

$$H_{1/10} = 5.1\sqrt{m_0} \quad (3.19)$$

Se debe tener presente que en aguas profundas  $H_{m_0}$  se considera una buena estimación de  $H_{1/3}$  o  $H_s$ . Por el contrario en aguas muy poco profundas cerca de la rotura comienzan a ver variaciones, la cual se observa en la Figura 3.4.

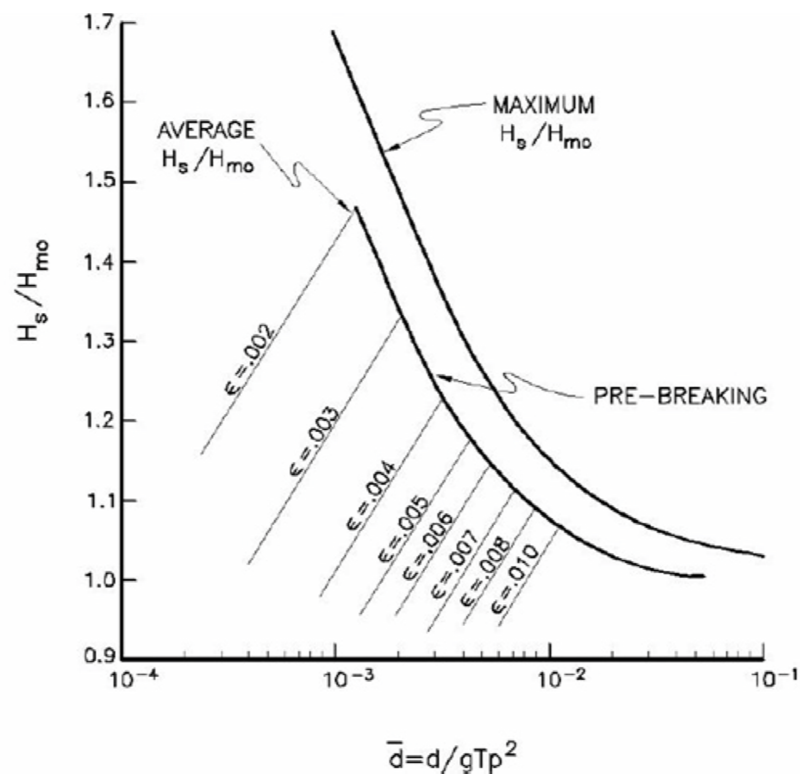


Figura 3.4: Variación de  $H_s/H_{m_0}$  en función de  $\bar{d}$ . Fuente: *Coastal Engineering Manual [2002c]*

- **Período medio:**

$$T_{m_{01}} = \frac{m_0}{m_1} \quad (3.20)$$

- **Período cero ( $T_z$ ):**

$$T_{m_{02}} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (3.21)$$



- Período energético:

$$T_{m-10} = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (3.22)$$

Para los casos de los periodos y direcciones pico, estos se asocian con la energía máxima del espectro.

## 3.4 Propagación de oleaje

### 3.4.1 Fenómenos asociados

A medida que el oleaje se acerca a la costa se va transformando, debido a que se comienzan a producir una serie de fenómenos que afectan en altura, período y dirección al oleaje. Transformaciones del oleaje que pueden ser lineales o no lineales dependiendo del criterio Ursell, [Coastal Engineering Manual [2002c]]. Algunos de los fenómenos asociados se detallan a continuación.

#### 3.4.1.1 Shoaling (asomeramiento)

Un tren de olas experimenta *shoaling* en la propagación de ola, al momento de disminuir gradualmente su longitud y celeridad de onda e incrementándose la altura de ola, debido a la variación en la profundidad. El coeficiente de *shoaling*, se puede enunciar de la forma expuesta en la Ecuación 3.23, [Documento de referencia [2000]].

$$K_s = \sqrt{\frac{C_{g0}}{C_{g1}}} = \sqrt{\frac{2 \cosh^2(kh_1)}{2kh_1 + \sinh(2kh_1)}} \quad (3.23)$$

#### 3.4.1.2 Refracción

Fenómeno que produce un cambio de altura y dirección del oleaje, debido a que la ola cuando se aproxima en sentido oblicuo a la costa, las secciones del tren de olas interactúan con el fondo y experimentan una desviación progresiva que tiende alinear el tren de olas con los veriles. En otras palabras podemos decir que existen secciones del tren de olas, que se propagan en aguas más profundas que otras secciones que se propagan en profundidades menores, con celeridades mayores, produciendo esta variación de celeridades el fenómeno de refracción. Este se puede representar por el coeficiente de refracción de la Ecuación 3.24, [Kamphuis [2000]], considerando que  $b$  es la distancia entre los rayos de onda adyacentes.

$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b}} \quad (3.24)$$

#### 3.4.1.3 Reflexión

Fenómeno que se produce cuando el oleaje cambia abruptamente de dirección en la propagación del oleaje, ya sea por una estructura natural o artificial. La importancia en playas es que la reflexión genera ondas atrapadas pudiendo alterar la hidrodinámica del sector. El coeficiente de reflexión se



define por la Ecuación 3.25, [Goda [2000]], siendo  $H_i$  y  $H_r$  la altura de ola incidente y reflejada respectivamente.

$$K_{re} = \frac{H_r}{H_i} \quad (3.25)$$

#### 3.4.1.4 Difracción

La difracción se caracteriza por la transferencia lateral de energía a lo largo de la ola. Se puede producir cuando, las olas se encuentran con una estructura o cuando los efectos de la refracción son pronunciados. El planteamiento general del problema de difracción asumiendo teoría lineal, contiene las siguientes ecuaciones, que se resuelven según el caso en estudio, siendo  $n$  un vector normal a la superficie del obstáculo, [Documento de referencia [2000]].

$$\begin{aligned} \nabla^2 \phi + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} &= 0 \quad -h(x) \leq z \leq 0 \\ \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} &= 0 \\ \text{(en el Obstáculo)} \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} &= 0 \end{aligned} \quad (3.26)$$

#### 3.4.1.5 Rotura

El oleaje al propagarse en profundidades decrecientes, disminuye la longitud y aumenta la altura de ola (*shoaling*). Sin embargo este aumento está limitado por un determinado valor que indica cuando el oleaje se torna inestable, produciéndose así el fenómeno de rotura.

Existen diferentes criterios para la determinación del valor de rotura, pudiendo depender de parámetros locales de la ola, características batimétricas y/o peralte de la ola en la zona *offshore* (aguas profundas). Algunos criterios son; Miche, McCowan, Goda y Kamphuis, [Documento de referencia [2000]].

Con relación al límite de rotura, se aplica el parámetro adimensional de Iribarren ( $I_r$ ), el cual depende de la pendiente de la playa ( $\beta$ ), altura de ola propagada ( $H$ ) y longitud de ola *offshore* ( $L_0$ ).

$$I_r = \frac{\tan(\beta)}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} \quad (3.27)$$

Según el valor del número de Iribarren, el tipo de rotura se puede clasificar en:



	
<p><b>Oscilación (<i>Surging</i>):</b> El número de Iribarren es superior a 3, que se da en general con periodos de olas y pendientes de playa elevados, no produciendo la rotura. Para este caso la reflexión es importante.</p>	<p><b>Colapso (<i>Colapsing</i>):</b> El número de Iribarren está entre 2.5 y 3. La ola en este caso comienza a desmoronarse por su base colapsando, disminuyendo la reflexión debido a la pérdida de energía.</p>
	
<p><b>Voluta (<i>Plunging</i>):</b> El número de Iribarren está entre 2.5 y 0.4. Tipo de rotura común en playas, en que la ola rompe lanzando su cresta hacia adelante, rompiendo claramente en la base de la ola y encerrando una cantidad de aire considerable, disipando un gran porcentaje de energía. Donde el coeficiente de reflexión es menor que el caso de colapso.</p>	<p><b>Descrestamiento (<i>Spilling</i>):</b> El número de Iribarren es menor que 0.4. La disipación de energía es muy gradual, produciendo espuma y turbulencia en la cresta de la ola. El caso del coeficiente de reflexión es mínimo.</p>

Figura 3.5: Tipos de rotura del oleaje. Fuente: [*Coastal Engineering Manual [2003]*]

### 3.4.2 Métodos de propagación

Existen cuatro métodos de propagación descritos por Nicolau del Roure durante el año 2004, que se presentan a continuación, [*Quezada [2007]*].

#### 3.4.2.1 Parámetros de resumen

Método que utiliza sólo los parámetros de resumen de los espectros de oleaje (altura significativa espectral, período pico, dirección pico, etc). Propagando cada parámetro de resumen como un evento aislado.

#### 3.4.2.2 Cuasi purista

Método espectral, utilizado en la presente investigación, basado en la determinación de funciones de transferencia de oleaje para las distintas alturas de olas y direcciones, considerando que el período



se mantiene constante. Las funciones de transferencia se establecen mediante la propagación de alturas de olas unitarias, con los distintos periodos y direcciones del caso en estudio. Luego se multiplican las funciones de transferencia a los espectros en aguas profundas, y así se obtiene el oleaje en el sitio de interés. La ventaja de este método es que reduce las propagaciones al trabajar con oleaje unitario. Sin embargo por ser unitario, no permite una adecuada forma de caracterizar la zona de rompientes.

### 3.4.2.3 Cuasi purista modificado

Método espectral que emplea la misma metodología que el cuasi purista, con la distinción que además de propagar oleaje unitario, se consideran alturas de olas como por ejemplo de 4 y 7 [m] para la funciones de transferencia. Así se caracterizan de mejor forma la zona de rompiente.

### 3.4.2.4 Purista

Método espectral que propaga el espectro de oleaje hacia el punto de interés, contemplando la totalidad del espectro en su forma energética, en función de los periodos y direcciones. Es decir, efectúa la propagación por cada uno de los espectros como un evento aislado, pudiendo efectuarse a través de un modelo numérico. La desventaja es el alto costo computacional que implica este método.

## 3.4.3 Transferencia espectral

La propagación de una ola se puede efectuar por la Ecuación 3.28, siendo  $H_0$ ,  $K_r$ ,  $K_s$ ,  $K_d$  y  $K_a$ , altura de ola a propagar, coeficientes de; refracción, *shoaling*, difracción y agitación respectivamente.

$$H = K_r K_s K_d H_0 = K_a H_0 \quad (3.28)$$

Pero si se quiere calcular una altura de ola con una propagación espectral, se debe considerar lo siguiente:

$$H_0 = 4\sqrt{m_0}$$

$$m_0 = \sum \sum m_{i,j} \Delta f \Delta \theta$$

Reemplazando se tiene:

$$H = 4\sqrt{m_0 K_a^2} = 4\sqrt{\sum \sum m_{i,j} K_a^2 \Delta f \Delta \theta} \quad (3.29)$$

Generalizando se tiene que la transferencia espectral, se puede representar por la siguiente formulación que se basa en *Massel [1996]* y *Coastal Engineering Manual [2002a y b]*.

$$S(\omega, \theta) = K_a^2 \frac{\partial \theta_0}{\partial \theta} S(\omega, \theta_0)^1 \quad (3.30)$$

## 3.5 Modelos de propagación de oleaje

### 3.5.1 Generalidades

Actualmente existen diferentes modelos de propagación de oleaje, que se pueden clasificar de acuerdo a la ecuación que resuelven, contando con tres categorías a señalar.

<sup>1</sup>Ecuación adoptada para hacer la transferencia espectral.



**Modelo Parabólico:** Modelo de problema inicial que tiene como formulación la Ecuación 3.31, de planteamientos estacionario, con utilización de la teoría de Stokes. Que tiene aplicación en la propagación de ondas lineales abiertas.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (3.31)$$

**Modelo Elíptico:** Modelo que presenta un problema de contorno, que tiene por formulación la Ecuación 3.32, de planteamientos estacionario, con utilización de la teoría de Stokes. Con aplicación en estudios de agitación de zonas de gran profundidad y estudio de oleaje local por viento.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (3.32)$$

**Modelo Hiperbólico:** Modelo que presenta un problema con condición inicial y de contorno, que tiene por formulación la Ecuación 3.33, de planteamiento de evolución en el tiempo, con teorías de onda no lineales. Teniendo por aplicación estudios de agitación en aguas someras de oleaje no lineal y obtención de las corrientes de rotura.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - u^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (3.33)$$

Sin embargo, por la forma de resolución de estas ecuaciones, se pueden realizar otras clasificaciones, como lo son los modelos que promedian la fase de la ola (MPF) y los que resuelven la fase (MRF).

A continuación se procede a explicar los tipos de modelos numéricos de propagación de oleaje utilizados en el presente estudio, con sus características y fenómenos que son capaces de representar.

### 3.5.2 Modelo Parabólico

En este caso se utiliza el modelo llamado *Steady-State spectral wave model (Stwawe)*, que se caracteriza por propagar oleaje espectral, resolviendo la ecuación de la pendiente suave de forma parabólica con la aproximación de Radder (1979), además promedia la fase de la onda mediante ecuaciones que resuelven el balance de energía espectral, [Smith et al. [2001]].

Con respecto a las capacidades del modelo, *Stwawe* reproduce los fenómenos de refracción, *shoaling* y tensores de radiación de forma lineal, suponiendo la fricción de fondo despreciable, régimen permanente de olas y oleaje costa afuera homogéneo. Pudiendo además agregar corrientes y vientos en un régimen permanente. Con respecto a la difracción del modelo, se debe tener presente que es de tipo numérica y no física. El tipo de rotura se basa en el criterio de Miche (1951).

*Stwawe* en la propagación espectral permite seleccionar diferentes tipos de espectros sintéticos. En el caso de las frecuencias se tienen los espectros tipo; Ochi-Hubble, Pierson and Moskowitz, Bretschneider, JONSWAP y TMA, siendo este último el que se ocupa dado que representa de buena forma la propagación del espectro a aguas intermedias. Para el caso de las direcciones se tienen los espectros sintéticos de distribución normal y Cosine power.



Dado que el modelo puede reproducir la interacción ola-corriente, se debe considerar para las ecuaciones de gobierno que el subíndice  $r$  se refiere a un parámetro relativo, por el contrario el subíndice  $a$  denota un parámetro absoluto. Con esto la relación de dispersión de onda se expresa por las siguientes ecuaciones.

$$\omega_r^2 = gk \tanh(kd) \quad (3.34)$$

$$\omega_a = \omega_r + kU' \cos(\partial' - \alpha_d) \quad (3.35)$$

Donde:

- $\omega$  : frecuencia angular.
- $U'$  : velocidad de corriente.
- $\partial'$  : dirección de la corriente relativa.
- $\alpha_d$  : dirección de las olas ortogonal.

Para el caso de la discretización numérica, el modelo presenta un desarrollo de diferencias finitas sobre un plano cartesiano cuadrículado ( $\partial'_x = \partial'_y$ ) y con posibilidades de obtener mayores resoluciones a través del anidamiento de mallas.

### 3.5.3 Modelo Elíptico

En este caso se utiliza el Modelo de propagación de olas monocromáticas llamado *Wave propagation on the coast* (WAPO), que resuelve la ecuación modificada de pendiente suave de forma elíptica, la cual no tiene restricciones en cuanto a la variación del talud y es capaz de reproducir fenómenos de refracción, difracción, someramiento, reflexión y disipación inducida por fricción de fondo y rotura de oleaje, [Silva [2008]].

La ecuación modificada de pendiente suave se muestra a continuación en su forma más compacta de tipo Helmholtz.

$$\nabla_h^2 \psi + K_c^2 \psi = 0 \quad (3.36)$$

Considerando  $\nabla_h = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$

La relación de dispersión está basada en la teoría lineal o de Stokes de primer orden, mediante la Ecuación 3.37. Sin embargo con la finalidad de extender la aplicación del modelo a zonas de poca profundidad, se puede modificar la relación de dispersión considerando la expuesta en la Ecuación 3.38 por Hedges (1976), siendo  $A$  la máxima amplitud local.

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad (3.37)$$

$$\sigma^2 = gk \tanh \left( kh \left( 1 + \frac{A}{h} \right) \right) \quad (3.38)$$

El modelo WAPO, evalúa la disipación de energía considerando los términos de amortiguamiento, por fricción de fondo y disipación de energía debido a rotura de oleaje, dado que son los que más influyen en el cálculo de la altura de ola.

La fricción de fondo se realiza tal como Kirby & Dalrymple (1994), ocupando un factor de fricción tipo Darcy-Weisbach ( $C_f$ ), teniendo como termino de disipación la Ecuación 3.39.

$$f_B = \frac{4}{3\pi} \frac{C_f a \sigma^2}{ng \sinh^3(kh)} \quad (3.39)$$



$$\text{Con } n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right)$$

En el caso del segundo término de disipación a considerar, se tiene que la rotura se simula determinando la variación espacial de energía del oleaje, ya que tiene la ventaja que describe tanto la rotura como la eventual recomposición de la onda. Utilizando la ecuación de balance de energía, siendo  $E$  la energía asociada,  $f_D$  un término de disipación desarrollado por Dalrymple (1984) y modificado para ajustarlo al modelo. Por lo que se tienen las ecuaciones siguientes.

$$\frac{\partial(EC_g)}{\partial x} = -f_D E \quad (3.40)$$

Sabiendo:

$$f_D = \frac{0.15k}{\sigma h} \left[ 1 - \left( \frac{0.4h}{H_B} \right)^2 \right] \quad (3.41)$$

Ya que el modelo WAPO es del tipo elíptico, debe tener condiciones de frontera, las cuales se estiman mediante la solución numérica de la ecuación de Helmholtz, que requiere la implementación de un esquema discreto y de condiciones de frontera apropiados. Para este modelo se consideran dos tipos de fronteras: condición abierta o de radiación y condición parcialmente reflejante. En virtud de la simplicidad y conveniencia del modelo, se restringe al menos que una de las fronteras sea tratada como una condición abierta y de profundidad constante.

La implementación numérica incorpora técnicas de diferencias finitas de segundo orden, con la excepción del cuarto orden, para la evaluación del oleaje incidente en las fronteras con fondo variable. Estas se utilizan para dar soluciones a los sistema de ecuaciones planteadas, con la metodología de eliminación de Gauss de pivoteo parcial. Además en la generación del sistema de ecuaciones, se utiliza la forma de segundo orden de las diferencias centrales, expuesto en la Ecuación 3.42.

$$\frac{\psi_{i,j-1} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i,j+1}}{\Delta y^2} + \frac{\psi_{i-1,j} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i+1,j}}{\Delta x^2} + K_c^2 \psi_{i,j} = 0 \quad (3.42)$$

### 3.6 Hidrodinámica de playas

Las corrientes que se generan en la costa son un factor importante para la operatividad del baño en playas, pudiendo causar peligros inminentes a los bañistas. Johnson en 1919 distinguió diferentes tipos de corrientes debidas a: oleaje, marea, vientos, oscilaciones de bahías (hidráulicas), sistemas oceánicos circulatorios (planetarios), ríos, etc. Sin embargo en el sistema circulatorio de la playa, generalmente se encuentra la zona de rompientes, dominada por las fuerzas inducidas por el oleaje y asociadas a la rotura del mismo, por lo que las corrientes debidas al oleaje son las más importantes en intensidad, [Modelo de corrientes de rotura en playas [2007a]].

La zona de rompiente de las playas se caracteriza por ser dinámica, habiendo disipación de la energía del oleaje a través de la turbulencia, que se transforma en ondas cortas y largas parcialmente reflejadas, variaciones del nivel medio del mar (NMM) y en corrientes de todo tipo, las cuales intervienen en este estudio.

La primera corriente de interés, se puede definir por el oleaje al incidir oblicuamente a la batimetría. Lo que produce que el exceso de flujo de momento, conocido como tensor de radiación en la zona de rompiente, puede descomponerse de forma transversal (que produce el *set-up*) y en forma longitudinal que al no tener condición de contorno, provoca una corriente paralela a la costa llamada también como corriente longitudinal.



Por otro lado existen las corrientes perpendiculares llamadas corriente de retorno, que se forman por las aceleraciones de estas, que causan desequilibrios sistemáticos en los caudales longitudinales que se compensan al producir zonas de entrada y salida de agua en la zona de rompiente y que se manifiestan también en modificaciones de la batimetría. Las zonas más someras son las zonas de entrada que son más difusas, y las zonas de salida más concentradas, donde se producen las corrientes de retorno o cíclicas, que son de vital importancia para la operatividad del nado debido al peligro de arrastre de los cuerpos hacia el mar.

Sin embargo, si se analiza la playa de forma vertical en la zona de rompiente, se identifican en la parte superior de la ola, las fuerzas que se dirigen predominantemente hacia la tierra, compensándose con un flujo neto saliente por debajo del seno de la ola, el cual se denomina corriente de resaca.

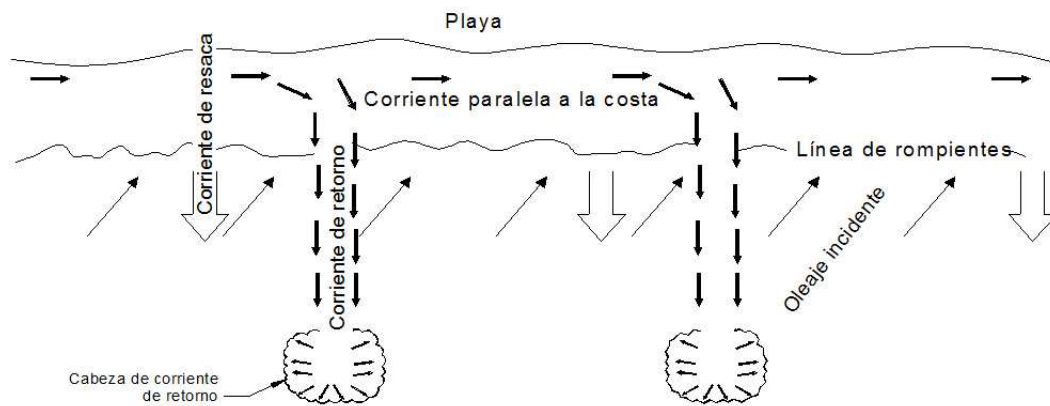


Figura 3.6: Tipos de corrientes cercanas a la playa. Fuente: Quezada [2008]

En los casos reales, el oleaje viene en grupos de olas grandes y pequeñas, los cuales provocan alteraciones temporales en la dinámica de las corrientes y niveles. Estas se deben a; 1) Liberación de la onda larga forzada, la cual se produce cuando el oleaje rompe y se destruye la estructura del grupo, quedando la onda forzada libre en la zona de rompiente, esta es una onda larga asociada a la oscilación del nivel medio entre las olas; 2) Variación del punto de rotura y del *set-up*, al ser el oleaje irregular el punto de rotura se traslada transversalmente, lo que produce un traslado de la zona de ascenso y descenso, constituyendo una onda larga libre que toma parte del movimiento de la oscilación de onda corta; 3) Transferencia no lineal de energía a los movimientos de largo período, debido a que en el proceso de rotura existen intercambios de energía de la onda corta hacia los movimientos de largo período. Se denomina como *surf beat* a este conjunto de oscilaciones de onda larga, transformadas en la zona de rompiente.

A continuación se profundiza los tipos de corrientes nombrados.

### 3.6.1 Corriente longitudinal

Para la resolución de las corrientes longitudinales se plantea el equilibrio en la dirección longitudinal, asumiendo movimientos medios permanentes, variaciones longitudinales nulas, tensiones de Reynolds despreciables, imponiendo la velocidad transversal como nula ( $U = 0$ ), teniendo como ecuación longitudinal de conservación de cantidad de movimiento, con  $S$  como la tensión de Radiación:



$$\frac{dS_{xy}}{dx} = R_y \quad (3.43)$$

Del término  $R_y$  se asume que sólo incluye la fricción por fondo. Por tanto, la resolución de la Ecuación 3.43 se puede realizar primero fuera del área de rompientes, pudiendo expresar el tensor de radiación de la forma descrita en la Ecuación 3.44:

$$S_{xy} = EC_g \frac{\sin(\theta)}{c} \cos(\theta) \quad (3.44)$$

En base a la ley de Snell de la refracción pura, la variación transversal del término  $S_{xy}$  debe ser nula, por lo que se tiene que:

$$R_y = 0$$

Y por la estructura de la fricción por fondo, esta ecuación se anula sólo para velocidades de corriente longitudinal nulas ( $V = 0$ ), de otra forma fuera del área de rompiente no existe corriente longitudinal, con los supuestos expuestos.

Sin embargo para el caso de la zona en que ocurren las rompientes, suponiendo que la altura de ola es proporcional a la profundidad, el tensor de radiación mediante aproximaciones de profundidad reducida, manteniendo la ley de Snell de la refracción y derivando, queda como sigue:

$$\frac{dS_{xy}}{dx} = -\frac{5}{16} \gamma'^2 \tan(\beta) \rho (gD)^{\frac{3}{2}} \frac{\sin(\theta_b)}{c_b} \cos(\theta_b) \quad (3.45)$$

El valor  $R_y$  se aproxima según Longuet-Higgins (1970), con  $u_b$  como la amplitud de la velocidad en el fondo y  $\gamma'$  constante de proporcionalidad de la profundidad con la ola en rotura.

$$R_y = \tau_y^B = -\frac{2}{\pi} \rho C_f |u_b| V \quad (3.46)$$

Obteniendo como primera aproximación de velocidad de la corriente longitudinal la Ecuación 3.47.

$$V = \frac{5\pi}{16} \frac{\gamma'}{C_f} \frac{\sin(\theta_0)}{c_0} gh \frac{dh}{dx} \quad (3.47)$$

### 3.6.2 Corriente de retorno (*rip current*).

Se entiende por corriente de retorno a la corriente concentrada y relativamente fuerte, que se proyecta desde la playa hacia el mar generando sistemas cíclicos que se establecen en la mayoría de las playas. Estos circuitos se caracterizan por movimientos de la masa de agua en la dirección de propagación del oleaje en la zona de rotura, corrientes longitudinales, corrientes cíclicas, expansión de la corriente en la cabeza del *rip* y movimientos longitudinales tras la zona de rompientes.

Las características principales de la corriente de retorno son que se alimentan de las longitudinales, se favorecen por la existencia de barras, causan pérdida de sedimento, suelen convertirse en flujo tipo meandro a lo largo de la costa en función del ángulo de incidencia del oleaje, alcanzando sus mayores intensidades en pleamar.

Estas corrientes se pueden desarrollar según Bowen (1969), con las ecuaciones de la cantidad de movimiento, simplificadas con la hipótesis de movimiento medios permanentes, presentando la siguiente formulación:



$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} + R_x + S_x \quad (3.48)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} + R_y + S_y \quad (3.49)$$

Siendo los términos  $R$  correspondientes a la fricción por fondo y por turbulencia. Y los términos  $S$  corresponden al tensor de radiación.

### 3.6.3 Corriente de resaca

Una de las primeras aproximaciones de la corriente de resaca, es la producida por las diferencias verticales entre, la tensión de radiación y la fuerza del gradiente de presión promediada en el tiempo, con la fricción con el fondo como fuerza equilibradora.

Luego para un caso estacionario bidimensional, despreciando las tensiones viscosas moleculares e integrando en un período del oleaje, se plantea la ecuación de conservación de cantidad de movimiento en el eje transversal, la cual tiene diversas formas de resolver la corriente de resaca.

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}^2 + \bar{p})}{\partial x} + \rho \frac{\partial(\bar{u}\bar{w})}{\partial z} = 0 \quad (3.50)$$

Una solución es la de Stive & Wind (1986), que obtuvieron la expresión para la distribución vertical de la corriente de resaca, utilizando las condiciones de contorno de tensión tangencial al nivel del seno de la onda y de flujo medio a través de un plano vertical nulo, [Documento de referencia [2000]].

$$U_e(z) = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{z+h}{d_t} - 1 \right)^2 - \frac{1}{3} \right] \frac{d_t^2}{\rho \varepsilon_t} \frac{dR}{dx} + \left( \frac{z+h}{d_t} - \frac{1}{2} \right) \frac{d_t \bar{\tau}(\eta_t)}{\rho \varepsilon_t} + \bar{U}_r \quad (3.51)$$

## 3.7 Modelos de circulación costera

### 3.7.1 Generalidades

Los modelos de circulación costera suelen ser importantes en estudios como, el transporte de sedimentos, dispersión de contaminantes, morfología costera, línea costera y estudios de corrientes. Siendo este último muy importante para el presente estudio de operatividad del baño. Los modelos se basan generalmente en la resolución de las ecuaciones promediadas del movimiento y la ecuación de continuidad. Pero existen diversas formas de resolución, introduciendo una serie de ecuaciones de cierre, dado que se utilizan expresiones para las tensiones tangenciales y turbulentas.

En general existen tres clasificaciones: Modelos de perfil transversal; Modelos en dos dimensiones; Modelos en tres dimensiones o cuasi-tridimensionales. Los tipos de modelos más completos son los tridimensionales (3-D), que resuelven las ecuaciones en mallas tridimensionales, caracterizando toda la columna de agua a lo largo y perpendicular a la costa, requiriendo un gran costo computacional. Debido a esto, y para simplificar el costo computacional, existen los modelos bidimensionales (2-D) de resolución numérica, comúnmente utilizados en diferencias finitas y esquemas implícitos, que reducen la inestabilidad del modelo.

Para el caso de los 2-D existen dos aproximaciones, los puramente 2-D (2-DV), que asumen las velocidades y gradientes en la dirección paralela a la costa como nulas, y los resultados obtenidos son velocidades y niveles; y los modelos integrados en la vertical (2-DH), que resuelven las



ecuaciones del movimiento y de continuidad integradas en vertical sobre una malla, entregando como resultado niveles y las dos componentes horizontales de la velocidad, perdiendo la estructura vertical del flujo, [*Modelo de corrientes de rotura en playas [2007a]*].

### 3.7.2 Modelado de las Corriente Costeras

Para el estudio operativo es necesario realizar un análisis de corrientes, es por ello que se debe implementar un modelo numérico de corrientes costeras, que tenga la capacidad de representar las corrientes inducidas por el oleaje en una playa. Se seleccionó el modelo llamado Corrientes Costeras (COCO) para ser implementado en la zona de estudio. Este modelo utiliza las amplitudes de onda que se propagan, para la estimación de las corrientes inducidas por los tensores de radiación, [*Mendoza et al. [2007]*].

