



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RED
NUMÉRICA DE INFORMACIÓN DE OLEAJE PARA LAS
COSTAS DE CHILE, APLICADO A LAS REGIONES DE
ANTOFAGASTA Y VALPARAÍSO**

Felipe Antonio Maldonado Gutiérrez

Diciembre 2017

**METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RED NUMÉRICA DE
INFORMACIÓN DE OLEAJE PARA LAS COSTAS DE CHILE, APLICADO A LA
REGIÓN DE ANTOFAGASTA Y VALPARAÍSO**

Felipe Antonio Maldonado Gutiérrez

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Patricio Winckler Grez
Profesor Guía

Rodrigo Filippi Fernández
Profesor Co Referente

Catalina Aguirre Galaz
Profesor Revisor

DECLARACIÓN

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

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

Patricio Winckler G
Profesor Guía

Felipe Maldonado G
Estudiante Memorista

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres Ernesto y Graciela por su apoyo incondicional desde el primer hasta el último momento, por el ánimo y en general por estar siempre conmigo con un consejo o los miles de enseñanzas que han hecho de mí, una mejor persona. A mis hermanas Marcela y Ernesto porque siempre me dieron palabras de aliento y apoyaron en cada una de mis decisiones. A mi polola Fernanda por el amor que me ha entregado y por estar conmigo en las buenas y en las malas, por apoyarme una y mil veces. A mi cuñado Ignacio, y a mis sobrinos Constanza, Valentina y Joaquín por estar siempre conmigo, por su apoyo y alegrías. A mi cuñada Claudia, y a mis sobrinos Benjamín y Javiera por su apoyo en este proceso. A mis mejores amigos Pablo y Stephanie por estos años de amistad y por contar con sus consejos siempre.

A Rodrigo Filippi por permitirme trabajar en este hermoso proyecto, por su apoyo, continuas y largas revisiones además del apoyo en todo lo necesario, a todo el equipo de la DOP especialmente a la Directora Nacional Antonia Bordas y a su jefa de gabinete Edith Del Pino por su apoyo y colaboración en este proyecto, a Pablo Pozo por sus correcciones y explicaciones en las primeras etapas, a Juan Carlos Domínguez por explicarme su memoria de postgrado y por corregir varias veces los resultados, y a todos quienes en mi estadía como memorista en la DOP me dieron aliento en este largo proceso, especialmente a Raúl Oberreuter, Soledad Hidalgo, Daniela Arregui, Don José, Pablo Mieres, Cristina Contzen, Fernando Moreira, Francisco Castro y María Angélica Gormaz. Al equipo del Laboratorio DOP por sus consejos e inyección de energía en las etapas finales de este proceso.

A mi profesor guía Patricio Winckler por sus continuas revisiones, correcciones y consejos para mejorar el documento y por enseñarme que un buen modelador no solamente sabe usar un software, sino que sabe qué hace el modelo y es crítico con los resultados. A mis profesores de la universidad Felipe Caselli, Cristian Valderas, Guillermo Acuña, José Beya y Mario Beale por marcar mi paso por la Universidad, a los amigos del kiosco FEUV (Erwin, tía Sole y tía Clari) por esa sonrisa y buena onda, a las tías del aseo, por su sonrisa y por hacer de la UV un lugar más ameno.

A Héctor Hidalgo y Jaime Herrera por sus consejos y apoyo en algunos scripts de Matlab.

A todos y cada uno de ustedes, infinitas gracias

...Dedicado a mis padres, hermanos y a mi polola...

**“ El Señor es mi luz y mi salvación
¿a quien temeré?
El señor es la defensa de mi vida,
”
¿ante quien temblaré?**

Salmo 26

TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN	XII
2	INTRODUCCIÓN	1
3	OBJETIVOS	2
3.1	OBJETIVO GENERAL	2
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
4	ALCANCES Y LIMITACIONES	3
5	MARCO TEÓRICO	4
5.1	EI OLEAJE	4
5.2	PROCESOS FÍSICOS DE PROPAGACIÓN	4
5.3	MODELO DE PROPAGACIÓN ESPECTRAL DE OLEAJE SWAN	5
5.3.1	ECUACIÓN DE BALANCE DE ACCIÓN	5
5.3.2	PROCESOS FÍSICOS DEL MODELO	6
5.3.2.1	REFRACCIÓN Y DIFRACCIÓN	6
5.3.2.2	FRICCIÓN DE FONDO	7
5.3.3	RESOLUCIÓN DE ECUACIONES DEL MODELO	7
5.4	TRANSFERENCIA PSEUDOESPECTRAL DE OLEAJE DE DOMINGUEZ (2011)	7
6	METODOLOGÍA	10
6.1	FUENTES DE DATOS	11
6.2	PRE PROCESO	13
6.3	PROCESO	13
6.4	POST PROCESO	16
6.4.1	CLIMA MEDIO	16
6.4.2	CLIMA EXTREMO	17
6.4.3	ANÁLISIS DE INFORMACION Y VALIDACIÓN	18
6.4.4	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS (PUBLICACIÓN EN SITIO WEB)	20
7	RESULTADOS	22
7.1	REGIÓN DE ANTOFAGASTA	22
7.1.1	NODO 2-1: MEJILLONES	23
7.1.1.1	VALIDACIÓN	23
7.1.1.2	CLIMA MEDIO	23
7.1.1.3	CLIMA EXTREMO	26
7.1.1.4	ANÁLISIS DE CLIMA	27
7.1.2	NODO 2-2: BALNEARIO DE JUAN LÓPEZ	28
7.1.2.1	VALIDACIÓN	28
7.1.2.2	CLIMA MEDIO	34
7.1.2.3	CLIMA EXTREMO	37
7.1.2.4	ANÁLISIS DE CLIMA	38
7.2	REGIÓN DE VALPARAÍSO	39
7.2.1	NODO 5-1: VALPARAÍSO	40
7.2.1.1	VALIDACIÓN	40
7.2.1.2	CLIMA MEDIO	40
7.2.1.3	CLIMA EXTREMO	43

7.2.1.4	ANÁLISIS DE CLIMA.....	44
7.2.2	NODO 5-2: PLAYA LAS DOCAS	45
7.2.2.1	VALIDACIÓN.....	45
7.2.2.2	CLIMA MEDIO	47
7.2.2.3	CLIMA EXTREMO.....	50
7.2.2.4	ANÁLISIS DE CLIMA.....	51
7.2.3	NODO 5-1-1: BAHÍA CUMBERLAND	52
7.2.3.1	VALIDACIÓN	53
7.2.3.2	CLIMA MEDIO	53
7.2.3.3	CLIMA EXTREMO.....	56
7.2.3.4	ANÁLISIS DE CLIMA.....	57
7.3	PRESENTACIÓN DE INFORMACIÓN.....	58
8	CONCLUSIONES	59
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
10	ANEXOS.....	64
10.1	TRANSFERENCIA ESPECTRAL.....	64
10.2	CONFIGURACION DEL MODELO	67
10.3	DIFRACCIÓN DEL MODELO.....	71
10.3.1	METODOLOGÍA.....	71
10.3.2	RESULTADOS.....	73
10.3.3	COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	79
10.4	INFORMACIÓN DE OLEAJE TRANSFERIDO.....	80
10.4.1	REGIÓN DE ANTOFAGASTA.....	80
10.4.1.1	NODO 2-3	80
10.4.1.2	NODO 2-4	84
10.4.2	REGIÓN DE VALPARAISO.....	88
10.4.2.1	NODO 5-3	88
10.4.2.2	NODO 5-4	92
10.4.2.3	NODO 5-5	96

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Espectros unitarios a propagar	8
Ilustración 2: Transferencia espectral	9
Ilustración 3: Diagrama de flujo (Metodología).....	10
Ilustración 4: Georreferencia de anidamientos.....	14
Ilustración 5: Histograma (clima medio)	16
Ilustración 6: Tabla de incidencia (clima medio)	16
Ilustración 7: Rosa de Oleaje (Dir-Hs) y Rosa de Dispersión (Dir-Tm)	17
Ilustración 8: Gráfico de peak sobre el umbral.....	17
Ilustración 9: Curvas bandas de confianza	18
Ilustración 10: Espectro promedio de frecuencias	19
Ilustración 11: Cuantil – cuantil (Bondad de ajuste)	20
Ilustración 12: Sitio web red de oleaje.....	21
Ilustración 13: Campos bidimensionales – Malla Gruesa Antofagasta	22
Ilustración 14: Geo posicionamiento de nodo 1 – Mejillones.	23
Ilustración 15: Histograma Dir	24
Ilustración 16: Histograma Hm0	24
Ilustración 17: Histograma Tm	25
Ilustración 18: Tabla de Incidencia Dir – Hm0.....	25
Ilustración 19: Rosas de oleaje y rosa de dispersión radial	26
Ilustración 20: Tabla de Incidencia.....	26
Ilustración 21: Clima extremo, bandas de confianza 90%	27
Ilustración 22: Georreferencia Nodo 2-2 – Balneario de Juan López	28
Ilustración 23: Georreferencia nodo 2 – ADCP validación	29
Ilustración 24: Gráfico de bondad de ajuste de alturas significativas (Hm0).....	29
Ilustración 25: Gráfico de bondad de ajuste para dirección media (medida y modelada)..	30
Ilustración 26: Gráfico de bondad de ajuste de periodos medios (numéricos y medidos) .	30
Ilustración 27: Gráfico de bondad de ajuste de Hm0 (modelado y medido)	32
Ilustración 28: Gráfico de bondad de ajuste de dirección media.....	32
Ilustración 29: Gráfico de bondad de ajuste de periodos medio.	33
Ilustración 30: Histograma Dir	34
Ilustración 31: Histograma Hm0	35
Ilustración 32: Histograma de periodo medio (Tm)	35
Ilustración 33: Tabla de Incidencia Dir – Hm0.....	36
Ilustración 34: Rosas de oleaje y rosas de dispersión radial	36
Ilustración 35: Tabla de Incidencia Tm – Hm0	37
Ilustración 36: Tabla de Incidencia Tm – Hm0	37
Ilustración 37: Campos bidimensionales Valparaíso.....	39
Ilustración 38: Georreferenciación nodo 5-1 Valparaíso	40
Ilustración 39: Histograma Dir	41
Ilustración 40: Histograma Hm0	41
Ilustración 41: Histograma Tm	42
Ilustración 42: Tabla de Incidencia Dir – Hm0.....	42
Ilustración 43: Rosa de oleaje y rosa de dispersión radial	43
Ilustración 44: Bandas de confianzas Tm	43
Ilustración 45: Georreferenciación Nodo 5-2 – Curaumilla	45
Ilustración 46: Bondad de ajuste cuantil – cuantil (altura significativa)	46
Ilustración 47: Histograma Dir	47

Ilustración 48: Histograma Hm0	48
Ilustración 49: Histograma Tm	48
Ilustración 50: Tabla de Incidencia Dir – Hm0.....	49
Ilustración 51: Rosa de oleaje y rosa de dispersión radial	49
Ilustración 52: Tabla de Incidencia Dir – Tm	50
Ilustración 53: Tabla de Incidencia Dir – Tm	50
Ilustración 54: Campos bidimensionales Juan Fernández.....	52
Ilustración 55: Georreferencia nodo 5-1-1 Juan Fernández.....	53
Ilustración 56: Histograma Dir	54
Ilustración 57: Histograma Hm0	55
Ilustración 58: Tabla de Incidencia Dir – Hm0.....	55
Ilustración 59: Rosas de oleaje y dispersión radial	55
Ilustración 60: Tabla de Incidencia Tm – Hm0	56
Ilustración 61: Bandas de confianza	56
Ilustración 62: Web presentación de resultados red de oleaje.....	58
Ilustración 63: Superposición de espectros unitarios	64
Ilustración 64: Propagación de oleaje sector Antofagasta – península de Mejillones.....	69
Ilustración 65: Zona de estudio Juan Fernández	72
Ilustración 66: Zona de estudio – Dominio	72
Ilustración 67: Histograma difracción - no difracción.....	74
Ilustración 68: Histograma comparación difracción - no difracción	74
Ilustración 69: Campos bidimensionales – Comparación	75
Ilustración 70: Histograma comparación difracción - no difracción	75
Ilustración 71: Histograma comparación direcciones - difracción - no difracción.....	76
Ilustración 72: Histograma comparación swan difracción - no difracción.....	76
Ilustración 73: Histograma comparación direcciones difracción - no difracción	77
Ilustración 74: Campos bidimensionales	77
Ilustración 75: Campos bidimensionales	78
Ilustración 76: Campos bidimensionales - comparación difracción - no difracción	78
Ilustración 77: Georreferenciación Nodo 2-3.....	80
Ilustración 78: Histograma Dir	81
Ilustración 79: Histograma Hm0	81
Ilustración 80: Histograma Tm	82
Ilustración 81: Tabla de Incidencia Dir – Hm0.....	82
Ilustración 82: Rosa de oleaje y rosa de dispersión	83
Ilustración 83: Tabla de Incidencia Tm - Hm0	83
Ilustración 84: Clima Extremo	83
Ilustración 85: Georreferenciación Nodo 2-4.....	84
Ilustración 86: Histograma Dir	84
Ilustración 87: Histograma Hm0	85
Ilustración 88: Histograma Tm	85
Ilustración 89: Histograma Dir – Tm	86
Ilustración 90: Histograma Dir – Hm0	86
Ilustración 91: Histograma Tm – Hm0.....	86
Ilustración 92: Rosas de oleaje y rosas de dispersión radial	87
Ilustración 93: Clima Extremo	87
Ilustración 94: Georreferenciación nodo 2	88
Ilustración 95: Histograma Dir	88
Ilustración 96: Histograma Hm0	89
Ilustración 97: Histograma Tm	89

Ilustración 98: Tabla de Incidencia Dir – Tm	90
Ilustración 99: Tabla de Incidencia Dir – Hm0.....	90
Ilustración 100: Tabla de Incidencia Tm – Hm0	90
Ilustración 101: Rosa de oleaje y rosa de dispersión radial	91
Ilustración 102: Clima Extremo – intervalos de confianza.....	91
Ilustración 103: Georreferenciación nodo 3	92
Ilustración 104: Histograma Dir	92
Ilustración 105: Histograma Hm0	93
Ilustración 106: Histograma Tm	93
Ilustración 107: Histograma Dir – Tm	94
Ilustración 108: Histograma Dir – Hm0	94
Ilustración 109: Histograma Tm	94
Ilustración 110: Rosa de oleaje y rosa de dispersión radial	95
Ilustración 111: Clima Extremo – intervalos de confianza.....	95
Ilustración 112: Georreferenciación nodo 5	96
Ilustración 113: Histograma Dir	96
Ilustración 114: Histograma Hm0	97
Ilustración 115: Histograma Tm	97
Ilustración 116: Tabla de Incidencia Dir – Tm	98
Ilustración 117: Tabla de Incidencia Dir – Hm0.....	98
Ilustración 118: Rosas de oleaje y rosas de dispersión radial	98
Ilustración 119: Clima Extremo – intervalo de confianza	99

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Selección de cartas náuticas.....	12
Tabla 2: Configuración de anidamientos para mallado de cálculo.....	15
Tabla 3: Diferencias de parámetros de resumen, entre modelo y mediciones	31
Tabla 4: Diferencias entre parámetros de resumen	31
Tabla 5: Error porcentual - diferencia entre parámetros de resumen	33
Tabla 6: Diferencia entre parámetros de resumen modelo – mediciones.....	33
Tabla 7: Mallado caso difracción.....	71
Tabla 8: Localización nodos.....	78
Tabla 9: Comparación parámetros de resumen	79

1 RESUMEN

En la presente memoria, se muestra una metodología para el desarrollo de la red numérica de información de oleaje costera de la Dirección de Obras Portuarias (DOP), que se configura como un sistema de información de oleaje disponible libremente, a través del sitio web www.oleajecostero.cl.

La red numérica corresponde a una serie de nodos ubicados aproximadamente a 20 metros de profundidad, en los cuales se presenta información estadística de oleaje (información de 36 años de oleaje propagado).

En la región de Antofagasta se analizaron en detalle 2 nodos, Mejillones y el balneario de Juan López. En la región de Valparaíso se analizaron 3 nodos, bahía de Valparaíso, playa Las Docas y Bahía Cumberland – archipiélago de Juan Fernández. En el anexo 10.4 se encuentran 5 nodos (2 nodos en la región de Antofagasta y 3 nodos en la región de Valparaíso).

Se consideraron 2 nodos para la validación. Estos nodos corresponden a Punta Curaumilla (playa Las Docas - Valparaíso) y Balneario de Juan López (Antofagasta). Para el sector de Juan López, la bondad de ajuste cuantil cuantil muestra diferencias entre datos medidos y modelados, principalmente debido a la alta difracción, por la escasa profundidad en el fondeo del instrumento y el acotado tiempo de medición. En el sector de punta Curaumilla la bondad de ajuste cuantil cuantil muestra mejores aproximaciones, sin embargo, se presenta una gran dispersión en valores peak de alturas significativas tanto para datos medidos como modelados.

2 INTRODUCCIÓN

Chile dispone de 6435 kilómetros de costa (Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile, 2017) de cara a uno de los océanos más energéticos del mundo. El oleaje que rompe en nuestro litoral proviene de grandes tormentas en los hemisferios sur y norte, ciclones tropicales, extratropicales y olas generadas localmente por viento; todos estos fenómenos se mezclan para conformar estados de mar complejos y poco predecibles. Además, nuestro país es azotado por marejadas destructivas e incluso tsunamis, tanto de campo cercano como lejano. A pesar de esto, gran parte de nuestro desarrollo económico, social, cultural y turístico se encuentra en la costa, por lo que año a año surgen nuevos proyectos públicos y privados que se instalan en ella (Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, 2011).

Para desarrollar un proyecto de ingeniería costera, es fundamental conocer en detalle las características de los fenómenos físicos que lo afectarán. El oleaje es un factor importante, por lo que se deben evaluar las condiciones de diseño y de operación. El problema radica en que estas condiciones varían entre un lugar y otro, ya sea por la latitud o por las características geográficas del entorno, por lo que encontrar información estadística de oleaje de un lugar en particular, es complicado y rara vez está disponible.

Para obtener información de oleaje en un sitio es necesario recopilar bases de datos históricas, provenientes de hindcast de modelos de escala global (WAM o WaveWatch III), para luego propagar esta información a través de un modelo espectral (e.g. SWAN) hacia un sitio de interés en la costa. Este proceso no está exento de dificultades, pues los modelos numéricos consumen tiempo computacional en cada propagación.

Para suplir esta necesidad, y en un afán de acercar la información de oleaje a la ciudadanía, la Dirección de Obras Portuarias elabora el proyecto que tiene por título “Red numérica de información de oleaje para las costas de Chile”, el cual pretende proveer información estadística de oleaje a través de un sitio web público y de libre acceso, en una red de nodos ubicados a lo largo de la costa.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de esta memoria, es desarrollar una metodología para la implementación de la red numérica de información de oleaje para las costas de Chile, que se concibe como un servicio abierto a la sociedad.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos son:

- Transferencia de información de oleaje espectral, utilizando el modelo SWAN y metodología de propagación pseudoespectral (Dominguez, 2011) en 10 nodos ubicados en regiones de Antofagasta y Valparaíso
- Validación de la información de oleaje propagada con datos de campo.
- Puesta en marcha y habilitación de sitio web Red de Oleaje (www.oleajecostero.cl).

4 ALCANCES Y LIMITACIONES

Las limitaciones y alcances de la memoria son:

- Se han elegido 10 nodos en dos regiones, Antofagasta y Valparaíso. El primero de ellos fue seleccionado por el desarrollo de proyectos DOP, mientras que el segundo fue elegido por el importante desarrollo tanto marítimo como costero.
- Dado los escasos datos batimétricos, se han elegido sectores con alta resolución batimétrica, los cuales se concentran en bahías, balnearios y puertos.
- No se utiliza la parametrización de difracción que recomienda el modelo SWAN, dado que su uso, genera divergencia y su parametrización implica utilizar mallado de menor resolución (Para más detalles del análisis, ver anexo 10.3)

5 MARCO TEÓRICO

5.1 EI OLEAJE

Desde el punto de vista físico, se considera oleaje al conjunto de ondas oceánicas, denominadas olas de gravedad, generadas por viento y con periodos entre 1 y 29 [s], (Alonso-Muñoyerro, 2007).