Las ecuaciones centrales que se desarrollan en el moldeamiento, son las promediadas en profundidad de Navier-Stokes, que describen adecuadamente el flujo de masas de agua, donde la velocidad vertical es despreciable y la presión puede ser considerada sólo como hidrostática. Estas ecuaciones son totalmente no lineales y tiene una solución analítica para algunos casos específicos. Teniendo en cuenta el efecto de Coriolis, se presentan las ecuaciones de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (3.52)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} - \left( \frac{\partial(\varepsilon'hu_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\varepsilon'hu_y)}{\partial y} \right) = \\ -\frac{\tau_{bx}}{\rho} - gh\frac{\partial \eta}{\partial x} + hf_{co}v - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} - \left( \frac{\partial(\varepsilon'hv_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\varepsilon'hv_y)}{\partial y} \right) = \\ -\frac{\tau_{by}}{\rho} - gh\frac{\partial \eta}{\partial y} + hf_{co}u - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.54)$$

Donde  $\eta$  es la elevación de la superficie sobre el nivel medio del mar ( $h_s$ ).  $U$  y  $V$  son los componentes del vector de velocidad y el índice denota el tipo de derivación.  $h$  es la profundidad total ( $h = h_s + \eta$ ) y  $\varepsilon'$  es la viscosidad de Foucault. Las tensiones de fondo se definen como:

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g u \sqrt{u_2 + v_2}}{C^2}; \tau_{by} = \frac{\rho g v \sqrt{u_2 + v_2}}{C^2}$$

$f_{co}$  es el parámetro de Coriolis y  $S_{ij}$  son las componentes del tensor de radiación, que son descritos más adelante.

La teoría de los tensores de radiación fue desarrollada originalmente por Longuet-Higgins y Stewart (1962). Se utilizó una analogía de la tensión que las ondas electromagnéticas, frente a los obstáculos y la transformación de las ondas debido a un fondo variable. Por lo tanto, el tensor lineal de radiación de ondas oblicua puede ser escrito de las siguientes formas.



- Aguas intermedias

$$S = \frac{\rho g a^2}{4} \begin{pmatrix} 2\frac{C_g}{C} \cos^2(\theta) + \left(\frac{2C_g}{C} - 1\right) & \frac{C_g}{C} \cos(\theta) \sin(\theta) \\ \frac{C_g}{C} \cos(\theta) \sin(\theta) & 2\frac{C_g}{C} \sin^2(\theta) + \left(\frac{2C_g}{C} - 1\right) \end{pmatrix}$$

- Aguas profundas

$$S = \frac{\rho g a^2}{4} \begin{pmatrix} \cos^2(\theta) & \cos(\theta) \sin(\theta) \\ \cos(\theta) \sin(\theta) & \sin^2(\theta) \end{pmatrix}$$

- Aguas someras

$$S = \frac{\rho g a^2}{4} \begin{pmatrix} 2 \cos^2(\theta) + 1 & \cos(\theta) \sin(\theta) \\ \cos(\theta) \sin(\theta) & 2 \sin^2(\theta) + 1 \end{pmatrix}$$

Donde  $S$  es el tensor de radiación,  $\rho$  la densidad del fluido,  $\theta$  el ángulo de incidencia y el parámetro  $a$  es la amplitud de la onda local.

Godunov (1959) desarrolló una técnica para la solución de los problemas de flujo, que pueden ser representados como sistemas hiperbólicos de ecuaciones diferenciales. Este procedimiento consiste en reemplazar el flujo continuo en un dominio de cálculo, por una serie de estados que se consideran constantes en pequeñas secciones y discontinuos al inicio y al final de cada una. De manera que se puede hallar una solución al problema de Riemann, para cada sección y reconstruir el campo general de flujo agrupando todas las soluciones locales. Sin embargo Godunov presentó la solución analítica para su técnica, pero actualmente es computacionalmente imposible, por lo que se desarrollaron soluciones aproximadas que se conocen como métodos de Godunov, el cual para el desarrollo de la solución numérica, utiliza la solución aproximada presentada por Roe (1981).

El tipo de malla que se utiliza es la tipo Quad-tree adaptada, que ha tenido éxito en los últimos 10-15 años, para alcanzar una mayor precisión en los modelos hidrodinámicos. Entre las ventajas del tipo de malla son, su independencia de la forma de dominio, la mejora en la eficiencia numérica y una buena organización de la información.

Quad-tree genera mallas que normalmente comienzan con una unidad de dominio cuadrado, o por el dominio forzado a ser un cuadrado, añadiendo las celdas necesarias. Utilizando para el modelo, una cuadrícula técnica de generación desarrollado por *Silva et al. [2004]*. Esta técnica es aplicable a los dominios de forma rectangular con celdas rectangulares.

### 3.8 Aspectos Biomecánicos en el nado

Un aspecto importante para el estudio operativo del baño, es definir ciertos criterios en el nado de las personas que utilizan las playas, es por ello que es de interés para este estudio dar a conocer aspectos de la biomecánica en el nado, [*Llana [2002]*].

Para comprender la locomoción humana en el medio acuático, es necesario identificar las fuerzas que interaccionan en el nado, pudiendo nombrar cuatro fuerzas que se observan en la Figura 3.7:



fuerza del peso, empuje hidrostático, fuerza propulsiva y resistencia, las cuales son determinantes en la velocidad de nado, de gran importancia para el caso en estudio, ya que delimitará la velocidad de corriente que no sea peligrosa y por ende la operatividad.

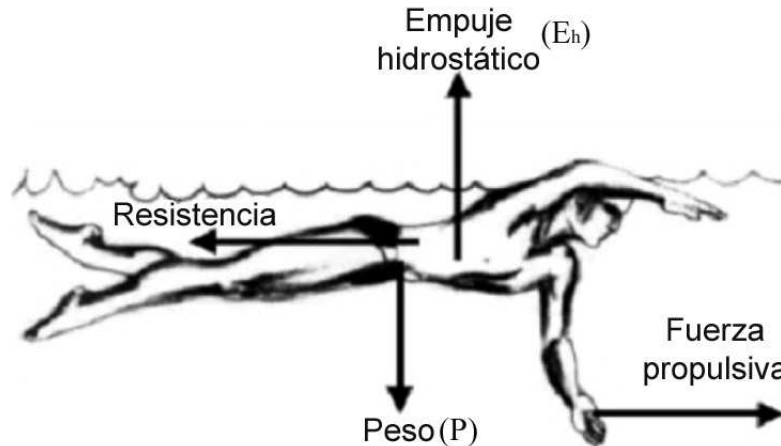


Figura 3.7: Interacción de fuerzas en el nado. Fuente: Llana [2002]

A continuación se procede a explicar la interacción en el nado de las fuerzas señaladas, según Llana [2002].

### 3.8.1 Flotación

La flotación está determinada por el principio de Arquímedes, en que se experimenta un empuje vertical llamado hidrostático, que es igual al peso del volumen del fluido desplazado. Por lo que la flotabilidad dependerá de que el peso del cuerpo sea menor al empuje hidrostático. Luego si se tiene:

$$E_h = m_{agua}g = v_{agua}\rho_{agua}g$$

$$P = m_{cuerpo}g = v_{cuerpo}\rho_{cuerpo}g$$

Lo que da;

$$v_{agua} = v_{cuerpo}$$

$$g = g$$

$$\rho_{fluido} \neq \rho_{cuerpo}$$

Por lo tanto la densidad ( $\rho$ ) será un factor determinante en la flotación, y en el caso del cuerpo humano esta densidad que posibilite la flotación, dependerá de la habilidad para expandir la caja torácica, la cual permite contener aire en el cuerpo, permitiendo la flotación.

### 3.8.2 Resistencia

El nadador se desplaza en el agua enfrentando tres tipos de resistencias: la resistencia de forma, la resistencia por oleaje y la resistencia por fricción.

**Resistencia de forma o presión:** Se produce debido a que durante el nado, se genera una zona de alta presión delante del cuerpo y otra de baja presión detrás de él, formando un gradiente de presión que frena el avance. Lo que se debe principalmente a que el agua fluye de forma turbulenta.



**Resistencia por oleaje:** Aparece cuando un cuerpo se mueve entre el agua y el aire, por lo que no existe en los desplazamientos subacuáticos. Se debe al choque del nadador con la masa de agua de las olas, que se forma como producto del avance. Y si se aplica la ley de acción y reacción este choque hará que el agua sea desplazada hacia adelante, mientras que el nadador será desplazado hacia atrás, por lo que la pérdida en velocidad que experimenta el nadador, será equivalente a la cantidad de momento que éste le aplique a la masa de agua que desplaza hacia adelante.

**Resistencia por fricción o debida al arrastre viscoso:** Su relevancia depende de la cantidad de superficie en contacto con el agua, de la viscosidad del agua, del coeficiente de fricción de piel, pelo y bañador, y de la velocidad de nado.

### 3.8.3 Propulsión

En general el tema de la propulsión, se estudia en base a dos leyes del movimiento: la acción-reacción y el teorema de Bernouilli. Sin embargo hay postulados que generan cierta controversia, dado que basan la propulsión en la formación de vórtices, según Colwin (1984, 1985). A continuación se hace una breve reseña de algunos postulados de las diferentes hipótesis mencionadas.

Counsilman en el año 1968, postuló que la generación de la propulsión por las manos de los nadadores, se explica con la tercera ley de Newton (acción-reacción). En donde la mano debe entrar al agua con el codo extendido, para posteriormente flexionarse y volverse a extender

Luego Brown y Counsilman postulan que los movimientos curvilíneos eran propulsivos, debido a la fuerza de elevación o sustentación que generaba, pudiendo ser explicado por el denominado teorema de Bernouilli. Principio que hace alusión a que cuando aumenta la velocidad del fluido la presión del fluido disminuye y viceversa, por lo que se genera el gradiente de presión, creando una fuerza ascensional o de sustentación, como se observa en la Figura 3.8.

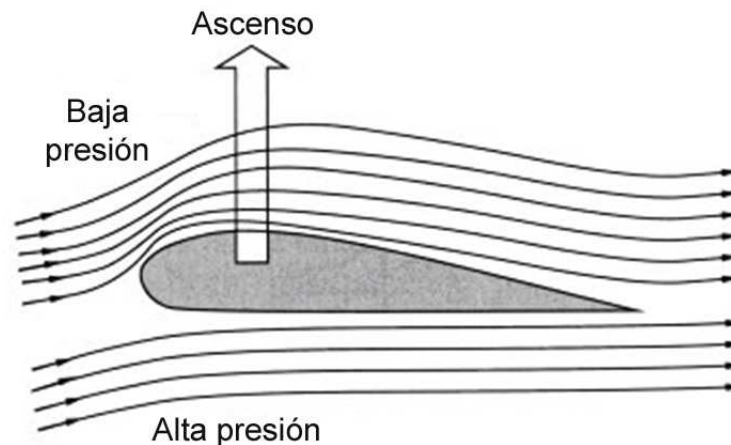


Figura 3.8: Presión de propulsión en el nado. Fuente: Llana [2002]

Sin embargo, a mediados de los 80 aparece una nueva perspectiva de la propulsión humana en el agua, llamada “hipótesis propulsiva de los vórtices”, como consecuencia del estudio del nado de los peces y de las corrientes de agua que son generadas durante los movimientos propulsivos. Siendo la primera teoría que aplica los conocimientos de dinámica de fluidos. En que los vórtices surgen por el principio de conservación del momento y del gradiente de velocidades, [Llana [2002]].



## 4. Metodología

### 4.1 Materiales

A continuación se señalan los materiales que se utilizan para ejecutar la presente investigación, los cuales son:

#### 4.1.1 Cartas náuticas

Con respecto a la batimetría, ésta se obtuvo de la digitalización de la carta náutica N° 5111, Bahía y Puerto de Valparaíso, utilizándose otras cartas complementarias de referencia como la N° 4000 y 4310, llamadas Bahía Coquimbo a Bahía Valparaíso y Bahía Quintero a Bahía Valparaíso, respectivamente.



Figura 4.1: Carta náutica N° 5111, Bahía y Puerto de Valparaíso. Fuente: SHOA



### 4.1.2 Base de datos de oleaje

Se utilizaron datos de un año de oleaje espectral de “Olas Chile” para desarrollar el estudio, pertenecientes a la Universidad de Valparaíso, los que fueron evaluados y validados por la empresa *Baird & Associates S.A.*

La ubicación de la boya desde la cual se obtuvieron los datos estadísticos se observa en la Figura 4.2. Que representan el oleaje en términos espectrales entre las fechas 1 de enero y 31 de diciembre del año 2000, contenidos en intervalos de tiempo cada 3 horas, definiendo así un estado de mar.



Figura 4.2: Ubicación nodo de estadísticas en aguas profundas. Fuente: E.P.

### 4.1.3 Software

Se utilizaron los siguientes software con licencia de la Universidad de Valparaíso:

**Didger:** Programa que tiene la capacidad de digitalizar archivos batimétricos georeferenciados, es decir los objetos y rasgos que aparecen en un mapa impreso los procesa a un formato digital.

**Surfer:** Para este caso se utilizó como complemento, con el fin de visualizar los archivos digitales y ejecutar el proceso de interpolación de la batimetría.

**IDL (*Interactive Data Language*):** Programa de lenguaje interpretado, orientado al arreglo de análisis matemático y despliegue gráfico, utilizado para el procesamiento de datos y gráficas de resultados.

**Stwave:** Modelo numérico, para la propagación del oleaje.

En segundo lugar están los softwares de libre distribución, que no requieren licencia para su uso, estos son:



**WAPO y COCO:** Modelos numéricos, para la propagación del oleaje y corrientes costeras, respectivamente. Los cuales se obtuvieron de los autores de los modelos.

#### 4.1.4 Sistema de procesamiento

Se utilizó un computador de escritorio con las siguientes características: disco duro de 1 TB (Sata), 4 GB de RAM (Kingston DDR2 800 [MHz]), Placa Intel (M/Board DG41RQ 1333 [MHz]) y un procesador Intel C2Q 8400 de 64 bits.

#### 4.1.5 Correntómetro

Se tomaron datos *in situ* de corrientes en la zona de estudio, utilizando un correntómetro tipo Sensordata como se muestra en la Figura 4.3, que toma datos de correntometría de forma euleriana, registrando la rapidez [cm/s] y la dirección a Sotavento (grados sexagesimales) de la corriente.



Figura 4.3: Correntómetro tipo sensor data. Fuente: E.P.

#### 4.1.6 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

Además para los datos *in situ* de corrientes mencionados, se utilizó un ADCP de 300 [kHz], con un alcance de 130 [m], tipo Sentinel como se muestra en la Figura 4.4, que toma datos de corriente de forma euleriana durante su desplazamiento.



Figura 4.4: ADCP tipo sentinel. Fuente: RDInstruments

#### 4.1.7 CTD

Instrumento que mide conductividad (salinidad), temperatura y profundidad en un perfil vertical en la columna de agua. En este caso, se utilizó con la finalidad de obtener el grado de estratificación de la columna de agua, para la zona de estudio.



Figura 4.5: CTD tipo SBE-19. Fuente: Sea-Bird Electronics



## 4.2 Diseño metodológico

Considerando que se tiene un año espectral de oleaje en aguas profundas y que la investigación tiene como fin analizar parámetros de oleaje y corrientes inducidas por la rotura del oleaje, en la zona de estudio. Se deben hacer una serie de procesos que permitan obtener una base de datos representativa, para el posterior análisis y validación mediante los datos *in situ* de corriente mencionado. Por lo cual en la Figura 4.6 se señalan las etapas a ejecutar, que se explican con mayor detalle a continuación.

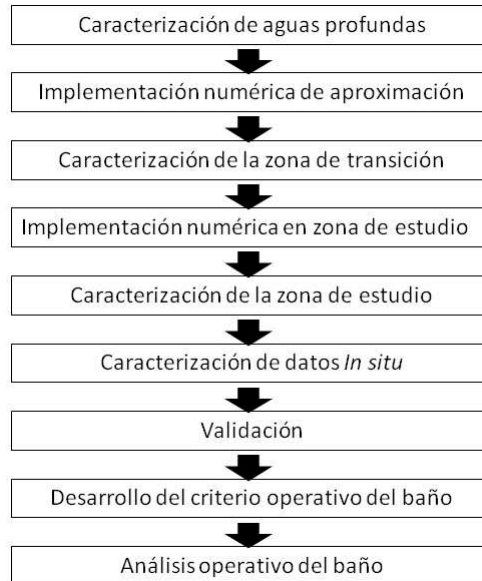


Figura 4.6: Esquema diseño metodológico. Fuente: E.P.

### 4.2.1 Caracterización de aguas profundas

Los espectros de oleaje de “Olas Chile” que se utilizaron se componen de una matriz de dirección y frecuencia de tamaño 24x25, por lo que se tienen espectros de 600 celdas de energía, en que las direcciones van de los 0° hasta los 360°, con periodos entre 2.4 y 23.9 [s]. La caracterización del espectro es necesaria para el diseño de la transferencia espectral, que se realizó en las secciones posteriores.

Se efectuó un análisis de mediano plazo de los parámetros de resumen de olas, correspondientes al año 2000, con la finalidad de comprender los patrones del oleaje en aguas profundas.

### 4.2.2 Implementación numérica de aproximación (*Stw*ave)

Previamente se definió la zona de transición, que indica el área hasta la cual se implementó el modelo de aproximación lineal (*Stw*ave), para proseguir con el segundo modelo (WAPO) en la zona de estudio. Es por ello que en base a *Salinas [2008]*, se justificó la implementación de un modelo lineal de aproximación dentro de la bahía de Valparaíso, determinando con respecto al criterio de Ursell el punto de transición en las coordenadas 33°01'4.06" S, 71°34'30.38" W a una profundidad de 35 [m] NRS aproximadamente, como se observa en la Figura 4.7.

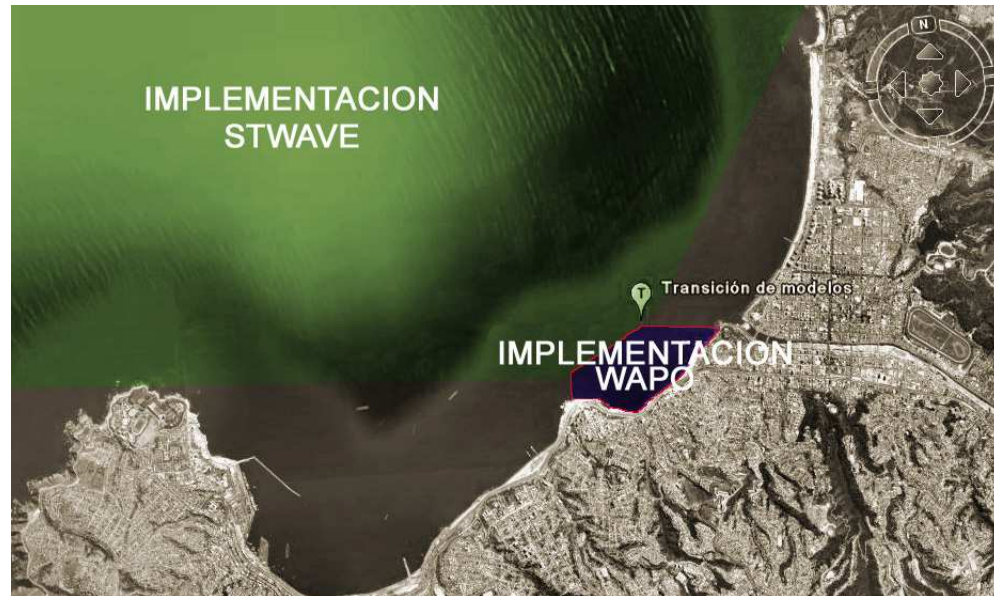


Figura 4.7: Demarcado de las áreas de implementación de los modelos. Fuente: E.P.

Se continuó con el desarrollo de la metodología de transferencia, que en este caso es semipurista, mediante la implementación numérica del modelo espectral *Stwave*, que consiste en la propagación de oleaje de alturas de olas unitarias con direcciones y periodos entre 183-357 [°] y 2-24 [s], que utilizan en la propagación espectros sintéticos tipo Cosine-power y TMA, respectivamente. Lo anterior con la finalidad de obtener las funciones de transferencia para los espectros de aguas profundas descritos, en el punto de transición.

Para configurar el modelo *Stwave*, se digitalizaron los sondajes de las cartas náuticas y se confeccionaron 3 mallas principales con una resolución de 100 [m], con mallas anidadas de 10 [m] para una mejor resolución de los resultados en el punto de transición, basándose en Sáez *et al.* [2009]. La configuración de las mallas se muestran en la Figura 4.8 y Tabla 4.1, especificando además la direcciones de propagación a efectuar en cada malla con periodos entre 2-24 [s] espaciados cada 2 [s], teniendo un total de 108 propagaciones para obtener las funciones de transferencia.

El punto de transición mencionado representa un área de 10 [m] x 10 [m] (punto T en Figura 4.7), considerando la configuración de la malla. Por lo que el criterio de anidamiento entre los modelos, consistió en el traspaso de información de coeficientes de transformación de oleaje en el área señalada. Este criterio se justificó en el Anexo 10.1, el cual rectifica que el área de anidamiento es representativa para este caso.

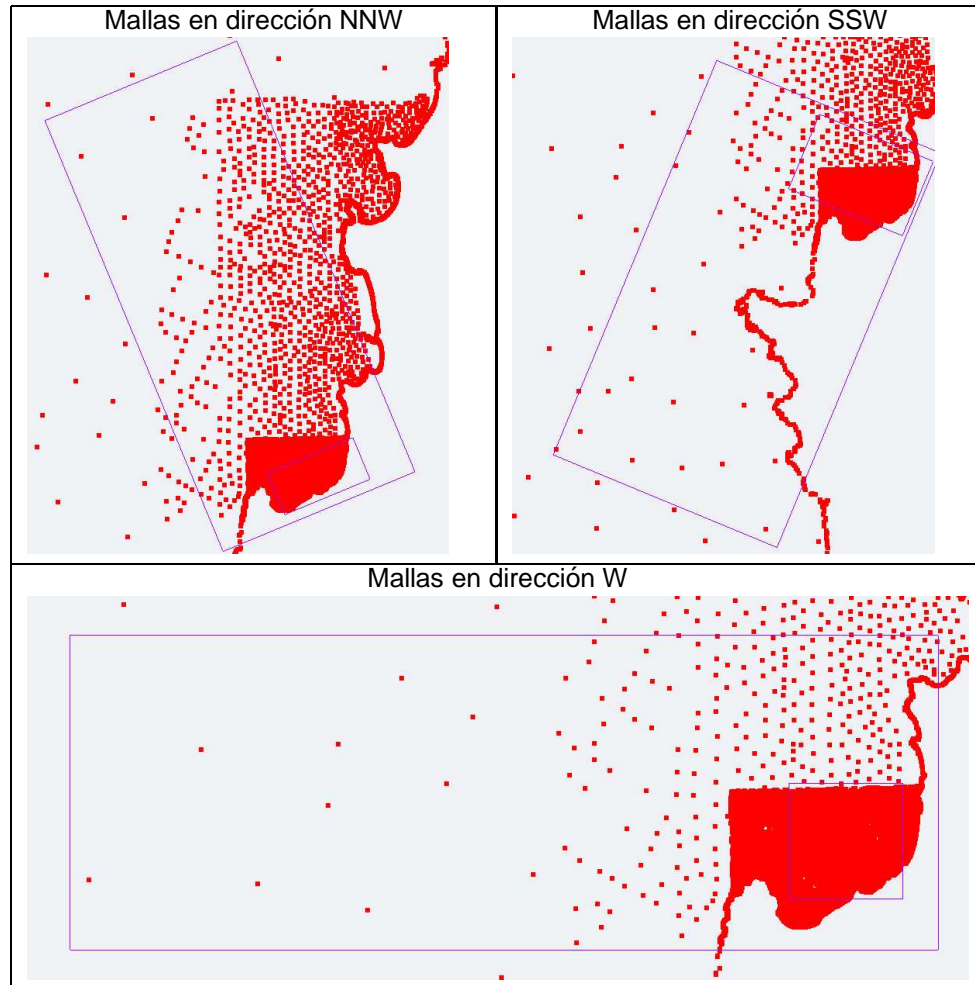


Figura 4.8: Configuración de mallas del modelo *Stwave*. Fuente: E.P.

Tabla 4.1: Configuración mallas del modelo *Stwave*. Fuente: E.P.

Dirección meteorológica malla principal [°]	Dirección meteorológica malla anidada [°]	Direcciones meteorológicas de propagación [°]
202.5-SSW	202.5-SSW	183-202.5-225
270-W	270-W	247.5-270-292.5
337.5-NNW	337.5-NNW	315-337.5-357

### 4.2.3 Caracterización de la zona de transición

Una vez desarrolladas las funciones de transferencia se procedió, mediante un algoritmo desarrollado en IDL, a transferir de forma semipurista los espectros de aguas profundas al punto de transición, efectuando un análisis de oleaje de mediano plazo para la caracterización del lugar.



#### 4.2.4 Implementación numérica zona de estudio (WAPO-COCO)

La obtención de los parámetros de oleaje en el área de estudio (Figura 4.7) se realizó aplicando el modelo WAPO, a partir del cual se obtuvo una caracterización de las corrientes usando COCO.

Con respecto a la implementación del modelo WAPO, se tuvieron en cuenta la configuración de la batimetría del área a modelar y los parámetros de oleaje a propagar, según el análisis de mediano plazo realizado en la zona de transición, debido a que la metodología de propagación a efectuar del punto de transición al área de la playa, se realizó mediante una transferencia monocromática o parámetros de resumen. Se partió del supuesto de que los espectros al ser propagados al punto de transición, se concentran con bandas de energías estrechas, que pueden ser modeladas mediante parámetros de resumen.

Para el caso del modelado de corrientes, en la configuración se utilizó de igual forma la batimetría y los tensores de radiación obtenidos del modelo WAPO.

El modelo WAPO se configuró con la aproximación del número de onda tipo Hedges, con un coeficiente de reflexión con valor 0.1, basándose en *Mike 21 toolbox [2005]*, dado que la zona de estudio presenta una playa constituida predominantemente por arenas medias, ocupando el criterio de Wentworth de 1992, [*Mercado [2009]*]. Para el caso del coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach se consideró 0.01, valor estimado en el *Modelo de propagación de oleaje monocromático [2007b]*.

Al modelo COCO se le ingresaron la viscosidad turbulenta y el coeficiente de fricción de fondo tipo Chezy, que para el caso de playa se estimaron del *Modelo de rotura en playas [2007a]*, tomando para este caso los valores  $15 [m^2/s]$  y  $10 [m^{1/2}/s]$  respectivamente.

#### 4.2.5 Caracterización de la zona de estudio

Para la caracterización de la zona de estudio se definieron dos áreas que se observan en la Figura 4.9, las cuales se evalúan a posterior si son aptas para el baño.

Las áreas definidas presentan la condición que la profundidad es menor o igual a  $5 [m]$ . Además considerando la proyección UTM, el área 1 y 2 en el eje y se encuentran entre 6343022.175-6343215 y 6343215-6343399 respectivamente, partiendo ambas del eje x en la coordenada 259650.

La metodología para caracterizar las áreas señaladas, es mediante un algoritmo de elaboración propia, el cual dado los resultados de los modelos, entrega las alturas de olas y corrientes anuales en las áreas en estudio. Cada parámetro representa el valor máximo que existió en un período de tres horas (estado de mar) en las áreas en cuestión. Se escoge el valor máximo como un factor de seguridad debido al riesgo asociado a la pérdida de vidas.

Luego se procedió a la caracterización mediante un análisis de mediano plazo, por cada área de los parámetros mencionados. Las corrientes se analizaron en corrientes transversales ( $V_{c_{tran}}$ ), que contempla tanto las corrientes de resaca como las de retorno, y longitudinales ( $V_{c_{long}}$ ). Las corrientes transversales pueden presentar un peligro hacia los bañistas, debido al empuje que produce en dirección mar abierto. En cambio las corrientes longitudinales se analizan por el riesgo asociado de empuje al bañista hacia las rocas, ya que en este caso la playa Caleta Abarca presenta zonas rocosas.

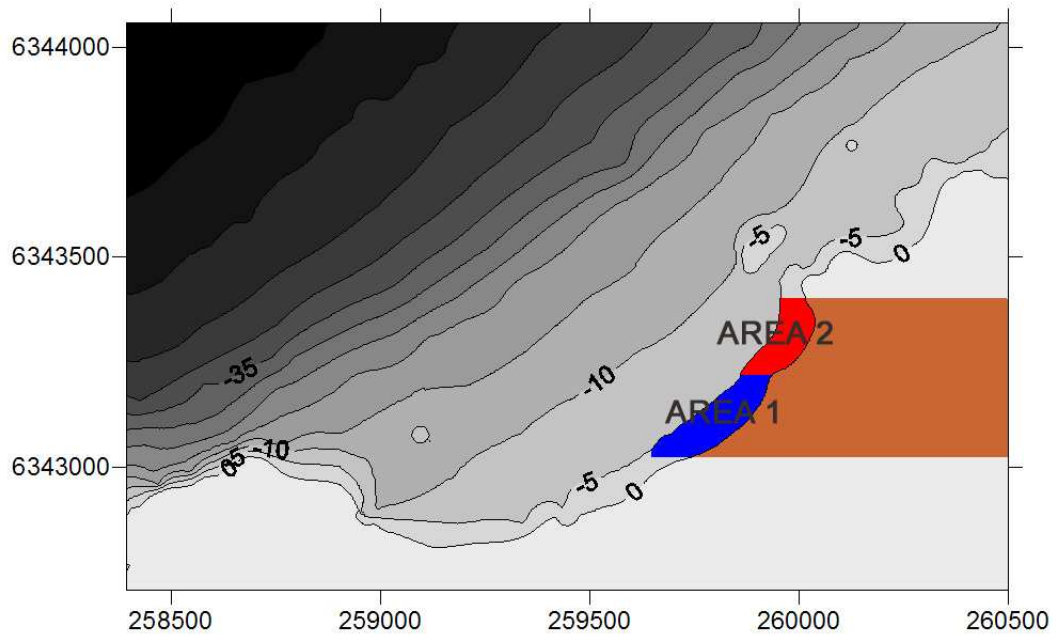


Figura 4.9: Áreas en estudio de playa Caleta Abarca. Fuente: E.P.

Además la playa Caleta Abarca, presenta una variación aproximada de su línea de costa de  $45^\circ$  con respecto al eje x, en un sistema de coordenadas cartesianas. Considerando un cierto factor de seguridad en magnitud, la corriente longitudinal corresponde a las direcciones entre  $0-45$  y  $0-135^\circ$  y la corriente transversal entre las direcciones  $45-180$  y  $-135-180^\circ$ . Todo esto con respecto al eje x.