El oleaje es una compleja composición de ondas de diferentes periodos, alturas y direcciones que se propagan a lo largo del océano, estas ondas son forzadas por el viento y por gradientes de presión atmosférica, las cuales generan una transferencia de energía hacia la superficie libre. (Silva, 2005)

Las pequeñas perturbaciones de presión asociadas a la turbulencia del viento en las proximidades de la superficie del mar, generan ondas capilares circulares, que son peraltadas producto del arrastre del viento, creciendo progresivamente hasta llegar al equilibrio (Oleaje desarrollado). En zonas de generación, el oleaje es desordenado con ondas irregulares de periodo corto y con direcciones de propagación variable (donde dicha condición se denomina mar de viento). Cuando estas ondas se alejan de la zona de generación, los procesos de disipación estabilizan la superficie, de esta forma las ondas de mayor periodo se separan de las menores, cuya condición se denomina mar de fondo. (Silva, 2005)

5.2 PROCESOS FÍSICOS DE PROPAGACIÓN

El oleaje al aproximarse a la costa, y dependiendo de la situación morfológica, modifica su dirección de incidencia, y su altura. Ésta transformación se denomina propagación. Algunos fenómenos de propagación son:

- Refracción: Este fenómeno obedece al cambio de dirección de propagación y de amplitud que experimenta el oleaje al avanzar sobre fondos de profundidad variable o zonas con corrientes de magnitud y dirección variable. (Garrido, 2007)
- Asomeramiento: Este fenómeno corresponde a una variación de altura de ola debido a la conservación en el flujo de energía a lo largo de la trayectoria del oleaje, desde que el oleaje siente el fondo ($d/L \geq 0.5$), donde d es la profundidad y L es la longitud de onda, (Garrido, 2007).
- Difracción: Este fenómeno corresponde a un proceso mediante el cual la energía se propaga lateral y perpendicular a la dirección dominante de la onda (Darlymple, 1984). Este fenómeno es de fundamental importancia para la penetración de

oleaje en puertos o en bahías muy cerradas. Existen soluciones particulares para determinados casos de interacción (asimilando ondas lineales) con estructuras simples como un rompeolas semi infinito, en cuyo caso es posible utilizar el diagrama de difracción de Wiegel (1962) (US Army Corps of Engineers, 1984).

Otros procesos importantes en la transformación y deformación del oleaje son: la reflexión, la fricción de fondo, whitecapping y las interacciones ola a ola. En la medida que las ondas se propagan hacia aguas someras, los efectos de fricción de fondo se incrementan disipando energía, modificando la forma de las mismas y retardando el flujo (Winckler, 2016). El whitecapping depende de la inclinación local de las olas y no directamente de la profundidad. Sin embargo, cuando las olas entran a aguas someras, el whitecapping tienden a aumentar su inclinación y su importancia, pero la refracción y difracción pueden inducir el efecto contrario, (Holthuijsen, 2007).

5.3 MODELO DE PROPAGACIÓN ESPECTRAL DE OLAJE SWAN

SWAN (Simulating Waves Nearshore) es un modelo de propagación de oleaje desarrollado por la Universidad de Tecnológica de Delft (TUDelft Holanda). Este software, de acceso gratuito es utilizado por científicos e ingenieros fundamentalmente para la investigación (Dominguez, 2011)

SWAN es un modelo de tercera generación, se le llama así ya que no necesariamente propaga espectros impuestos previamente. Lo anterior implica, la posibilidad de seleccionar espectros sintéticos (utilizando parámetros de resumen), o bien propagando espectros directamente.

5.3.1 ECUACIÓN DE BALANCE DE ACCIÓN

La ecuación de balance de acción del oleaje $N(\sigma, \theta; x, y, t)$ es una generalización de la ecuación de conservación de energía, para ondas combinadas y corrientes con disipación de energía (Svendsen, 2006). En la ecuación 1 se observa la ecuación de balance de acción del oleaje cuando $N(\sigma, \theta; x, y, t)$ está en coordenadas cartesianas (Holthuijsen, 2007).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x}N}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y}N}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta}N}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma}N}{\partial \sigma} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

Donde $\frac{\partial N}{\partial t}$ es la variación local en el tiempo del balance de acción, $\frac{\partial c_{g,x}N}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y}N}{\partial y}$ representa la propagación de energía en el espacio geográfico bidimensional (diferencia de flujo entrante y saliente en un volumen de control), $\frac{\partial c_{\theta}N}{\partial \theta}$ representa la refracción causada por variaciones de fondo, $\frac{\partial c_{\sigma}N}{\partial \sigma}$ representa el desfase de la frecuencia debido a las variaciones

de la profundidad, $\frac{s}{\sigma}$ son las fuentes o sumideros asociados a la generación, disipación y transferencia de energía.

El modelo SWAN se puede utilizar cuando el dominio de integración es relativamente pequeño, de modo que la curvatura terrestre no altere los resultados de la propagación. En términos prácticos, la expresión puede utilizarse para estudios de propagación de oleaje desde aguas profundas a un punto en la costa (nodo de interés).

En la ecuación 2 se muestra la descomposición de los términos de la derecha de la ecuación 1 (términos fuentes).

$$s = s_{in}(\sigma, \theta) + s_{nl}(\sigma, \theta) + s_{diss}(\sigma, \theta) \quad (2)$$

Donde $s_{in}(\sigma, \theta)$ corresponde a la forzante por vientos, $s_{nl}(\sigma, \theta)$ representa la interacción no lineal entre componentes y $s_{diss}(\sigma, \theta)$ comprende todos los mecanismos de disipación. El término de interacción no lineal que se muestra en la ecuación 3, se puede subdividir en la interacción entre triadas $s_{nl3}(\sigma, \theta)$, fenómeno importante en aguas profundas, cuádruples $s_{nl4}(\sigma, \theta)$ que predomina en aguas intermedias.

$$s_{nl}(\sigma, \theta) = s_{nl3}(\sigma, \theta) + s_{nl4}(\sigma, \theta) \quad (3)$$

Ambos términos fuentes de la ecuación de balance de acción se deben parametrizar (se modelan para que se asemejen al fenómeno real). Por otra parte, los modelos que resuelven la fase, no se parametrizan, pues éstas, resuelven en forma directa el fenómeno. Es por esto que, en profundidades reducidas, se recomienda utilizar modelos Boussinesq o modelos no lineales de onda larga como las ecuaciones de aguas someras. El término de disipación se puede subdividir en i) la contribución de las whitecapping $s_{wc}(\sigma, \theta)$ asociado al rompimiento de oleaje en aguas profundas (conocido como mar risada), ii) la disipación por fricción de fondo $s_{btf}(\sigma, \theta)$ que es importante en aguas intermedias o someras (cuando el oleaje siente el fondo) y iii) la disipación por rotura $s_{surf}(\sigma, \theta)$

$$s_{diss}(\sigma, \theta) = s_{wc}(\sigma, \theta) + s_{btf}(\sigma, \theta) + s_{surf}(\sigma, \theta) \quad (4)$$

Se pueden adicionar otros mecanismos de disipación como la percolación en suelo poroso, medios limosos o arcillosos, vegetación, disipación turbulenta y otros fenómenos que usualmente son poco relevantes para el caso de las costas chilenas. (Winckler, 2016)

5.3.2 PROCESOS FÍSICOS DEL MODELO

SWAN considera procesos físicos que están presentes en la propagación de oleaje hacia áreas costeras, los cuales se detallan a continuación:

5.3.2.1 REFRACCIÓN Y DIFRACCIÓN

SWAN representa la refracción y difracción utilizando una modificación de la ecuación de la pendiente suave (MSE) omitiendo información de la fase (Holthuijsen, 2007). En la ecuación 5 se muestra la parametrización de la difracción.

$$C_x = C_{x,0}\sqrt{1+\delta}; C_y = C_{y,0}\sqrt{1+\delta}; C_\theta = C_{\theta,0}\sqrt{1+\delta} - \frac{\partial\sqrt{1+\delta}}{\partial x}C_{y,0} + \frac{\partial\sqrt{1+\delta}}{\partial y}C_{x,0} \quad (5)$$

Donde δ corresponde al parámetro de difracción y se calcula como

$$\delta = \frac{\nabla^2 a}{k^2 a} \quad (6)$$

k es el número de onda, y a es la amplitud de onda.

5.3.2.2 FRICCIÓN DE FONDO

El modelo representa la fricción de fondo siguiendo las formulaciones empíricas propuestas por Hasselmann (1973), el modelo de viscosidad turbulenta de Madsen (1988) y el modelo de la ley de arrastre de Collins (1972).

5.3.3 RESOLUCIÓN DE ECUACIONES DEL MODELO

El modelo SWAN es de esquema implícito, es decir, recurre a un es un proceso iterativo para llegar a la convergencia (accuracy) (Winckler, 2016).

5.4 TRANSFERENCIA PSEUDOESPECTRAL DE OLEAJE DE DOMÍNGUEZ (2011)

Este método de transferencia, se basa en un sistema abreviado de transferencia espectral, con el fin de disminuir la cantidad de propagaciones y con ello, el costo computacional. Este método se compone de dos etapas, la primera (cuyo cálculo es en aguas profundas) consiste en representar espectros reales considerando espectros sintéticos bidimensionales y coeficientes (α), luego, en una segunda etapa (cálculo en aguas someras) se reconstruyen espectros reales, considerando espectros unitarios propagados con el modelo SWAN y los coeficientes (α) calculados en la primera etapa.

Para calcular los espectros unitarios (en términos de la frecuencia), se utilizó el espectro sintético Jonswap (Hasselmann, 1973), donde sus direcciones fueron estimadas por la formulación modificada de Goda (2010). Por otro lado está el método de transferencia espectral de Domínguez (2011), el cual considera la propagación de espectros sintéticos. Estos espectros son utilizados en aguas profundas para el cálculo de los coeficientes (α), y para propagarlos con el modelo SWAN. La metodología fue validada para las costas chilenas (Domínguez, 2014).

El espectro unitario representa una matriz discretizada en 120 direcciones y 34 frecuencias, estas últimas con una distribución logarítmica, en la ilustración 1 se observan 9 espectros unitarios. La totalidad de espectros utilizados en esta memoria son 480.

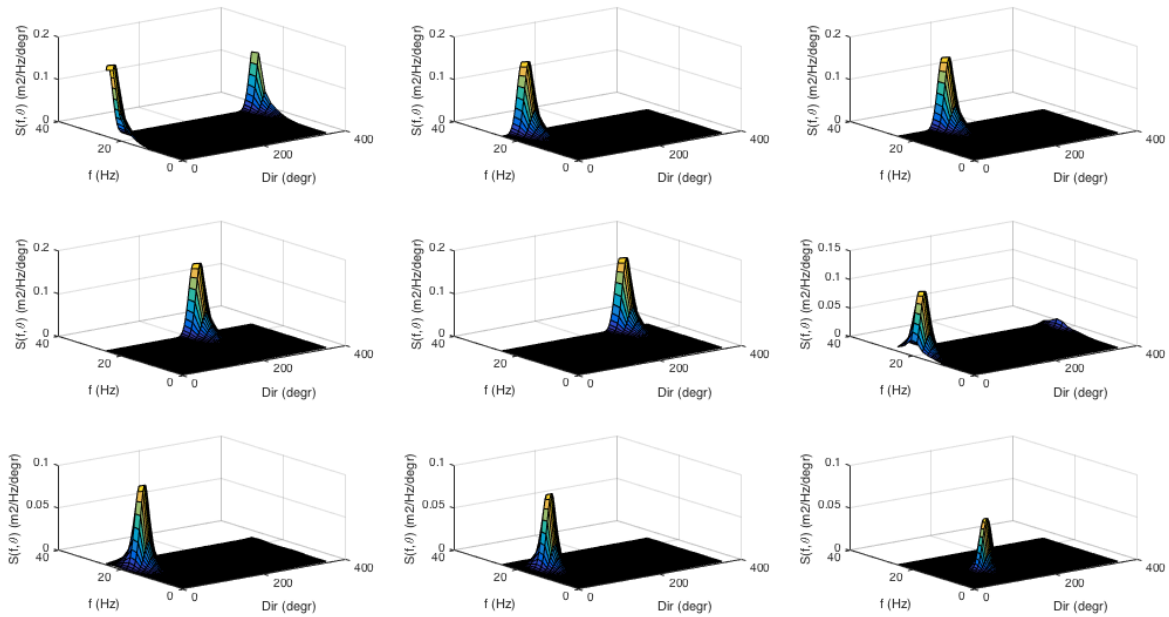


Ilustración 1, Espectros unitarios a propagar

El método contempla reproducir espectros en aguas profundas, considerando espectros unitarios y coeficientes α , como se observa en la ecuación 7.

$$ER_{AP} = \alpha * UE \quad (7)$$

Donde ER_{AP} es el espectro real en aguas profundas, α es el coeficiente de representación y UE son los espectros unitarios de entrada. Como el objetivo es obtener los coeficientes, se debe multiplicar la inversa de la matriz UE .

$$ER_{AP} * UE^{-1} = \alpha \quad (8)$$

La operación anterior se realizó bin a bin, es decir, cada uno de los espectros unitarios se multiplicaron con el espectro real, considerando una matriz con 480 variables (α) y 108110 ecuaciones (desarrollo del método se puede revisar en anexo 10.1).

$$UP * \alpha = ER_{propagados} \quad (9)$$

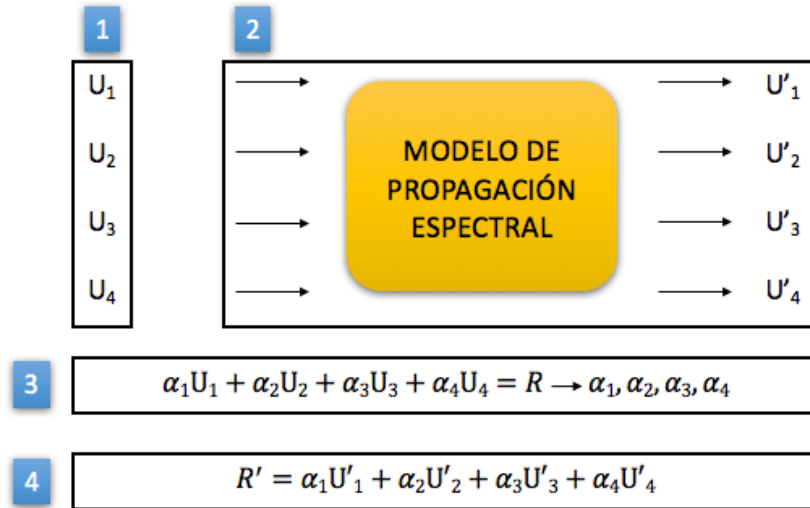
Se calculó el espectro real propagado, considerando los espectros unitarios (resultados de SWAN) y los coeficientes α , como se observa en la ecuación 9.

Como la cantidad de ecuaciones es mayor a la cantidad de variables, se utilizaron métodos numéricos (mínimos cuadrados).

En resumen, se presenta la ilustración 2, donde se muestran las distintas fases de la metodología de transferencia espectral.

1. Construcción de espectros unitarios de entrada.
2. Propagación de espectros unitarios utilizando el modelo SWAN
3. Cálculo de coeficientes utilizando espectros unitarios en aguas profundas.
4. Reconstrucción de espectros en aguas someras (nodo de interés).

Ilustración 2, Transferencia espectral



Fuente: Elaboración propia, ilustración adaptada (Dominguez, 2011)

6 METODOLOGÍA

En la ilustración 3, se presenta un diagrama de flujo con los pasos que se utilizaron en el desarrollo de esta memoria.

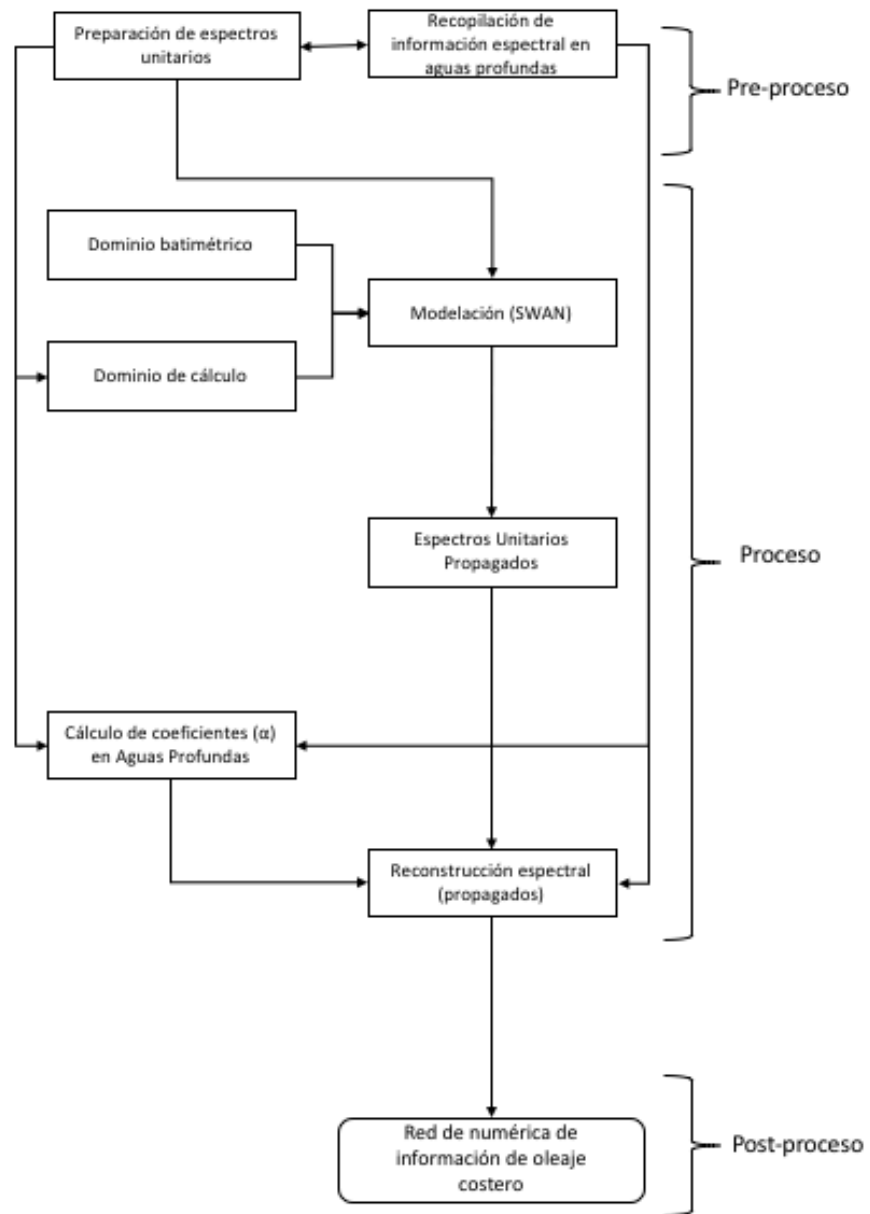


Ilustración 3, Diagrama de flujo (Metodología)

6.1 FUENTES DE DATOS

En este capítulo, se presenta la información utilizada para el desarrollo de la memoria de titulación, dentro de esta información se contemplan datos espectrales en aguas profundas desarrollados por la Universidad de Valparaíso – Atlas de oleaje de Chile (Beyá J., 2016), batimetría otorgada por la DOP y por Fundación Chile (Fundación Chile, Aquaterra y Universidad de Valparaíso, 2014).

Para la validación de la transferencia espectral, se utilizan mediciones de ADCP entregado por la UV (pertenecientes a la Región de Valparaíso) y por la DOP (Región de Antofagasta).

Se cuenta con estadísticas del Atlas de oleaje de Chile (Beyá J., 2016), correspondiente a datos estimados a través de hindcast de oleaje. Contempla espectros de 24 direcciones y 29 frecuencias asociadas a periodos desde 2 [s] a 29 [s]. Esta información corresponde a treinta y seis años desde el 1 de enero del 1979 al 31 de diciembre del 2015.

La información batimétrica para el desarrollo de este proyecto, es obtenida de las cartas náuticas electrónicas (CNE) del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) (tabla 1). (SHOA., Atlas Hidrográfico de Chile, 2007)

Tabla 1: Selección de cartas náuticas

REGIÓN DE ANTOFAGASTA	ANTOFAGASTA Y MEJILLONES	Cartas	Número de Carta
		Bahía Mejillones del Sur a Puerto de Caldera	CL2AN020
		Rada de Antofagasta	CL5AN015
		Caletas en el litoral de Antofagasta	CL5AN020
		Caleta El Cobre	CL5AN045
		Bahía Lavata	CL5AN050
		Caletas entre Taltal y Caldera	CL5AN055
REGIÓN DE VALPARAISO	QUINTERO, VALPARAISO Y SAN ANTONIO	Cartas	Número de Carta
		Bahía Coquimbo a bahía Valparaíso	CL2CO040
		Bahía Quintero a bahía Valparaíso	CL4VA010
		Bahía Quintero	CL5VA005
		Bahía Concón	CL5VA010
		Bahía Valparaíso a Golfo de Arauco	CL2VA050
		Bahía y Puerto Valparaíso	CL5VA015
		Aproximación a Puerto San Antonio	CL5VA020
	Puerto San Antonio	CL5VA021	
	ARCHIPIELAGO DE JUAN FERNÁNDEZ	Cartas	Numero de Carta
		Isla Robinson Crusoe	CL4VA050
		Bahía Cumberland (Isla Robinson Crusoe)	CL5VA055

Para complementar la información batimétrica de las CNE en la isla de Robinson Crusoe, se incluyó información de sondajes desarrollado en el proyecto potencial para el desarrollo de la energía marina en comunidades costeras de la V región (Fundación Chile, Aquaterra y Universidad de Valparaíso, 2014).

6.2 PRE PROCESO

Se calcularon espectros de altura unitaria utilizando los trabajos de Hasselmann (1973), Mitsuyasu (1975); Goda (2010) (el detalle se presenta en la sección 5.4).

La serie de espectros bidimensionales de altura unitaria en aguas profundas se encuentran discretizados direccionalmente cada 15° y en términos de frecuencias utilizando una función logarítmica.

Para la construcción de los espectros, se utilizó el coeficiente de apuntalamiento $\gamma = 3.3$, y spreading direccional $s = 22$ (Dominguez, 2011).

Con los espectros sintéticos de alturas unitarias y espectros reales, se calcularon los coeficientes α . Estos coeficientes identifican la información espectral utilizando espectros sintéticos, y se utilizan para reconstruir espectros reales utilizando espectros sintéticos de altura unitaria propagados con el modelo SWAN.

6.3 PROCESO

El proceso de modelación se realizó con el método de anidamientos utilizando mallas estructuradas. (Más detalles en el anexo 10.2). Lo anterior con el fin de evitar complicaciones en la convergencia del modelo, siguiendo las recomendaciones del manual de SWAN (Delft University of Technology, 2016).

Para el mallado de cálculo, se definieron 3 anidados que van desde los 500 [m], 200 [m] y 50 [m] de resolución. El mallado fino se determinó con un máximo de 40 [km] de extensión (largo y ancho).

En la ilustración 4, se presentan los dominios de cálculos utilizados para el caso de Antofagasta; el cuadrado azul representa la malla gruesa, el cuadrado naranja representa la malla intermedia y el cuadrado amarillo corresponde al mallado fino, las dimensiones de cada una de las mallas utilizadas en la simulación se encuentran detalladas en la tabla 2.

Fuente: Google Earth.

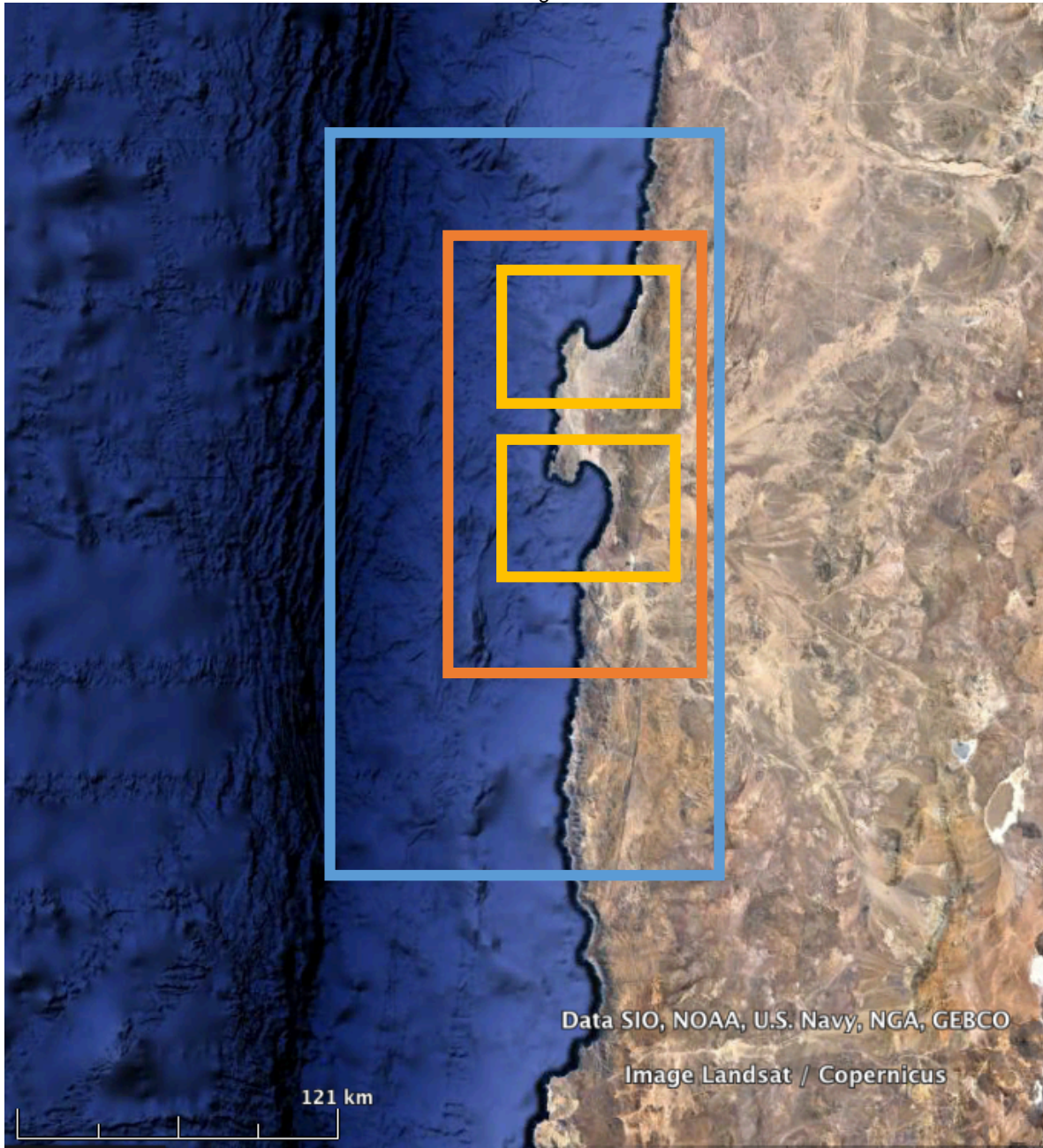


Ilustración 4, Georreferencia de anidamientos

En la tabla 2 se observa la configuración del mallado de cálculo, se realizaron 3 mallados. Para el caso de la malla gruesa se realizó una malla de resolución 500x500 [m], una malla intermedia de resolución 200x200 [m] y dos mallas finas de 50x50 [m].

Análogamente se observa una segunda tabla con el mallado de Valparaíso.

REGIÓN DE ANTOFAGASTA			
Mallas	Cantidad	Eje	Resolución [m]
Gruesa	1	X	500
		Y	500
Intermedia	1	X	200
		Y	200
Fina	2	X	50
		Y	50

REGIÓN DE VALPARAÍSO			
Mallas	Cantidad	Eje	Resolución [m]
Gruesa	1	X	500
		Y	500
Intermedia	1	X	200
		Y	200
Fina	3	X	50
		Y	50

Tabla 2: Configuración de anidamientos para mallado de cálculo.

Luego de la modelación de oleaje, se realiza la transferencia espectral, ésta se realizó siguiendo la metodología pseudoespectral de Domínguez (2011). La cual busca disminuir el costo computacional que implica modelar 37 años de estadísticas de oleaje. Se reconstruyó la información espectral transferida al nodo de interés, utilizando el coeficiente (α) y los espectros sintéticos de altura unitaria propagados con el modelo SWAN. Para más detalles, revisar el anexo 10.1.

6.4 POST PROCESO

Con los datos generados de la transferencia espectral se realizaron estudios de clima medio y extremo, con el fin de generar ilustraciones de la estadística propagada y caracterizar el clima de oleaje en nodos de interés.

6.4.1 CLIMA MEDIO

Respecto al clima medio, se realizaron histogramas y tablas de incidencia. A modo de ejemplo, se presentan las ilustraciones 5 y 6.

El histograma de la ilustración 5 y la tabla de incidencia de la ilustración 6, corresponde al sector de Mejillones (la ubicación se encuentra en 7.1.1) en Antofagasta.

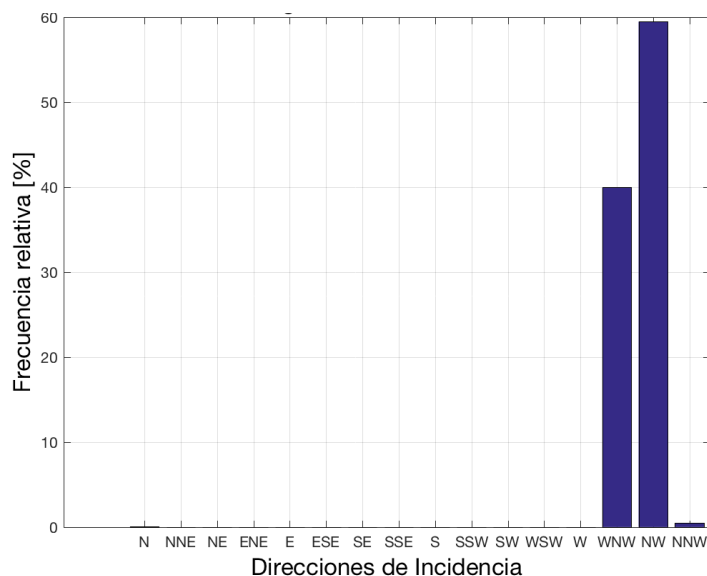


Ilustración 5, Histograma (clima medio)

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	% Real	% Acumulado
0 - 0.5 [m]	216	0	0	0	0	0	371	102796	95.6276	95.6276
0.5 - 1 [m]	0	0	0	0	0	0	0	4573	4.2300	99.8576
1 - 1.5 [m]	0	0	0	0	0	0	0	154	0.1424	100
1.5 - 2 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
2 - 2.5 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
2.5 - 3 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3 - 3.5 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3.5 - 4 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
% Real	0.1998	0	0	0	0	0	0.3432	99.4570	0	0
% Acumulado	0.1998	0.1998	0.1998	0.1998	0	0.1998	0.5430	100	0	0

Ilustración 6, Tabla de incidencia (clima medio)

En la ilustración 7 se observa las rosas de oleaje y de dispersión radial.

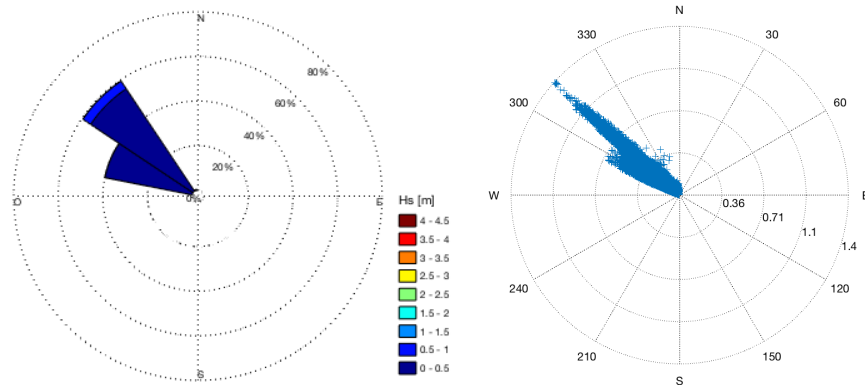


Ilustración 7, Rosa de Oleaje (Dir-Hs) y Rosa de Dispersión (Dir-Tm)

6.4.2 CLIMA EXTREMO

Para el cálculo de tormentas extremas se utilizó la metodología POT, y luego se realizó un filtro con el fin de evitar que estos estados de mar correspondan al mismo evento, asegurando independencia entre ellos. De esta manera se escogieron 40 tormentas representativas a la estadística de 36 años, como se observa en la ilustración 8.

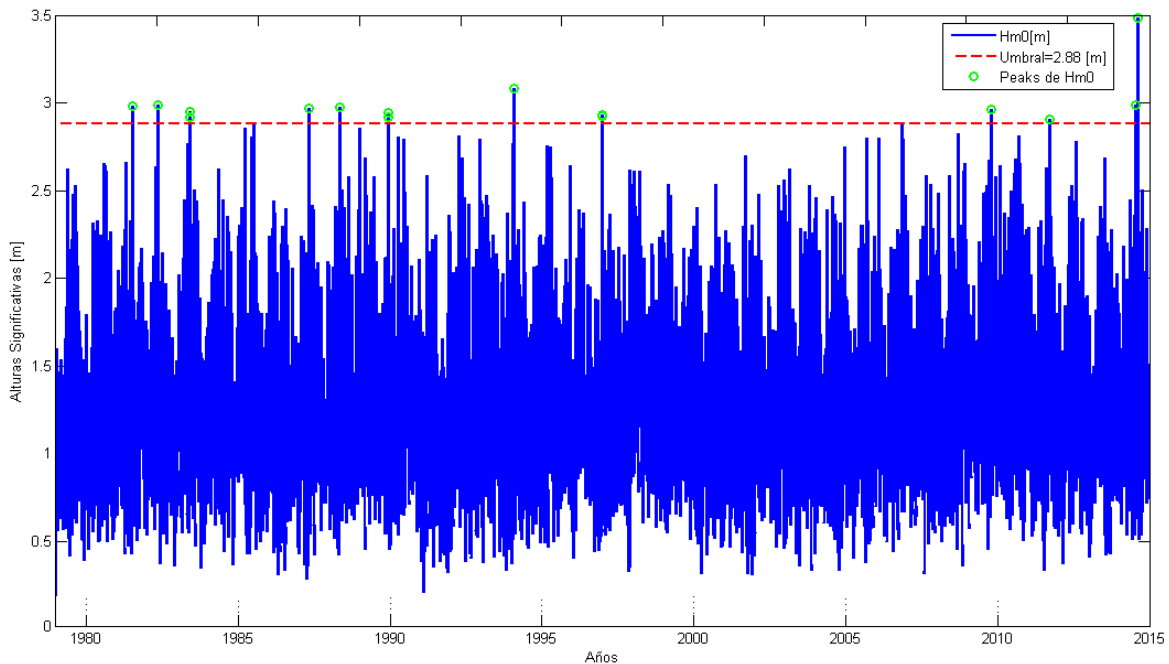


Ilustración 8, Gráfico de peak sobre el umbral

Se realizó el análisis extremal utilizando la distribución de Weibull y Gumbel (Frigaard, 2001). Luego, se calculó el coeficiente de correlación (R^2) y se seleccionó el mejor ajuste. Se calcularon las bandas de confianzas utilizando la desviación estándar asociado al 90% y las H_{m0} del periodo de retorno, siguiendo la metodología Bootstrap (Efron, 1993). En la ilustración 9, se observan las bandas de confianza para el Nodo 1 de Antofagasta, más detalles en la sección 7.1.1.

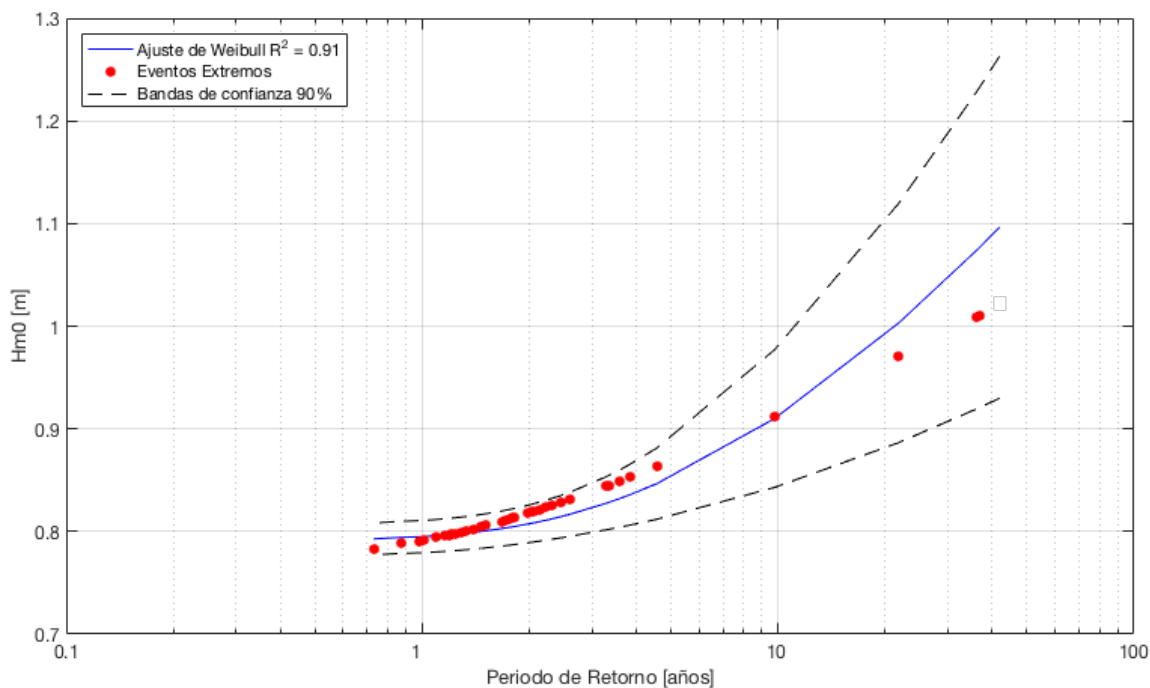


Ilustración 9, Curvas bandas de confianza

6.4.3 ANÁLISIS DE INFORMACION Y VALIDACIÓN

Con el fin de validar la información obtenida del proceso de transferencia, se utilizaron mediciones de ADCPs en los balnearios de Juan López en la península de Mejillones, Antofagasta, y Punta Curaumilla, Valparaíso.

Con respecto a la información in situ de Antofagasta, se tiene una serie de tiempo de desnivelaciones de 10 horas y 22 minutos. La información de desnivelaciones se parcializó en ventanas de 3 horas, con el objetivo de representar un estado de mar. Además, se utilizó la transformada rápida de Fourier para convertir una serie de desnivelaciones en un espectro, siguiendo la metodología de Frigaard (2001), las correcciones de ondas largas y suavizadas de Silva (2005).

En la ilustración 10 se observa un espectro de frecuencias obtenido desde mediciones con un ADCP. En consecuencia, luego de calcular el espectro, filtrarlo y suavizarlo, se obtuvieron parámetros espectrales de altura significativa (H_m0), periodo medio (T_{m02}), y dirección media (MWD).