#### 4.2.6 Caracterización de datos *In situ*

Con el fin de validar los datos obtenidos en la presente investigación, se realizó una toma de datos *in situ* en el sector de playa Caleta Abarca, la cual consistió en efectuar un ADCP remolcado en la ruta mostrada en la Figura 4.10, la que entrega los perfiles en profundidad de las velocidades de corriente. La Tabla 4.2 detalla las coordenadas de los puntos que forman los transectas de la figura señalada.

Tabla 4.2: Puntos del circuito del ADCP remolcado. Fuente: E.P.

Punto	Latitud [ $^\circ$ ]	Longitud [ $^\circ$ ]
A	-33.018800	-71.566680
B	-33.024200	-71.582690
C	-33.022301	-71.583494
D	-33.019599	-71.575369
E	-33.023620	-71.572231
F	-33.021107	-71.569576
G	-33.018029	-71.571105
H	-33.016898	-71.567243

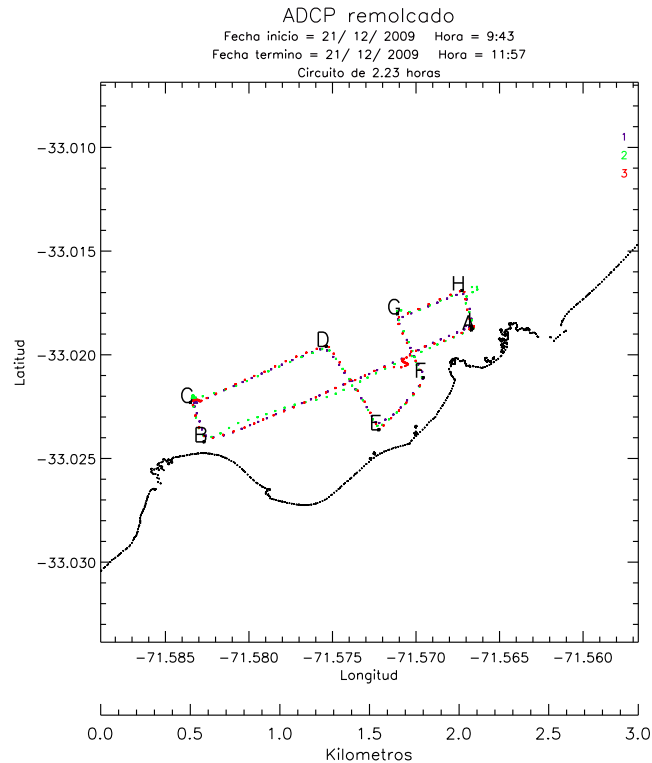


Figura 4.10: Ruta de ADCP remolcado en playa Caleta Abarca. Fuente: E.P.

La modalidad de adquisición de datos remolcado, se llevo a cabo el día 21 de diciembre del 2009 con una velocidad de remolque de aproximadamente  $2.5 [m/s]$ , realizando los circuitos de la Figura 4.10, que tuvieron por duración total 2.23315 horas con una profundidad máxima de  $40 [m]$ . Las horas de inicio y término se detallan a continuación en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Inicio y termino de los circuitos del ADCP remolcado. Fuente: E.P.

Circuito	Inicio [horas]	Termino [horas]
1	9:43	10:26
2	10:26	11:08
3	11:08	11:57

El tamaño de las celdas verticales del ADCP fue de  $1 [m]$ , con una pérdida del primer metro superficial y de un metro cercano al fondo por diseño del instrumento y limitaciones en la propagación de la onda por rebotes cercanos al fondo. El instrumento realizó perfiles verticales de corriente cada  $1 [s]$  y para el análisis se realizaron promedios cada  $20 [s]$ . Los datos  $U$  y  $V$  fueron corregidos por orientación del compás.

El correntómetro se ubicó en las coordenadas  $33^{\circ}01'14.88'' S$ ,  $71^{\circ}34'16.212'' W$  a una profundidad de  $4 [m]$ , que tuvo por inicio el día 21 de diciembre a las 11:28 horas, finalizando el 22 de diciembre a las 7:08 horas, configurando el instrumento para que tome datos cada 5 minutos. A las componentes  $U$  y  $V$  se les aplicó un ajuste sinusoidal por mínimos cuadrados, para extraer las componentes de amplitud, fase y residual de las dos principales constituyentes armónicas de la marea: M2 y K1. Con



estos datos se analizó la corriente inducida por el oleaje, frente a las corrientes inducidas por otros fenómenos como la marea entre otros.

Además se efectuaron tres mediciones de CTD en los puntos A y C de profundidades 7 y 35 [m], uno en cada circuito. Esto tuvo por finalidad medir densidades en perfiles verticales para estimar el grado de estratificación. Si la columna es verticalmente homogénea o casi homogénea, se puede asumir la condición de una capa de flujo para la implementación en modelos de una capa. El instrumento registraba 4 datos de temperatura, salinidad y presión, por segundo. Los datos fueron procesados usando el software SeaSoft recomendado por el fabricante, el cual calcula el valor de densidad utilizando la Ecuación de Estado (EOS).

#### 4.2.7 Validación

Efectuada la caracterización de los datos, se procedió a una primera validación del estudio, comparando los datos procesados por los modelos e *in situ*.

Si bien se tienen datos *in situ* del lugar en estudio del año 2009, en un intervalo de tiempo reducido (minutos), existe la problemática de como lograr hacer comparables estos valores con los entregados por la implementación numérica del año 2000 y de intervalos de tiempo no tan reducidos (cada 3 horas) como los señalados. Es por ello que para la comparación entre los datos observados y modelados, se dividió la validación en magnitudes y direcciones de las corrientes.

Los datos medidos por el correntómetro se utilizaron para la validación de las magnitudes de las corrientes, comparándolos con los valores del mes de diciembre de la implementación numérica, mediante la gráfica de ocurrencia.

En cambio lo obtenido por el ADCP remolcado, se ocupó para comprender el comportamiento de las direcciones de la corriente en la cercanías de la playa. Se compararon de forma cualitativa, las gráficas en planta de los datos del ADCP remolcado (promediados en la vertical), con los casos seleccionados que se obtuvieron del modelo.

#### 4.2.8 Desarrollo del criterio operativo del baño

Se desarrolló el criterio que define si un área es apta para el baño, considerando las alturas de olas y velocidades de corrientes que no son peligrosas para el nado de los bañistas.

Las velocidades de las corrientes representan la dinámica de una masa de agua y no la de un vector que se pueda restar de forma directa a la velocidad del nado de una persona, por lo que no se podría desarrollar un experimento en una piscina estándar, con el fin de obtener velocidades de nado que resten de forma directa a las corrientes. Por lo tanto, para un desarrollo adecuado se debería realizar un experimento en un canal de olas, con las dimensiones que posibiliten la introducción de distintos sujetos con diferentes capacidades en el nado, lo que escapa del alcance de esta memoria.

Considerando lo anterior, se encontraron distintos autores que fijan criterios de velocidad de corriente y alturas de olas, con lo que se logró un consenso de criterios, que fueron utilizados en el desarrollo de la operatividad.



#### **4.2.9 Análisis operativo del baño**

Esta sección se basa en, los resultados obtenidos en la caracterización de la zona de estudio y el desarrollo del criterio operativo, para determinar el porcentaje de operatividad de la playa Caleta Abarca según el año 2000. Se agregó un análisis de series de tiempo para las alturas de olas y un análisis *WAVELET* con un filtro tipo *Morlet* para las corrientes, con la finalidad de obtener en cada área el comportamiento de los parámetros en estudio, que puedan afectar a la operatividad de la playa.



## 5. Resultados obtenidos

### 5.1 Caracterización de aguas profundas

Con respecto al nodo de aguas profundas se desarrolló un análisis de mediano plazo, según los parámetros de resumen (Ver Anexo 10.2).

Observando la Figura 5.1 se aprecia que las alturas de olas mayores a 4.5 [m] son de baja incidencia, estos son asociados generalmente a eventos de temporales, existiendo una probabilidad del 50% que ocurran alturas menores a 2.5 [m]. Las direcciones predominantes que se aprecian en la Figura 5.2, provienen en general del tercer cuadrante (S) y en mayor porcentaje del SW, con alturas de olas menores a 3 [m]. Respecto a la concentración conjunta de las alturas de olas y periodos pico, se observa en la Figura 5.3, que mayoritariamente pertenecen a los intervalos de 1.5-3.0 [m] y 12-14 [s].

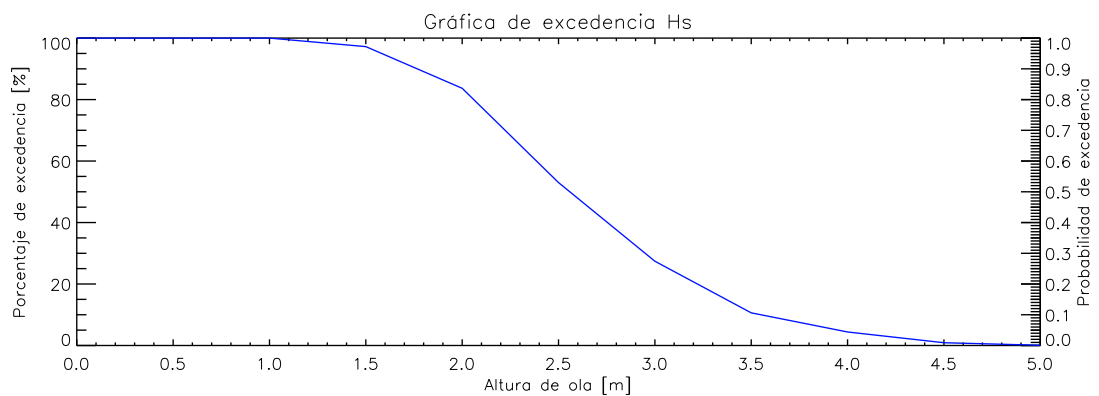


Figura 5.1: Curva de excedencia  $H_s$ , aguas profundas. Fuente: E.P.

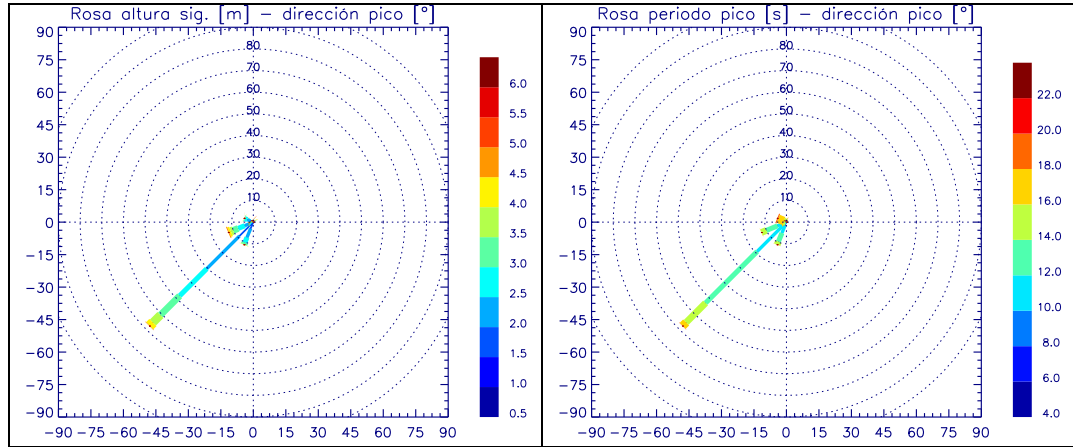


Figura 5.2: Rosas de oleaje, aguas profundas. Fuente: E.P.

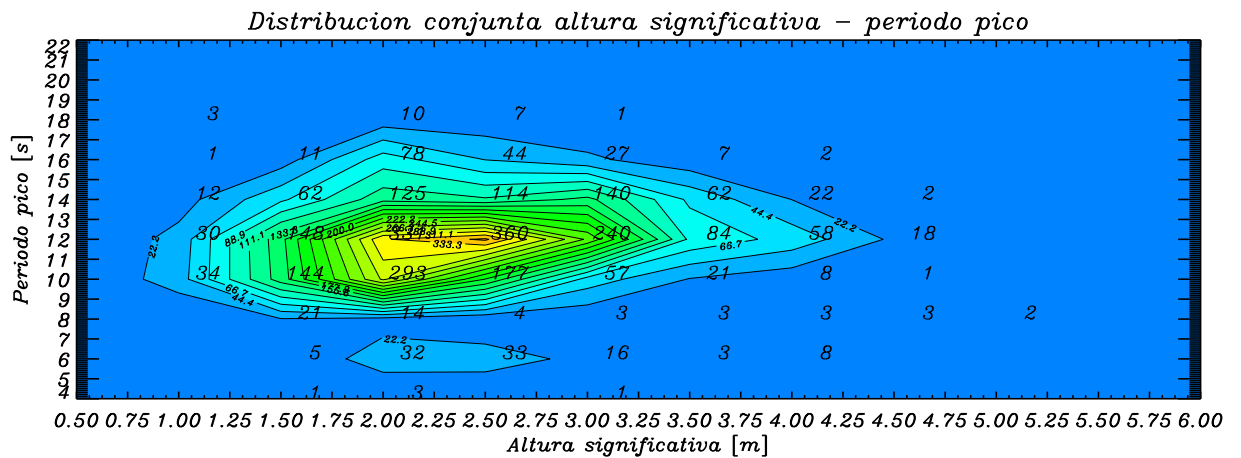


Figura 5.3: Distribución conjunta  $H_s$ -  $T_p$ , aguas profundas. Fuente: E.P.

## 5.2 Implementación numérica de aproximación (Stwave)

Se digitalizó la batimetría que se observa en la Figura 5.4, la cual tiene profundidades máximas de 450 [m], que son necesarios para la implementación numérica en la propagación de los distintos periodos.

Se configuró el modelo *Stwave* para efectuar las propagaciones, que se observan en la Figura 5.5 con diferentes resultados en las direcciones evaluadas, pudiendo así apreciar los efectos de refracción (dirección de los vectores) y *shoaling* (paleta de colores).

A partir de estas propagaciones, se obtuvieron las funciones de transferencia de la Figura 5.6 en el punto de transición. Las variaciones direccionales son mayores en las direcciones incidentes que contengan componente S, con una tendencia proporcional con respecto a los periodos. En cambio



en las direcciones incidentes N son menores, con una tendencia inversamente proporcional a los periodos.

En el caso de los coeficientes de transferencia son menores en las direcciones incidentes S, resultado coherente con lo esperado debido a la protección que presta la Punta Ángeles al sitio de interés en la propagación de olas. Se observa además que todas las alturas de olas en el punto de transición disminuyen con respecto a las alturas de aguas profundas, pudiéndose explicar por una variación uniforme en la profundidades a lo largo de la propagación.

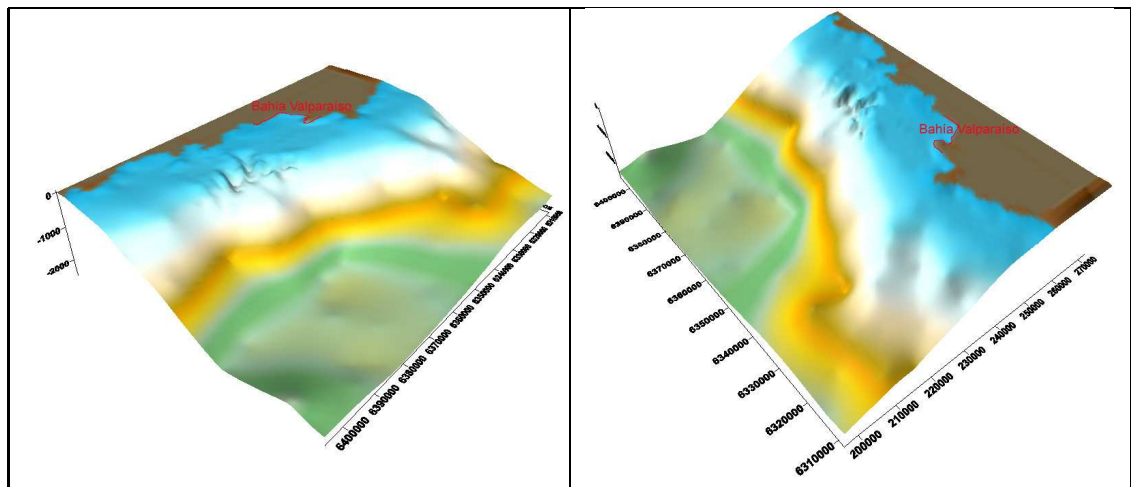


Figura 5.4: Batimetría para el modelo *Stwave*. Fuente: E.P.

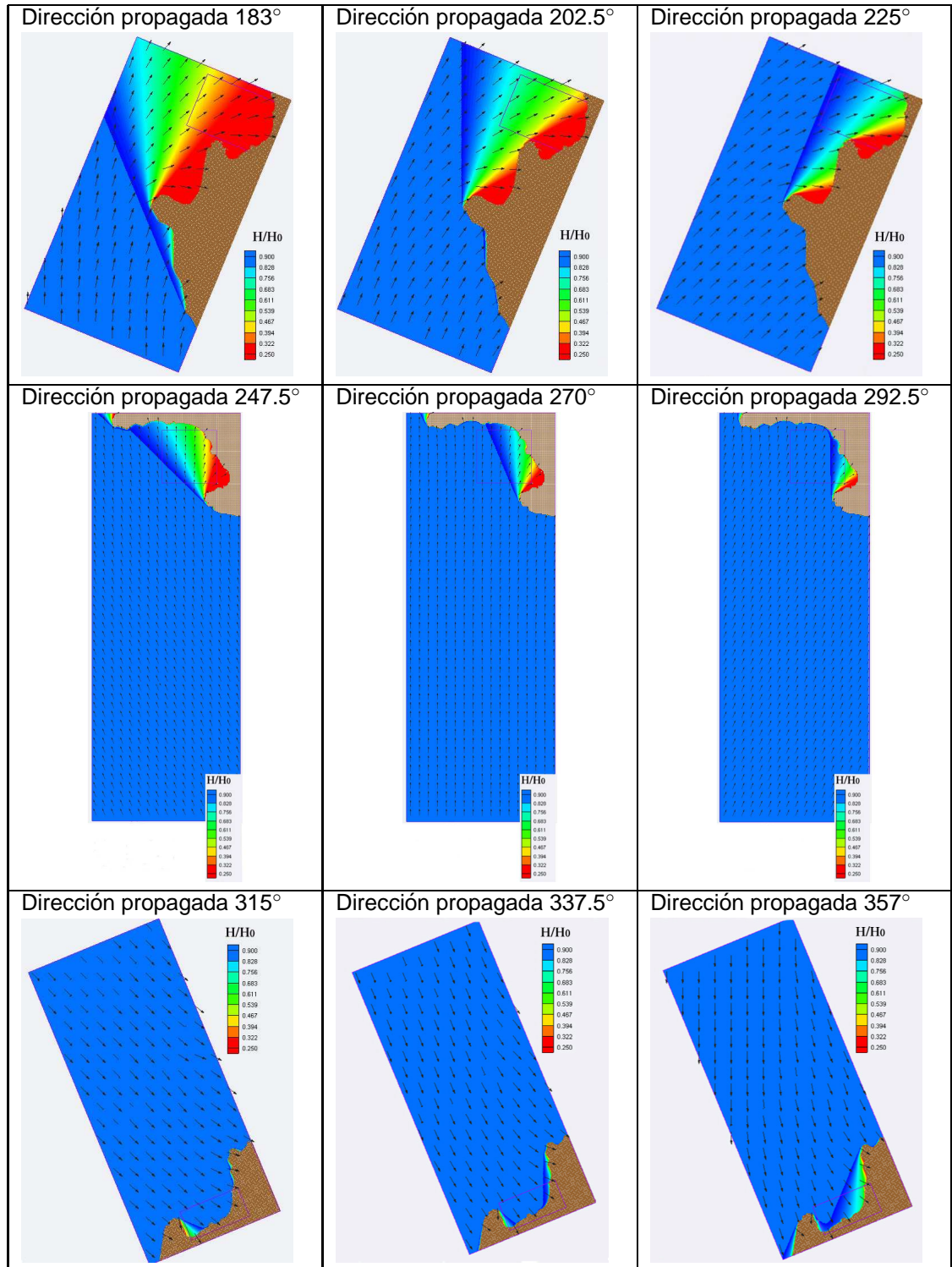


Figura 5.5: Ejemplo de dirección y altura de ola del modelo *Stwawe*. Fuente: E.P.

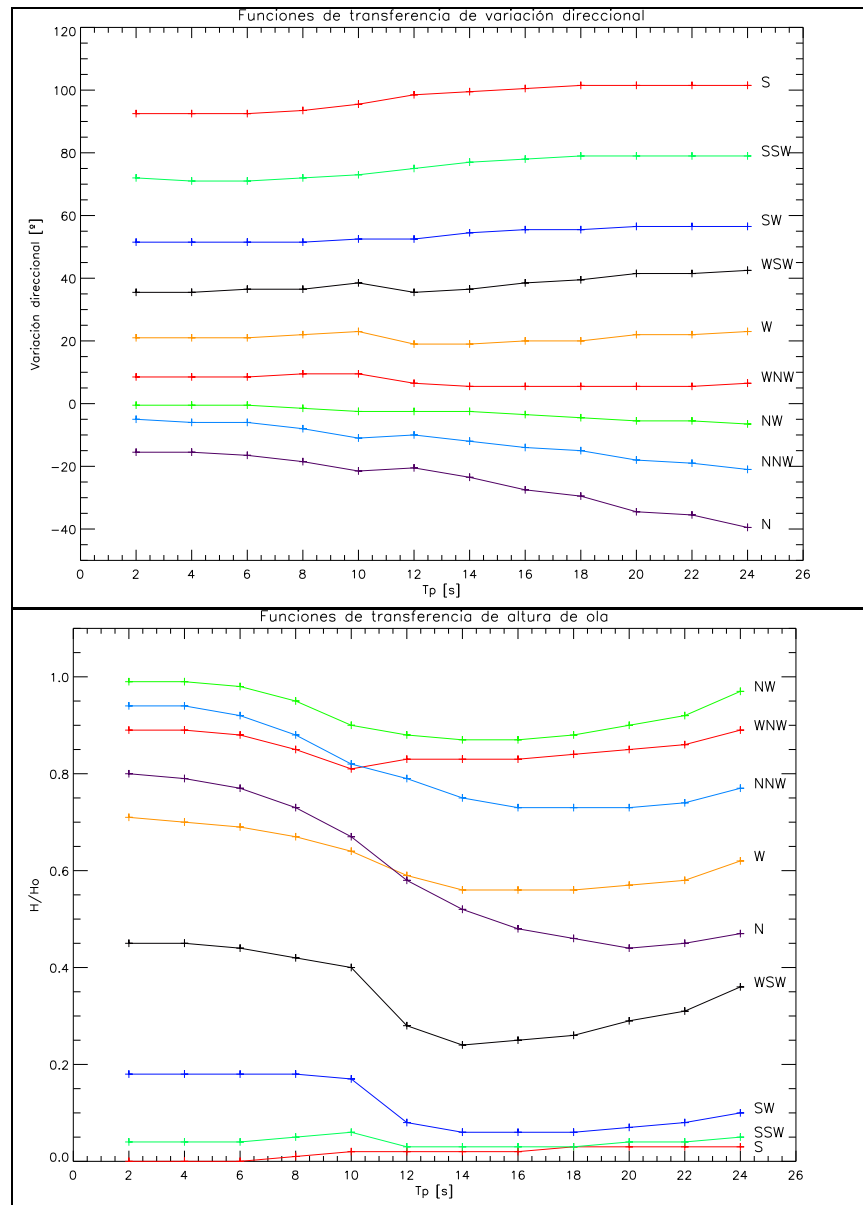


Figura 5.6: Funciones de transferencia al punto de transición. Fuente: E.P.



### 5.3 Caracterización de la zona de transición

La zona de transición se caracterizó mediante un análisis de mediano plazo, según los parámetros de resumen obtenidos de los espectros transferidos al punto en cuestión (Ver Anexo 10.3).

Dada la Figura 5.7, con respecto a los periodos se denota la existencia de más de un estado de mar, en que el primero representa el 10% de los datos aproximadamente, con periodos menores a 10 [s], asociados al oleaje de generación local, en cambio los estados de mar restantes se asocian al oleaje tipo Swell, el cual concentra un oleaje reinante cercano al 40% con periodos entre 10 a 14 [s], con otra componente de periodos mayores a 14 [s]. Existe una probabilidad en un 40% de que los periodos sobrepasen los 12 [s] del total de los datos.

En la misma figura se aprecia que las alturas de olas se concentran en la magnitud de 0.8 [m], con una probabilidad de que el 50% de las alturas de olas sea menor a 0.6 [m].

Basándose en la Figura 5.8, se observa que las direcciones predominantes provienen en general del N y en mayor porcentaje del WNW, debido a que el oleaje de aguas profundas se refracta, haciendo que el frente de olas se aproxime de forma perpendicular a la costa.

Para el caso de la distribución conjunta de las alturas de olas y periodos pico se observa la Figura 5.9, en que la concentración de los datos se encuentra en los intervalos de 0.5-1.5 [m] y 12-14 [s], pudiendo afirmar que las alturas de olas son menores que en aguas profundas, lo cual es consistente con los coeficientes entregados por el modelo.

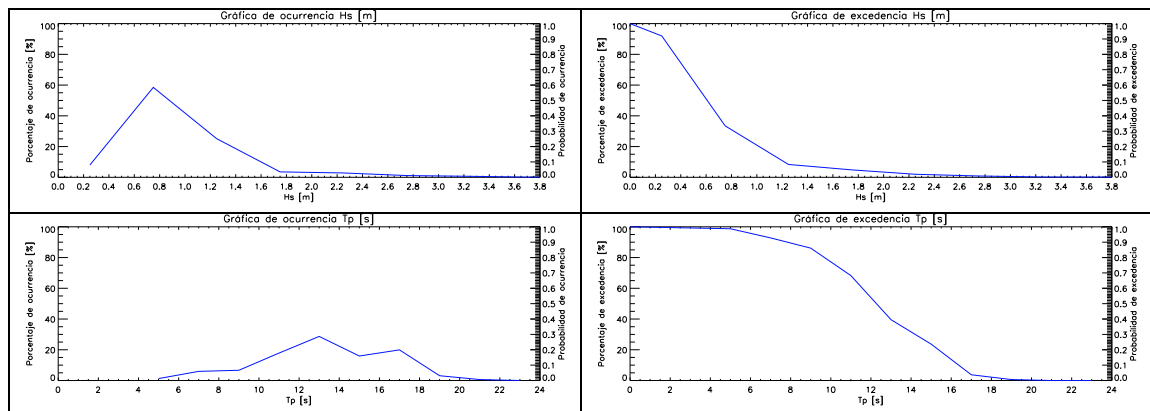


Figura 5.7: Curvas de  $T_p$  y  $H_s$ , zona de transición. Fuente: E.P.

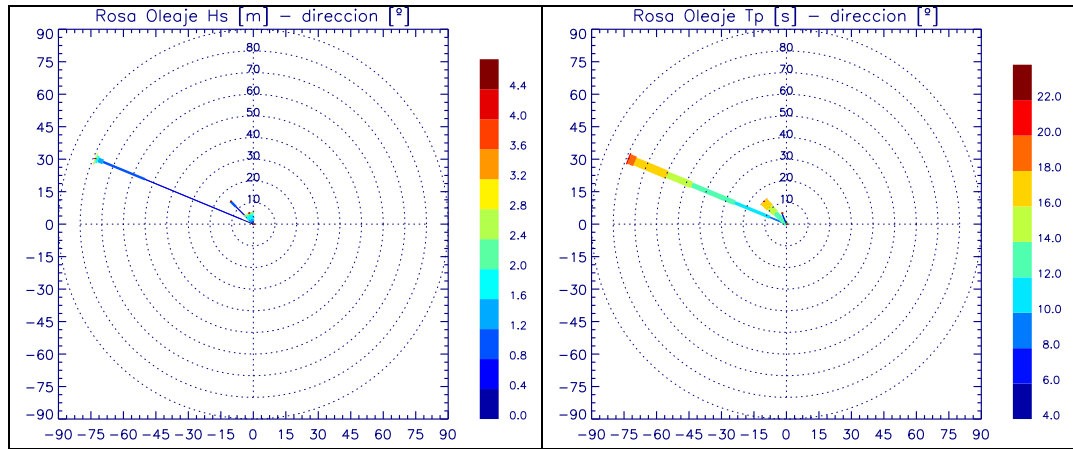


Figura 5.8: Rosas de oleaje, zona de transición. Fuente: E.P.

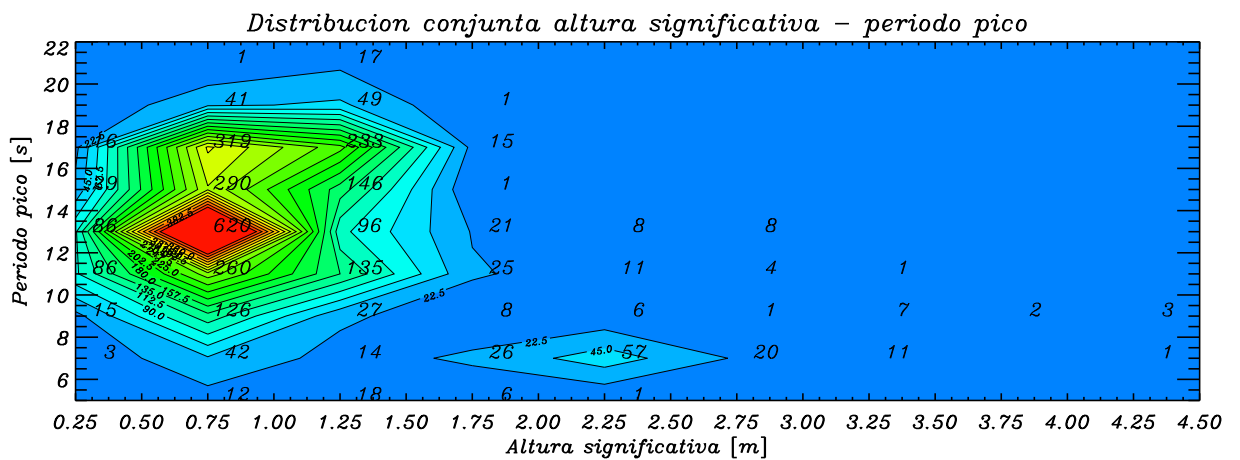


Figura 5.9: Distribución conjunta  $H_s - T_p$ , zona de transición. Fuente: E.P.