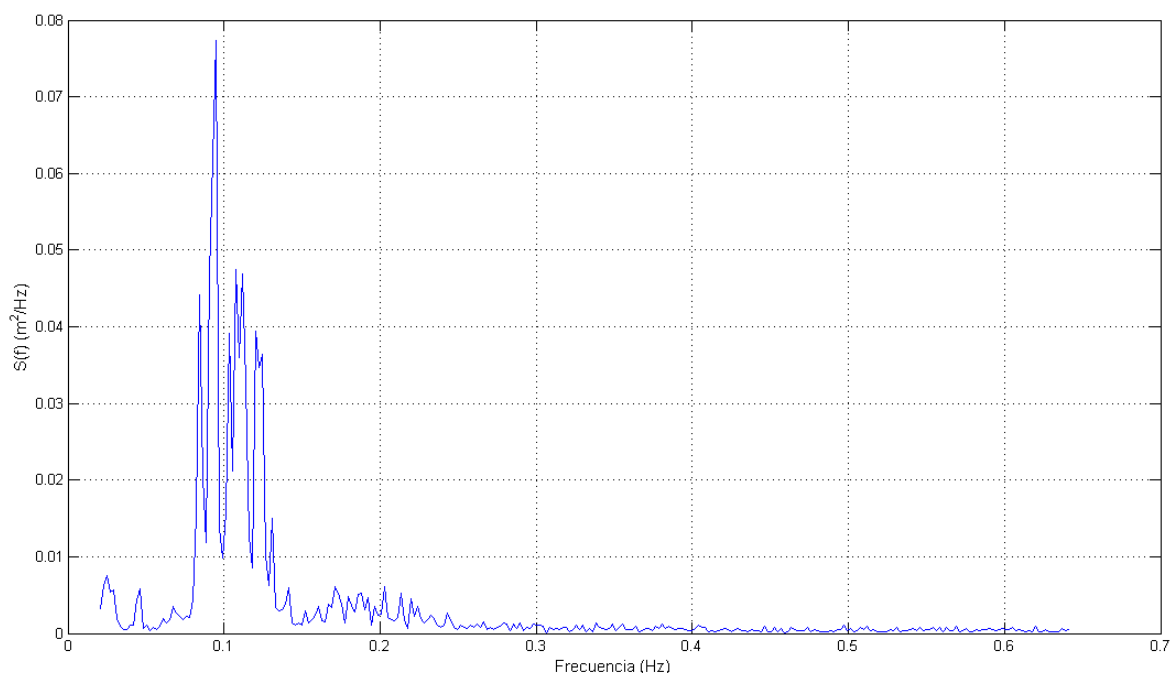


Ilustración 10, Espectro promedio de frecuencias

Se utilizó mediciones de ADCP en dos sectores, uno de ellos se ubicó en el Balneario de Juan López a 8 [m] de profundidad. El segundo ADCP se ubicó en playa Las Docas en Punta Curaumilla – Valparaíso, a 8 [m] de profundidad.

Para efectos de esta memoria, y con el fin de comparar resultados H_m0 de ADCP y modelados, se consideró un nodo de cálculo cercano a los 8 [m], sin embargo, en esta profundidad el modelo pierde validez, debido a procesos de difracción y de rompimiento.

Con los parámetros de resumen (estadísticos) obtenidos de transferencia espectral, y las alturas significativas (mediciones) calculadas con la metodología de Frigaard (2001), se realizó una comparación por medio de un gráfico cuantil – cuantil de bondad de ajuste.

En la ilustración 11 se observa el gráfico cuantil-cuantil de bondad de ajuste, los puntos rojos corresponden a los estados de mar calculados por medio de la transformada rápida de Fourier, y la información transferida con la metodología de transferencia espectral (Dominguez, 2011).

Los puntos azules corresponden a cuantiles y las líneas corresponden a los ajustes (lineal e identificado).

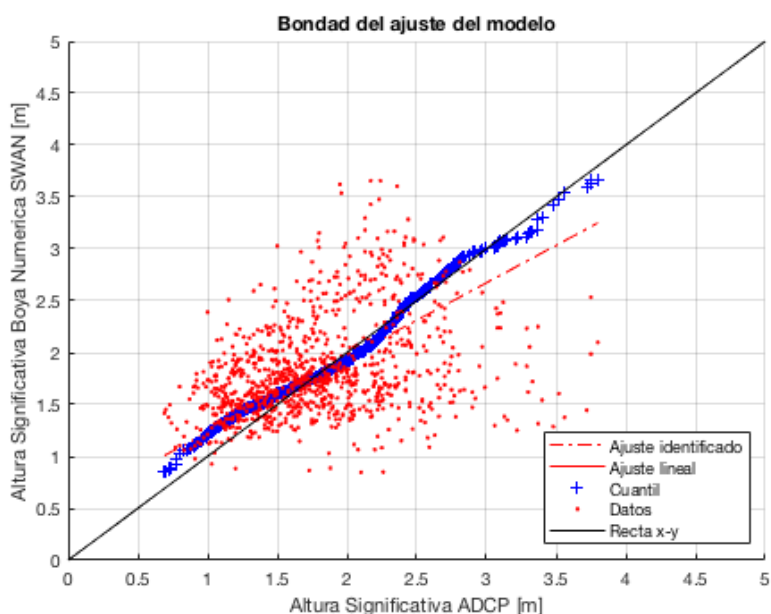
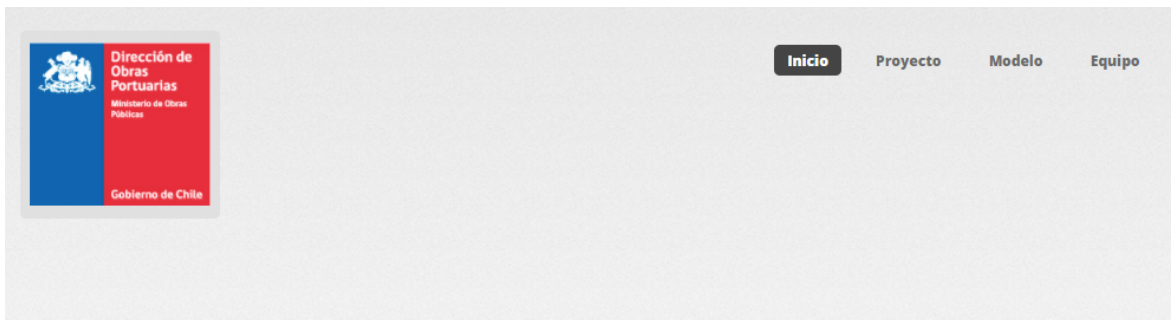


Ilustración 11, Cuantil – cuantil (Bondad de ajuste)

6.4.4 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS (PUBLICACIÓN EN SITIO WEB)

Se construyó el sitio web oleajecostero.cl, plataforma para la publicación de la información de oleaje, la web consta de un mapa geográfico donde se georreferenciaron los nodos transferidos, la explicación del método de transferencia y modelo utilizado.

En la ilustración 12, se presenta el prototipo de sitio web para la presentación de resultados de la red de oleaje, en esta web se encuentra publicada la caracterización del clima de oleaje en nodos de interés, para las regiones de Antofagasta y Valparaíso.



Red de Oleaje para las Costas de Chile

La Dirección de Obras Portuarias pone a disposición de la ciudadanía, estadística de oleaje en una red de nodos a lo largo de la costa chilena a través de un proyecto llamado **"Red de Oleaje Costero DOP"**. Los desarrolladores del proyecto son la Dirección de Obras Portuarias, la Universidad de Valparaíso a través de la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica y es apoyado por el NLHPC del Centro de Modelamiento Matemático (CMM - Universidad de Chile).

La Red de oleaje se lleva a cabo mediante el uso del modelo espectral de propagación de oleaje de tercera generación SWAN v41.01 (Booij, N., Holthuijsen, L.H. and R.C. Ris, 1996), compilado bajo un protocolo de memoria distribuida utilizando bibliotecas MPI (Message Passing Interface). Para su implementación se utiliza el Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NLHPC).

Ilustración 12, Sitio web red de oleaje

En el prototipo de sitio web se publicaron los gráficos de clima medio y extremo, además de las estadísticas de oleaje propagados, en una etapa posterior (que está fuera del alcance de esta memoria) se publicarán informes de oleaje de cada uno de los nodos presentados.

Más detalles se pueden revisar en el sitio web <http://www.oleajecostero.cl>.

7 RESULTADOS

7.1 REGIÓN DE ANTOFAGASTA

En la ilustración 13 se presenta el gráfico de campos bidimensionales de la malla gruesa para la región de Antofagasta, esta ilustración corresponde a la dirección WNW y H_{m0} 1 [m]. Se determinó este dominio con el fin de evitar que las condiciones de borde laterales afecten la zona de interés

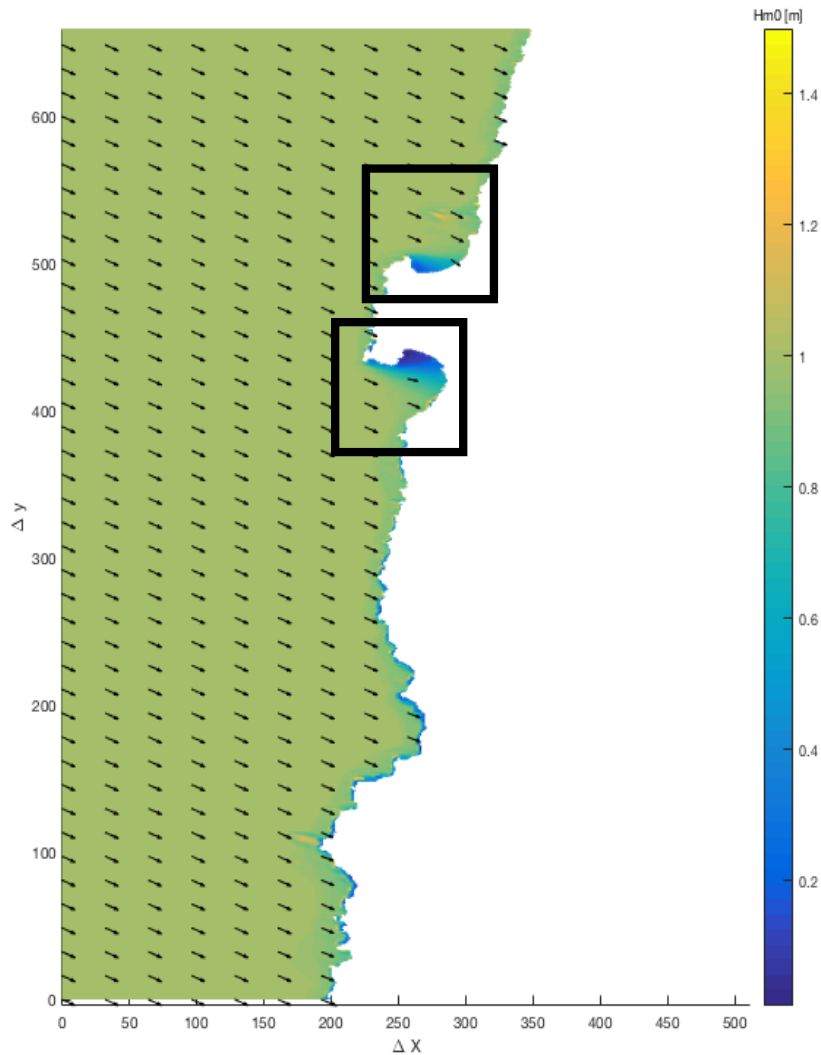


Ilustración 13, Campos bidimensionales – Malla Gruesa Antofagasta

A continuación, se presentan los resultados de algunos de los nodos obtenidos, el nodo 1 correspondiente a la ciudad Mejillones y el nodo 2 al balneario de Juan López.

7.1.1 NODO 2-1: MEJILLONES

En la ilustración 14 observa el nodo 2-1, el cual se encuentra a 40 m de profundidad, cuyas coordenadas UTM -19 H (datum WGS84) son 356313 E, 7449167 N.

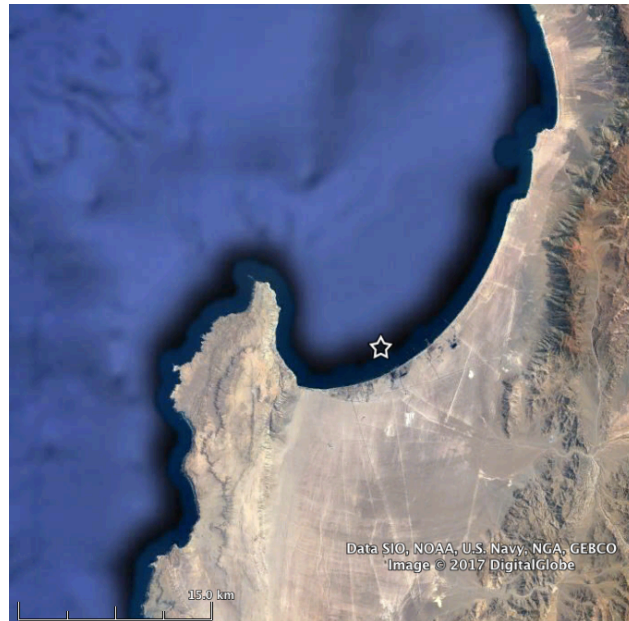


Ilustración 14, Geo posicionamiento de nodo 1 – Mejillones.

7.1.1.1 VALIDACIÓN

A falta de registros de oleaje en este sitio, no se efectuó una validación.

7.1.1.2 CLIMA MEDIO

Para el nodo ubicado en Mejillones se realizó clima medio, con tablas de incidencia, histogramas, rosas de oleaje y dispersión radial.

En la ilustración 15, se observa el histograma de dirección media, donde la altura de oleaje significativa espectral incidente proviene de las direcciones asociadas al WNW, NW y NNW, el peak de las ocurrencias (59%) de la frecuencia relativa procede del NW.

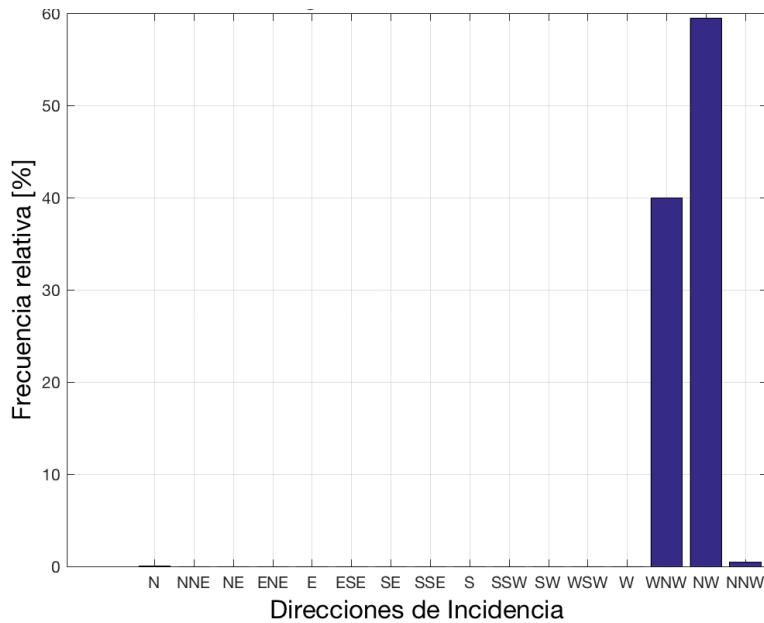


Ilustración 15, Histograma Dir

En la ilustración 16, se observa que más del 95% de la frecuencia relativa tiene una altura significativa menor a 0.6 [m], luego con un 5% las alturas del oleaje significativo espectral son menores a 1.2 [m].

En consecuencia, en esta zona se aprecian efectos físicos importantes que hacen disminuir la energía de los estados de mar, como son la refracción y la difracción, sobre todo con el oleaje proveniente del SW.

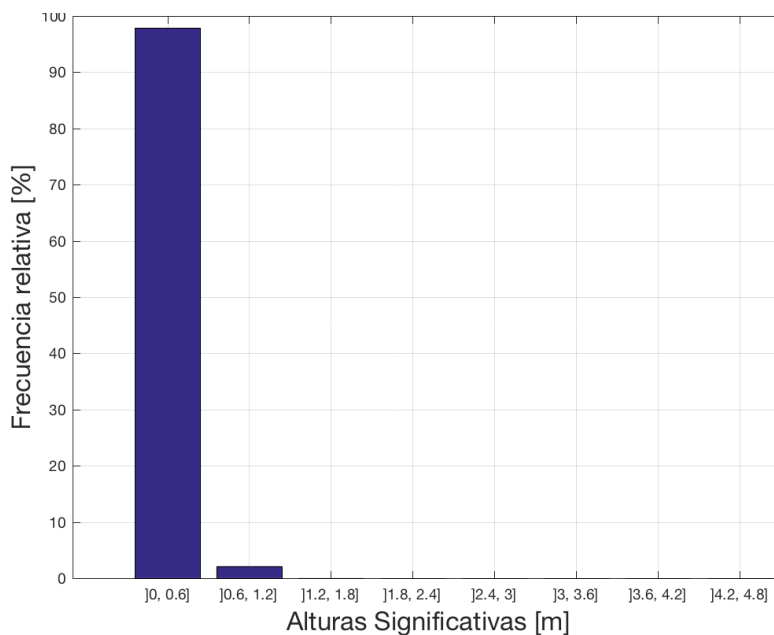


Ilustración 16, Histograma Hm0

En la ilustración 17 se observa con un 43% que la frecuencia relativa se asocia al periodo de 12.5 [s], con 38% al periodo 9.5 [s]. El periodo máximo, aunque con bajas frecuencias corresponde a 21.5 [s].

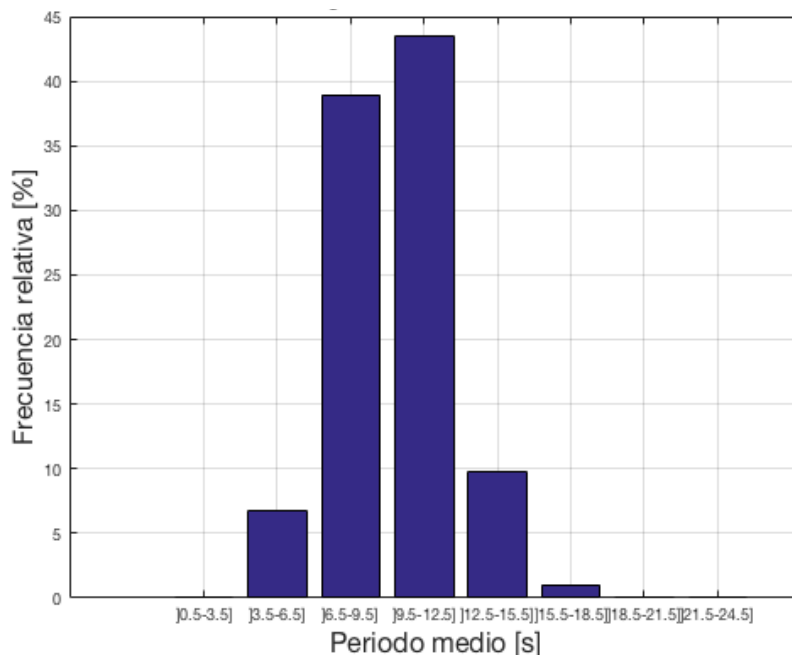


Ilustración 17, Histograma Tm

En la ilustración 18, que corresponde a la tabla de incidencia, se puede observar que las máximas alturas significativas inciden de la dirección NW.

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	% Real	% Acumulado
0 - 0.5 [m]	216	0	0	0	0	0	371	102796	95.6276	95.6276
0.5 - 1 [m]	0	0	0	0	0	0	0	4573	4.2300	99.8576
1 - 1.5 [m]	0	0	0	0	0	0	0	154	0.1424	100
1.5 - 2 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
2 - 2.5 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
2.5 - 3 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3 - 3.5 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3.5 - 4 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
% Real	0.1998	0	0	0	0	0	0.3432	99.4570	0	0
% Acumulado	0.1998	0.1998	0.1998	0.1998	0	0.1998	0.5430	100	0	0

Ilustración 18, Tabla de Incidencia Dir – Hm0

Se presenta la ilustración 19, donde se observa que la máxima altura significativa proviene de dirección NW, y la totalidad de la energía incide de las direcciones WNW y NW.

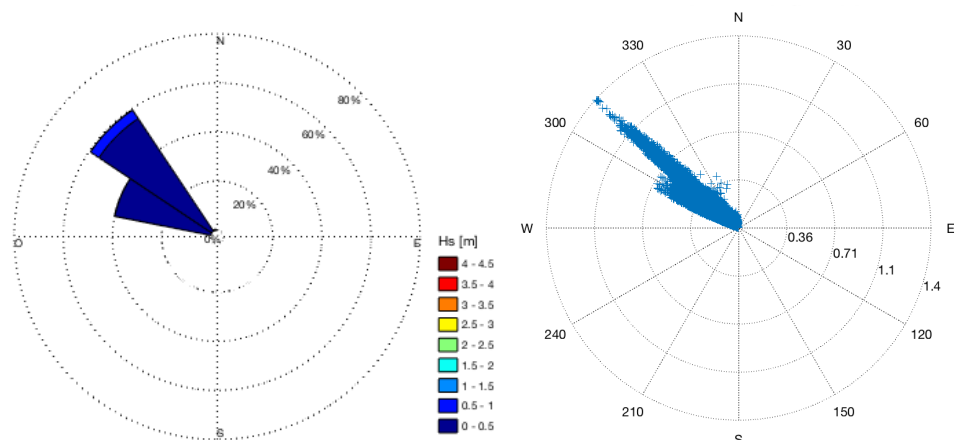


Ilustración 19, Rosas de oleaje y rosa de dispersión radial

En la ilustración 20 se presenta la tabla de incidencia de altura – periodo, donde se observa que la mayor frecuencia ocurre en el periodo 12.5 [s] y altura significativa 0.6 [m], las máximas alturas significativas corresponden al periodo 15,5 [s], de lo anterior se observa que hay presencia de periodos altos, pero con alturas significativas bajas.

	0.5 - 3.5 [s]	3.5 - 6.5 [s]	6.5 - 9.5 [s]	9.5 - 12.5 [s]	12.5 - 15.5 [s]	15.5 - 18.5 [s]	18.5 - 21.5 [s]	21.5 - 24.5 [s]	% Real	% Acumulado
0 - 0.6 [m]	0	7283	42074	46245	9102	1055	29	0	97.8522	97.8522
0.6 - 1.2 [m]	0	6	17	696	1521	62	0	0	2.1293	99.9815
1.2 - 1.8 [m]	0	0	0	10	10	0	0	0	0.0185	100.0000
1.8 - 2.4 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
2.4 - 3 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
3 - 3.6 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
3.6 - 4.2 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
4.2 - 6 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
% Real	0	6.7422	38.9335	43.4289	9.8354	1.0332	0.0268	0	0	0
% Acumulado	0	6.7422	45.6757	89.1046	98.9400	99.9732	100	100	0	0

Ilustración 20, Tabla de Incidencia

7.1.1.3 CLIMA EXTREMO

Se filtraron 40 eventos extremos, para ello se utilizó la metodología POT con un umbral de 1.0 [m]. A continuación, se eligió el mejor ajuste, en este caso corresponde a Weibull con un coeficiente de determinación $R^2 = 91\%$.

El H_m0 asociado al periodo de retorno de 50 años corresponde a 1.1[m].

En la ilustración 21 se observan los intervalos de confianza al 90%, los eventos extremos de periodo de retorno de 50 años se encuentran entre los 1.25 [m] y 0.92 [m]

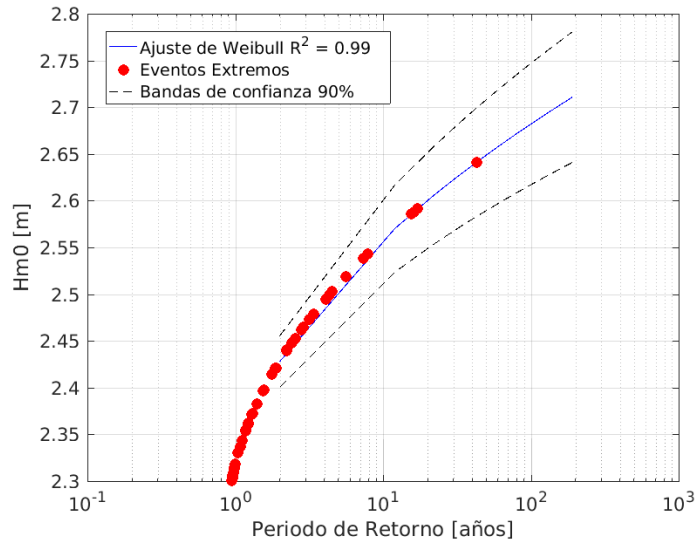


Ilustración 21, Clima extremo, bandas de confianza 90%

7.1.1.4 ANÁLISIS DE CLIMA

La bahía de Mejillones tiene una protección natural al oleaje incidente del SW, por acción de la península de Mejillones. Sin embargo, queda expuesta al oleaje del NW, fenómeno que no es frecuente en el sector. La altura significativa no supera los 1.8 [m] incidentes del NW.

Se observa escasa dispersión angular, debida a la fuerte difracción generado por la península de mejillones, Por lo cual, el oleaje reinante y dominante inciden de la misma dirección, situación que es distinta en aguas profundas, donde el oleaje reinante tiene componente SW y el dominante tiene influencia del NW.

En consecuencia, la gran protección que naturalmente le bringa la península, hace que las alturas significativas de los estados de mar sean menores, razón por la cual, esta bahía presenta un gran desarrollo marítimo y portuario.

7.1.2 NODO 2-2: BALNEARIO DE JUAN LÓPEZ

En la ilustración 22 se observa el nodo 2, el cual se encuentra a 8 [m] de profundidad, cuyas coordenadas UTM 19 H son 343710 E, 7399007 S. Este nodo corresponde a la validación con información de desnivelaciones de un ADCP que fue registrado por la DOP, El nodo numérico se encuentra a esta profundidad con el objetivo de acercar la boya numérica con el ADCP (profundidad aproximada 8 [m]), sin embargo, se debe tener presente los fenómenos físicos de rompiente que en el modelo no representa.

Fuente: Google Earth



Ilustración 22, Georreferencia Nodo 2-2 – Balneario de Juan López

7.1.2.1 VALIDACIÓN

Para la validación, se consideraron 2 ADCP ubicados en la bahía de Juan López, cuyas coordenadas UTM 19 son 343632 – 7399025 y 343661 – 7398960 respectivamente. Estos ADCPs se fondearon a 8 [m] de profundidad aproximadamente, el nodo numérico se encuentra a una profundidad de 8 [m] (para que el caso sea comparable), sin embargo, se reitera que los resultados pueden contener errores asociados a los procesos físicos no considerados por el modelo (no es recomendable obtener información del modelo SWAN en profundidades bajo 20 [m]). En la ilustración 23 se observa la imagen satelital con la ubicación del nodo numérico y ambos ADCP.

Fuente: Google Earth



Ilustración 23, Georreferencia nodo 2 – ADCP validación

Validación con ADCP 1

En la ilustración 24, se observa el gráfico de bondad de ajuste cuantil – cuantil para alturas significativas espectrales, entre la boya numérica SWAN y la altura significativa obtenida desde el ADCP. Se atisban diferencias entre las lecturas del instrumento y las obtenida de la modelación, las diferencias varían en el rango de 0.02 [m] y 0.002 [m], las alturas significativas del ADCP se encuentran entre los 0.05 [m] y 0.08 [m] y las alturas significativas modeladas están en el rango de 0.07 [m] y 0.08 [m].

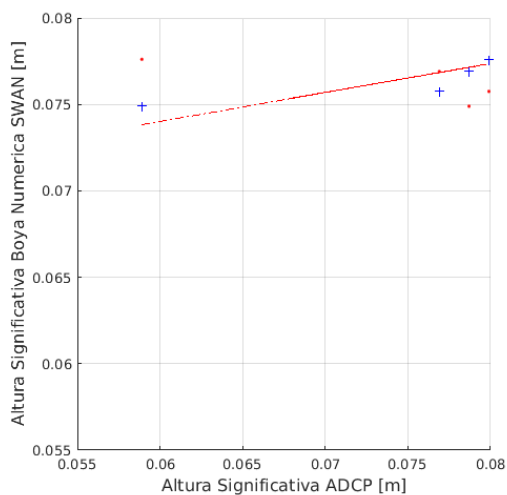


Ilustración 24, Gráfico de bondad de ajuste de alturas significativas (H_{m0})

En la ilustración 25, se muestra el gráfico de bondad de ajuste cuantil – cuantil para dirección media entre el ADCP y la boya numérica SWAN. En éste, se observa un estado de mar que se escapa de la media, el cual hace aumentar la diferencia entre la dirección medida y modelada, sin embargo, la media se encuentra en una diferencia de 4° entre ellas. En consecuencia se observa que las direcciones del ADCP son más dispersivas que las modeladas.

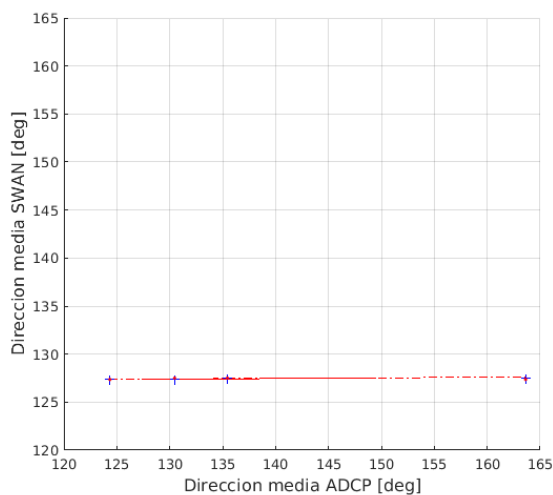


Ilustración 25, Gráfico de bondad de ajuste para dirección media (medida y modelada)

En la ilustración 26, se observa los periodos medios entre el nodo numérico y el ADCP, en términos generales. La representación del modelo presenta diferencias en periodos medios mayores a 7 [s], en cambio, el periodo de 5.6 [s] aumenta la diferencia entre ambas muestras, lo cual que se puede revisar en la tabla 3, donde aparece el periodo medio modelado (7.52 [s]) y el periodo medio instrumental (5.59 [s]).

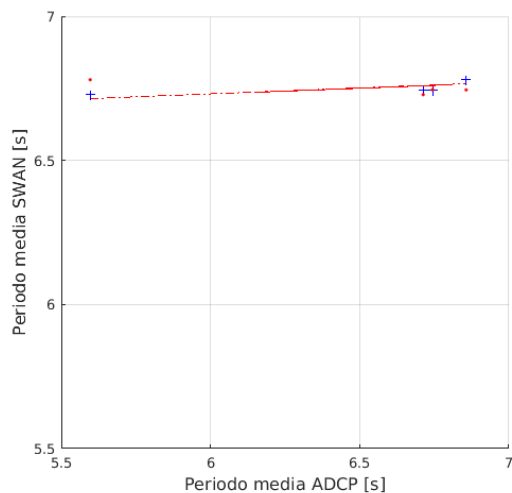


Ilustración 26, Gráfico de bondad de ajuste de periodos medios (numéricos y medidos)

En la tabla 3, se exhibe el cuadro síntesis de los parámetros de resumen obtenidos, se observa que los periodos medios bajos presentan grandes diferencias entre la modelación y la medición. Sin embargo, los periodos más altos presentan menores diferencias. Éstas, se observan en la dirección media y periodo medio, lo cual ocurre por efectos de la difracción.

Modelo			Mediciones		
Hm0 [m]	Tm [s]	Dir [°]	Hm0 [m]	Tm [s]	Dir [°]
0.075	6.78	127.35	0.059	5.6	163.63
0.076	6.74	127.50	0.079	6.85	135.45
0.077	6.72	127.51	0.077	6.71	124.35
0.077	6.75	127.36	0.077	6.74	130.46

Tabla 3: Diferencias de parámetros de resumen, entre modelo y mediciones

Como se presentó en la metodología, la difracción no fue considerada (ver anexo 10.3), por lo cual, el modelo no logra representar los cambios de direcciones en periodos bajos, donde la difracción es dominante.

En la tabla 4 se presentan las diferencias entre el ADCP y la boya numérica, en el primer estado de mar se observan grandes diferencias en la dirección media, periodo medio y altura significativa, luego las diferencias en los siguientes estados de mar son menores. En consecuencia, las mayores diferencias corresponden a periodos bajos (5.59 [s]), en los cuales, la difracción adquiere relevancia por sobre otros fenómenos físicos de difracción y asomeramiento.

Diferencias (en porcentaje)		
Hm0	Dir m	Tm
22.85%	10.08%	24.21%
0.72%	2.21%	3.34%
0.99%	0.88%	0.17%
0.31%	0.86%	5.29%

Tabla 4: Diferencias entre parámetros de resumen

VALIDACIÓN CON ADCP 2

En la ilustración 27 se muestra el gráfico de bondad de ajuste cuantil – cuantil de alturas significativas, entre la boya numérica SWAN y la altura significativa obtenida desde el ADCP. Se observan diferencias entre las lecturas del instrumento y las obtenida de la modelación, las diferencias varían en el rango de 0.04 [m], las alturas se encuentran entre los 0.16 [m] y 0.21 [m].

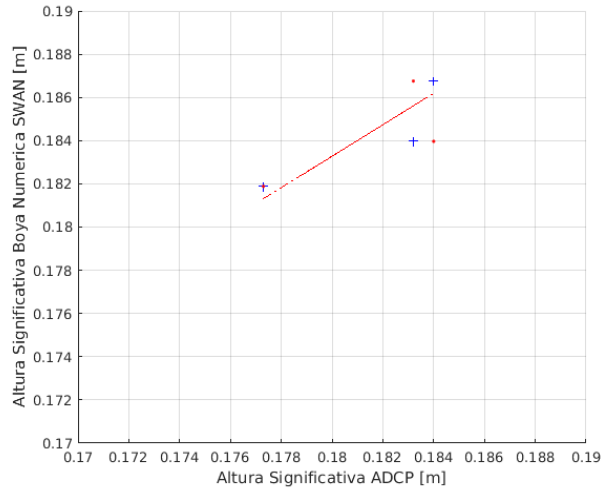


Ilustración 27, Gráfico de bondad de ajuste de H_{m0} (modelado y medido)

En la ilustración 28 se muestra el gráfico de bondad de ajuste cuantil – cuantil, en ella, se observan diferencias entre la boya numérica y la instrumental, la cual es de 15° , 0.35° y 5° respectivamente.

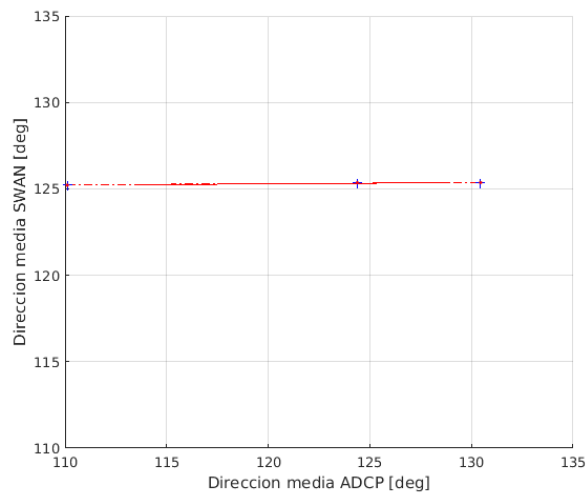


Ilustración 28, Gráfico de bondad de ajuste de dirección media.

En la ilustración 29, se observa el gráfico de bondad de ajuste cuantil – cuantil de periodos medios, donde se atisban diferencias de 0.4 [s] que correspondiente a un 5%. (Máxima diferencia).

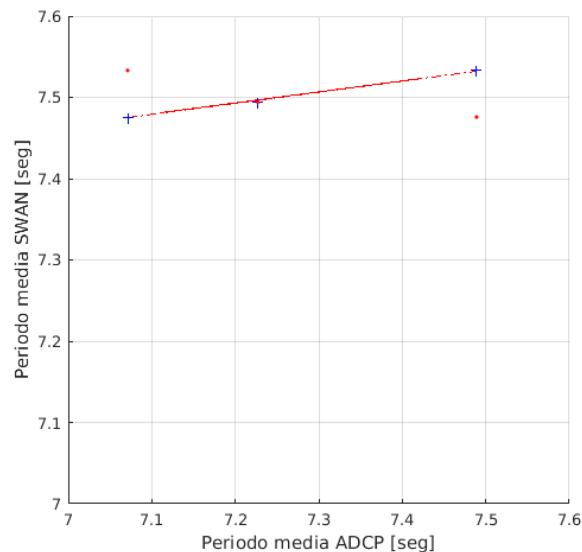


Ilustración 29, Gráfico de bondad de ajuste de periodos medio.

En la tabla 5 se muestra el cuadro de diferencias entre estados de mar (simulados y medidos), se observaron diferencias a la validación con el ADCP 1, se presentan diferencias entre la simulación y la medición, sin embargo la información disponible es muy escasa para obtener un resultado en los ajustes.

Diferencias (en porcentaje)		
Hm0	Dir m	Tm
1.03%	4.19%	5.13%
0.81%	1.42%	2.97%
1.00%	0.27%	0.15%

Tabla 5: Error porcentual - diferencia entre parámetros de resumen

A modo de resumen se observa la tabla 6, que corresponde a las mediciones y modelaciones graficadas.

Modelo			Mediciones		
Hm0 [m]	Tm [s]	Dir [°]	Hm0 [m]	Tm [s]	Dir [°]
0.198	7.533	125.211	0.177	7.071	110.11
0.2	7.494	125.354	0.184	7.227	130.45
0.203	7.476	125.363	0.183	7.489	124.38

Tabla 6: Diferencia entre parámetros de resumen modelo – mediciones

7.1.2.2 CLIMA MEDIO

Para el nodo ubicado en el Balneario de Juan López, se realizó clima medio, con tablas de incidencia, histogramas y rosas de oleaje – dispersión radial.

En la ilustración 30, se muestra el histograma de dirección media, donde se puede observar que las alturas significativas incidentes provienen de las direcciones asociadas al SE, por lo cual, el peak asociado casi al 100% de la frecuencia relativa procede del SE.

Los datos modelados provienen del SE debido a la alta refracción y difracción presentada por la península de Mejillones.

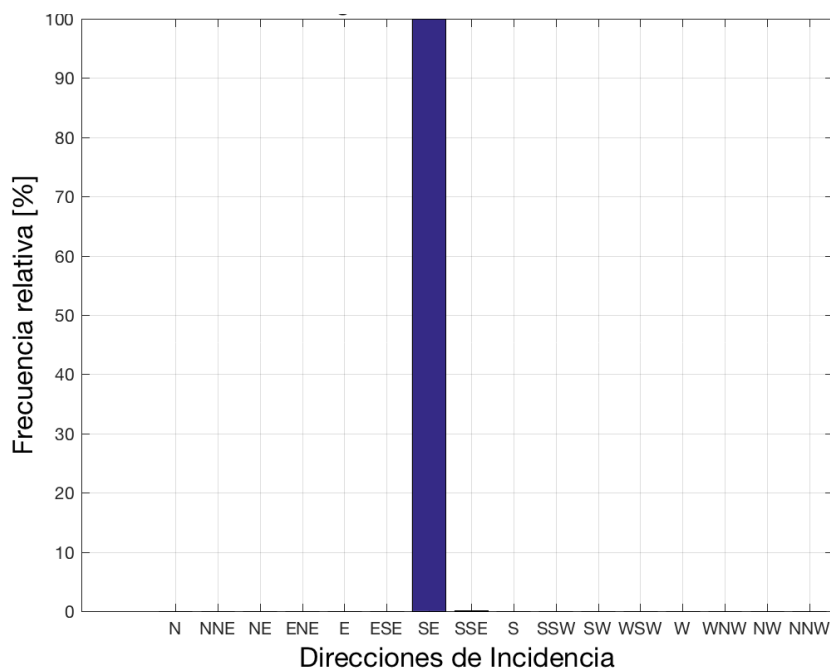


Ilustración 30, Histograma Dir

En la ilustración 31 se observa el histograma de frecuencia relativa – alturas significativas, el cual indica que más del 96% de la frecuencia tiene una altura significativa menor a 0.6 [m], luego con un 4% la altura significativa espectral es menor a 1.2 [m].

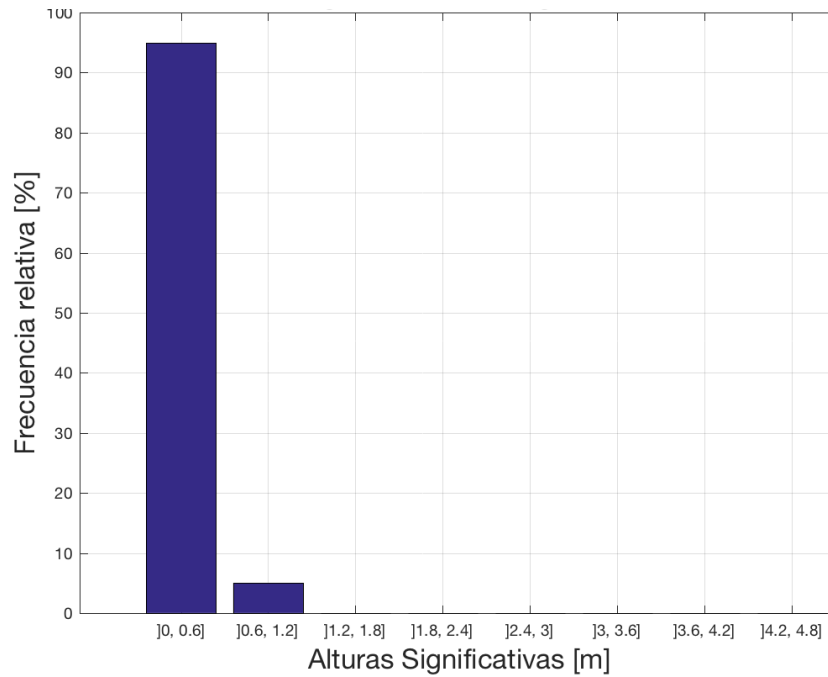


Ilustración 31, Histograma H_{m0}

En la ilustración 32, se observa el histograma frecuencia relativa – Periodo medio, el cual muestra que un 90% de la frecuencia se encuentra entre los periodos 6.5 y 9.5 [s], con 9% al periodo 9.5 y 12.5 [s]. El periodo máximo, aunque con bajas frecuencias corresponde al rango de 12.5 y 15.5 [s].