## 5.4 Implementación numérica zona de estudio (WAPO-COCO)

La batimetría en donde se implementa el modelo WAPO, se observa en la Figura 5.10. Esta fue obtenida a partir de la digitalización de las cartas náuticas del área.

Las propagaciones que se desarrollan con los modelos, se basan en el análisis de mediano plazo realizado en el punto de transición, utilizando las marcas de clases de los intervalos de período, dirección y altura de ola en que los parámetros de oleaje son de importancia. Se proponen 58 propagaciones que se especifican en la Tabla 5.1.

En cuanto al supuesto de que los espectros se concentran con bandas de energías estrechas, se realiza un análisis de los espectros propagados al punto de transición. Mediante el criterio de



Soares and Nolasco [1992] modificado<sup>1</sup> en función de los espectros utilizados, en los cuales su escala de frecuencia es logarítmica, resulta que el 92% corresponde a espectros que contienen un solo pico de energía, de bandas estrechas.

La Figura 5.11 y el Anexo 10.4, muestra alguno de los resultados de los modelos WAPO y COCO, pudiendo observar las direcciones del oleaje y corriente, mediante flechas que son proporcionales a las magnitudes de altura de ola y velocidad de corriente. Se observa que según los modelos en la playa en estudio, existen corrientes longitudinales y transversales, presentándose aceleraciones de corriente en la puntas terrestres acentuados en los periodos más bajos.

Las alturas de olas se aprecian mayores en la cercanía de la playa con periodos más bajos, pudiéndose explicar debido a que un oleaje que tenga periodos menores, presenta un fenómeno de disipación por rotura en una profundidad menor.

En las direcciones se puede observar que hay entradas y salidas de flujo en la playa, dependiendo estos flujos de la incidencia del oleaje.

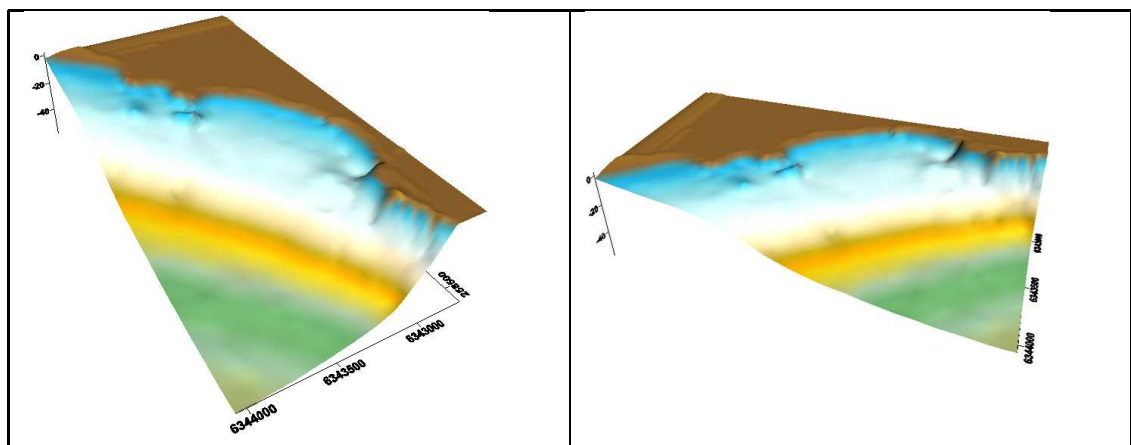


Figura 5.10: Batimetría para el modelo WAPO y COCO. Fuente: E.P.

<sup>1</sup>Para este caso se determinó que un pico de energía dentro de un espectro bidimensional, es aquella celda de la matriz espectral, que es mayor al 10% de la celda más energética, cumpliéndose que las celdas adyacentes sean menores de forma monótonamente decreciente, tanto en dirección como en frecuencia.



Tabla 5.1: Propagación de oleaje en modelo WAPO, 58 casos. Fuente: E.P.

Dirección meteorológica [°]	Período pico [s]	Altura de ola [m]
337.5-NNW	5	0.75
		1.25
337.5-NNW	7	1.75
		0.75
		1.25
		1.75
		2.25
		2.75
315 -NW	13	3.25
		0.25
		0.75
		1.25
	15	1.75
		0.25
	17	0.75
		1.25
19	1.75	
	0.75	
292.5-WNW	7	1.25
		0.25
		0.75
		1.25
		1.75
		2.25
	9	2.75
		3.25
		0.25
		0.75
		1.25
		1.75
	11	2.25
		2.75
	13	0.25
		0.75
		1.25
		1.75
		2.25
		2.75
	15	0.25
		0.75
	17	1.25
		1.75
19	0.75	
	1.25	
21	1.25	

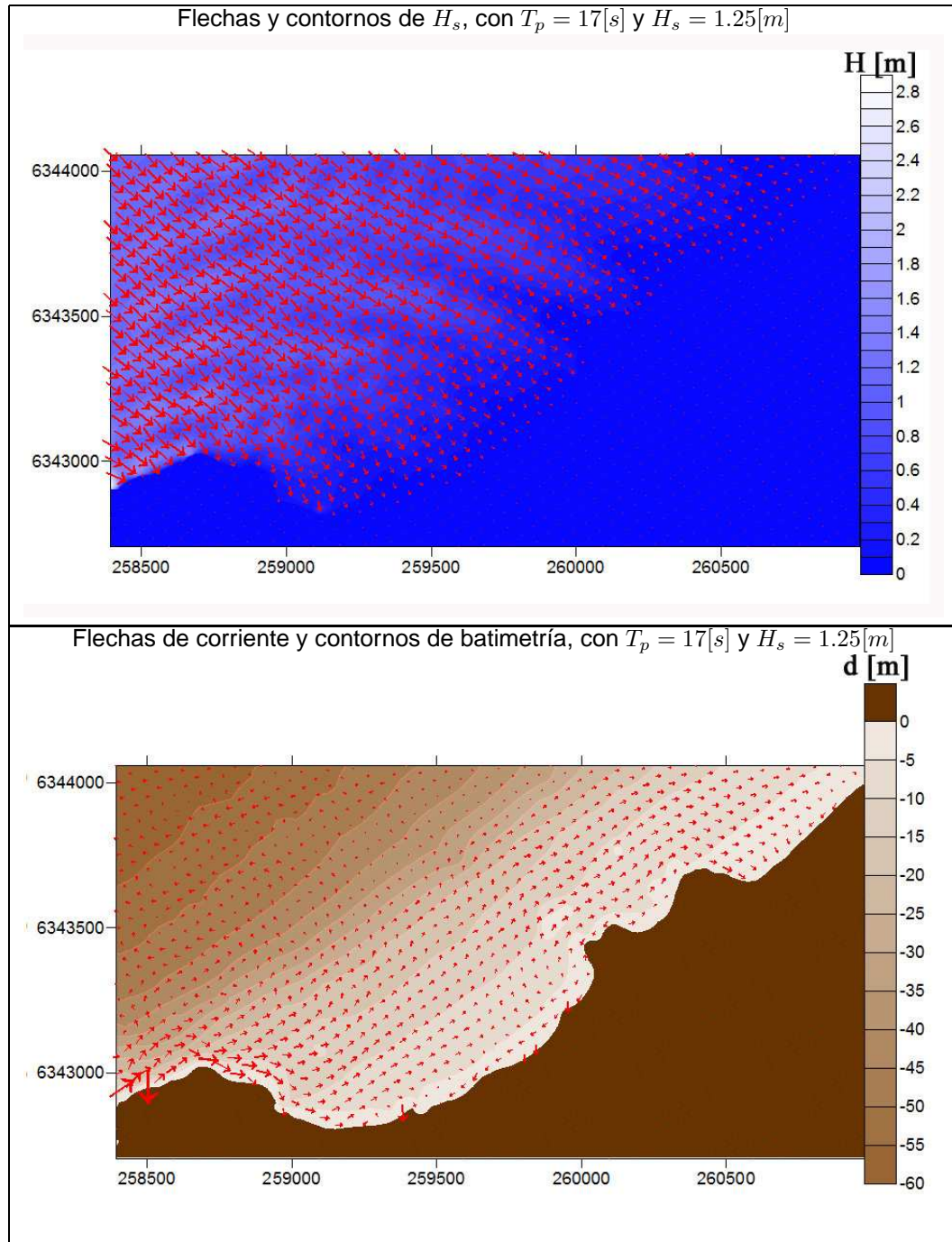


Figura 5.11: Modelado en la zona de estudio caso NW. Fuente: E.P.



## 5.5 Caracterización de la zona de estudio

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los modelos con la metodología propuesta, en las Tablas 5.2 y 5.3 (Ver Anexo 10.5). Se puede denotar que para ambas áreas en general, salvo algunas excepciones, las alturas de olas de las áreas ( $H_{area}$ ) son proporcionales a las alturas de ola en el punto de transición ( $H_s$ ), en la dirección NNW. Por el contrario a las direcciones NW y WNW, que la tendencia es que  $H_{area}$  es inversamente proporcional a  $H_s$ .

En el caso de las corrientes estas son proporcionales a  $H_s$  con ciertas excepciones, además que las velocidades de la corriente longitudinal ( $V_{Clong}$ ), son mayores que la corriente transversal ( $V_{Ctran}$ ).

Con respecto al período pico en el punto de transición ( $T_p$ ), se observa una tendencia inversamente proporcional a las magnitudes de los parámetros de  $H_{area}$ ,  $V_{Clong}$  y  $V_{Ctran}$ . Para el caso del área 2 la tendencia con respecto al  $T_p$ , no se da para los casos de periodos mayores.

Las excepciones a las tendencias observadas se atribuyen a que las olas en el área, pueden ser de alturas que han sufrido el fenómeno de la rompiente con anterioridad recomponiéndose. Es por ello que cuando las alturas de olas aún no rompen con anterioridad, producen alturas de olas mayores con respecto a  $H_s$ , incrementando el valor de las velocidades de corriente en el área de estudio. O por el contrario alturas de olas menores respecto a  $H_s$ , con velocidades de corriente menores, si hubiesen las olas presentado la recomposición tras la rompiente.

Las olas que aumentan su magnitud en altura respecto a la ola propagada, son todas aquellas con  $H_s$  igual a 0.25 [m], agregando las de 0.75, 1.25 [m] con periodos de 5 [s] y las de 0.75 [m] con periodos de 7 [s].



Tabla 5.2: Resultados de los modelos en la zona área 1, 58 casos. Fuente: E.P.

Dir. meteorológica [°]	$T_p$ [s]	$H_s$ [m]	$H_{areal}$ [m]	$V_{clong}$ [m/s]	$V_{ctran}$ [m/s]
337.5-NNW	5	0.75	1.093	0.111	0.084
		1.25	1.618	0.146	0.114
		1.75	1.962	0.160	0.123
	7	0.75	0.940	0.124	0.078
		1.25	1.094	0.110	0.077
		1.75	1.215	0.121	0.091
		2.25	1.248	0.134	0.092
2.75		1.180	0.144	0.086	
315 -NW	13	0.25	0.403	0.068	0.028
		0.75	0.368	0.062	0.026
		1.25	0.265	0.065	0.025
		1.75	0.145	0.069	0.036
	15	0.25	0.308	0.068	0.025
		0.75	0.277	0.059	0.019
		1.25	0.167	0.063	0.023
	17	0.25	0.337	0.054	0.015
		0.75	0.185	0.056	0.015
		1.25	0.073	0.064	0.020
	19	1.75	0.022	0.069	0.028
		0.75	0.143	0.056	0.014
19	1.25	0.049	0.065	0.022	
	292.5-WNW	7	0.25	0.575	0.040
0.75			0.947	0.098	0.050
1.25			1.084	0.083	0.057
1.75			1.228	0.088	0.064
2.25			1.183	0.092	0.057
2.75			1.068	0.096	0.057
9		3.25	0.925	0.101	0.064
		0.25	0.601	0.079	0.027
		0.75	0.764	0.071	0.036
		1.25	0.739	0.077	0.036
		1.75	0.747	0.082	0.040
		2.25	0.667	0.085	0.048
11	2.75	0.571	0.086	0.059	
	3.25	0.451	0.088	0.069	
	0.25	0.591	0.084	0.032	
	0.75	0.653	0.070	0.035	
	1.25	0.498	0.072	0.034	
	1.75	0.404	0.074	0.039	
13	2.25	0.288	0.077	0.050	
	2.75	0.191	0.081	0.061	
	0.25	0.468	0.093	0.022	
	0.75	0.460	0.064	0.023	
	1.25	0.351	0.067	0.030	
	1.75	0.224	0.073	0.040	
15	2.25	0.125	0.078	0.054	
	2.75	0.063	0.088	0.066	
	0.25	0.297	0.073	0.021	
	0.75	0.301	0.061	0.018	
17	1.25	0.176	0.064	0.024	
	0.25	0.263	0.055	0.016	
	0.75	0.148	0.058	0.016	
	1.25	0.069	0.066	0.022	
19	1.75	0.021	0.073	0.034	
	0.75	0.221	0.057	0.014	
21	1.25	0.102	0.067	0.023	
	1.25	0.088	0.066	0.021	



Tabla 5.3: Resultados de los modelos en la zona área 2, 58 casos. Fuente: E.P.

Dir. meteorológica [°]	$T_p$ [s]	$H_s$ [m]	$H_{area2}$ [m]	$V_{clong}$ [m/s]	$V_{ctran}$ [m/s]
337.5-NNW	5	0.75	1.004	0.091	0.051
		1.25	1.455	0.155	0.066
		1.75	1.645	0.201	0.076
	7	0.75	0.815	0.110	0.040
		1.25	1.023	0.156	0.059
		1.75	1.288	0.199	0.068
2.25		1.393	0.232	0.071	
315 -NW	13	2.75	1.348	0.256	0.073
		3.25	1.198	0.269	0.072
		0.25	0.397	0.084	0.016
		0.75	0.352	0.083	0.024
	15	1.25	0.245	0.089	0.027
		1.75	0.145	0.095	0.033
		0.25	0.342	0.087	0.020
	17	0.75	0.277	0.079	0.019
		1.25	0.162	0.087	0.025
		1.75	0.082	0.089	0.027
	19	0.25	0.405	0.070	0.033
		0.75	0.239	0.073	0.020
292.5-WNW	7	1.25	0.160	0.083	0.022
		1.75	0.082	0.089	0.027
		0.25	0.122	0.071	0.015
		1.25	0.045	0.084	0.022
		0.25	0.459	0.042	0.012
		0.75	0.843	0.078	0.056
	9	1.25	1.076	0.103	0.050
		1.75	1.308	0.114	0.058
		2.25	1.411	0.132	0.051
		2.75	1.377	0.162	0.057
		3.25	1.185	0.185	0.067
		0.25	0.503	0.112	0.051
	11	0.75	0.677	0.094	0.034
		1.25	0.870	0.091	0.044
		1.75	0.874	0.097	0.040
		2.25	0.773	0.113	0.043
		2.75	0.628	0.129	0.058
		3.25	0.505	0.139	0.070
13	0.25	0.439	0.080	0.025	
	0.75	0.505	0.081	0.022	
	1.25	0.497	0.090	0.026	
	1.75	0.404	0.097	0.035	
	2.25	0.285	0.102	0.044	
	2.75	0.185	0.104	0.052	
15	0.25	0.502	0.076	0.033	
	0.75	0.791	0.085	0.030	
	1.25	0.617	0.090	0.033	
	1.75	0.416	0.097	0.039	
	2.25	0.243	0.101	0.044	
17	2.75	0.132	0.104	0.051	
	0.25	0.358	0.080	0.032	
	0.75	0.253	0.076	0.017	
19	1.25	0.166	0.085	0.024	
	0.25	0.417	0.081	0.033	
	0.75	0.438	0.078	0.032	
	1.25	0.280	0.087	0.026	
21	1.75	0.176	0.093	0.031	
	0.75	0.069	0.074	0.016	
	1.25	0.014	0.086	0.025	
	1.25	0.017	0.085	0.024	



## **ÁREA 1**

Dada la Figura 5.12 (complementando con el Anexo 10.5), se aprecia que en el área 1 se caracteriza por presentar un 98% de alturas de olas menores a 1.00 [m], estando las alturas concentradas en un primer y segundo lugar, entre los intervalos de 0.75-1.00 [m] y 0.50-0.75 [m], respectivamente. Para el caso de las corrientes longitudinales y transversales, ambas se concentran en gran parte en magnitudes menores a 0.1 [m/s].

Respecto a las distribuciones conjuntas de la Figura 5.13, se tiene que ambas corrientes se concentran conjuntamente en un 94% en valores menores a 0.1 [m/s]. En cambio, la altura de ola en la zona de estudio en conjunto con las corrientes, presentan aproximadamente un 60% de concentración en los intervalos de 0.75-1.00 [m] y 0.0-0.1 [m/s], respectivamente. Siguiendo en segundo lugar con un 33% en los intervalos 0.50-0.75 [m] y 0.0-0.1 [m/s].

Se observa de las series de tiempo de la Figura 5.14, que las alturas de olas presentan ciclos en la estación de Verano (21 de diciembre al 20 de marzo), con magnitudes que se mantienen entre los intervalos 0.6-1.0 [m]. En el caso de las corrientes, se aprecia que las mayores magnitudes se concentran en la estación de Invierno (21 de junio al 20 de septiembre).

Además se distingue una coherencia en la tendencia entre las corrientes longitudinales y transversales. Sin embargo, la altura de ola tiene una correspondencia menor, con respecto a la señalada entre las corrientes, pudiendo justificarse por no existir una respuesta inmediata entre el rompimiento de la ola y las corrientes inducidas.

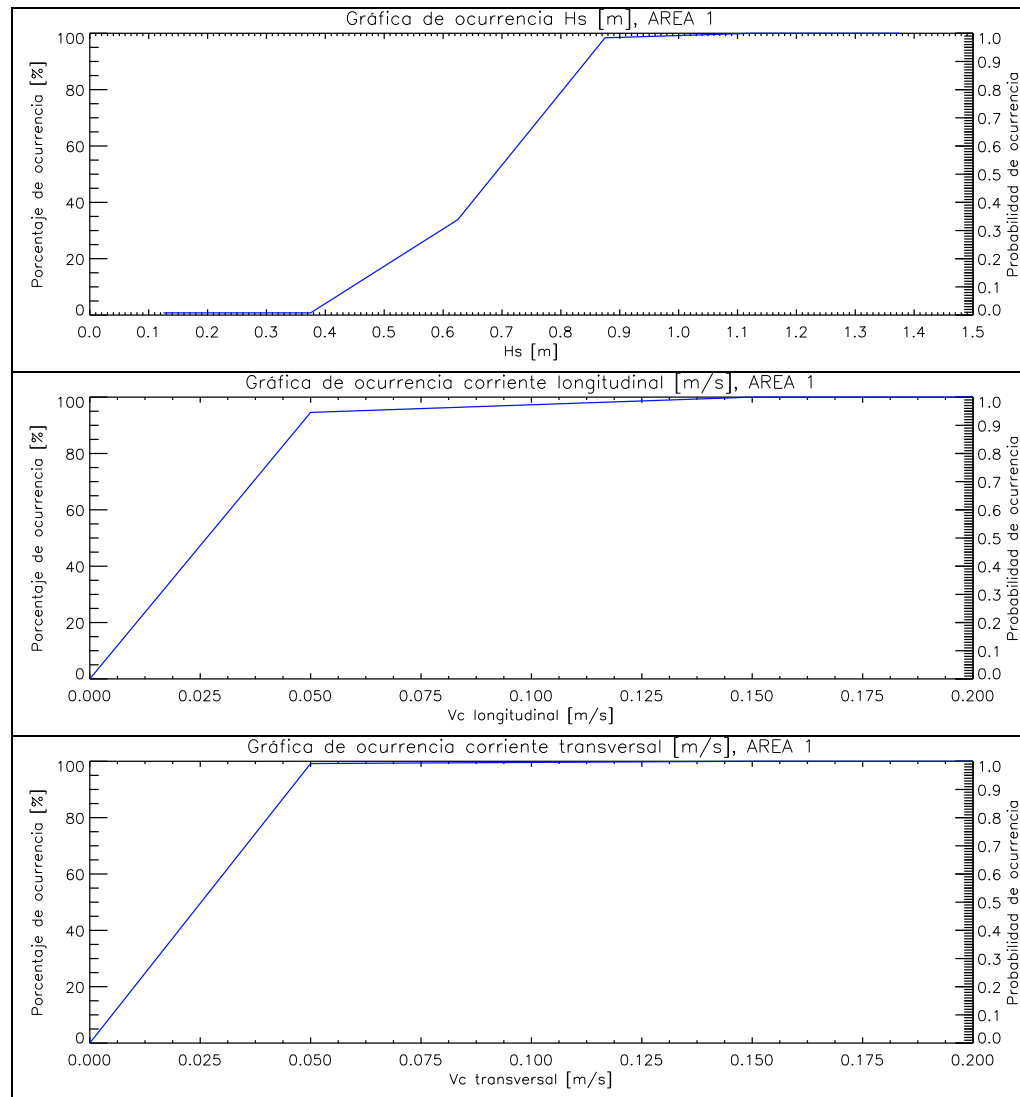
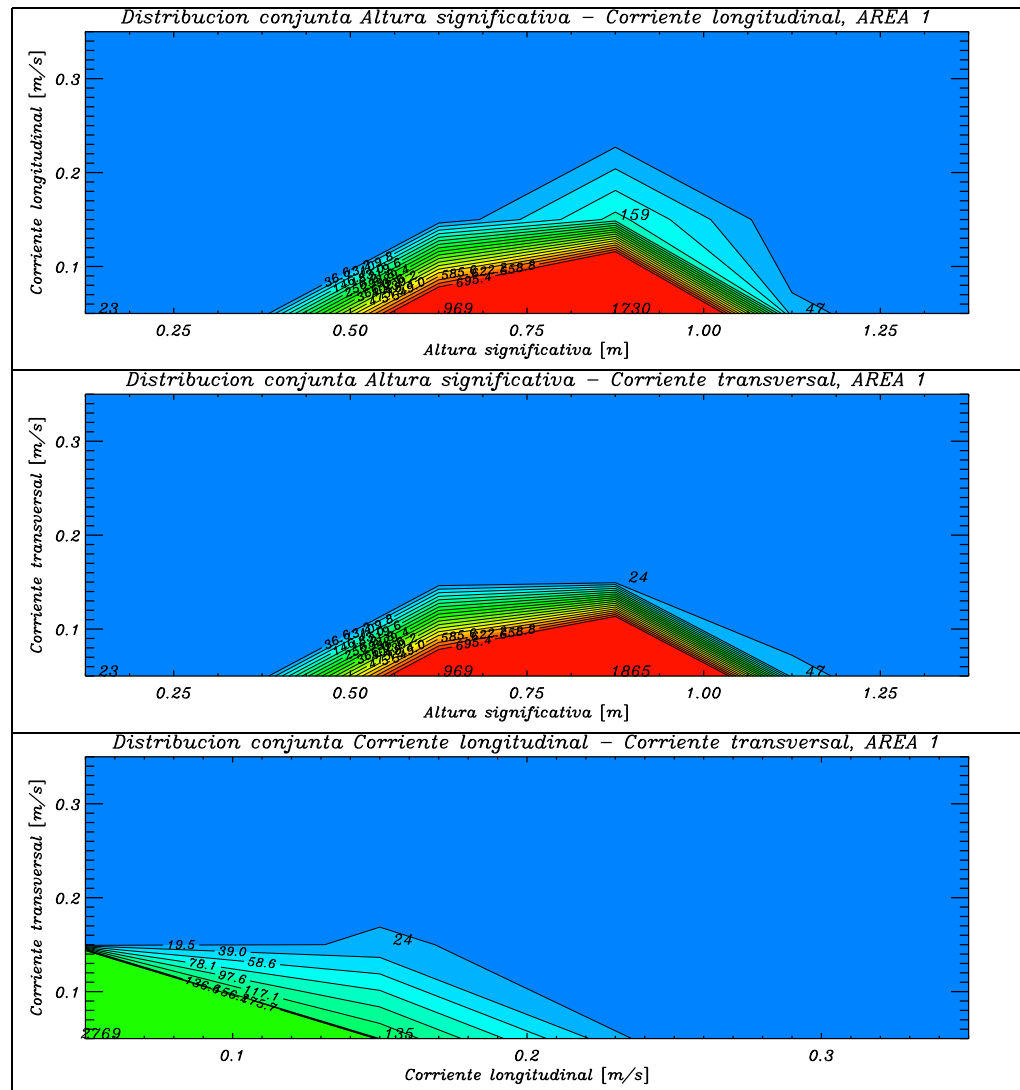


Figura 5.12: Gráficas de ocurrencia, área 1. Fuente: E.P.



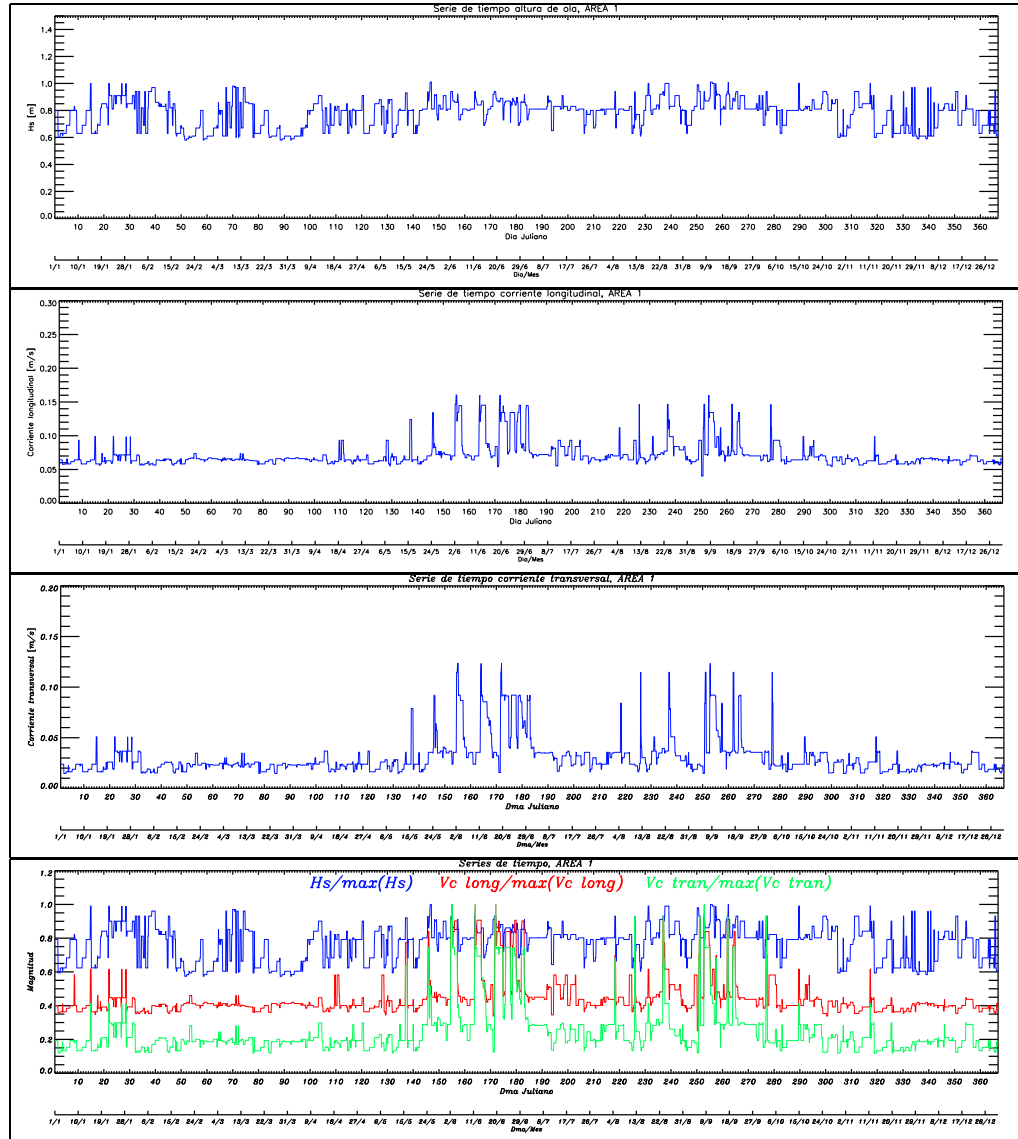


Figura 5.14: Series de tiempo, área 1. Fuente: E.P.



## **ÁREA 2**

El área 2 se caracteriza en la Figura 5.15 y Anexo 10.5, donde se observa un 98% de alturas de olas menores a 1.00 [m], estando las alturas concentradas en un primer y segundo lugar, entre los intervalos de 0.75-1.00 [m] y 0.50-0.75 [m]. Para el caso de las corrientes longitudinales y transversales, ambas se concentran en gran parte en magnitudes menores a 0.1 [m/s]. Sin embargo a diferencia del área 1, las corrientes longitudinales presentan un 7% de magnitudes entre los intervalos 0.2-0.3 [m/s].

Respecto a las distribuciones conjuntas de la Figura 5.16, se tiene que ambas corrientes se concentran conjuntamente en un 92% en valores menores a 0.1 [m/s]. En cambio, la altura de ola en la zona de estudio en conjunto con las corrientes, presentan aproximadamente un 64% de datos existentes en los intervalos de 0.75-1.00 [m] y 0.0-0.1 [m/s], respectivamente. Siguiendo en segundo lugar con un 33% en los intervalos 0.50-0.75 [m] y 0.0-0.1 [m/s].

Se observa de las series de tiempo de la Figura 5.17, que las alturas de olas presentan ciclos en la estación de Verano, con magnitudes que se mantienen entre los intervalos 0.6-1.0 [m]. En el caso de las corrientes, se aprecia que las mayores magnitudes se concentran en la estación de Invierno, con magnitudes mayores con relación al área 1.

Además al igual que el área 1, se distingue una coherencia en la tendencia entre las corrientes longitudinales y transversales. Sin embargo, la altura de ola tiene una correspondencia menor, con respecto a la señalada entre las corrientes, pudiendo justificarse por no existir una respuesta inmediata entre el rompimiento de la ola y las corrientes inducidas.

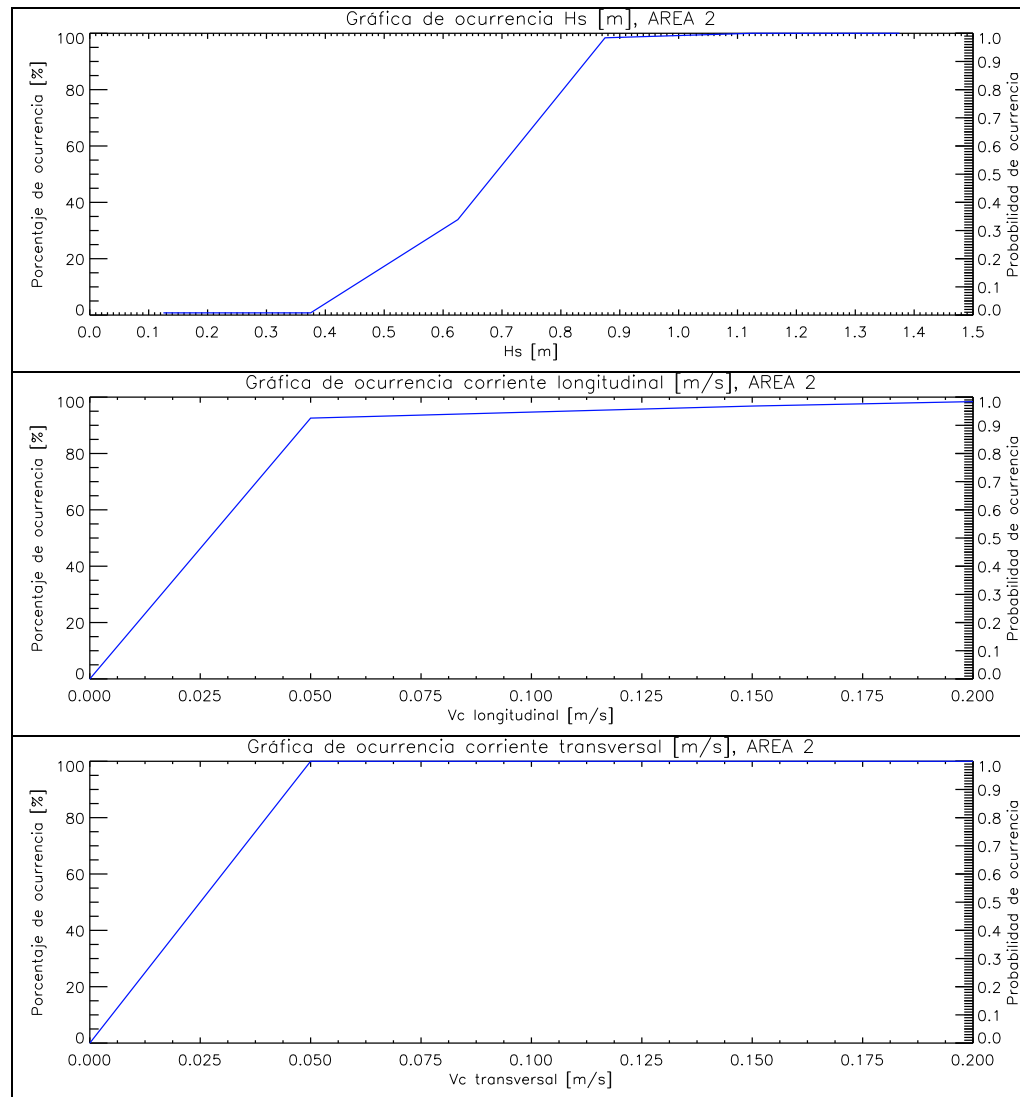


Figura 5.15: Gráficas de ocurrencia, área 2. Fuente: E.P.

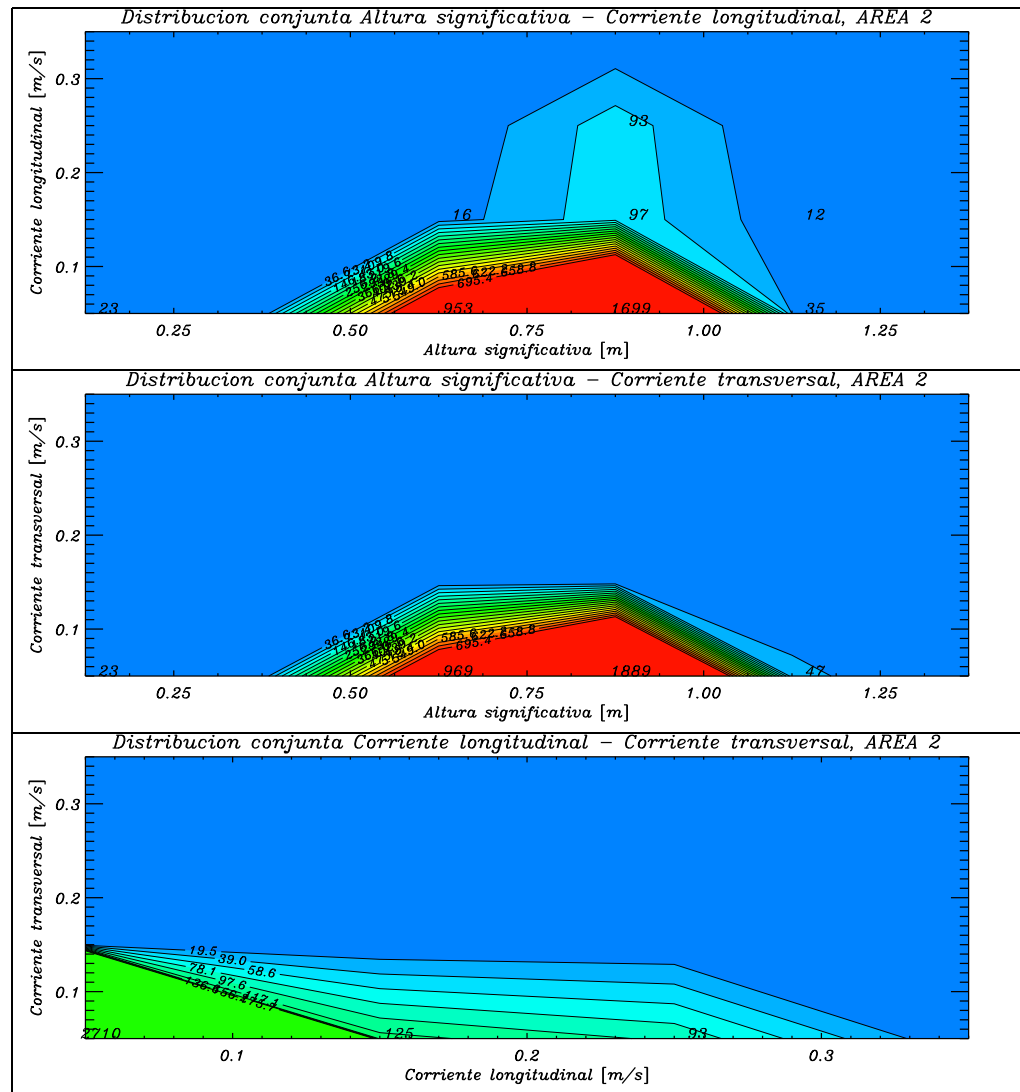


Figura 5.16: Gráficas de contorno, área 2. Fuente: E.P.

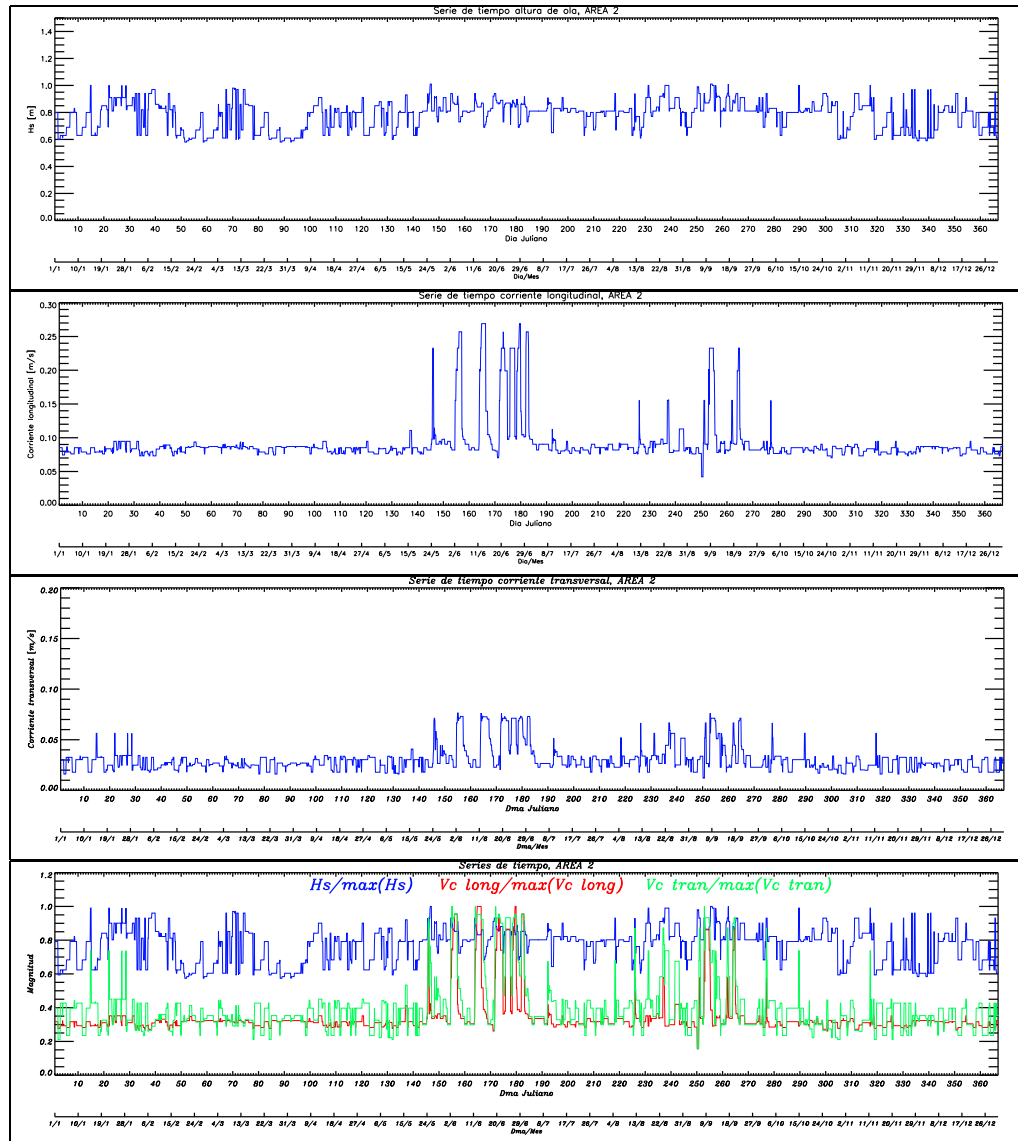


Figura 5.17: Series de tiempo, área 2. Fuente: E.P.



## 5.6 Caracterización de datos *In situ*

### CTD

La Figura 5.18 muestra los perfiles de densidad promedio de las dos estaciones de medición con CTD. Los perfiles muestran pequeñas variaciones de densidad ( $<0.5 [kg/m^3]$ ) entre la superficie y el fondo, lo que sugiere que la columna de agua se encuentra casi homogénea verticalmente. Esta distribución vertical apoya el empleo de modelos de una capa en este ambiente costero.

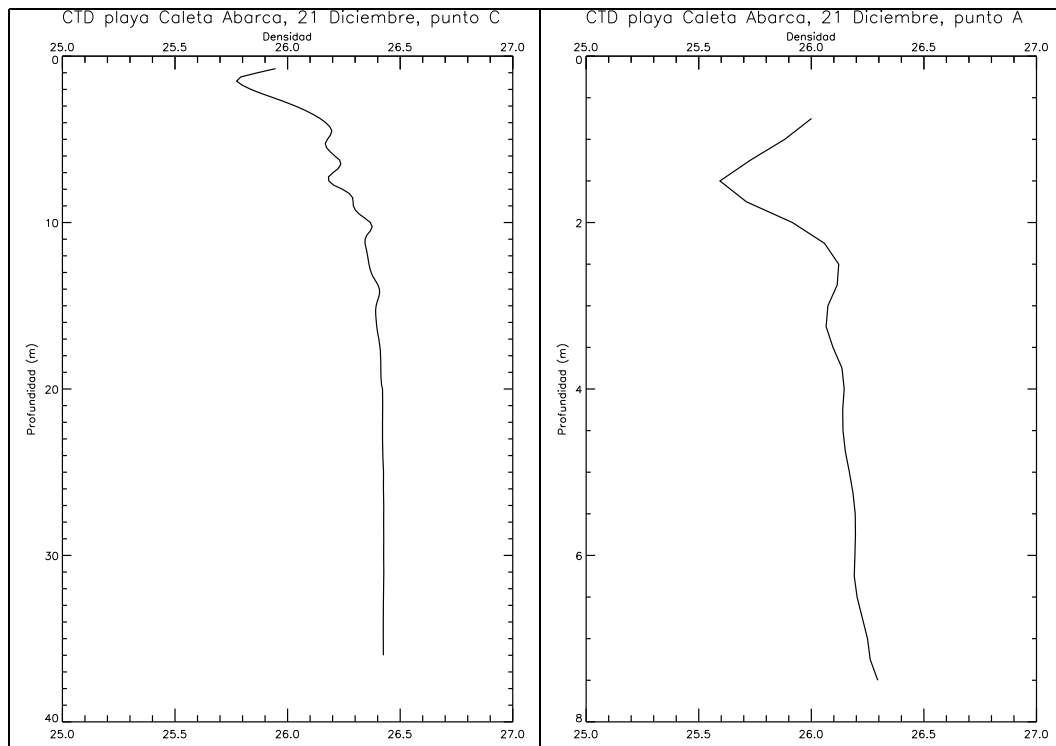


Figura 5.18: Resultados CTD en la playa. Fuente: E.P.



### ADCP

La Figura 5.19 describe el perfil de velocidades interpolado de las componentes de corriente, en función de la profundidad asociada al tiempo, señalando los puntos con las respectivas letras de la ruta realizada. Las cruces de color negro muestran la ubicación de los puntos medidos.

Se aprecia que el rango de magnitudes de velocidad de las componentes  $U$  y  $V$ , en general es menor a  $11 \text{ [cm/s]}$ . Se observa que en los perfiles de profundidades menores existen predominantemente componentes  $U$  y  $V$  positivas, lo que estaría indicando que el flujo sale de la playa, al contrario de los perfiles con profundidades mayores que tienen predominancia negativa, lo que daría un flujo entrante a la playa. Además se aprecia que hay variabilidad de las componentes de la corriente a lo largo del tiempo, con un sentido de rotación anti horario.

En el caso de la Figura 5.20 se muestran los patrones de dirección del oleaje en las profundidades de 2 y 4  $[m]$ , en los distintos circuitos. Se aprecia que las corrientes varían tanto en profundidad como en tiempo, siguiendo con un patrón rotatorio el cual nos indica que se producen corrientes tanto para las direcciones hacia la playa o contra la playa.

Debido al tipo de rotación que se produce en el sector de estudio, se aprecia una cierta semejanza al comportamiento de una bahía de esquema cíclico de corrientes de entradas y salidas.

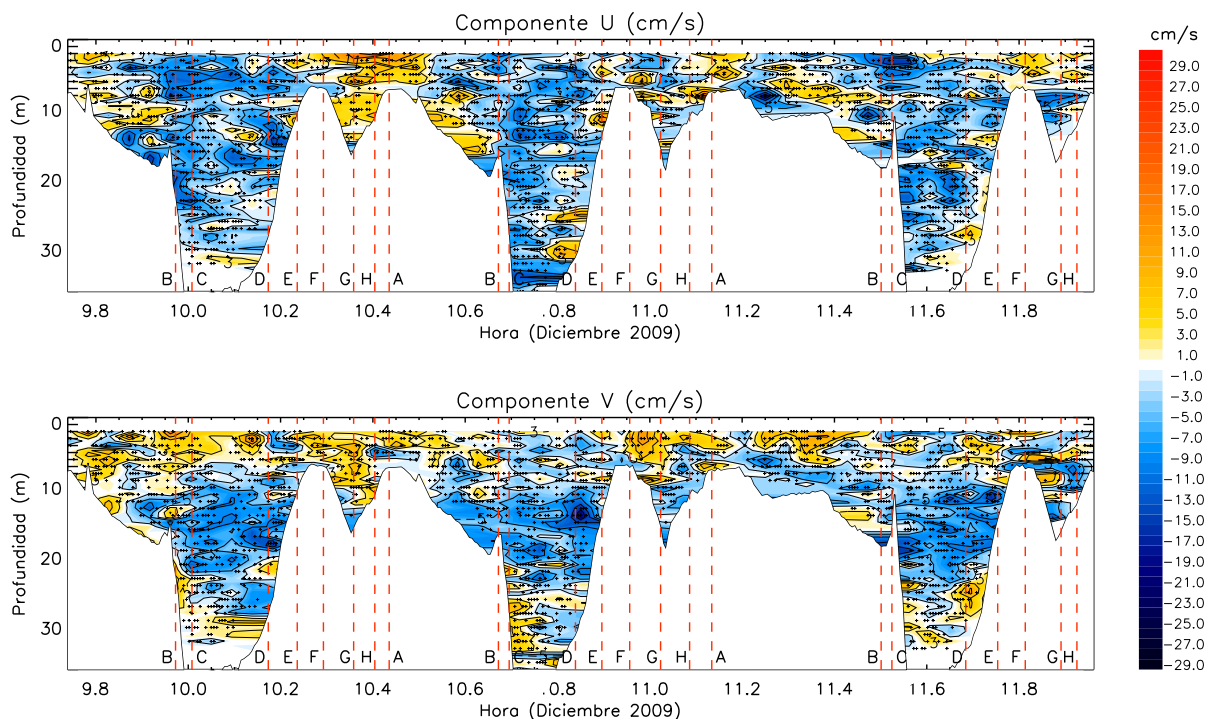


Figura 5.19: Perfil de corriente del ADCP remolcado en la playa. Fuente: E.P.

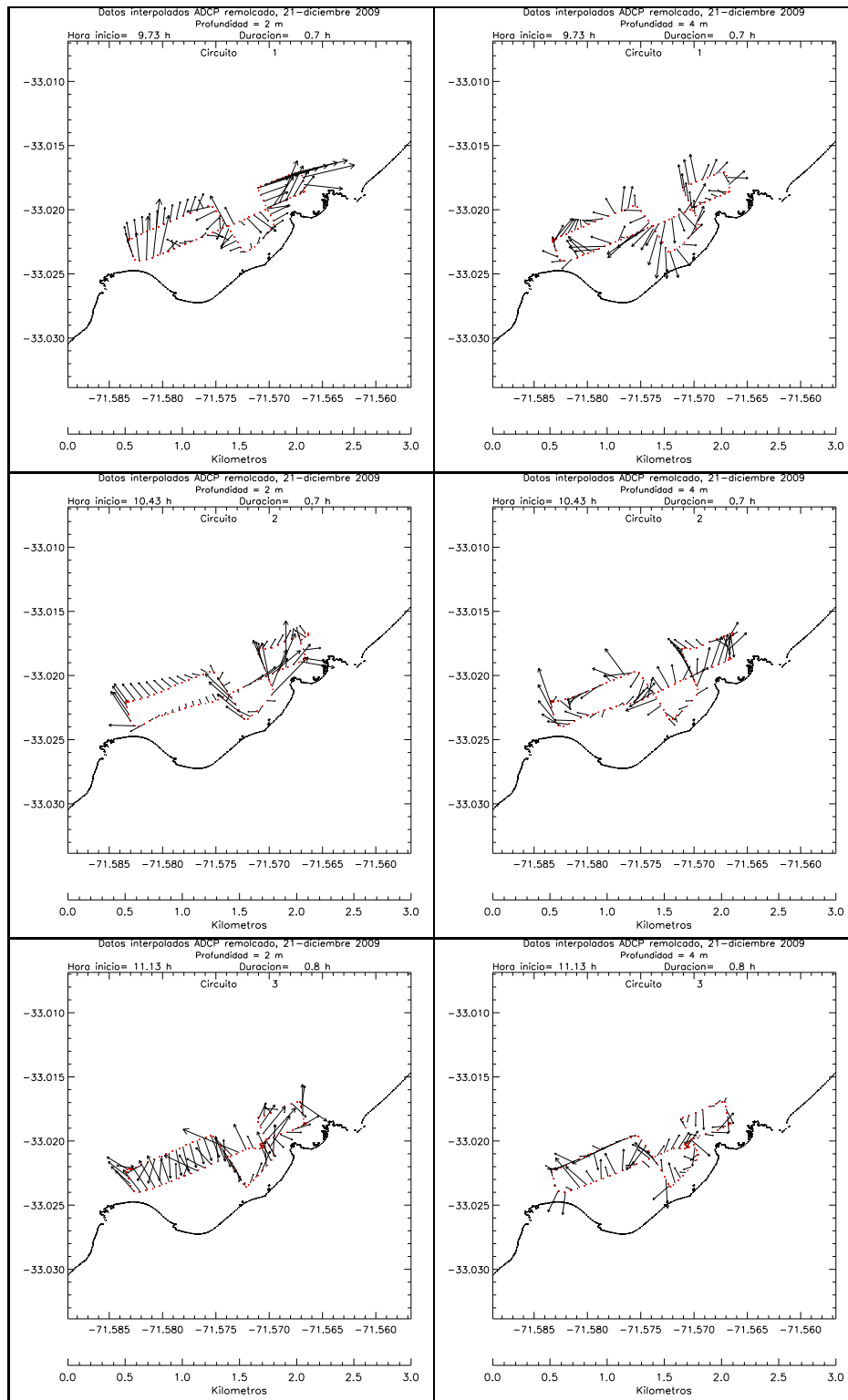


Figura 5.20: Resultados ADCP remolcado en la playa. Fuente: E.P.



### Correntómetro

Respecto a las corrientes se observa en las Figuras 5.21 y 5.22, que los máximos valores de velocidad en magnitud son del orden de  $10 [cm/s]$ , dominando los valores de baja intensidad, con direcciones que se presentan en todos los cuadrantes, siendo las direcciones SW y W las dominantes en el tiempo de medición. En el caso de las componentes  $U$  y  $V$  se aprecia que entre la 17 y 19 horas el flujo pasa de una dirección NW a SW, aumentando la magnitud de la corriente.

Se denota con la Figura 5.23 el diagrama de vector progresivo, en el cual se observa que una partícula viaja una distancia de  $2109 [m]$  en 22 horas en dirección SW (suponiendo condición homogénea en la columna de agua), por lo que entrega una primera aproximación de la posible ubicación del destino de bañistas.

En la tabla 5.4 se presentan los porcentajes explicados por marea. Esta tabla muestra que el porcentaje explicado por el efecto de la marea es relativamente bajo en la componente  $V$  y moderado en la componente  $U$ , lo cual sugiere el efecto de otros factores que intervienen en la dinámica de la bahía. Se complementa el estudio con un filtrado de señal de corriente, mediante un filtro coseno Lanczos de 426 pesos y poder medio de 25 horas, logrando filtrar las componentes de marea, obteniendo así la Figura 5.24, en que se tiene un desfase de tiempo entre la pleamar (a las 17 horas) y la máxima en magnitud del flujo de la componente  $U$  (a las 18 horas), alcanzando un valor cercano a los  $8 [cm/s]$ , en que el resto del tiempo la marea fluctúa en los valores cercanos a  $-2 [cm/s]$ . Esto muestra que la respuesta de la componente de baja frecuencia de la corriente mantiene magnitudes bajas.

Debido a que se presenta en la Figura 5.25 un aumento de velocidad y temperatura entre las 17-19 horas, se comparan las tendencias de los datos medidos y los datos registrados por la estación meteorológica Estacion Meteo-UV <sup>2</sup>, correspondientes a velocidad del viento ( $V_{ev}$ ) y temperatura ambiente ( $T^{\circ}amb$ ). Con esto se puede inferir que este aumento de velocidad de corrientes, puede ser causada por la brisa marina en su ciclo diario y/o gradientes de presión, debido al aumento de la velocidad el viento y temperatura ambiente respectivamente.

---

<sup>2</sup>Ubicada en la comuna de Valparaíso, a una altura de  $89 [snmm]$ , con coordenadas  $71^{\circ}30' W$  y  $33^{\circ} 1' S$ .

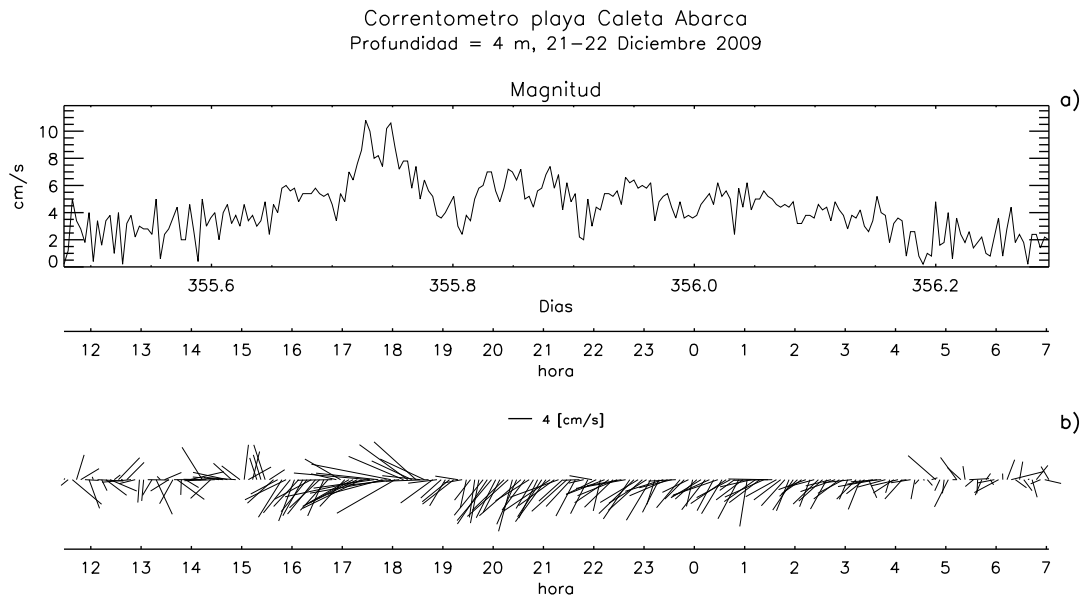


Figura 5.21: Resultado 1 del correntómetro ubicado en la playa. Fuente: E.P.

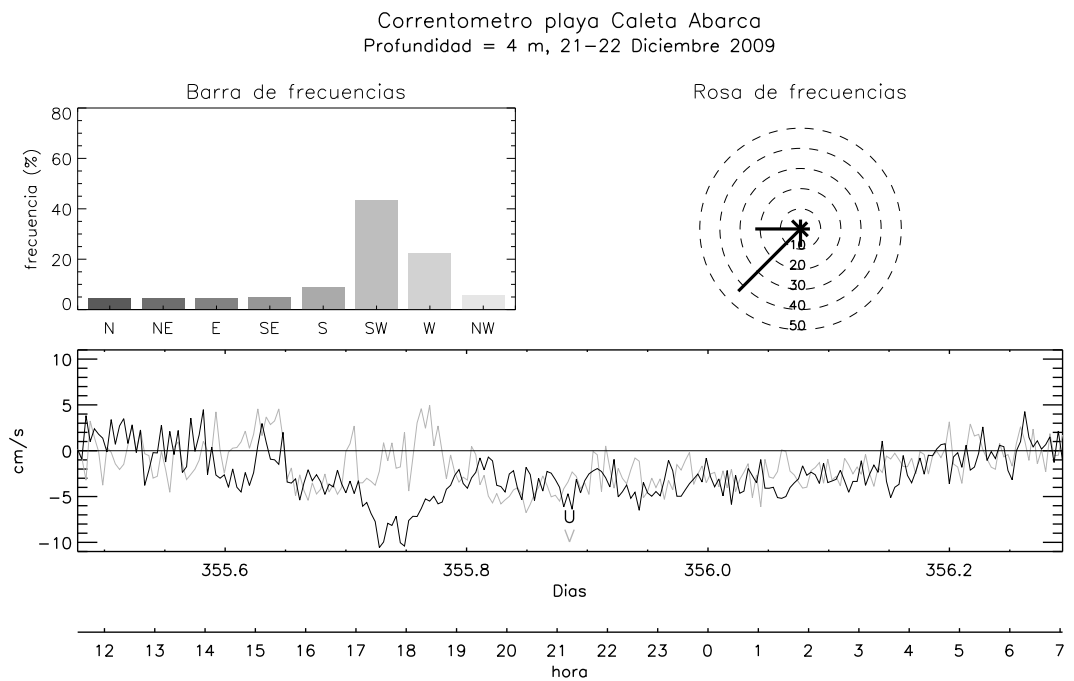


Figura 5.22: Resultado 2 del correntómetro ubicado en la playa. Fuente: E.P.

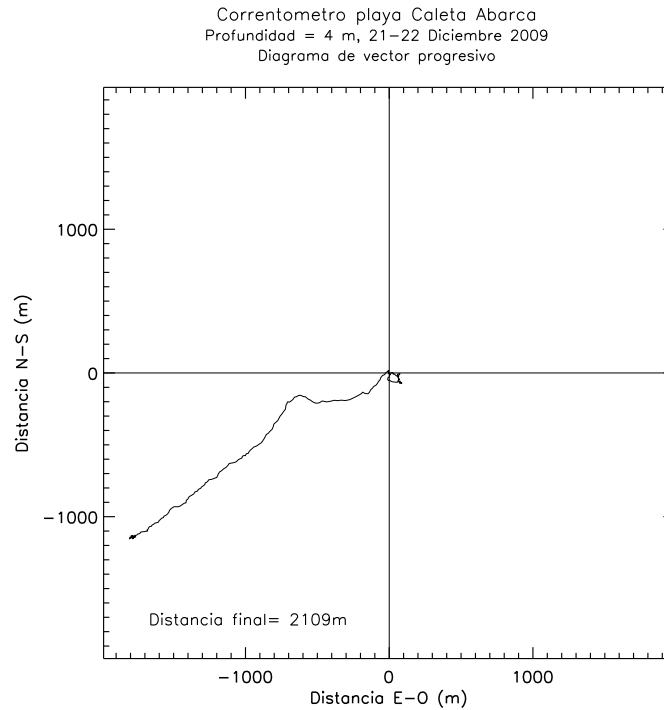


Figura 5.23: Diagrama de vector progresivo del correntómetro. Fuente: E.P.

Tabla 5.4: Porcentaje de corriente explicado por Marea. Fuente: E.P.