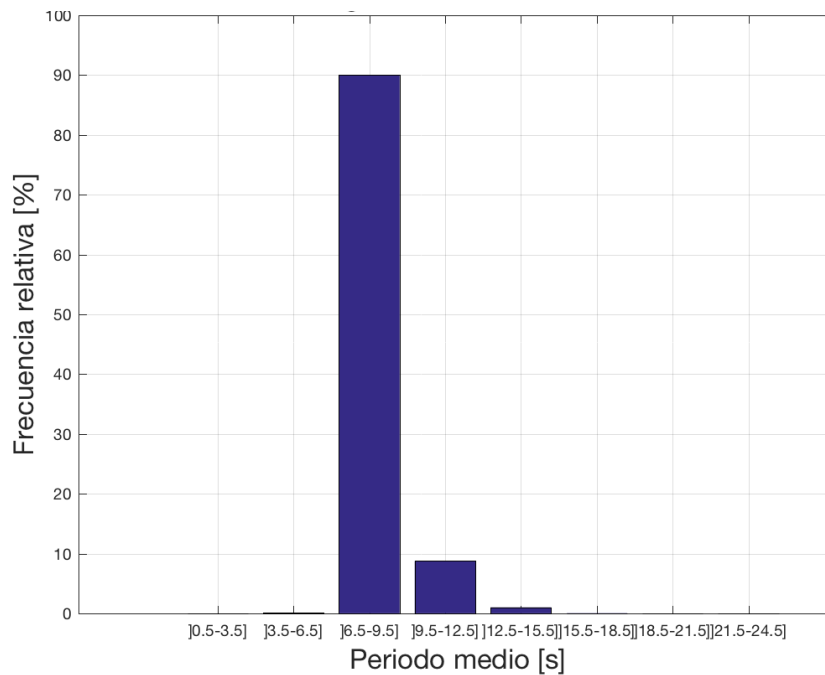


Ilustración 32, Histograma de periodo medio (T_m)

La ilustración 33, corresponde a la tabla de incidencia altura significativa – dirección media, en ésta, se observa que el 100% de las alturas significativas provienen de la dirección SE.

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	% Real	% Acumulado
0 - 0.5 [m]	0	0	0	94816	0	0	0	0	87.7033	87.7033
0.5 - 1 [m]	0	0	0	13285	0	0	0	0	12.2884	99.9917
1 - 1.5 [m]	0	0	0	9	0	0	0	0	0.0083	100
1.5 - 2 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
2 - 2.5 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
2.5 - 3 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3 - 3.5 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3.5 - 4 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
% Real	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0
% Acumulado	0	0	0	100	0	100	100	100	0	0

Ilustración 33, Tabla de Incidencia Dir – Hm0

En la ilustración 34, se observa las rosas de oleaje y de dispersión radial respectivamente, en éstas, se atisba que la máxima altura significativa incide de dirección 140° aproximadamente.

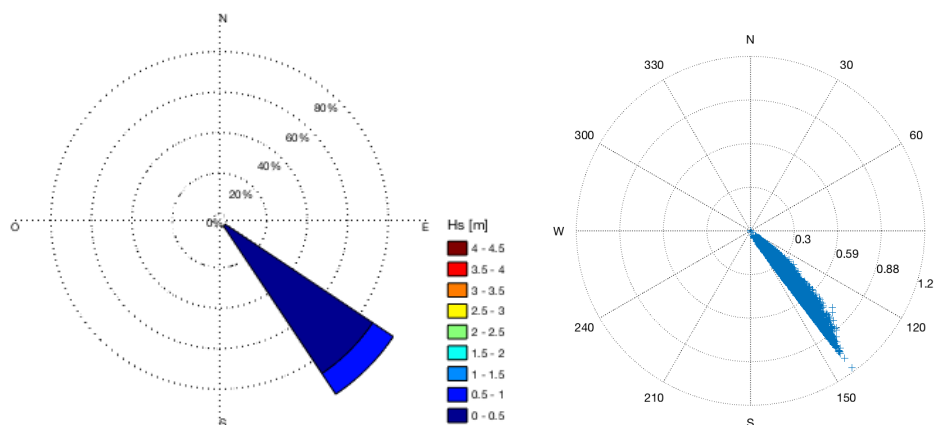


Ilustración 34, Rosas de oleaje y rosas de dispersión radial

En la ilustración 35, se muestra la tabla de incidencia de altura significativa – periodo medio, donde se muestra que la mayor frecuencia ocurre en el periodo 9.5 [s] y Hm0 0.6 [m], las máximas alturas significativas corresponden al periodo 12,5 [s], hay presencia de periodos altos, pero con alturas Hm0 bajas.

	0.5 - 3.5 [s]	3.5 - 6.5 [s]	6.5 - 9.5 [s]	9.5 - 12.5 [s]	12.5 - 15.5 [s]	15.5 - 18.5 [s]	18.5 - 21.5 [s]	21.5 - 24.5 [s]	% Real	% Acumulado
0 - 0.6 [m]	0	123	91955	9465	1081	42	2	0	94.9662	94.9662
0.6 - 1.2 [m]	0	0	5419	23	0	0	0	0	5.0338	100
1.2 - 1.8 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
1.8 - 2.4 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
2.4 - 3 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3 - 3.6 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3.6 - 4.2 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
4.2 - 6 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
% Real	0	0.1138	90.0694	8.7762	0.9999	0.0388	0.0018	0	0	0
% Acumulado	0	0.1138	90.1831	98.9594	99.9593	99.9982	100	100	0	0

Ilustración 35, Tabla de Incidencia $T_m - H_{m0}$

El balneario de Juan López presenta oleaje incidente del SE, producto del cambio de dirección que sufre de la península de mejillones. Respecto a las direcciones, la mayor frecuencia incide del SE, con alturas significativas 0.6 [m] y rango de periodos medios de 6.5 y 9.5 [m].

7.1.2.3 CLIMA EXTREMO

Se filtraron 40 eventos extremos, para ello se utilizó la metodología POT con un umbral de 0.88 [m]. A continuación, se eligió el mejor ajuste, en este caso corresponde a Weibull con un coeficiente de determinación $R^2 = 91\%$.

El H_{m0} asociado al periodo de retorno de 50 años corresponde a 1.1 [m].

En la ilustración 36 se observan los intervalos de confianza al 90%, los eventos extremos de periodo de retorno de 100 años se encuentran entre los 1.5 [m] y 0.92 [m]

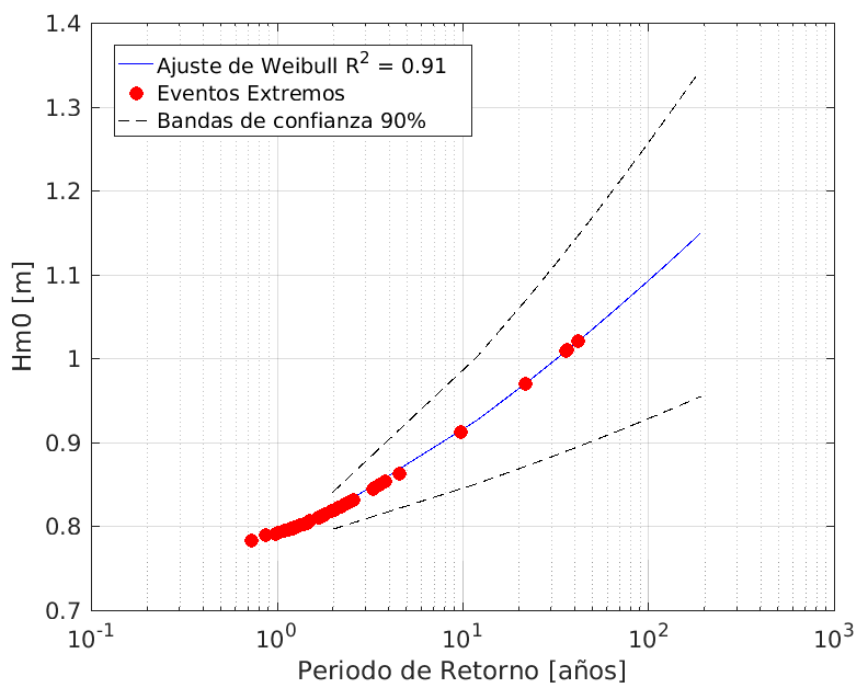


Ilustración 36, Tabla de Incidencia $T_m - H_{m0}$

7.1.2.4 ANÁLISIS DE CLIMA

El balneario de Juan López es un sector particular, debido a su localización en la península de Mejillones, el oleaje difractado incide del SE y su dispersión angular es mínima, la altura significativa es baja debido a la condición de propagación.

Como se observa en la ilustración 34 y 35, el oleaje reinante y dominante incide de la misma dirección, muy diferente a lo que ocurre en aguas profundas, donde el oleaje reinante incide del SW y dominante tiene componentes del NW.

La península de Mejillones presta importante protección en Juan López, las alturas significativas son bajas, el oleaje de incidencia tiene una baja dispersión. Por otro lado, la batimetría del sector lo constituye una pendiente suave con farellones rocosos en sectores norte y sur (SHOA., Atlas Hidrográfico de Chile, 2007), ésta condición aumenta la protección en la bahía e incorpora otros fenómenos de propagación.

7.2 REGIÓN DE VALPARAÍSO

En la ilustración 37, se presenta el gráfico de campos bidimensionales. En este caso se simuló dirección de incidencia WNW, y con alturas significativas de 1 [m], es preciso señalar que el campo bidimensional de la ilustración corresponde al mallado grueso, sus condiciones de borde fueron generadas siguiendo la metodología de transferencia espectral explicada en el punto 5.4.

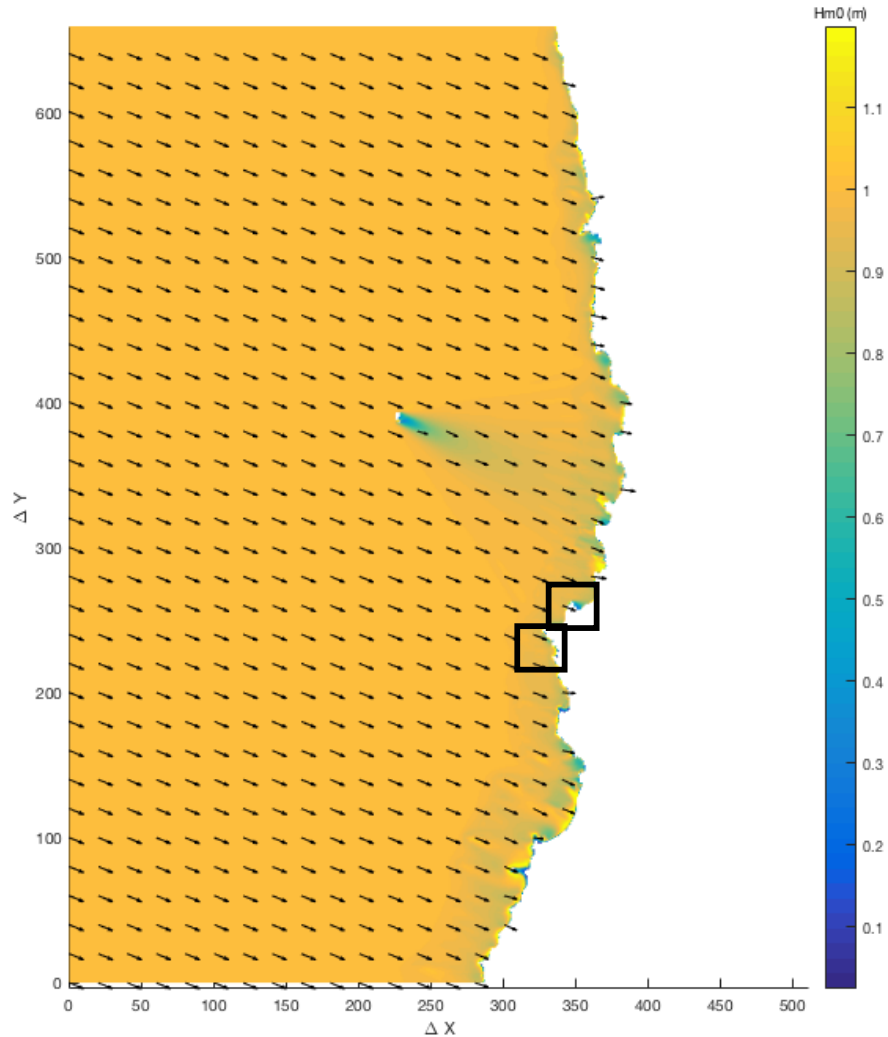


Ilustración 37, Campos bidimensionales Valparaíso

7.2.1 NODO 5-1: VALPARAÍSO

En la ilustración 38, se observa la ubicación geográfica del nodo 5-1, el cual se encuentra a 28 [m] de profundidad, cuyas coordenadas UTM 18 H son 255302 E, 6342059 S (Datum WGS84). Este nodo se encuentra ubicado cercano al cabezo del molo de abrigo del sector puerto de Valparaíso.

Fuente: Google Earth

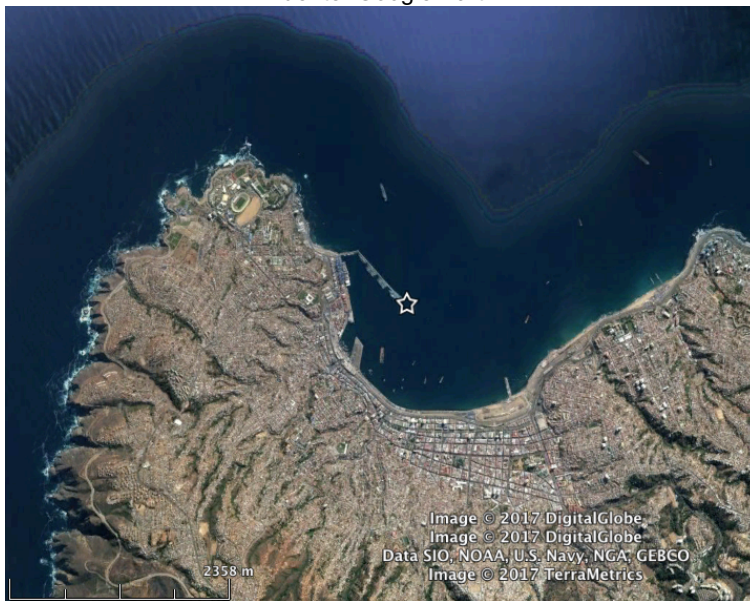


Ilustración 38, Georreferenciación nodo 5-1 Valparaíso

7.2.1.1 VALIDACIÓN

A falta de registros de oleaje en este sitio, no se efectuó una validación.

7.2.1.2 CLIMA MEDIO

En el nodo 5-1, se realizaron tablas de incidencia, histogramas y rosas de oleaje – dispersión radial, cuyas ilustraciones corresponden al clima medio. Además de las bandas de confianza para clima extremo.

En la ilustración 39, se muestra el histograma de dirección media, donde se puede observar que la dirección incidente proviene del N y NNW, la mayor frecuencia relativa (85%) procede del NNW.

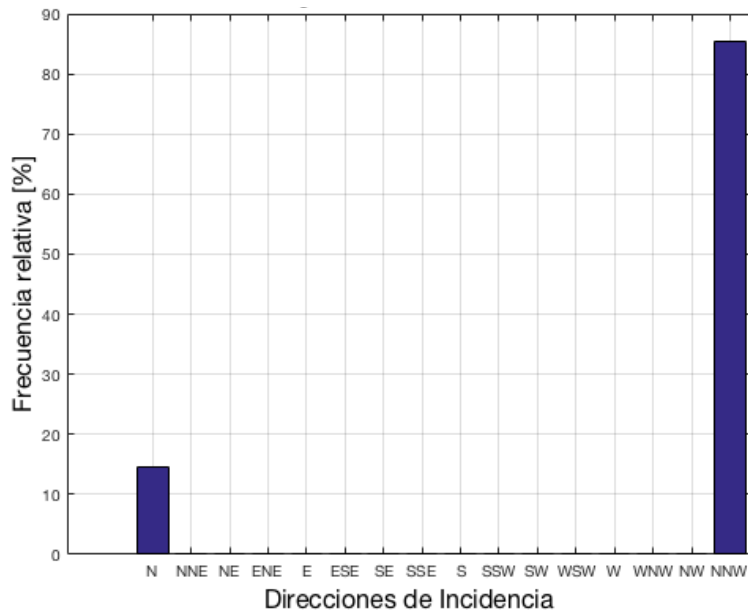


Ilustración 39, Histograma Dir

En la ilustración 40, se observa el histograma de frecuencia relativa - alturas significativas, el cual muestra que más del 90% de la frecuencia relativa tiene una altura menor a 0.6 m, y con 10% alturas menores a 1.2 [m].

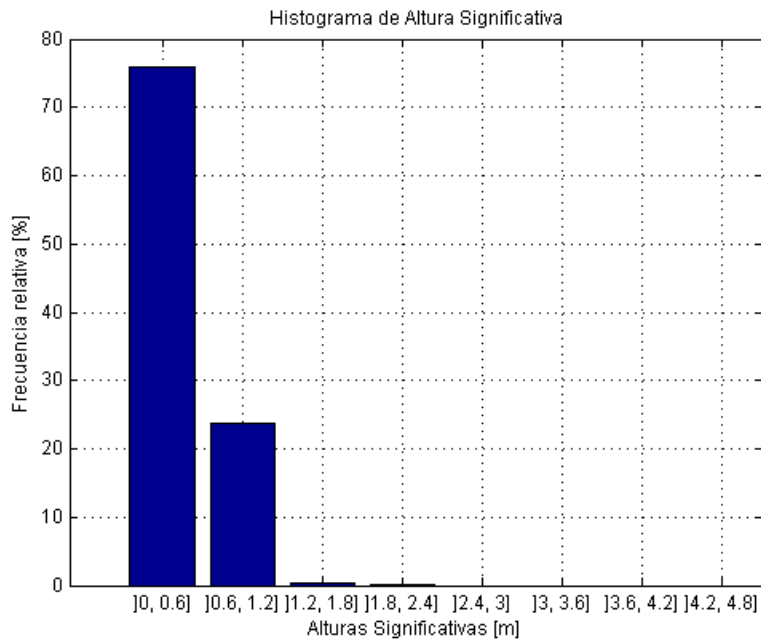


Ilustración 40, Histograma Hm0

En la ilustración 41, se observa el histograma de frecuencia relativa – periodo medio, el cual muestra que un 56% de la frecuencia relativa corresponde al periodo de 12.5 y 15.5 [s], con 23% al periodo 15.5 y 18.5 [s].

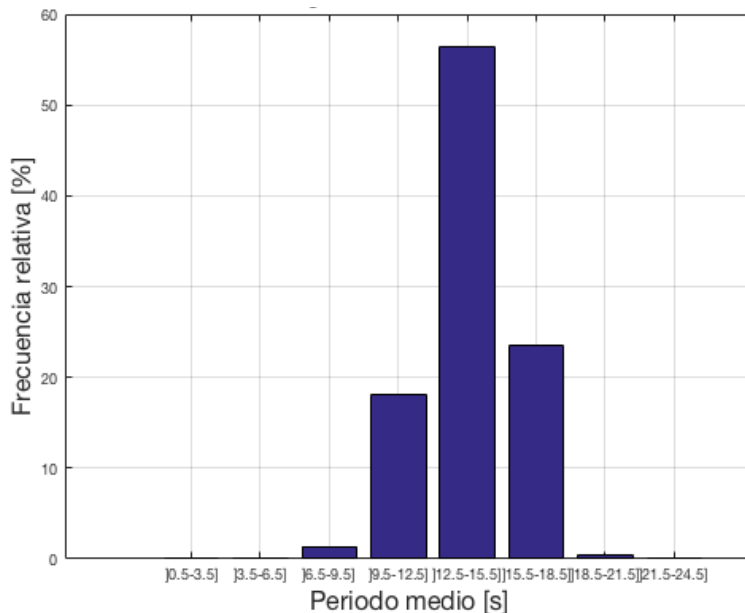


Ilustración 41, Histograma Tm

En la ilustración 42, tabla de incidencia dirección – altura significativa, el cual muestra que las máximas alturas provienen de las direcciones N y mínimas del N y NW.

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	% Real	% Acumulado
0 - 0.5 [m]	44398	0	0	0	0	0	0	21387	60.8501	60.8501
0.5 - 1 [m]	38101	0	0	0	0	0	0	2514	37.5682	98.4183
1 - 1.5 [m]	1609	0	0	0	0	0	0	33	1.5188	99.9371
1.5 - 2 [m]	64	0	0	0	0	0	0	2	0.0610	99.9982
2 - 2.5 [m]	0	0	0	0	0	0	0	2	0.0018	100.0000
2.5 - 3 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
3 - 3.5 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
3.5 - 4 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
% Real	77.8577	0	0	0	0	0	0	22.1423	0	0
% Acumulado	77.8577	77.8577	77.8577	77.8577	0	77.8577	77.8577	100	0	0

Ilustración 42, Tabla de Incidencia Dir – Hm0

En la ilustración 43 se presenta la rosa de oleaje y de dispersión radial, donde se observa que la máxima altura significativa proviene de dirección NNW, que el máximo evento extremo se aproxima a los 2 [m].

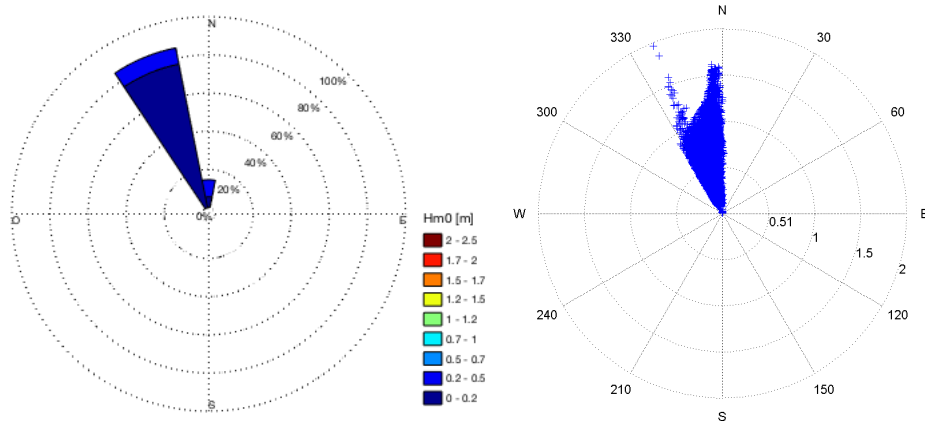


Ilustración 43, Rosa de oleaje y rosa de dispersión radial

7.2.1.3 CLIMA EXTREMO

En la ilustración 44, se observa la curva de eventos extremos, ajuste y bandas de confianza, el mejor ajuste corresponde a Weibull con un coeficiente de determinación de un 88%, la altura significativa correspondiente al periodo de retorno de 100 años es de 2.35 [m], la altura significativa asociada al periodo de retorno de 60 años es de 2.2 [m].

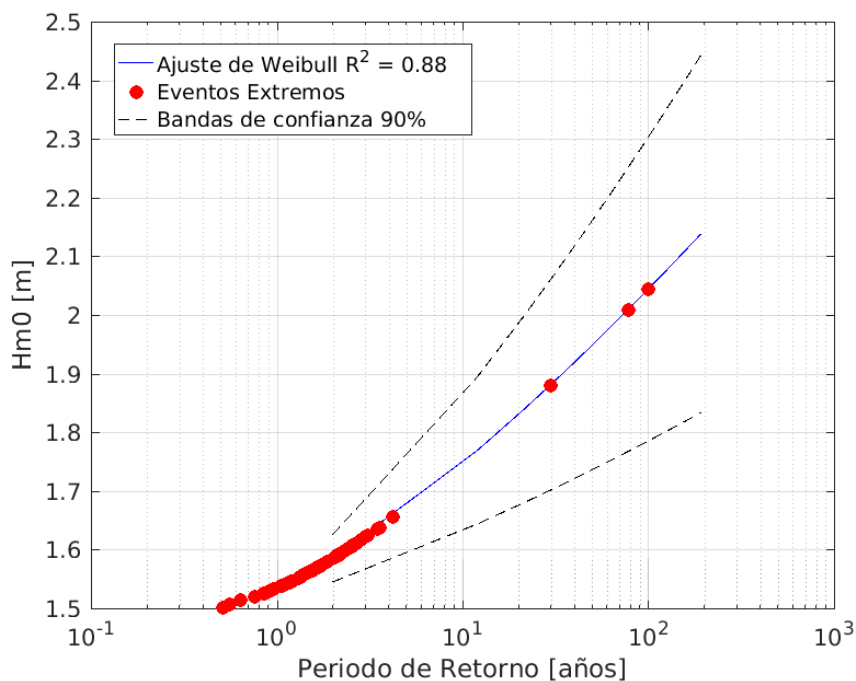


Ilustración 44, Bandas de confianzas Tm

7.2.1.4 ANÁLISIS DE CLIMA

La bahía de Valparaíso es una zona protegida del oleaje incidente del SW fundamentalmente de marejadas generadas en el pacífico sur, sin embargo no cuenta con ninguna barrera al oleaje del NW, o del W, oleaje que constituye marejadas por tormentas locales o generadas en el pacífico norte. La estadística de oleaje transferida con la metodología pseudoespectral muestra que las alturas significativas están en el rango de 0 a 2.5 m, pero sobre el 75% de la estadística, indica alturas significativas menores a 0.6 m.

La dispersión angular es de aproximadamente 30°, incidentes fundamentalmente del NNW. El oleaje reinante incide del N y NNW, y el oleaje dominante del NW, sin embargo, en aguas profundas, el oleaje reinante y dominante incide del SW. (Beyá J., 2016)

Punta Curaumilla y punta Ángeles generan protección a la bahía, el oleaje difractado incide de dirección NW con alturas significativas disminuidas, ésta situación se presenta en la zona portuaria de Valparaíso, pero hacia el norte de la bahía, la protección disminuye, aumentando las alturas significativas y cambiando las direcciones de incidencia.

7.2.2 NODO 5-2: PLAYA LAS DOCAS

En la ilustración 45, se observa la ubicación geográfica del nodo 5-2, el cual se encuentra a 8 [m] de profundidad, cuyas coordenadas UTM 18 H son 246766 E, 6330135 S. Este nodo corresponde a la validación con datos de ADCP. El instrumento fue fondeado a 8 [m] de profundidad, con el objetivo de comparar el resultado de la medición y el resultado de la transferencia espectral, se ubicó un nodo numérico a 8 [m] de profundidad, sin embargo, se destaca que los resultados pueden contener errores, principalmente producto de los fenómenos físicos generados en aguas someras (rompiente), procesos que el modelo no capaz de representar.

Fuente: Google Earth

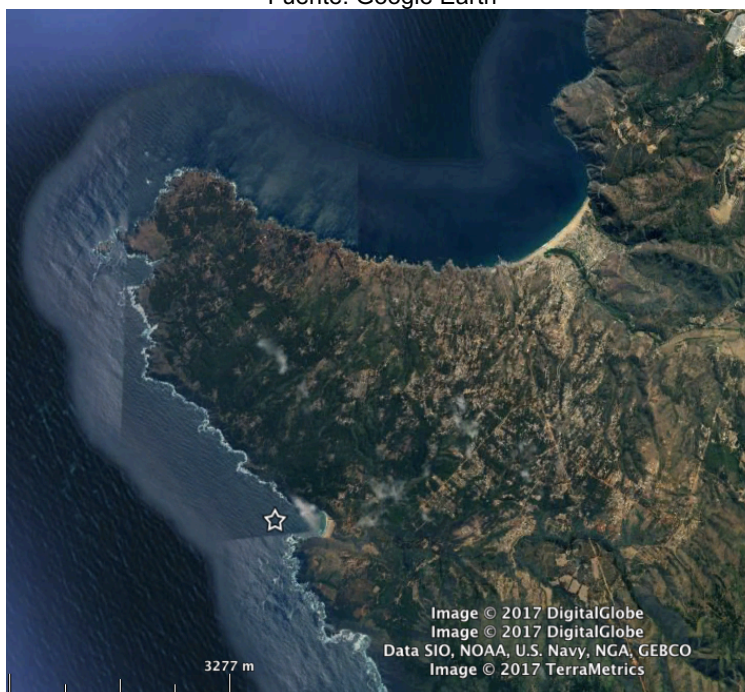


Ilustración 45, Georreferenciación Nodo 5-2 – Curaumilla

7.2.2.1 VALIDACIÓN

Para la calibración, se consideró un ADCP ubicados en la playa las docas, cuyas coordenadas UTM 19 son 246766 E 6330135 S.

En la ilustración 45 se presenta la localización geográfica del instrumento, el cual fue fondeado a 8 [m] de profundidad.

En la ilustración 46, se presenta la bondad de ajuste cuantil cuantil de alturas significativas, entre la boya numérica SWAN y la altura significativa obtenida desde el ADCP. Los puntos rojos corresponden a los datos $Hm0_{ADCP}$ y $Hm0_{Modelado}$, los puntos azules corresponden a los cuantiles, y las líneas corresponden a los ajustes.

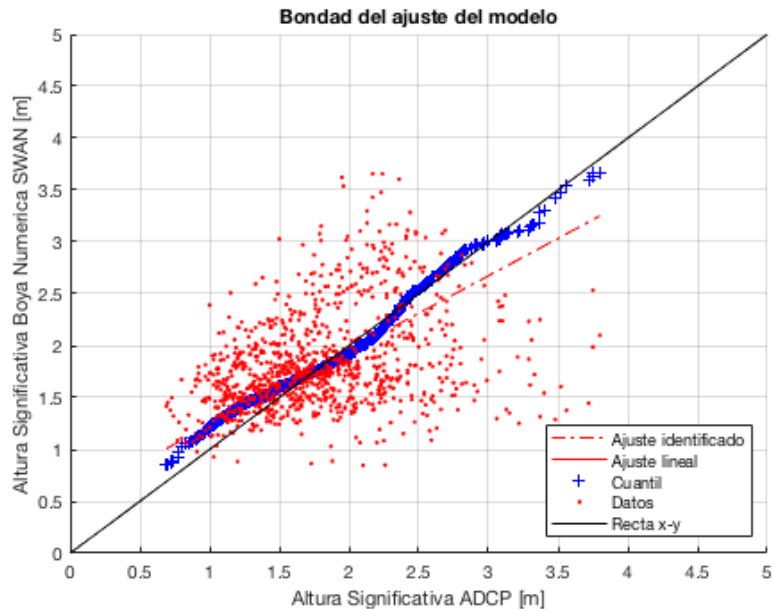


Ilustración 46, Bondad de ajuste cuantil – cuantil (altura significativa)

Se observa gran dispersión en los peak de alturas significativas, tanto para las boyas numéricas como para las mediciones, en alturas menores se muestra que la concentración de información tiene tendencia lineal. En consecuencia, las alturas entre 0.5 y 2 [m] se encuentran ajustados, y responden a una distribución lineal, sin embargo, en altura mayores presentan diferencias. Se muestra, que el modelo subestima las alturas máximas y sobreestima las alturas mínimas.

Las diferencias observadas responden a la simulación generada, el modelo SWAN, así como todos los modelos que promedian la fase, no son efectivos para la propagación en zonas costeras con profundidades menores a 20 [m], el coeficiente de correlación de Pearson es de 0.511.

7.2.2.2 CLIMA MEDIO

Para el nodo ubicado en la playa Las Docas, Punta Curaumilla – región de Valparaíso, se realizó clima medio, con tablas de incidencia, histogramas y rosas de oleaje – dispersión radial, además de clima extremo con las bandas de confianza.

En la ilustración 47, se observa el histograma de dirección media, donde se puede observar que el peak asociada al 100% de la frecuencia relativa procede del WSW.

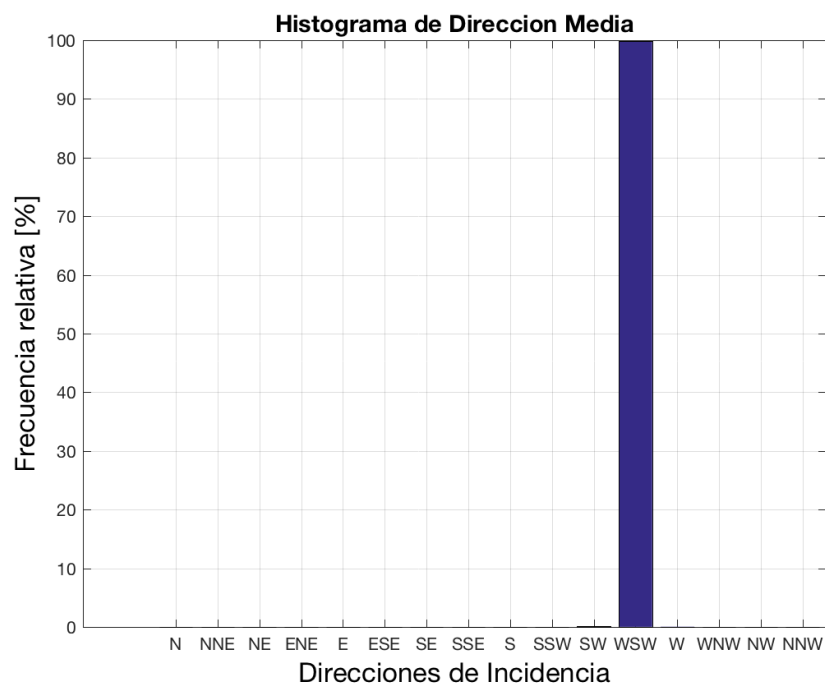


Ilustración 47, Histograma Dir

Fuente: Elaboración propia

En relación a las alturas, ilustración 48, se observa que más del 43% de la frecuencia relativa tiene una altura menor a 1.8 [m], luego con un 32% que la altura es menor a 2.4 [m], que con un 10% las alturas son menores a 3 [m] y las mayores alturas (4.8 [m]) corresponden a un 1%.

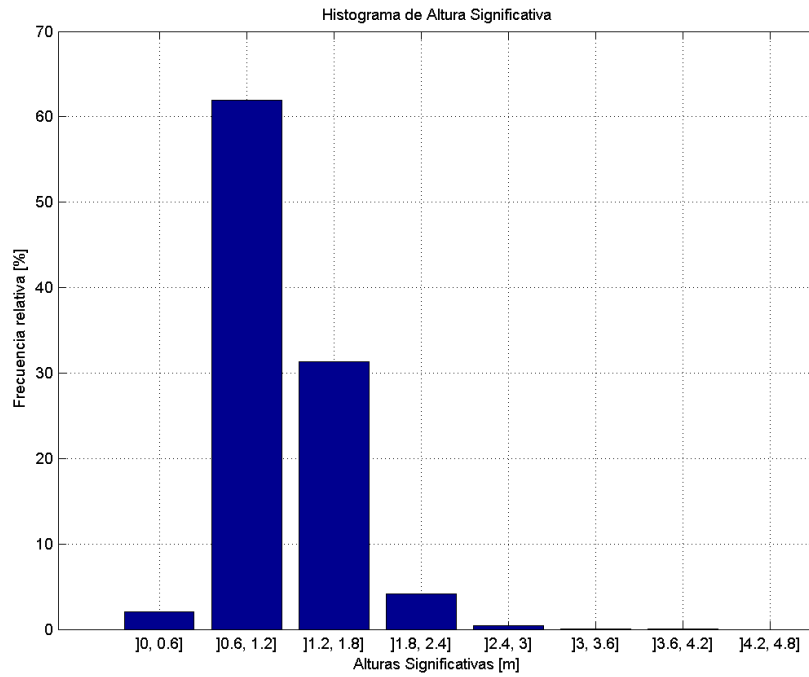


Ilustración 48, Histograma Hm0

En la ilustración 49, se presenta el histograma de frecuencias relativas – periodos medios, donde se observa el peak, el cual corresponde al rango de 6.5 a 9.5 [s], el rango de 9.5 a 125 [s]

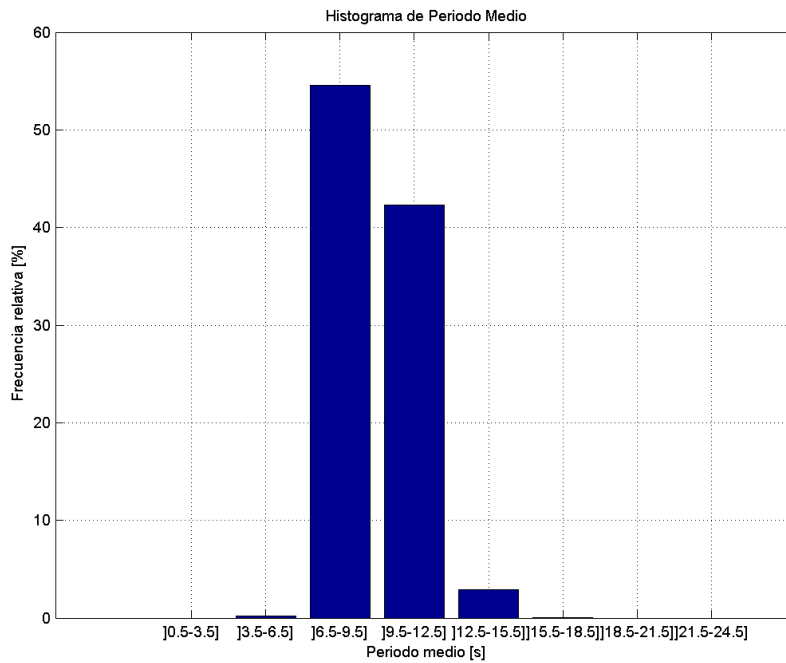


Ilustración 49, Histograma Tm

En la tabla de incidencia, ilustración 50, se puede observar que las máximas y mínimas alturas significativas provienen de dirección SW.

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	% Real	% Acumulado
0 - 0.5 [m]	0	0	0	0	0	436	0	0	0.4033	0.4033
0.5 - 1 [m]	0	0	0	0	0	41081	214	0	38.1972	38.6005
1 - 1.5 [m]	0	0	0	0	0	51693	228	0	48.0261	86.6266
1.5 - 2 [m]	0	0	0	0	0	12025	56	0	11.1747	97.8013
2 - 2.5 [m]	0	0	0	0	0	2023	0	0	1.8712	99.6726
2.5 - 3 [m]	0	0	0	0	0	308	0	0	0.2849	99.9575
3 - 3.5 [m]	0	0	0	0	0	46	0	0	0.0425	100
3.5 - 5.5 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
% Real	0	0	0	0	0	99.5394	0.4606	0	0	0
% Acumulado	0	0	0	0	0	99.5394	100	100	0	0

Ilustración 50, Tabla de Incidencia Dir – Hm0

En la ilustración 51, se presenta la rosa de oleaje y dispersión radial, donde se observa que la máxima altura significativa proviene de dirección 245º aproximadamente, en el gráfico de dispersión se muestra que la energía se encuentra contenida en su totalidad en la dirección WSW.