Componente	U	V
Residual [cm/s]	-1.5	-1.3
Amplitud M2 [cm/s]	1.5	0.5
Amplitud K1 [cm/s]	3.7	1.6
% Explicado por Marea	52.1	24.3

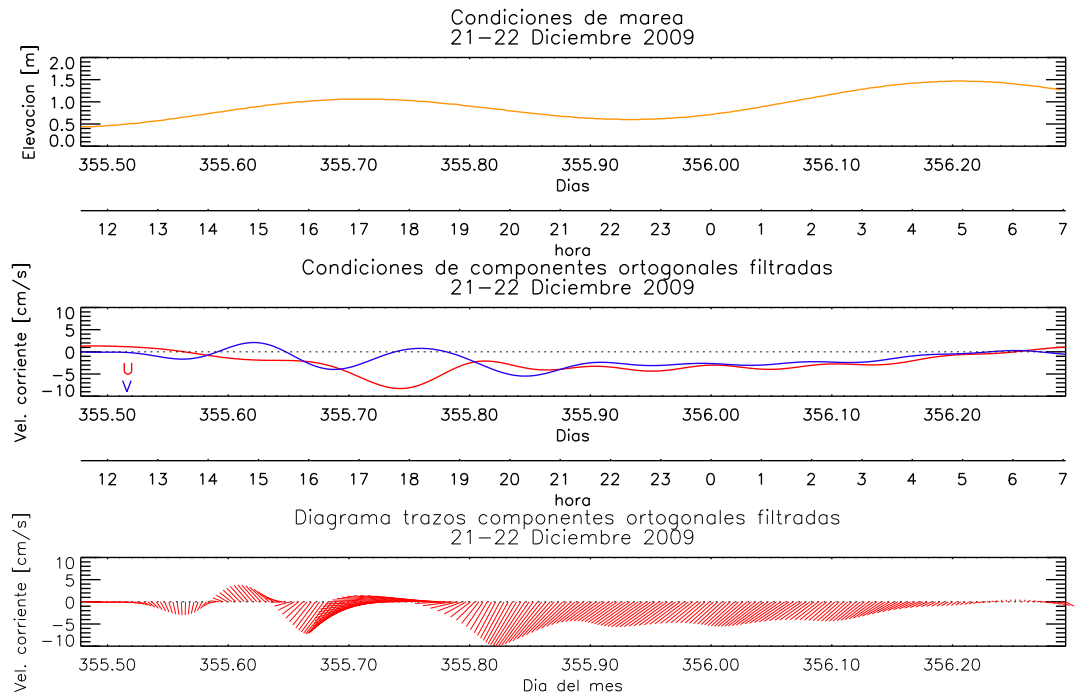


Figura 5.24: Serie de marea, componente  $U$ ,  $V$  y diagrama de trazos filtrados. Fuente: E.P.

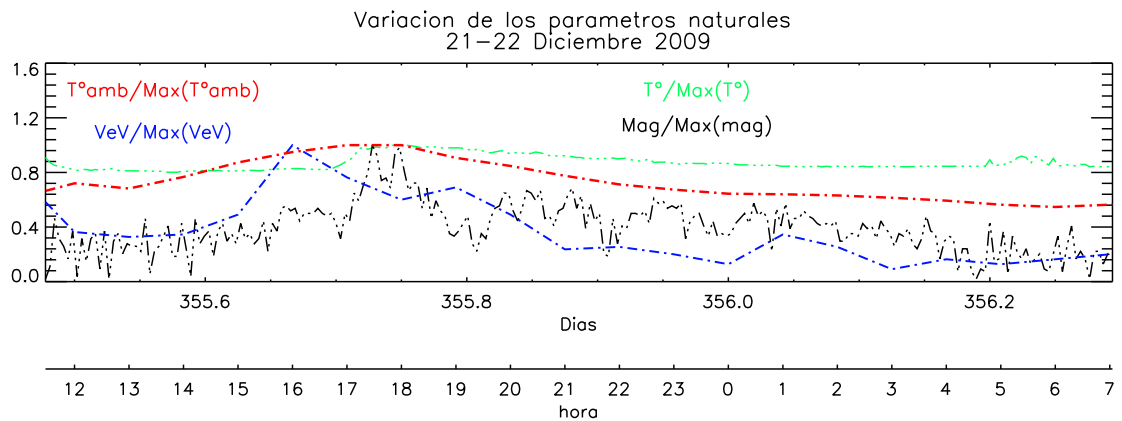


Figura 5.25: Variación de los parámetros naturales. Fuente: E.P.



## 5.7 Validación

Se compararon los datos del correntómetro de los días 21-22 de diciembre, con todo el mes de diciembre que se obtuvo mediante la implementación numérica. Esta validación se sustenta en que deben trabajarse escalas de tiempo comparables, por lo que se realiza el supuesto que la información medida, se puede extrapolar para todo el mes de diciembre dentro de un grado de certeza, sin embargo extenderse a escalas mayores al año no es recomendable dado que no se cuenta con información suficiente para realizar dicho análisis. Cabe destacar que los datos comparados se ubican en coordenadas geográficas similares.

Dada las Figuras 5.26 y 5.27 de ocurrencia de los datos modelados (Ver Anexo 10.6), se aprecia que la magnitud (en términos absolutos) entre las componentes ortogonales muestran entre sí una distribución de comportamiento similar. De igual manera esto ocurre para el caso entre las componentes de los datos *in situ*, por lo que se puede apreciar una consistencia.

Respecto a las magnitudes señaladas se observa, que las componentes ortogonales de la implementación numérica con respecto a los datos *in situ*, se comportan con una distribución de ocurrencia similar. Pudiendo explicar las diferencias, debido a que la implementación numérica no contempla los fenómenos como marea, brisa marina, gradiente de presión u otro. Siendo para el caso en estudio una aproximación adecuada en magnitud de acuerdo al objetivo señalado.

En el caso de la validación de la direcciones, se usan los datos *in situ* promediados en vertical del ADCP remolcado, con el fin de hacerlos comparables con los datos del modelo.

Los circuitos del ADCP remolcado al momento que fueron ejecutados, se realizaron bajo un estado de mar calmo con alturas de olas menores, por lo que se escogieron 3 casos del modelo que presenten las características nombradas.

En las siguientes figuras se muestran los casos seleccionados de los modelos, en donde se pueden apreciar las direcciones obtenidas por el ADCP remolcado y los datos modelados, observándose que los datos de corrientes de ADCP remolcado muestran rasgos similares de dirección de las corrientes en el sector de la punta norte (Sector Bajo Bianchi) en el primer circuito. Esta similitud no se repite en los otros circuitos, donde las direcciones dominantes de los datos de ADCP son hacia el NW. Los datos del modelo muestran, sin embargo, el patrón esperable dentro de la zona de rompientes, donde existiría una corriente longitudinal costera hacia el sur en los tres circuitos. Así, el modelo muestra este rasgo y su posterior giro hacia el NW sobrepasando la punta sur (Punta Gruesa). El modelo simularía las condiciones en la zona de rompientes, inducida por el oleaje, mientras que los datos del campo de corrientes en la región externa mostrarían la región más afectada por la acción de la marea y el viento.

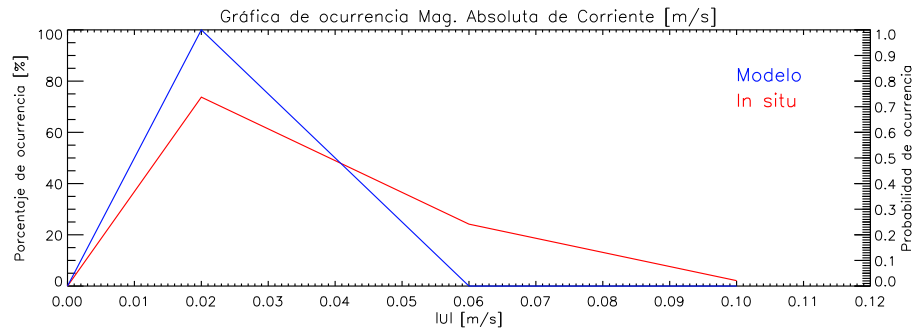


Figura 5.26: Validación por curvas de ocurrencia, componente U. Fuente: E.P.

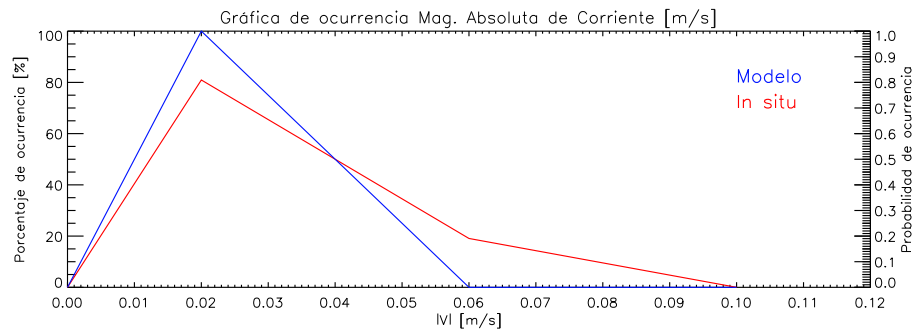


Figura 5.27: Validación por curvas de ocurrencia, componente V. Fuente: E.P.

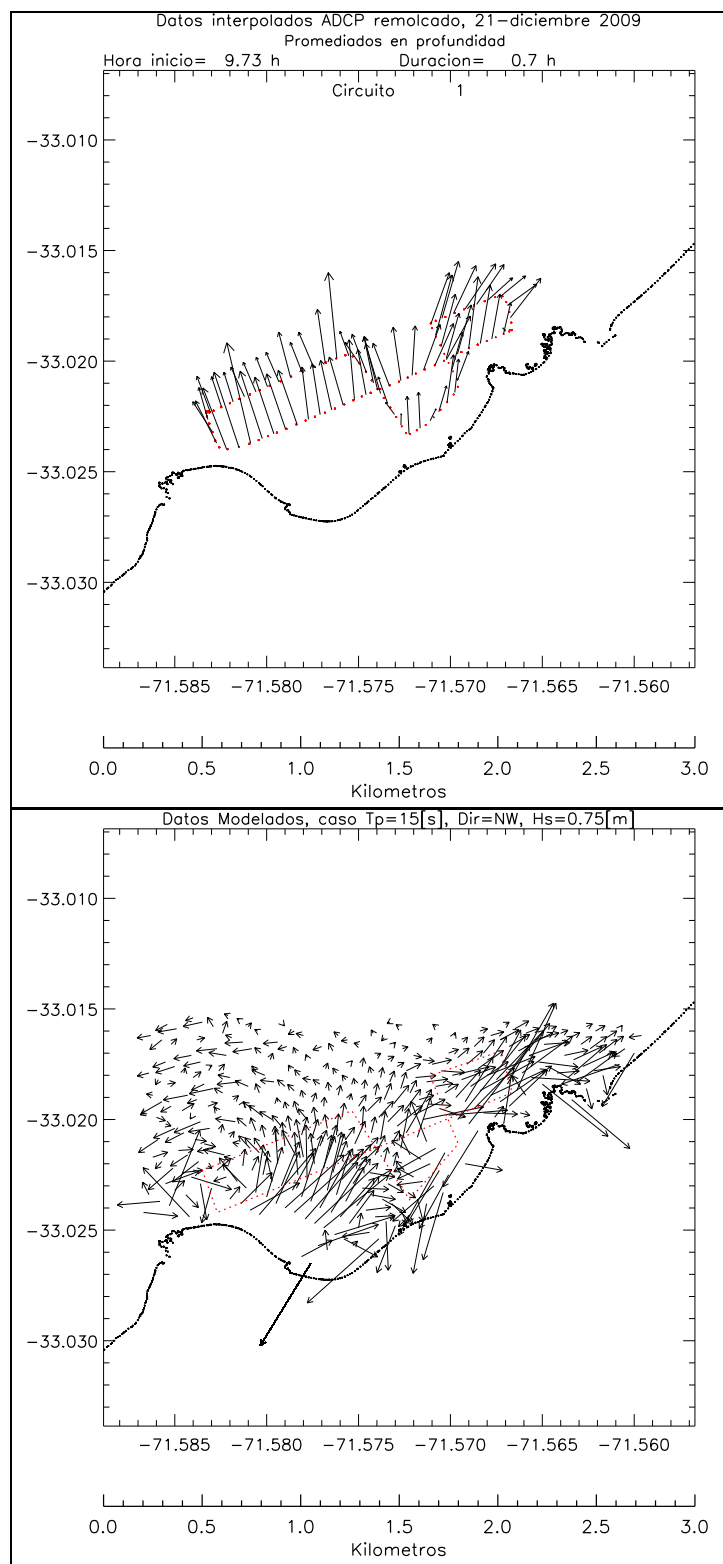


Figura 5.28: Validación 1 por ADCP remolcado y datos modelados. Fuente: E.P.

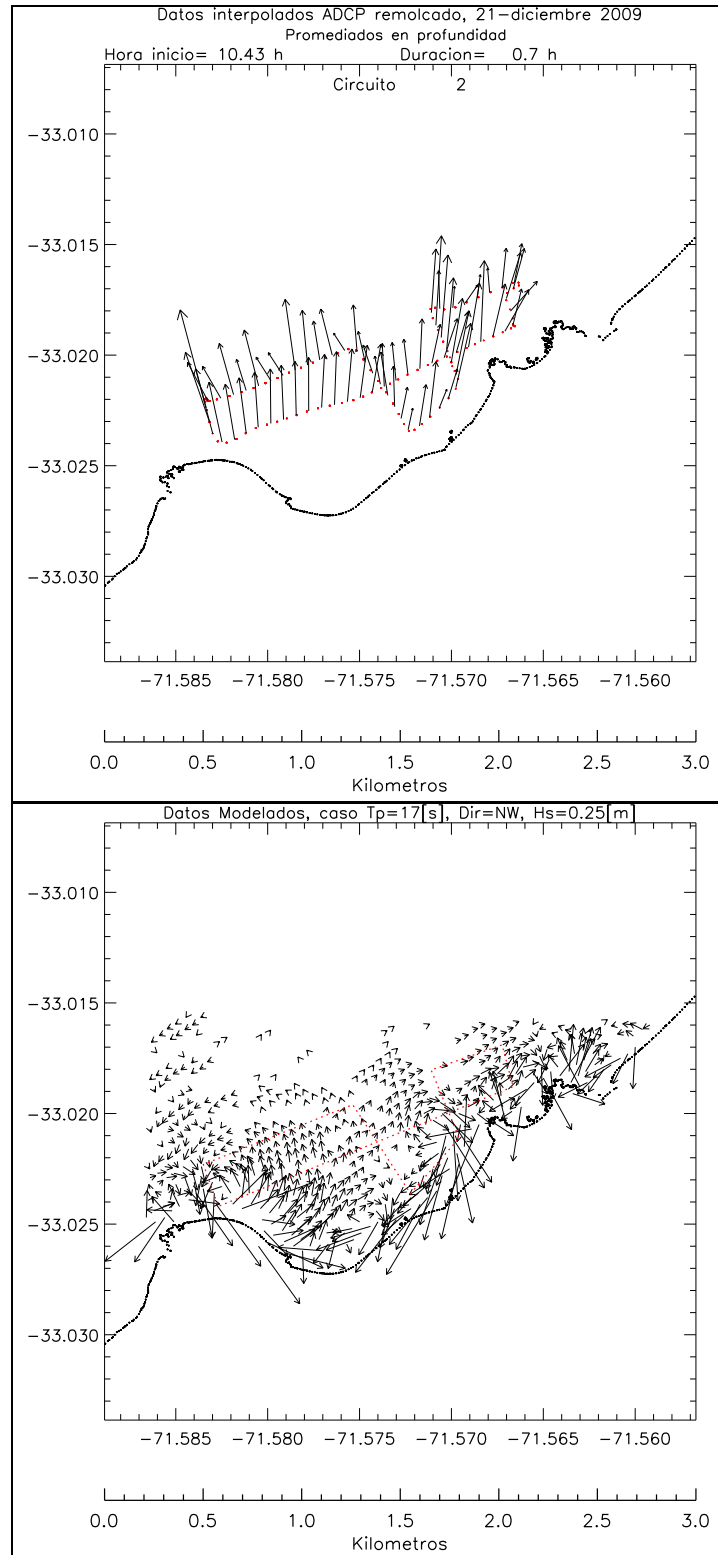


Figura 5.29: Validación 2 por ADCP remolcado y datos modelados. Fuente: E.P.

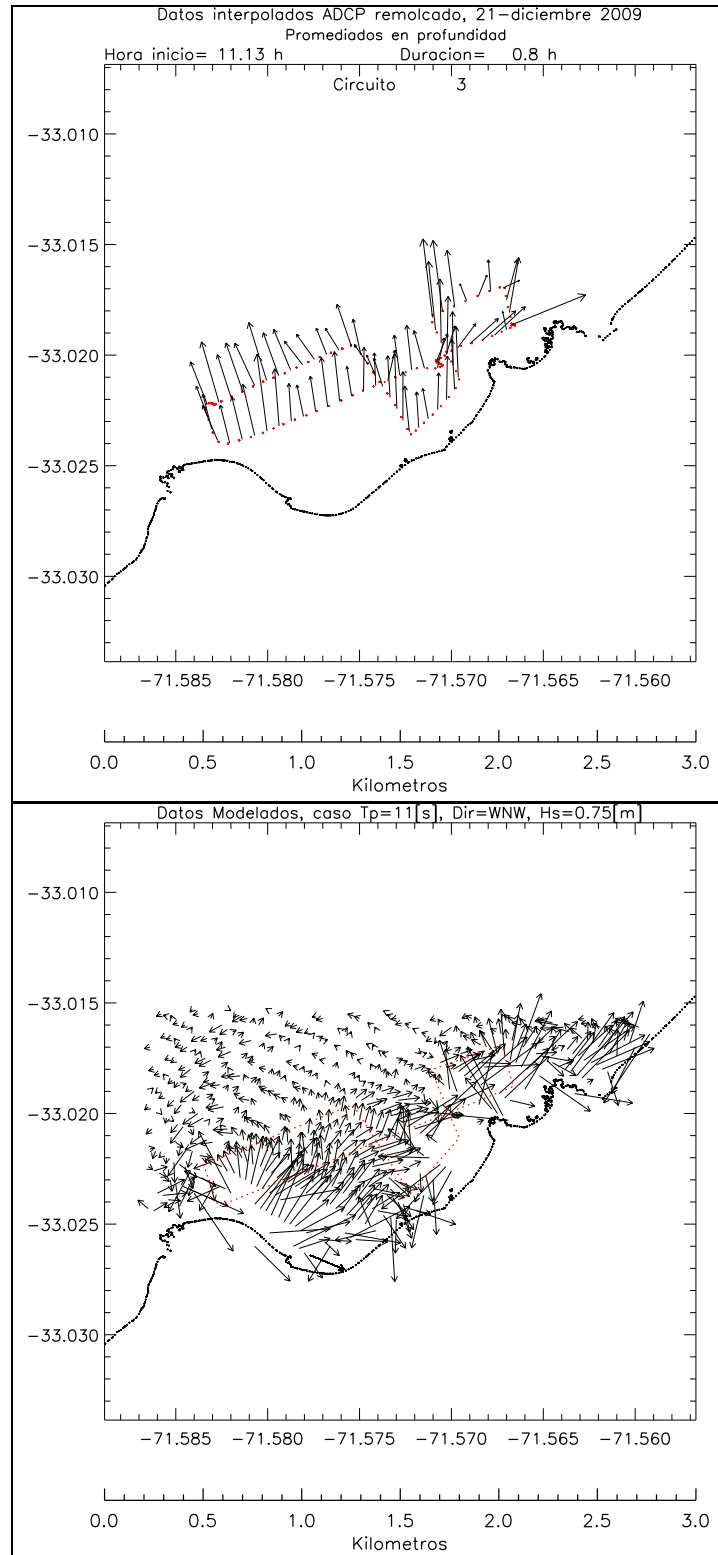


Figura 5.30: Validación 3 por ADCP remolcado y datos modelados. Fuente: E.P.



## 5.8 Desarrollo del criterio operativo del baño

En primer lugar, se definen los intervalos de altura de ola que hacen posible que un área de playa sea operable (apta para el baño) o no operable (no apta para el baño), para los bañistas, basado en el *Documento temático de Regeneración de playas [2007c]*. Se considera que una altura de ola mayor a 1.00 [m] no es operable para los bañistas, pero entre los intervalos entre 0.50-1.00 [m] y 0.00-0.50 [m] se evaluarán como operable y muy operable, respectivamente.

Respecto al criterio operativo de las corrientes, se tomó en consideración lo que determina la NOAA<sup>3</sup>, quienes establecen que las corrientes peligrosas para el baño son las mayores a 1.5 [m/s], siendo las corrientes entre 0.5-1.5 [m/s] y 0.0-0.5 [m/s] evaluadas como operables y muy operables para este caso.

Mencionados los criterios de las alturas de olas y corrientes, se obtiene la Tabla 5.5 para el posterior análisis operable de las zonas en estudio. Considerando que las persona que hacen uso del baño recreacional, tienen habilidades de natación mínimas para desplazarse.

Tabla 5.5: Desarrollo del criterio operable para playas. Fuente: E.P.

Velocidad de corriente [m/s]	Alturas de olas [m]		
	0.00-0.50	0.50-1.00	≥ 1.00
0.0-0.5	Muy Operable	Operable	No operable
0.5-1.5	Operable	Operable	No operable
≥ 1.5	No operable	No operable	No operable

<sup>3</sup>[www.erh.noaa.gov/er/akq/marine/rip.php](http://www.erh.noaa.gov/er/akq/marine/rip.php), visitada en diciembre del 2009.



## 5.9 Análisis operativo del baño

Efectuando un análisis basado en los datos entregados por la implementación numérica y datos medidos, se concluye que el patrón de circulación local en playa Caleta Abarca, queda representado por la Figura 5.31, en que existen corrientes longitudinales (flechas azules) y transversales (flechas rojas) potencialmente peligrosas para los bañistas.

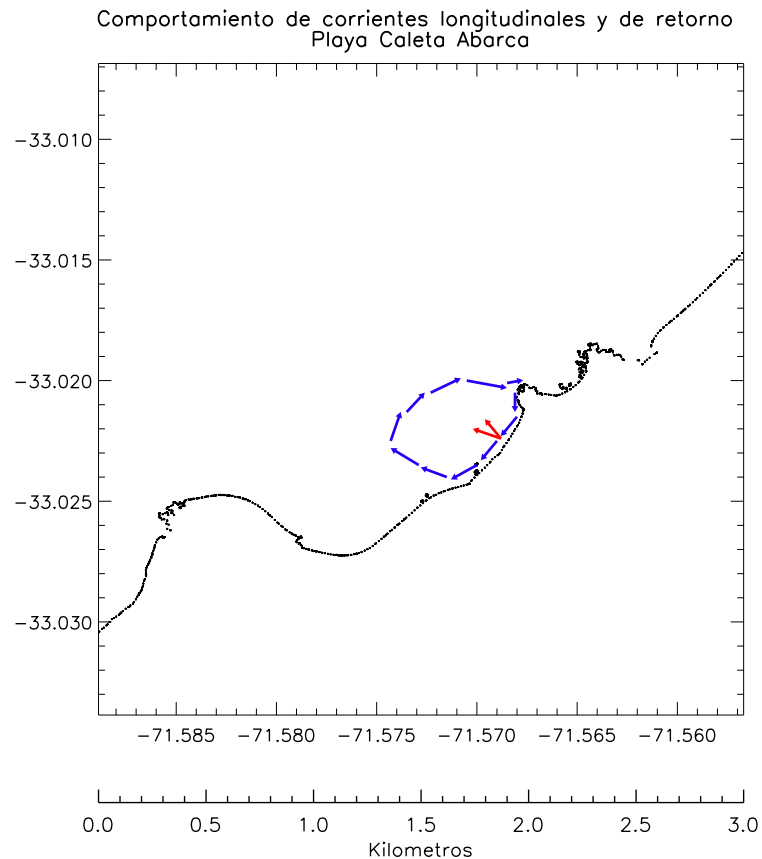


Figura 5.31: Tendencia de corrientes longitudinales y transversales en la playa. Fuente: E.P.

Para las áreas 1 y 2, las magnitudes de corrientes longitudinales y transversales, no afectan la operatividad del baño en Caleta Abarca, sin embargo las alturas de olas limitan la operatividad, de acuerdo a lo que se obtuvo en la Tabla 5.6. Así, durante un período de un año, la playa puede ser utilizada por los bañistas en un 98.39%.



De las Figuras 5.32 y 5.33 de series de tiempo, se observó que las máximas energías de corrientes en la playa se concentran en Invierno (21 de junio al 20 de septiembre), con frecuencias o ciclos entre 320-360 [días]. Y con relación a las alturas de olas estas sobrepasan ocasionalmente el criterio operativo en tiempos puntuales, presentando una tendencia general que no sobrepasa el criterio.

En las dos áreas se aprecia (Figuras 5.32 y 5.33 ) que en las época estival (21 de diciembre al 20 de marzo) existen ciertos valores de alturas de mayor intensidad respecto a las condiciones del promedio, pero estas no ofrecen un verdadero aporte energético para la corriente transversal y longitudinal, en cambio los meses de Invierno muestran una consistencia temporal, ya que no se evidencian fluctuaciones significativas, lo que se traduce en una consistencia de mayor aporte energético y periodicidad de eventos al cabo de un año.

Tabla 5.6: Porcentajes de alturas de olas en las áreas. Fuente: E.P.

$H_s$ [m]	área 1 y 2 [%]
0.00-0.50	0.79
0.50-1.00	97.6
$\geq 1.00$	1.61

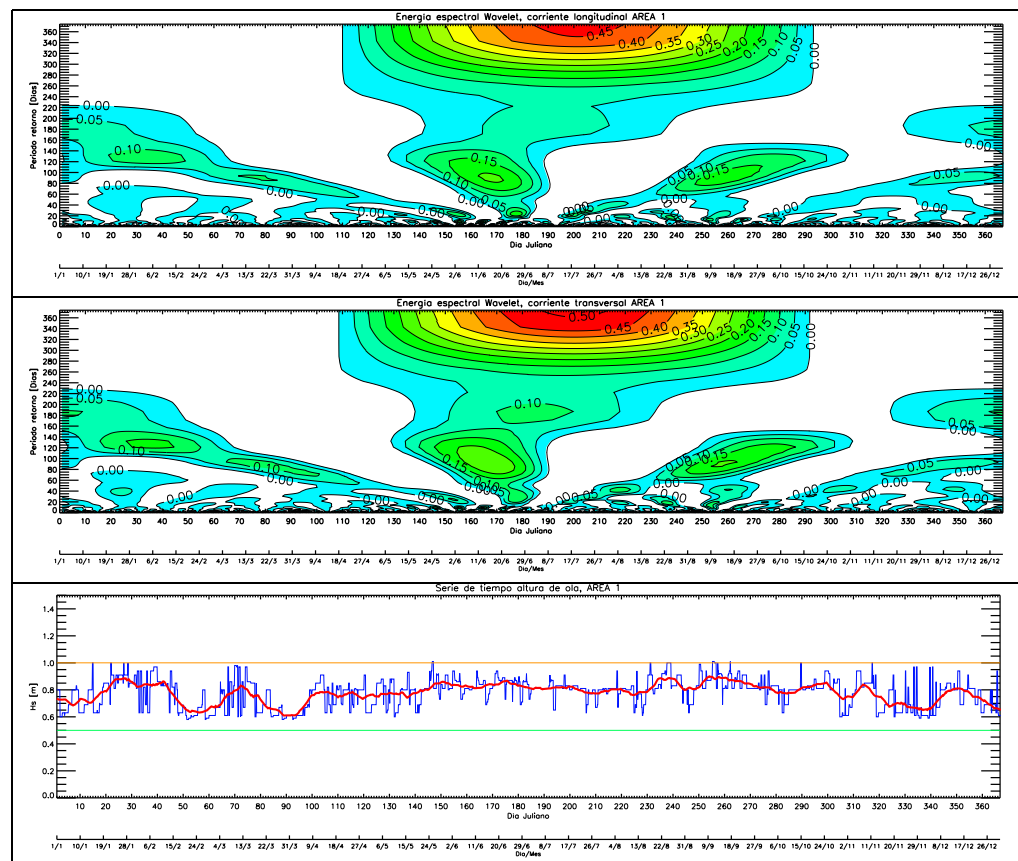


Figura 5.32: Análisis operacional, área 1. Fuente: E.P.

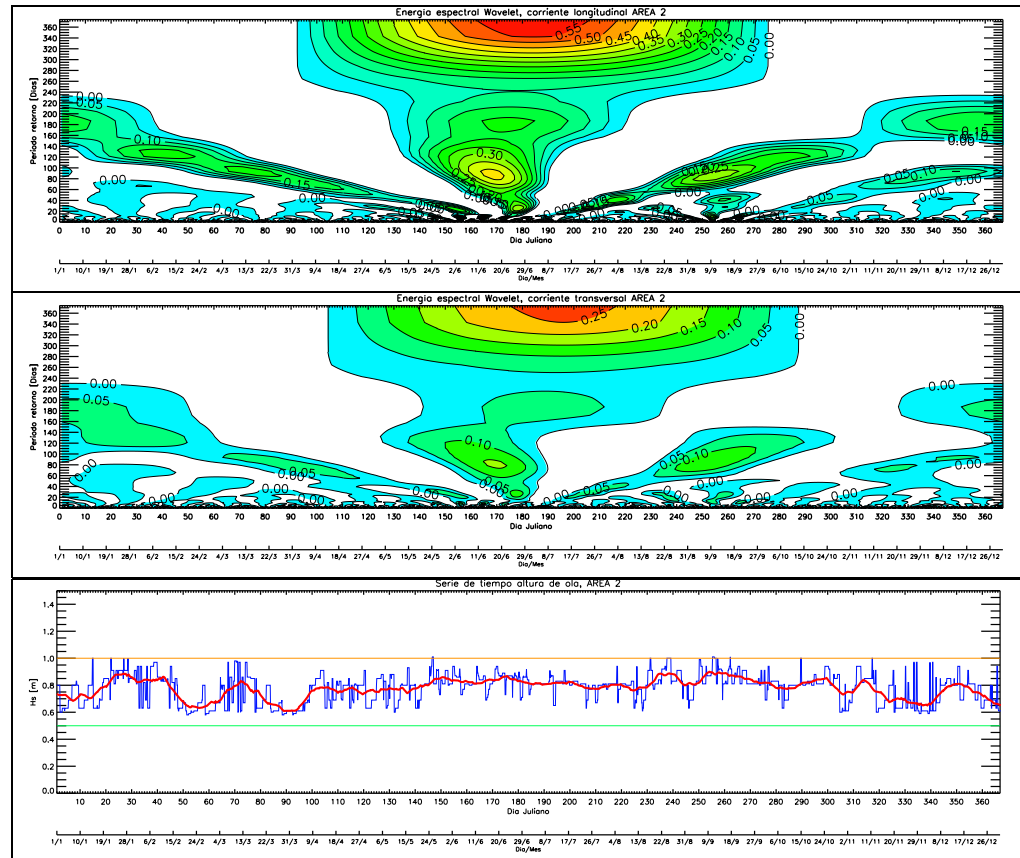


Figura 5.33: Análisis operacional, área 2. Fuente: E.P.



## 6. Discusión

### 6.1 Aproximación de oleaje al punto de transición

El punto de transición de profundidad 35 [m], se seleccionó mediante el análisis de los parámetros de Ursell, concluyendo que no existen fenómenos no lineales de mayor importancia, siendo la implementación lineal una buena aproximación.

La aproximación de oleaje al punto de transición se desarrolló con un modelo lineal, capaz de representar los fenómenos de asomeramiento y refracción del oleaje, siendo la difracción no representada de forma física en la implementación numérica, debido que para este caso no implica mayor importancia. Una modelación que represente la difracción del oleaje, podría demorar un tiempo considerablemente mayor, lo que en términos de tiempo para la ingeniería es aceptable no considerar tal fenómeno.

El método de transferencia de oleaje al punto de transición que se utilizó es el llamado semipurista, el cual fue seleccionado dado que mantiene la información de la forma espectral del oleaje en el punto a transferir. Esto es de vital importancia para una buena caracterización del oleaje y no implica un mayor costo de tiempo.

### 6.2 Propagación de oleaje a playa Caleta Abarca

La implementación numérica en la zona de estudio se desarrolló con los modelos de oleaje y corriente llamados WAPO y COCO, respectivamente, de los cuales este último resuelve de manera adecuada el campo de magnitudes de corrientes observado en los datos *in situ*. Estos se utilizan por ser de uso gratuito, con buenas aproximaciones y con un costo de tiempo adecuado a los fenómenos a modelar.

El método de transferencia que se utilizó es el llamado parámetros de resumen, el cual pierde la forma espectral, pero si se considera que para este caso hay un 92% de espectros de un sólo pico, pudiendo así ser el espectro representado por una ola, se puede afirmar que tal método de transferencia entrega una buena aproximación. Se utilizaron los parámetros de resumen, por tener un costo de tiempo menor con una buena aproximación para este caso.



### 6.3 Datos *In situ*

Si bien los datos *in situ* se utilizaron para hacer una validación del estudio en playa Caleta Abarca, se debe tener presente que lo realizado es una primera aproximación, dado que no se cuenta con la cantidad de datos *in situ* y de espectros de olas necesarios, para hacer una validación en profundidad.

Se obtuvo una serie de datos *in situ*, los cuales dan una reseña del comportamiento de los fenómenos en estudio en la playa Caleta Abarca. Si bien el tiempo de medición fue breve por limitaciones presupuestarias, sirven de igual forma para dar una primera aproximación del proceso de validación.

Con la medición realizada por el CTD, se pudo determinar que la columna de agua de la zona de estudio, presenta bajas diferencias verticales de densidad, por lo que la columna de agua puede sugerirse como casi verticalmente homogénea. Esto valida la utilización de un modelo de una capa.

En cambio con las mediciones de ADCP remolcado y correntómetro, se observó que la playa Caleta Abarca se encuentra en un sector en que las direcciones de las corrientes tienden a rotar en un semicírculo, siguiendo el efecto de la marea, de manera semejante al comportamiento típico de circulación de una bahía dominada por este forzante externo. Se observaron magnitudes de corrientes menores a  $0.1 [m/s]$ , existiendo corrientes longitudinales y transversales, y con moderados porcentajes de corrientes explicados por marea (52% para componente  $U$ , y 24 % para componente  $V$ ). Esto cumple la suposición inicial del presente trabajo con respecto a la marea, que se puede desprestigiar al no ser considerada en la implementación numérica en la zona de estudio.

Referente a la validación de las corrientes, se debe considerar el problema de escala al momento de comparar los datos *in situ* respecto a los modelados. Mientras los datos modelados utilizan un tensor de radiación representativo de tres horas de oleaje, las corrientes observadas fueron en intervalos de 5 minutos. Esto induce un sesgo en la validación.

### 6.4 Operatividad playa Caleta Abarca

El criterio operativo para este caso se desarrolló mediante las recomendaciones señaladas, sin embargo revisando la bibliográfica pertinente, existe un área de la biomecánica que se concentra en temas de natación profesional, lo cual para este caso no sirve, dado que la playa es de uso de personas que no necesariamente son profesionales en la natación. En el presente trabajo se consideró que las persona que hacen uso del baño recreacional en esta playa, tienen habilidades de natación mínimas para desplazarse.

Futuros estudios de interacción entre el desplazamiento de un nadador en el medio acuático, podrían enfocarse en la comprensión de la totalidad de las fuerzas que están actuando en la generación y oposición al movimiento, y no solo en el efecto cinemático de las corrientes.



## 7. Conclusiones y Recomendaciones

### 7.1 Aproximación de oleaje al punto de transición

El oleaje medio en el punto de transición, se caracterizó por ser en mayor porcentaje proveniente de las direcciones WNW y N, con alturas de olas concentradas entre 0.50-1.50 [m] y periodos picos en los intervalos 12-14 [s], lo que es consistente con los coeficientes de transferencia entregados por el modelo implementado.

### 7.2 Propagación de oleaje a playa Caleta Abarca

La caracterización de las corrientes longitudinales y transversales en playa Caleta Abarca, presentó un alto porcentaje de alturas de olas menores a 1.00 [m], con una concentración en las corrientes longitudinales y transversales menores a 0.1 [m/s].

Las máximas alturas de olas se presentaron en la estación de Verano, observándose las más altas magnitudes de corrientes en la estación de Invierno. Se distinguió en todo el año una tendencia similar entre las corrientes longitudinales y transversales.

### 7.3 Datos *In situ*

En la validación de las magnitudes de las componentes ortogonales de corrientes obtenidos de la implementación numérica, con respecto a los datos *in situ*, se observó una distribución de ocurrencia similar para ambas componentes. Las diferencias se explican porque el modelo resuelve el patrón de corrientes generadas por olas, y en el sitio de medición hay influencia de otros agentes forzantes tales como la marea, el flujo de río y el viento. No obstante, la aproximación de los datos obtenidos es adecuada para el objetivo señalado, pudiendo así con ello dar una primera validación del estudio efectuado en cuanto a las magnitudes de las componentes de corriente.

Las direcciones fueron validadas de manera cuantitativa, observándose que los patrones de distribución del modelo se ajustaban a los datos de ADCP remolcado en algunos sectores como en la punta norte (Sector Bajo Bianchi). El modelo pudo entregar un patrón aceptable del comportamiento de las corrientes dentro de la zona de rompientes, mientras que los datos de ADCP remolcado mostraron el comportamiento de las corrientes fuera de la zona de rompientes.

Los resultados del diagrama del vector progresivo sugieren que una partícula liberada en el sector fuera de la rompiente, se dirigirá hacia el SW por acción de las corrientes dominantes.



## **7.4 Operatividad playa Caleta Abarca**

Se concluye que la playa Caleta Abarca en todas sus áreas, en función de los parámetros de oleaje y corrientes, es operable o apta para el baño en la mayor parte del tiempo del año, especialmente en la temporada de Verano, según los resultados obtenidos. Esta conclusión se basa en los datos de solo un año espectral, recomendando que para un estudio acabado se realice con 20 años de oleaje, que es lo que comúnmente se ocupa para un estudio de operatividad. Para una mejor implementación numérica, se recomienda una campaña de batimetría de alta resolución en la zona de estudio, con el fin de obtener datos de profundidades de mejor calidad.

Aunque existen corrientes longitudinales y transversales que empujarían al bañista a las rocas y hacia el mar abierto respectivamente, las magnitudes de las corrientes no son lo suficientemente altas para producir un empuje significativo.

La presente investigación de pre grado, estudia un problema relativamente nuevo en Chile, lo que contribuye a obtener una nueva línea de investigación a futuro. Por lo que el autor atribuye el estudio efectuado, como el inicio de un tema a investigar, que se pretende continuar.

## **7.5 Alcance**

Si bien la playa Caleta Abarca resultó ser apta para el baño en cuanto a los fenómenos hidrodinámicos y de oleaje, se debe tener en consideración que existen otros factores que pueden ser limitantes en la operatividad de las playas en estudio. Estos factores son:

- Químicos, los cuales dirán si la playa tanto en arena como en agua, cumple con las normas sanitarias, pudiendo así no causar daños a la salud de las personas.
- Biológicos, referido a si existe alguna especie en protección que impida la interferencia humana, o bien alguna especie que sea dañina al contacto o ingestión humano.
- Fondo parejo, pendiente suave, limpio de restos de construcciones submarinas y sin roqueríos.
- Capacidad de carga de la playa, que hace alusión a la cantidad de personas que pueden estar utilizando la playa, para que sea operable.
- Condiciones adquiridas, que se refieren a estar a cargo de un concesionario que cumpla con los elementos de seguridad, sistema de primeros auxilios y salvavidas.



## 8. Glosario

$a$	: Amplitud de la onda.
$\alpha_d$	: Dirección de las olas ortogonal.
$\alpha'$	: Factor de escala asociado a la energía espectral.
$\beta$	: Pendiente de la playa.
$C$	: Celeridad de la ola.
$C_g$	: Celeridad de grupo de las olas.
$C_f$	: Factor de fricción.
$D(\alpha, \omega)$	: Función de dispersión direccional.
$E$	: Energía asociada al oleaje.
$E$	: Componente direccional Este (sólo en sección 5.6).
$\eta$	: Desnivelación instantánea de la ola.
$f$	: Frecuencia de la ola.
$f_p$	: Frecuencia pico de ola, que se asocia con la máxima energía.
$f_B$	: Fricción de fondo.
$f_D$	: Término de disipación de energía.
$f_{co}$	: Parámetro de coriolis.
$g$	: Aceleración de gravedad.
$\gamma$	: Factor de forma pico del espectro.
$\gamma'$	: Constante de proporcionalidad entre la profundidad y ola en rotura.
$h, d$	: Profundidad.
$H$	: Altura de ola, desde el valle hasta la cresta.
$H_{area}$	: Altura de ola máxima en una determinada área.
$H_0$	: Altura de ola en aguas profundas.
$H_{m_0}$	: Altura de ola espectral.
$H_{1/10}$	: Promedio del 10% de las olas más altas.
$H_{1/3}$	: Promedio del 33% de las olas más altas.
$H_i$	: Altura de ola incidente.
$H_r$	: Altura de ola reflejada.
$H_s$	: Altura de ola significativa, considerada como $H_{1/3}$ .
$I_r$	: Parámetro adimensional de Iribarren.
$k$	: Número de ola.
$K_a$	: Coeficiente de agitación.
$K_d$	: Coeficiente de difracción.
$K_r$	: Coeficiente de refracción.
$K_{re}$	: Coeficiente de reflexión.
$K_s$	: Coeficiente de <i>Shoaling</i> .
$L$	: Longitud de la ola.
$L_0$	: Longitud de la ola en aguas profundas.
$m_n$	: Momento de orden $n$ , de la distribución.



$n$	: Vector normal.
$N$	: Componente direccional Norte.
$\nu$	: Anchura espectral caso 2.
$\omega$	: Frecuencia angular.
$p$	: Presión local.
$\partial'$	: Dirección de la corriente relativa.
$\phi$	: Función potencial.
$\phi(\omega_h)$	: Factor de transformación del espectro tipo TMA.
$R_y$	: Fricción de fondo.
$\rho$	: Densidad del fluido.
$S$	: Componente direccional Sur.
$S$	: Tensor de radiación (sólo en las secciones 3.6 y 3.7).
$s$	: Función empírica por Hasselman.
$S(\omega, \theta)$	: Función de densidad espectral ( $S(\omega, \alpha)$ ).
$S_j(f)$	: Espectro tipo JONSWAP.
$S_{TMA}$	: Espectro tipo TMA.
$sig.$	: Parámetro significativo.
$\sigma$	: Ancho de la base del espectro.
$\sigma^2$	: Dispersión del oleaje.
$T$	: Período de la ola.
$T_p$	: Período pico de la ola, que se asocia con la máxima energía.
$T_{m01}$	: Período medio.
$T_{m02}$	: Período cero ( $T_z$ ).
$T_{m-10}$	: Período energético.
$t$	: Tiempo.
$\tau_b$	: Tensión de fondo.
$\theta$	: Dirección del oleaje incidente.
$u, U$	: Velocidad de la corriente eje horizontal (eje x).
$u_b$	: Amplitud de la velocidad en el fondo.
$U'$	: Velocidad de corriente.
$U_{10}$	: Velocidad del viento a 10[m] sobre la superficie.
$v, V$	: Velocidad de la corriente eje vertical (eje y).
$V^{clong}$	: Velocidad de las corrientes longitudinales, de la playa.
$V^{ctran}$	: Velocidad de las corrientes de resaca y retorno, de la playa.
$\varepsilon$	: Anchura espectral.
$\varepsilon'$	: Viscosidad de Foucault.
$W, O$	: Componente direccional Oeste.
$x$	: Eje horizontal, vista en planta de la playa.
$x'$	: largo del Fetch.
$y$	: Eje vertical, vista en planta de la playa.
$z$	: Eje vertical que tiene su origen en el nivel medio del agua.



## 9. Referencias

- The use of rock in hydraulic engineering. The rock manual.* Construction Industry Research and Information Association(CIRIA), London, 2 edition, 2006.
- MIKE 21 Boussinesq wave model.* Danish Hydraulic Institute (DHI). User Guide and Reference Manual, 2005.
- Caracterización del oleaje. Ingeniería Marítima.* Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de Barcelona, España, 2002. Vol 2.
- Y. Goda. *Random seas and design of maritime structures.* Yokohama National University, Japón, world scientific edition, 2000. Vol 15.
- Documento de Referencia.* Grupo de ingeniería oceanografía y de costas, Universidad de Cantabria, España, 2000. Vol 1.
- Modelo de corrientes de rotura en playas.* Grupo de ingeniería oceanografía y de costas, Universidad de Cantabria, España, 2007a.
- Modelo de propagación de oleaje monocromático.* Grupo de ingeniería oceanografía y de costas, Universidad de Cantabria, España, 2007b.
- Documento temático, Regeneración de playas.* Grupo de ingeniería oceanografía y de costas, Universidad de Cantabria, España, 2007c.
- Cesar Guzmán. *Puesta en marcha de canal con generación de olas y caracterización hidrodinámica.* Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile, Chile, Diciembre 2006.
- J. William Kamphuis. *Introduction to Coastal Engineering and Management.* Queen's University, Canadá, world scientific edition, 2000. Vol 16.
- Salvador Llana. *El Análisis biomecánico en la natación.* Facultad de ciencias de la actividad física y el deporte. Universidad de València, España, 2002.
- Stanislaw R. Massel. *Ocean surface waves: their physics and prediction.* Australian Inst of Marine Sci, Australia, world scientific edition, 1996. Vol 11.
- Edgar Mendoza, Rodolfo Silva, Asunción Baquerizo, and Miguel Losada. *Quad tree based numerical model for coastal hydrodynamics simulation.* Ocean Engineering Research Advances, 2007.
- Juan Mercado. *Análisis sedimentológico, playa Caleta Abarca.* Ingeniería civil oceánica, curso de ingeniería de costas, Universidad de Valparaíso, Chile, 2009.
- Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias. Recomendación de Obras Marítimas 02-90 (ROM).* Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, España, 1990.



- Matías Quezada. *Estudio de erosión costera y regeneración de espacios litorales. Una aplicación en playa el Papagayo, Quintero*. Memoria para optar al título de ingeniero civil oceánico, Universidad de Valparaíso, Chile, 2007.
- Matías Quezada. *Diapositiva: Interacción del oleaje con el fondo*. Ingeniería civil oceánica, curso de Ingeniería de costas, Universidad de Valparaíso, 2008.
- Roberto Salinas. *Transferencia espectral en aguas someras mediante modelos numéricos*. Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, 2008.
- Christopher Sáez, Arnaldo Torres, Juan Mercado, Tim Mundon, and C Hutchings. *Análisis de sensibilidad de la resolución de engrillamiento en modelos de propagación de oleaje parabólico de fase promediada*. Sociedad Chilena de Mecánica Computacional, Chile, 2009.
- Rodolfo Silva. *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Instituto de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2005.
- Rodolfo Silva. *Manual del usuario y documento de referencia del programa MWAPO3*. Instituto de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2008.
- Rodolfo Silva, Alistair Borthwick, and Edgar Mendoza. *Linear wave propagation on an adaptive quad-tree cut-cell grid*. Coastal Engineering, 2004.
- Jane Smith, Ann Sherlock, and Donald Resio. *STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model User's Manual for STWAVE*. U.S Army Corps of Engineers, Washington, DC, 2001. Versión 3.0.
- C. Guedes Soares and M. C. Nolasco. *Spectral Modeling of Sea States With Multiple Wave Systems*. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1992. doi: 10.1115/1.2919981. URL <http://link.aip.org/link/?JOM/114/278/1>. Vol 4, N° 4.
- Estimation of nearshore waves. Coastal Engineering Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 2002a. Vol 2.
- Harbor hydrodynamics. Coastal Engineering Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 2002b. Vol 2.
- Water wave mechanics. Coastal Engineering Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 2002c. Vol 2.
- Surf Zone Hydrodynamics. Coastal Engineering Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 2003. Vol 2.
- Guide to wave analysis and forecasting*. World Meteorological organization, Ginebra, Suiza, 1998. N° 702.



## 10. Anexo

### 10.1 Criterio de anidamiento (punto de transición)

El criterio de anidar los modelos en el punto de transición de la Figura 4.7, se justifica en las funciones de transferencia que presentaron variaciones menores, en el veril en que se anidan los modelos de propagación de oleaje.

En la Figura 10.2, se observan los coeficientes de transferencia del punto de anidamiento escogido y dos casos de puntos adyacentes a este, llamados casos del punto 2 y 3 que se ubican en las coordenadas  $33^{\circ}01'3.08''$  S,  $71^{\circ}34'24.37''$  W y  $33^{\circ}01'3.03''$  S,  $71^{\circ}34'38.49''$  W, respectivamente (Ver Figura 10.1).

Por lo tanto, se observa en la Figura 10.2 que las variaciones son menores en la distintas funciones de transferencia de los puntos mencionados, existiendo errores promedios respecto al punto de anidamiento descritos en la Tabla 10.1, los cuales son menores con relación a la escala de trabajo, esto indica que los coeficientes en el veril de anidamiento presentan una baja variación.

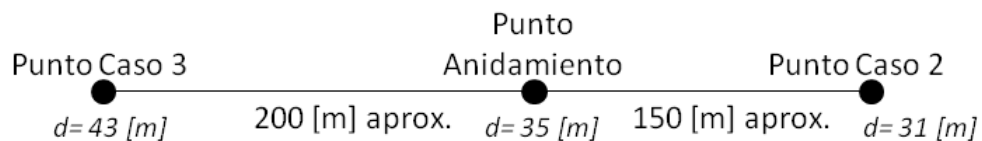


Figura 10.1: Esquema general de puntos en el veril de anidamiento. Fuente: E.P.

Tabla 10.1: Justificación del criterio de anidamiento en base al error promedio. Fuente: E.P.

Error promedio respecto al punto de transición	Coefficiente de agitación	Variación direccional [°]
Caso punto 2	0.0057	0.435
Caso punto 3	0.0048	0.037

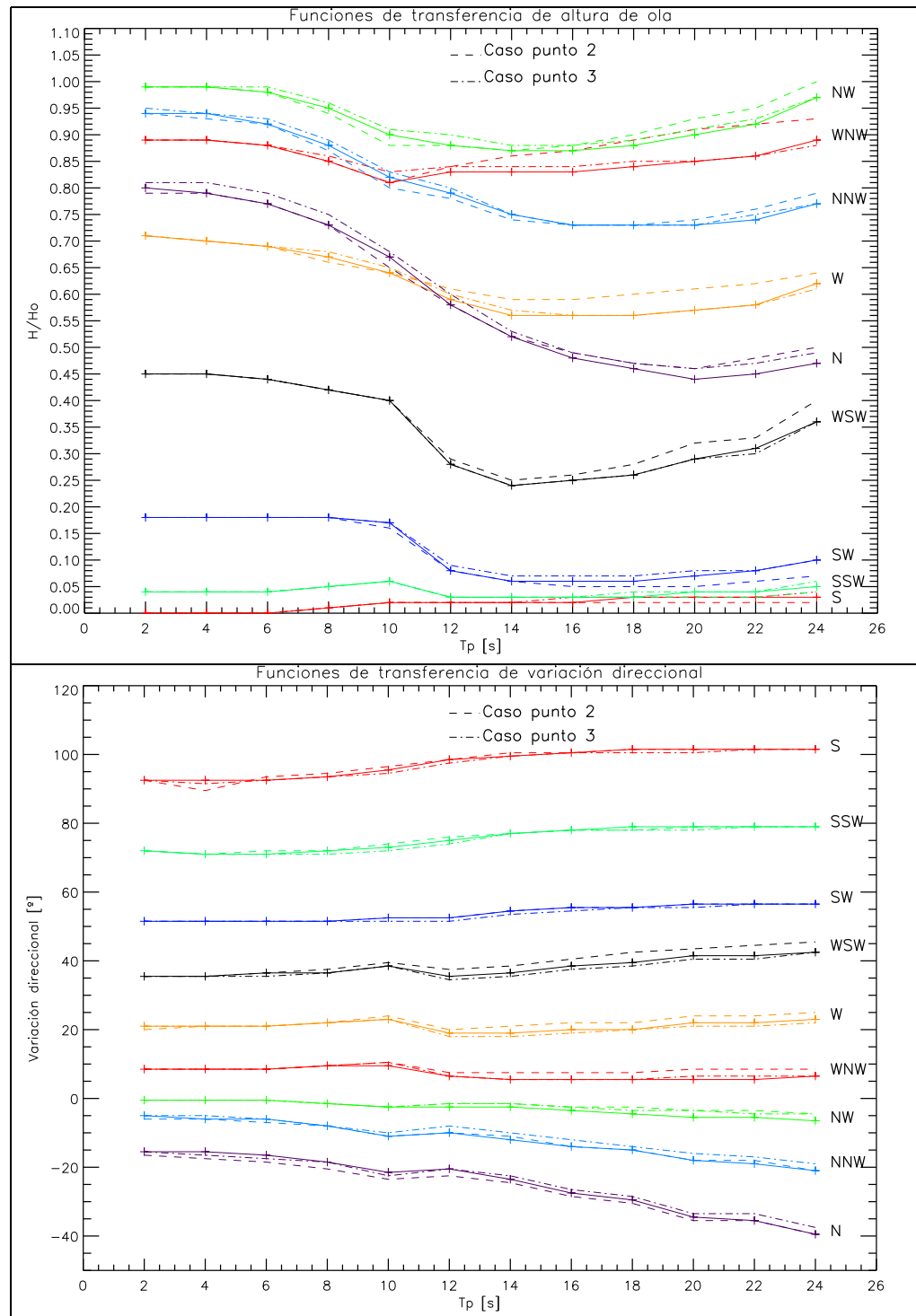


Figura 10.2: Funciones de transferencia respecto a la del punto de anidamiento. Fuente: E.P.



## 10.2 Caracterización de aguas profundas

Tabla 10.2: Incidencia Periodo pico- Dirección pico, aguas profundas. Fuente: E.P.

Periodo pico [s]		Dirección pico [°]										Sum.	Frec.	Frec. acum.
Desde	Hasta	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N				
4.	6.	0.	2.	2.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	5.	0.17	0.2	
6.	8.	0.	46.	25.	0.	0.	1.	8.	17.	0.	97.	3.36	3.5	
8.	10.	0.	5.	28.	6.	7.	3.	4.	0.	0.	53.	1.83	5.4	
10.	12.	0.	105.	498.	125.	7.	0.	0.	0.	0.	735.	25.44	30.8	
12.	14.	0.	123.	973.	159.	3.	11.	0.	0.	0.	1269.	43.93	74.7	
14.	16.	0.	43.	367.	67.	29.	25.	8.	0.	0.	539.	18.66	93.4	
16.	18.	0.	3.	64.	5.	13.	79.	6.	0.	0.	170.	5.88	99.3	
18.	20.	0.	0.	4.	0.	0.	15.	2.	0.	0.	21.	0.73	100.0	
20.	22.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	100.0	
22.	24.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	100.0	
Sum.		0.	327.	1961.	362.	59.	134.	28.	18.	0.				
Frec.		0.0	11.3	67.9	12.5	2.0	4.6	1.0	0.6	0.0				
Frec. Acum.		0.0	11.3	79.2	91.7	93.8	98.4	99.4	100.0	100.0				

Tabla 10.3: Incidencia Periodo pico- Altura sig, aguas profundas. Fuente: E.P.

Periodo pico [s]		Altura sig. [m]										Sum.	Frec.	Frec. acum.
Desde	Hasta	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5			
4.	6.	0.	0.	1.	3.	0.	1.	0.	0.	0.	0.00	5.0	0.17	0.2
6.	8.	0.	0.	5.	32.	33.	16.	3.	8.	0.	0.00	97.0	3.36	3.5
8.	10.	0.	0.	21.	14.	4.	3.	3.	3.	2.00	53.0	1.83	5.4	
10.	12.	0.	34.	144.	293.	177.	57.	21.	8.	1.	0.00	735.0	25.44	30.8
12.	14.	0.	30.	148.	331.	360.	240.	84.	58.	18.	0.00	1269.0	43.93	74.7
14.	16.	0.	12.	62.	125.	114.	140.	62.	22.	2.	0.00	539.0	18.66	93.4
16.	18.	0.	1.	11.	78.	44.	27.	7.	2.	0.	0.00	170.0	5.88	99.3
18.	20.	0.	3.	0.	10.	7.	1.	0.	0.	0.	0.00	21.0	0.73	100.0
20.	22.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	0.00	0.00	100.0
22.	24.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum.		0.	80.	392.	886.	739.	485.	180.	101.	24.	2.			
Frec.		0.0	2.8	13.6	30.7	25.6	16.8	6.2	3.5	0.8	0.1			
Frec. Acum.		0.0	2.8	16.3	47.0	72.6	89.4	95.6	99.1	99.9	100.0			

Tabla 10.4: Incidencia Altura sig- Dirección pico, aguas profundas. Fuente: E.P.

Altura sig. [m]		Dirección pico [°]										Sum.	Frec.	Frec. acum.
Desde	Hasta	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N				
0.5	1.0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	0.00	0.0
1.0	1.5	0.	5.	43.	19.	0.	13.	0.	0.	0.	80.	2.77	2.8	
1.5	2.0	0.	87.	218.	36.	13.	30.	8.	0.	0.	392.	13.57	16.3	
2.0	2.5	0.	129.	619.	69.	17.	44.	8.	0.	0.	886.	30.67	47.0	
2.5	3.0	0.	73.	511.	96.	19.	35.	4.	1.	0.	739.	25.58	72.6	
3.0	3.5	0.	28.	362.	71.	3.	9.	2.	10.	0.	485.	16.79	89.4	
3.5	4.0	0.	2.	141.	32.	4.	0.	0.	1.	0.	180.	6.23	95.6	
4.0	4.5	0.	3.	60.	25.	3.	2.	2.	6.	0.	101.	3.50	99.1	
4.5	5.0	0.	0.	7.	14.	0.	1.	2.	0.	0.	24.	0.83	99.9	
5.0	5.5	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	0.	0.	2.	0.07	100.0	
Sum.		0.	327.	1961.	362.	59.	134.	28.	18.	0.				
Frec.		0.0	11.3	67.9	12.5	2.0	4.6	1.0	0.6	0.0				
Frec. Acum.		0.0	11.3	79.2	91.7	93.8	98.4	99.4	100.0	100.0				



### 10.3 Caracterización de la zona de transición

Tabla 10.5: Incidencia Periodo pico- Dirección pico, punto de transición. Fuente: E.P.

Periodo pico [s]		Dirección pico [°]										Sum.	Frec.	Frec. acum.
Desde	Hasta	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N				
4.	6.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	37.	0.	37.	1.26	1.26	
6.	8.	0.	0.	0.	0.	0.	50.	0.	124.	0.	174.	5.95	7.21	
8.	10.	0.	0.	0.	0.	0.	194.	0.	1.	0.	195.	6.67	13.88	
10.	12.	0.	0.	0.	0.	10.	512.	0.	0.	0.	522.	17.85	31.73	
12.	14.	0.	0.	0.	0.	0.	627.	212.	0.	0.	839.	28.68	60.41	
14.	16.	0.	0.	0.	0.	0.	360.	106.	0.	0.	466.	15.93	76.34	
16.	18.	0.	0.	0.	0.	0.	471.	112.	0.	0.	583.	19.93	96.27	
18.	20.	0.	0.	0.	0.	0.	85.	6.	0.	0.	91.	3.11	99.38	
20.	22.	0.	0.	0.	0.	0.	18.	0.	0.	0.	18.	0.62	100.00	
22.	24.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	100.00	
Sum.		0.	0.	0.	0.	10.	2317.	436.	162.	0.				
Frec.		0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	79.21	14.91	5.54	0.00				
Frec. Acum.		0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	79.56	94.46	100.00	100.00				

Tabla 10.6: Incidencia Periodo pico- Altura sig, punto de transición. Fuente: E.P.

Periodo pico [s]		Altura sig. [m]										Sum.	Frec.	Frec. acum.
Desde	Hasta	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5			
4.	6.	0.	12.	18.	6.	1.	0.	0.	0.	0.	0.	37.	1.26	1.26
6.	8.	3.	42.	14.	26.	57.	20.	11.	0.	1.	0.	174.	5.95	7.21
8.	10.	15.	126.	27.	8.	6.	1.	7.	2.	3.	0.	195.	6.67	13.88
10.	12.	86.	260.	135.	25.	11.	4.	1.	0.	0.	0.	522.	17.85	31.73
12.	14.	86.	620.	96.	21.	8.	8.	0.	0.	0.	0.	839.	28.68	60.41
14.	16.	29.	290.	146.	1.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	466.	15.93	76.34
16.	18.	16.	319.	233.	15.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	583.	19.93	96.27
18.	20.	0.	41.	49.	1.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	91.	3.11	99.38
20.	22.	0.	1.	17.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	18.	0.62	100.00
22.	24.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	0.00
Sum.		235.	1711.	735.	103.	83.	33.	19.	2.	4.	0.			
Frec.		8.03	58.50	25.13	3.52	2.84	1.13	0.65	0.07	0.14	0.00			
Frec. Acum.		8.03	66.53	91.66	95.18	98.02	99.15	99.79	99.86	100.00	100.00			

Tabla 10.7: Incidencia Altura sig- Dirección pico, punto de transición. Fuente: E.P.

Altura sig. [m]		Dirección pico [°]										Sum.	Frec.	Frec. acum.
Desde	Hasta	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N				
0.0	0.5	0.	0.	0.	0.	10.	168.	57.	0.	0.	235.	8.03	8.03	
0.5	1.0	0.	0.	0.	0.	0.	1415.	277.	19.	0.	1711.	58.50	66.53	
1.0	1.5	0.	0.	0.	0.	0.	614.	100.	21.	0.	735.	25.13	91.66	
1.5	2.0	0.	0.	0.	0.	0.	70.	2.	31.	0.	103.	3.52	95.18	
2.0	2.5	0.	0.	0.	0.	0.	25.	0.	58.	0.	83.	2.84	98.02	
2.5	3.0	0.	0.	0.	0.	0.	13.	0.	20.	0.	33.	1.13	99.15	
3.0	3.5	0.	0.	0.	0.	0.	8.	0.	11.	0.	19.	0.65	99.79	
3.5	4.0	0.	0.	0.	0.	0.	2.	0.	0.	0.	2.	0.07	99.86	
4.0	4.5	0.	0.	0.	0.	0.	2.	0.	2.	0.	4.	0.14	100.00	
4.5	5.0	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	100.00	
Sum.		0.	0.	0.	0.	10.	2317.	436.	162.	0.				
Frec.		0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	79.21	14.91	5.54	0.00				
Frec. Acum.		0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	79.56	94.46	100.00	100.00				



## 10.4 Implementación numérica zona de estudio (WAPO-COCO)

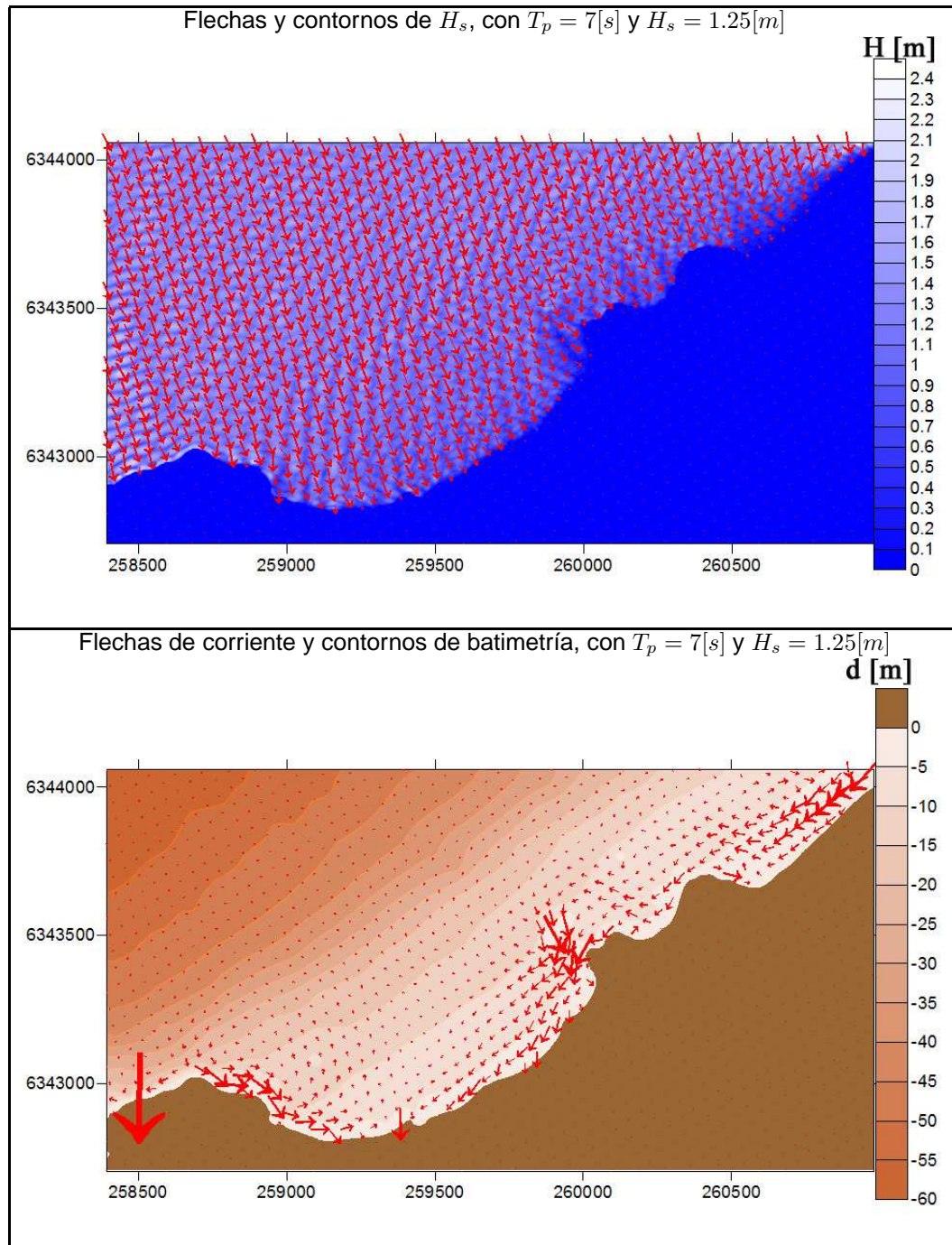


Figura 10.3: Modelado en la zona de estudio caso NNW. Fuente: E.P.

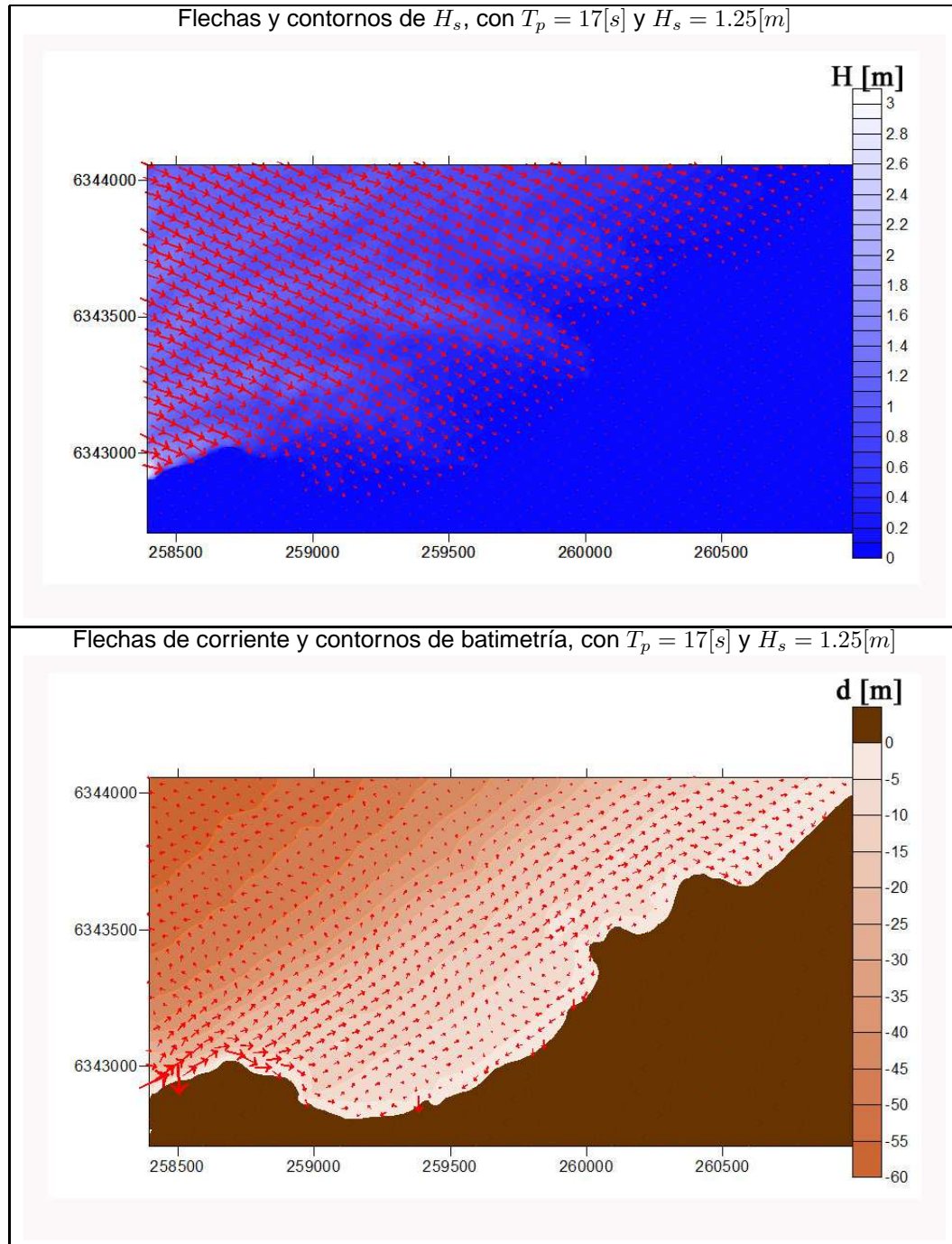


Figura 10.4: Modelado en la zona de estudio caso WNW. Fuente: E.P.



## 10.5 Caracterización de la zona de estudio

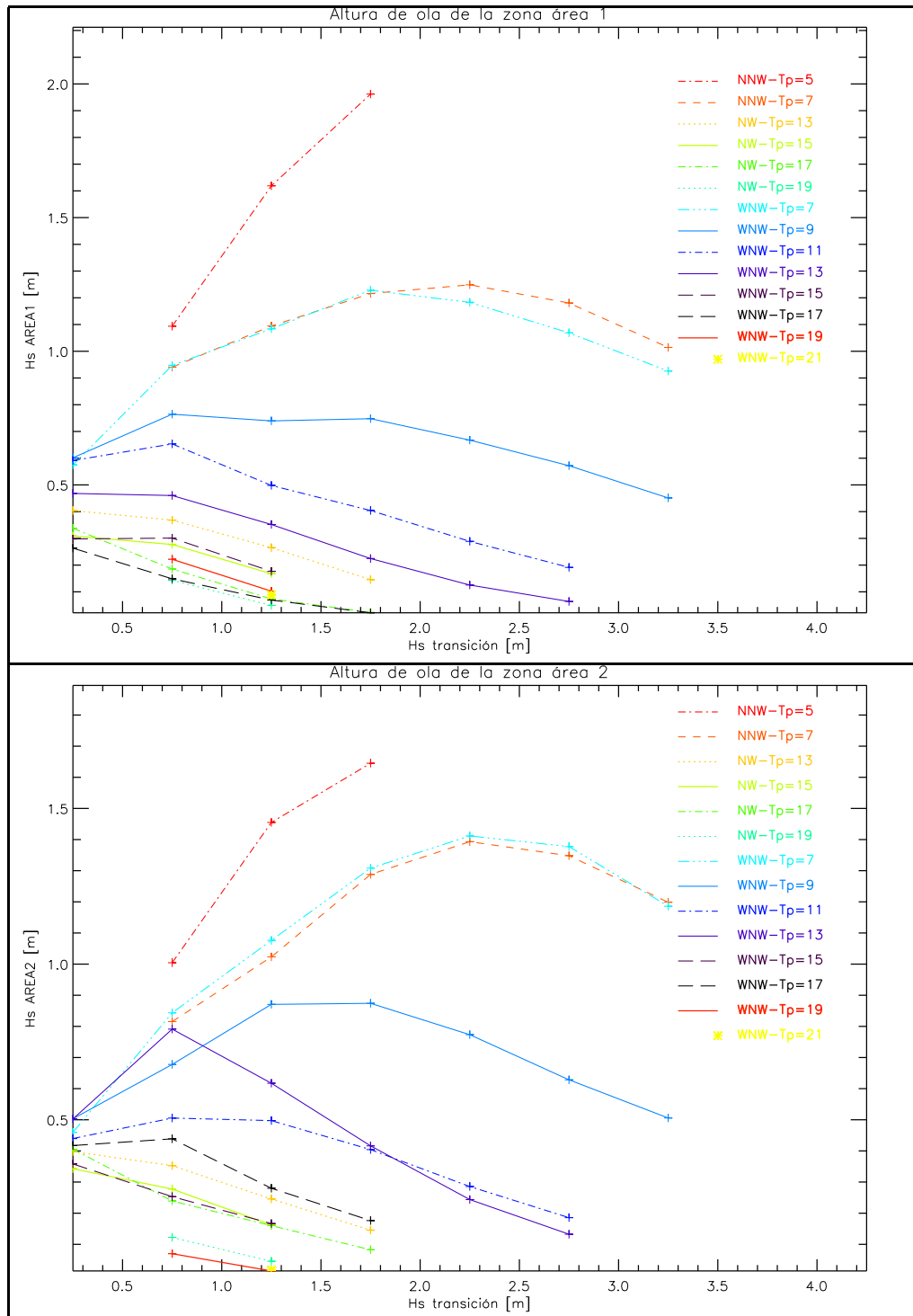


Figura 10.5: Alturas de olas modeladas en las áreas de estudio. Fuente: E.P.

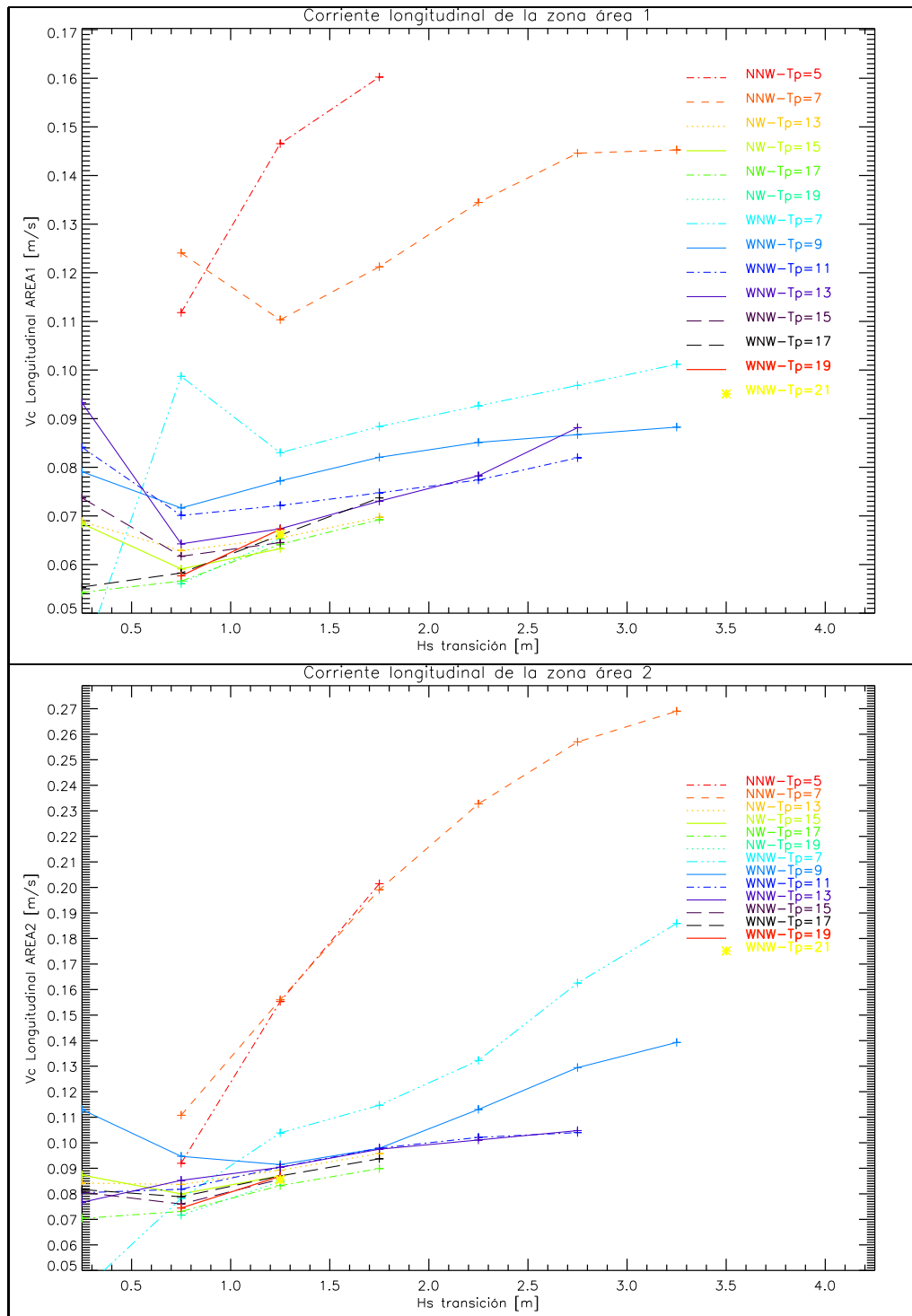


Figura 10.6: Corrientes longitudinales modeladas en las áreas de estudio. Fuente: E.P.

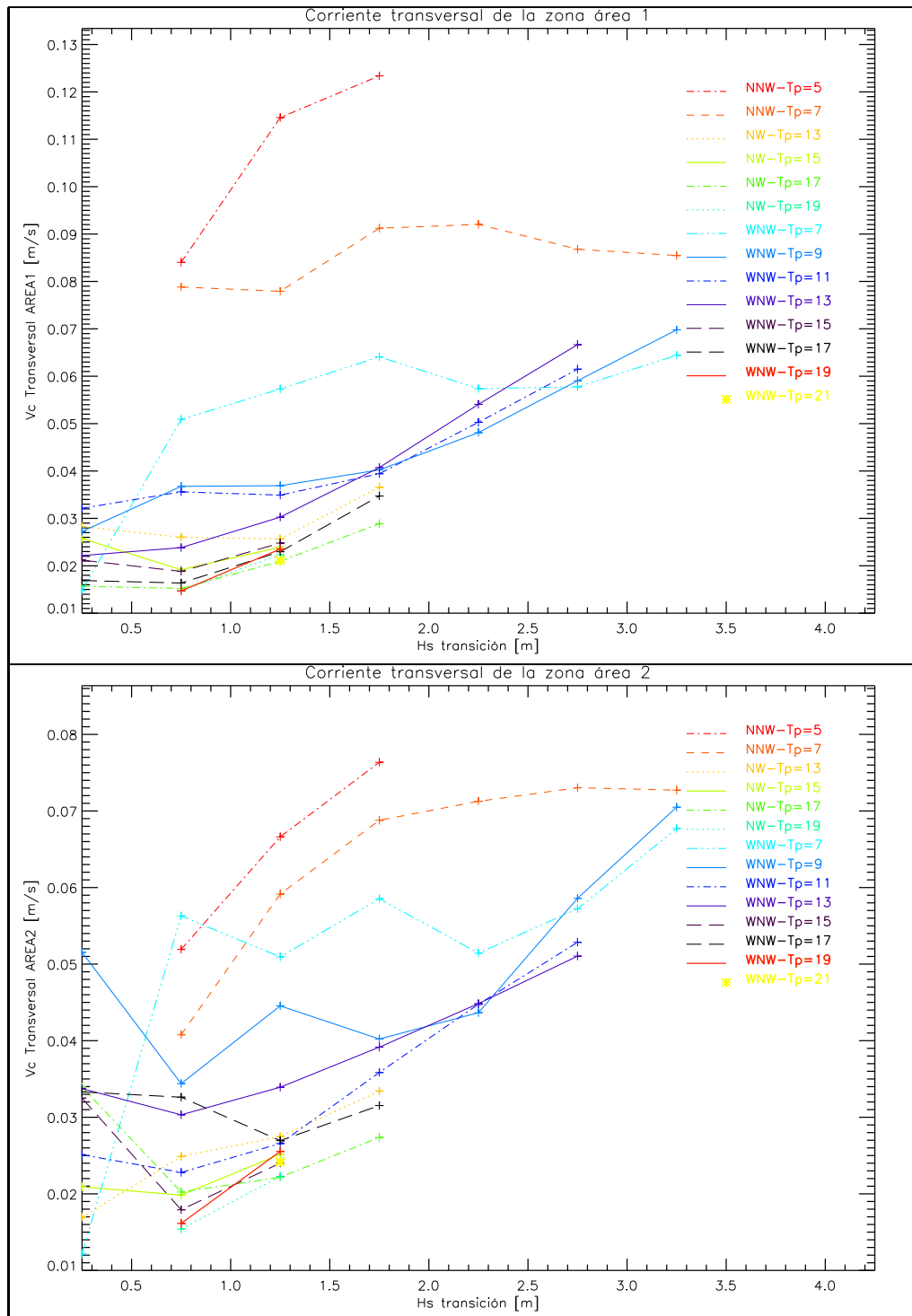


Figura 10.7: Corrientes transversales modeladas en las áreas de estudio. Fuente: E.P.



**ÁREA 1**

Tabla 10.8: Incidencia Corriente longitudinal- Corriente transversal, área 1. Fuente: E.P.

Corriente longitudinal [m/s]		Corriente transversal [m/s]				Sum.	Frec.	Frec. acum.
Desde	Hasta	0.0 0.1	0.1 0.2	0.2 0.3	0.3 0.4			
0.0	0.1	2769.	0.	0.	0.	2769.	94.57	94.57
0.1	0.2	135.	24.	0.	0.	159.	5.43	100.00
0.2	0.3	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	100.00
0.3	0.4	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	100.00
Sum.		2904.	24.	0.	0.			
Frec.		99.18	0.82	0.00	0.00			
Frec. Acum.		99.18	100.00	100.00	100.00			

Tabla 10.9: Incidencia Altura sig- Corriente longitudinal, área 1. Fuente: E.P.

Altura sig. [m]		Corriente longitudinal [m/s]				Sum.	Frec.	Frec. acum.
Desde	Hasta	0.0 0.1	0.1 0.2	0.2 0.3	0.3 0.4			
0.00	0.25	23.	0.	0.	0.	23.	0.79	0.79
0.25	0.50	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	0.79
0.50	0.75	969.	0.	0.	0.	969.	33.09	33.88
0.75	1.00	1730.	159.	0.	0.	1889.	64.52	98.39
1.00	1.25	47.	0.	0.	0.	47.	1.61	100.00
1.25	1.50	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	100.00
Sum.		2769.	159.	0.	0.			
Frec.		94.57	5.43	0.00	0.00			
Frec. Acum.		94.57	100.00	100.00	100.00			

Tabla 10.10: Incidencia Altura sig- Corriente transversal, área 1. Fuente: E.P.

Altura sig. [m]		Corriente transversal [m/s]				Sum.	Frec.	Frec. acum.
Desde	Hasta	0.0 0.1	0.1 0.2	0.2 0.3	0.3 0.4			
0.00	0.25	23.	0.	0.	0.	23.	0.79	0.79
0.25	0.50	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	0.79
0.50	0.75	969.	0.	0.	0.	969.	33.09	33.88
0.75	1.00	1865.	24.	0.	0.	1889.	64.52	98.39
1.00	1.25	47.	0.	0.	0.	47.	1.61	100.00
1.25	1.50	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	100.00
Sum.		2904.	24.	0.	0.			
Frec.		99.18	0.82	0.00	0.00			
Frec. Acum.		99.18	100.00	100.00	100.00			

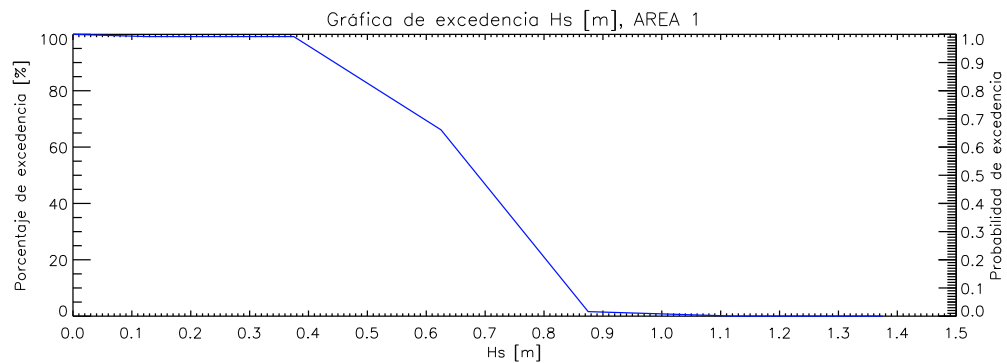


Figura 10.8: Gráfica de excedencia altura de ola, área 1. Fuente: E.P.



**ÁREA 2**

Tabla 10.11: Incidencia Corriente longitudinal- Corriente transversal, área 2. Fuente: E.P.

Corriente longitudinal [m/s]		Corriente transversal [m/s]				Sum.	Frec.	Frec. acum.
Desde	Hasta	0.0 0.1	0.1 0.2	0.2 0.3	0.3 0.4			
0.0	0.1	2710.	0.	0.	0.	2710.	92.55	92.55
0.1	0.2	125.	0.	0.	0.	125.	4.27	96.82
0.2	0.3	93.	0.	0.	0.	93.	3.18	100.00
0.3	0.4	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	100.00
Sum.		2928.	0.	0.	0.			
Frec.		100.00	0.00	0.00	0.00			
Frec. Acum.		100.00	100.00	100.00	100.00			

Tabla 10.12: Incidencia Altura sig- Corriente longitudinal, área 2. Fuente: E.P.

Altura sig. [m]		Corriente longitudinal [m/s]				Sum.	Frec.	Frec. acum.
Desde	Hasta	0.0 0.1	0.1 0.2	0.2 0.3	0.3 0.4			
0.00	0.25	23.	0.	0.	0.	23.	0.79	0.79
0.25	0.50	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	0.79
0.50	0.75	953.	16.	0.	0.	969.	33.09	33.88
0.75	1.00	1889.	97.	93.	0.	1889.	64.52	98.39
1.00	1.25	35.	12.	0.	0.	47.	1.61	100.00
1.25	1.50	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	100.00
Sum.		2710.	125.	93.	0.			
Frec.		92.55	4.27	3.18	0.00			
Frec. Acum.		92.55	96.82	100.00	100.00			

Tabla 10.13: Incidencia Altura sig- Corriente transversal, área 2. Fuente: E.P.

Altura sig. [m]		Corriente transversal [m/s]				Sum.	Frec.	Frec. acum.
Desde	Hasta	0.0 0.1	0.1 0.2	0.2 0.3	0.3 0.4			
0.00	0.25	23.	0.	0.	0.	23.	0.79	0.79
0.25	0.50	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	0.79
0.50	0.75	969.	0.	0.	0.	969.	33.09	33.88
0.75	1.00	1889.	0.	0.	0.	1889.	64.52	98.39
1.00	1.25	47.	0.	0.	0.	47.	1.61	100.00
1.25	1.50	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	100.00
Sum.		2928.	0.	0.	0.			
Frec.		100.00	0.00	0.00	0.00			
Frec. Acum.		100.00	100.00	100.00	100.00			

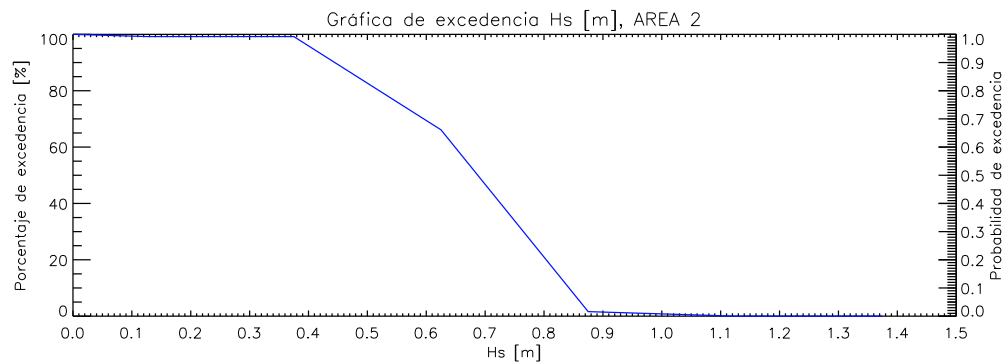


Figura 10.9: Gráfica de excedencia altura de ola, área 2. Fuente: E.P.



## 10.6 Validación

Tabla 10.14: Incidencia U-V de datos *in situ*, 21-22 Diciembre. Fuente: E.P.

U [m/s]		V [m/s]						Sum.	Frec.	Frec. acum.
Desde	Hasta	-0.12 -0.08	-0.08 -0.04	-0.04 0.0	0.0 0.04	0.04 0.08	0.08 0.12			
-0.12	-0.08	0.	0.	2.	3.	0.	0.00	5.00	2.12	2.12
-0.08	-0.04	0.	9.	37.	7.	2.	0.00	55.00	23.31	25.42
-0.04	0.00	0.	30.	82.	21.	2.	0.00	135.00	57.20	82.63
0.00	0.04	0.	1.	19.	18.	1.	0.00	39.00	16.53	99.15
0.04	0.08	0.	0.	0.	2.	0.	0.00	2.00	0.85	100.00
0.08	0.12	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	0.00	0.00	100.00
Sum.		0.	40.	140.	51.	5.	0.			
Frec.		0.00	16.95	59.32	21.61	2.12	0.00			
Frec. Acum.		0.00	16.95	76.27	97.88	100.00	100.00			

Tabla 10.15: Incidencia U-V, Diciembre datos modelados. Fuente: E.P.

U [m/s]		V [m/s]						Sum.	Frec.	Frec. acum.
Desde	Hasta	-0.12 -0.08	-0.08 -0.04	-0.04 0.0	0.0 0.04	0.04 0.08	0.08 0.12			
-0.12	-0.08	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.08	-0.04	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.04	0.00	0.	0.	0.	40.	0.	0.00	40.00	2.69	2.69
0.00	0.04	0.	0.	0.	1448.	0.	0.00	1448.00	97.31	100.00
0.04	0.08	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	0.00	0.00	100.00
0.08	0.12	0.	0.	0.	0.	0.	0.00	0.00	0.00	100.00
Sum.		0.	0.	0.	1488.	0.	0.			
Frec.		0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00			
Frec. Acum.		0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00			