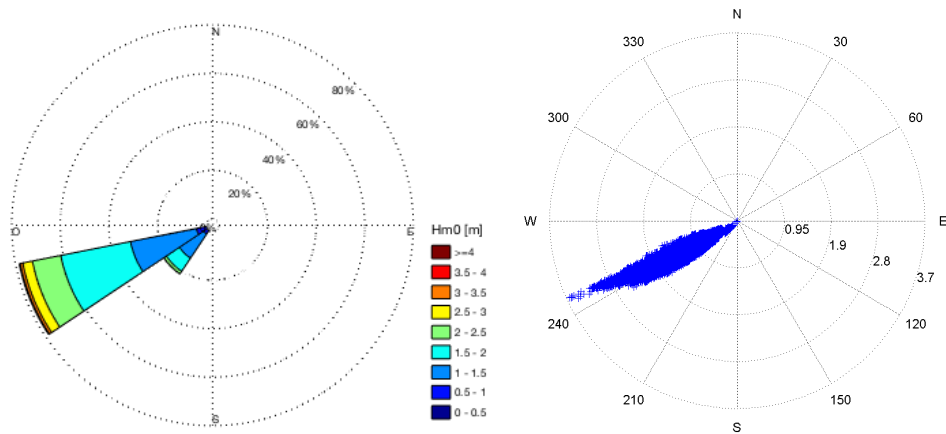


Ilustración 51, Rosa de oleaje y rosa de dispersión radial

En la tabla de incidencia de periodo – dirección, ilustración 52, se observa que la mayor frecuencia ocurre en el periodo 9.5 [s] y dirección SW. Los periodos altos corresponden al periodo 18,5 [s].

	0.5 - 3.5 [s]	3.5 - 6.5 [s]	6.5 - 9.5 [s]	9.5 - 12.5 [s]	12.5 - 15.5 [s]	15.5 - 18.5 [s]	18.5 - 21.5 [s]	21.5 - 24.5 [s]	% Real	% Acumulado
0 - 0.6 [m]	0	60	1721	400	1	0	0	0	2.0183	2.0183
0.6 - 1.2 [m]	0	44	38796	27804	351	0	0	0	61.9693	63.9876
1.2 - 1.8 [m]	0	0	10024	21066	2820	7	0	0	31.3727	95.3603
1.8 - 2.4 [m]	0	0	354	2794	1297	0	0	0	4.1116	99.4718
2.4 - 3 [m]	0	0	0	168	304	17	0	0	0.4523	99.9242
3 - 3.6 [m]	0	0	0	2	35	4	0	0	0.0379	99.9621
3.6 - 4.2 [m]	0	0	0	1	1	3	0	0	0.0046	99.9667
4.2 - 6 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99.9667
% Real	0	0.0962	47.0771	48.3165	4.4482	0.0287	0	0	0	0
% Acumulado	0	0.0962	47.1732	95.4898	99.9380	99.9667	99.9667	99.9667	0	0

Ilustración 52, Tabla de Incidencia Dir – Tm

7.2.2.3 CLIMA EXTREMO

En la ilustración 53, se observa la curva de eventos extremos, ajuste y bandas de confianza. El mejor ajuste corresponde a Weibull con un coeficiente de determinación de un 98% y la altura significativa correspondiente al periodo de retorno de 50 años es de 3.25 [m].

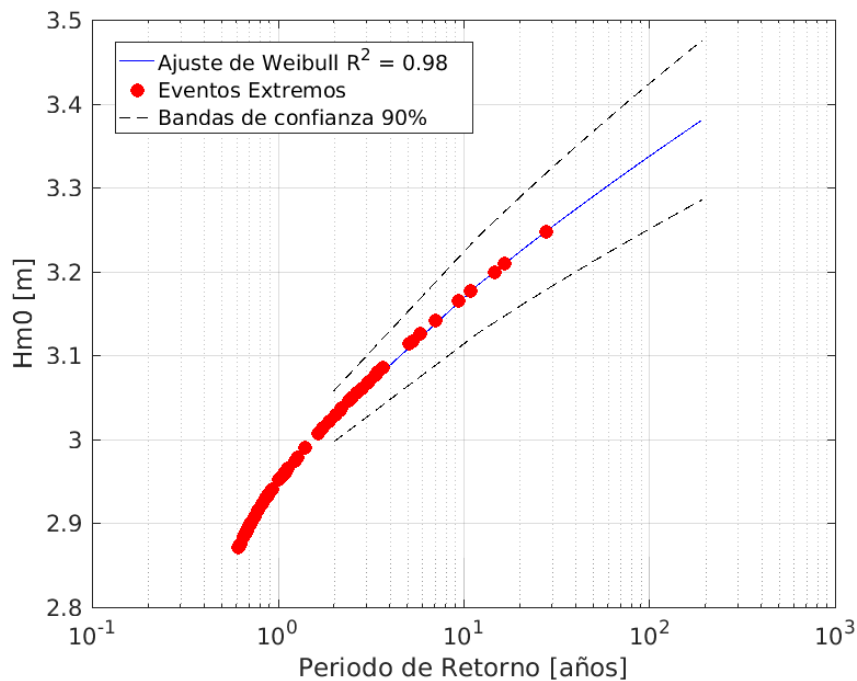


Ilustración 53, Tabla de Incidencia Dir – Tm

7.2.2.4 ANÁLISIS DE CLIMA

Playa Las Docas es una zona completamente expuesta al oleaje incidente del SW, por lo cual las marejadas generadas en el pacífico sur inciden de manera directa, sin embargo cuenta con protección del oleaje incidente del NW.

La estadística de oleaje transferida muestra que las alturas significativas se encuentran en el rango 0 a 4.2 m, el oleaje reinante presenta oleaje significativo de 1.2 m y periodos de 9.5 s. La dispersión angular es mínima, por lo cual el oleaje incide casi directamente del SW.

El oleaje dominante también proviene del SW con alturas de 4.2 m con periodos de 15 s. Debido a la geografía de la bahía, los fenómenos de propagación que más influyen en la transformación del oleaje son el asomeramiento y en menor medida la refracción.

7.2.3 NODO 5-1-1: BAHÍA CUMBERLAND

En la ilustración 54, se observa el gráfico bidimensional de altura significativa y direcciones, en este caso, el dominio de cálculo y batimétrico utilizado es de 50 [m], la simulación se realizó con dirección WNW y altura significativa 1 [m]. En la ilustración se observan los procesos físicos de refracción, asomeramiento y difracción, principalmente en la zona sur de la isla Robinson Crusoe y en bahía Cumberland.

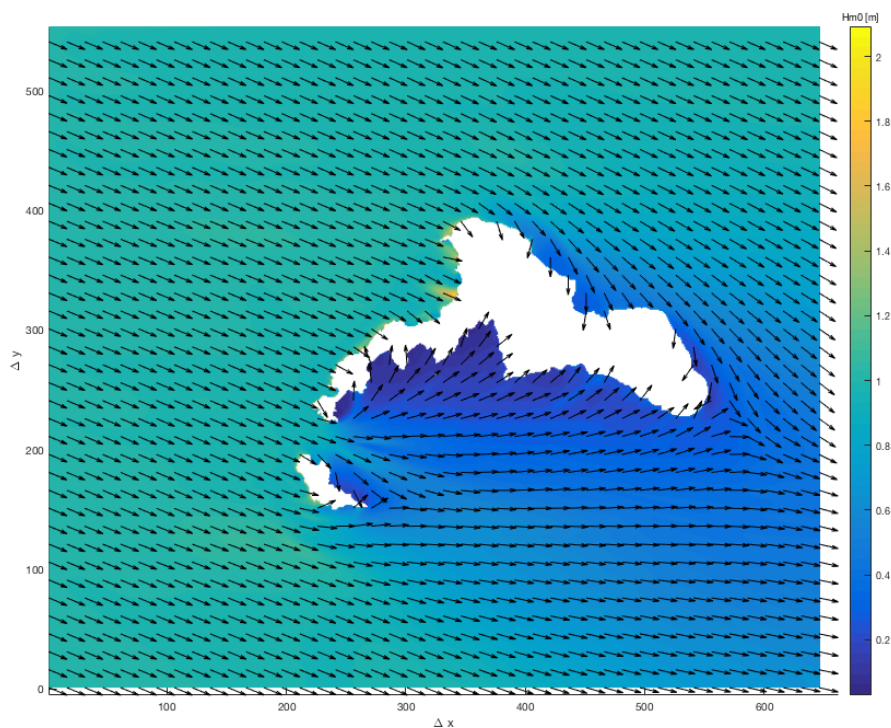


Ilustración 54, Campos bidimensionales Juan Fernández

En la ilustración 55 se observa la localización geográfica del nodo 5-1-1, donde sus coordenadas UTM 17 H son 701788 E, 6276225 S y se encuentra a 28 [m] de profundidad. Este nodo se ubica en bahía Cumberland, Juan Fernández – Región de Valparaíso.

Fuente: Google Earth

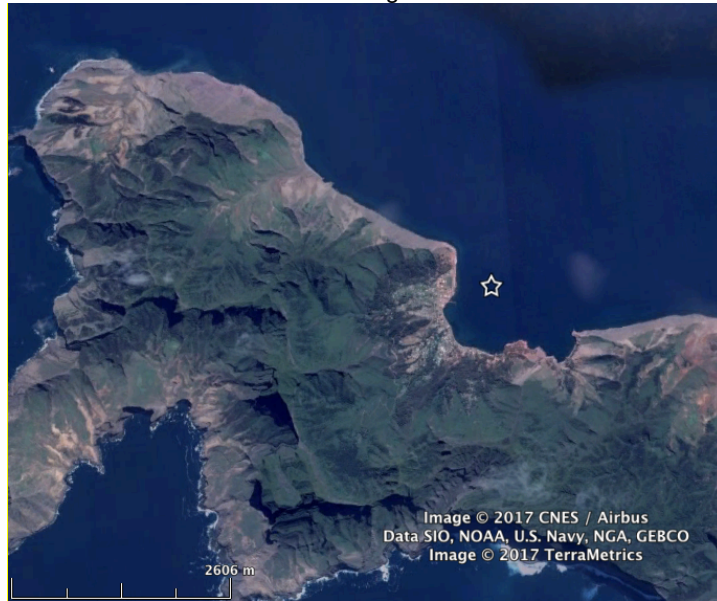


Ilustración 55, Georreferencia nodo 5-1-1 Juan Fernández

7.2.3.1 VALIDACIÓN

A falta de registros de oleaje en este sitio, no se efectuó una validación.

7.2.3.2 CLIMA MEDIO

A continuación, se presentan tablas de incidencia, histogramas y rosas de oleaje – dispersión radial que corresponden a clima medio.

En la ilustración 56, se encuentra el histograma de dirección media, donde se puede observar que la dirección incidente proviene del N, NNE, NE, ENE, E el peak asociada al 78% de la frecuencia relativa procede del NNE.

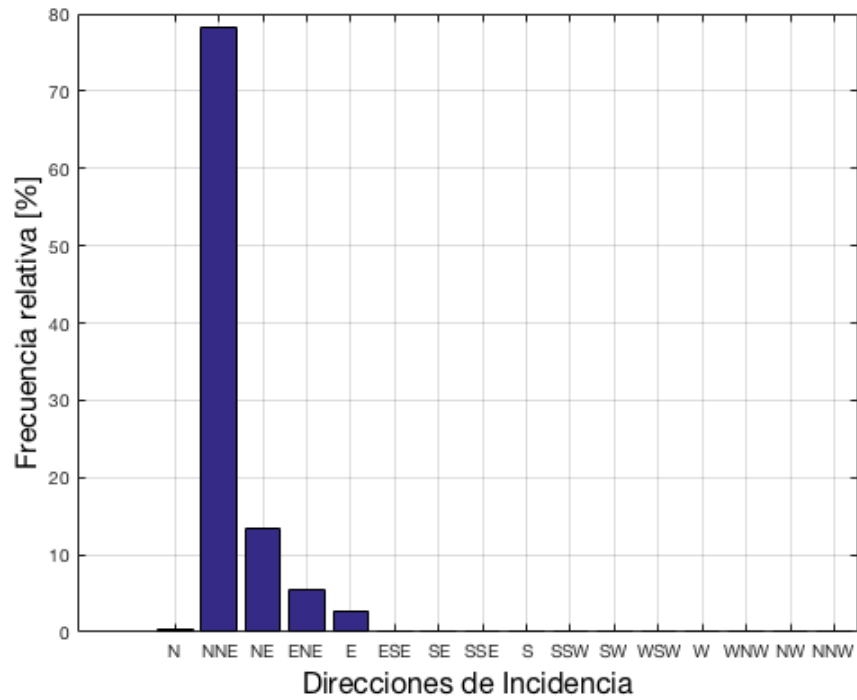


Ilustración 56, Histograma Dir

En la ilustración 57, se presenta el histograma de altura significativa, donde se observa que más del 99% de la frecuencia relativa tiene una altura significativa menor a 0.6 [m], y con 1% alturas significativas entre 0.6 [m] y 1.2 [m].

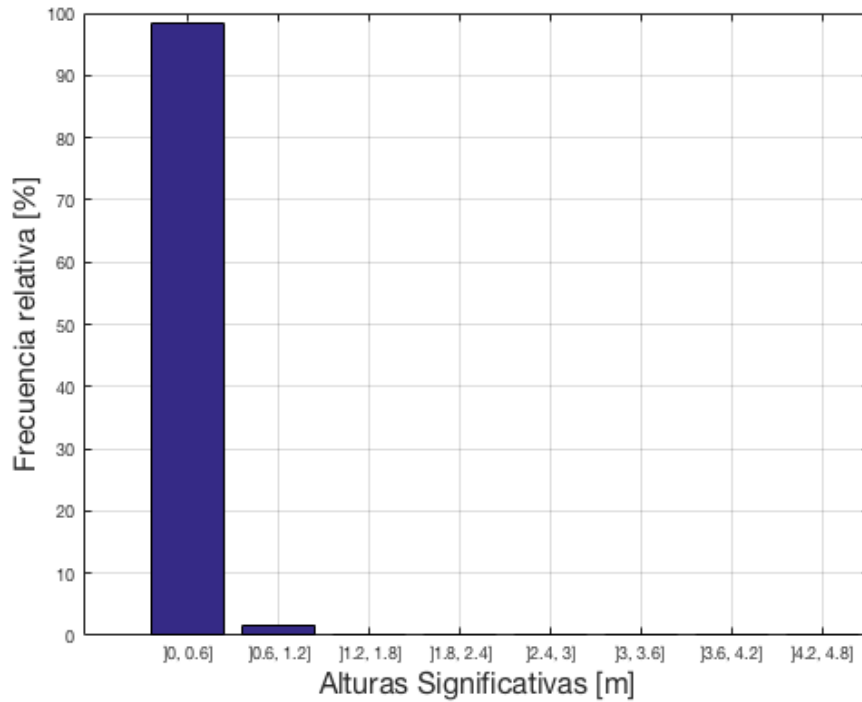


Ilustración 57, Histograma Hm0

En la tabla de incidencia, ilustración 58, se puede observar que las máximas alturas provienen de las direcciones N y mínimas del N, NE y E.

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	% Real	% Acumulado
0 - 0.5 [m]	62024	28520	17303	0	0	0	0	0	99.7567	99.7567
0.5 - 1 [m]	263	0	0	0	0	0	0	0	0.2433	100
1 - 1.5 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
1.5 - 2 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
2 - 2.5 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
2.5 - 3 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3 - 3.5 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3.5 - 4 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
% Real	57.6145	26.3805	16.0050	0	0	0	0	0	0	0
% Acumulado	57.6145	83.9950	100	100	0	100	100	100	0	0

Ilustración 58, Tabla de Incidencia Dir – Hm0

En la ilustración 59 se presenta la rosa de oleaje y dispersión radial, donde se puede observar que la máxima altura proviene de dirección NNE, como se pudo atisbar en la ilustración 41.

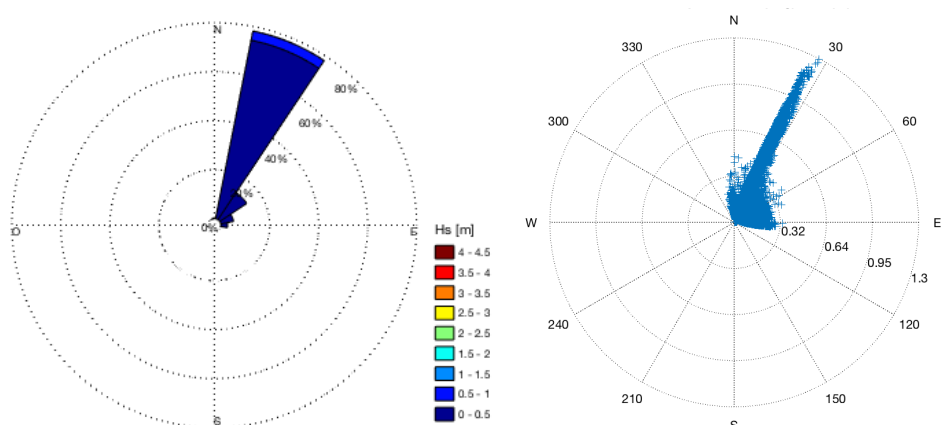


Ilustración 59, Rosas de oleaje y dispersión radial

En la ilustración 60 se muestra la tabla de incidencia periodo medio – altura significativa, donde se puede observar que la mayor frecuencia ocurre en el periodo 9.5 y 12.5 [s] y altura 0.6 [m].

	0.5 - 3.5 [s]	3.5 - 6.5 [s]	6.5 - 9.5 [s]	9.5 - 12.5 [s]	12.5 - 15.5 [s]	15.5 - 18.5 [s]	18.5 - 21.5 [s]	21.5 - 24.5 [s]	% Real	% Acumulado
0 - 0.6 [m]	108	39768	22249	23048	19369	3460	23	0	99.9214	99.9214
0.6 - 1.2 [m]	0	0	0	0	0	85	0	0	0.0786	100
1.2 - 1.8 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
1.8 - 2.4 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
2.4 - 3 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3 - 3.6 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3.6 - 4.2 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
4.2 - 6 [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
% Real	0	36.7848	20.5800	21.3190	17.9160	3.2791	0.0213	0	0	0
% Acumulado	0.0999	36.8847	57.4646	78.7836	96.6997	99.9787	100	100	0	0

Ilustración 60, Tabla de Incidencia $T_m - H_m0$

7.2.3.3 CLIMA EXTREMO

En la ilustración 61, se presentan el gráfico de clima extremo con bandas de confianza, en la cual se observa que el mejor ajuste corresponde a Weibull con un coeficiente de determinación del 97%. Los eventos extremos (en rojo) corresponden a las 44 tormentas filtradas a través del método POT, la máxima tormenta tiene una altura significativa de 1.26 [m].

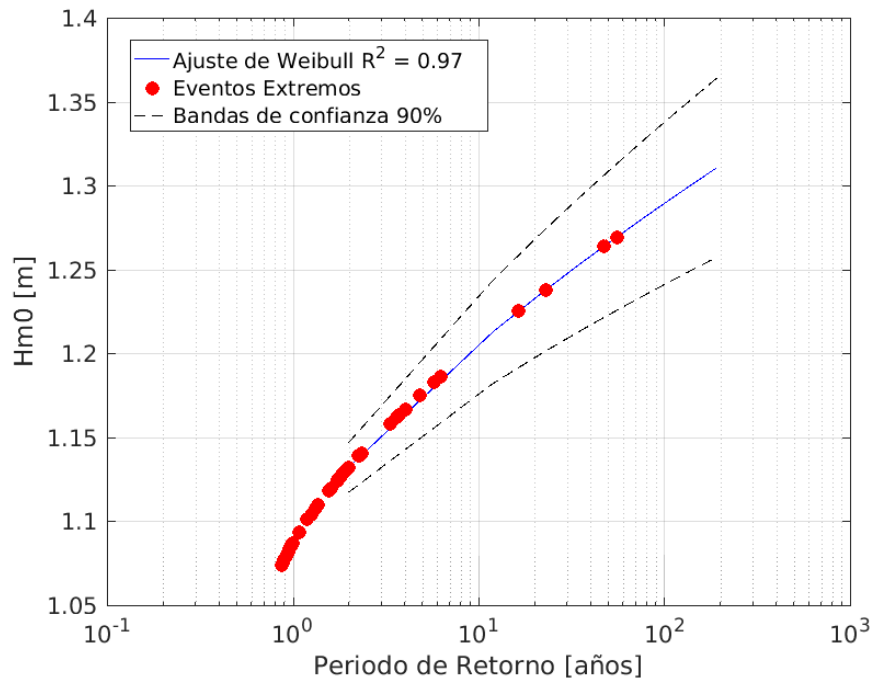


Ilustración 61, Bandas de confianza

Fuente: Elaboración propia

7.2.3.4 ANÁLISIS DE CLIMA

Bahía Cumberland se encuentra en una zona protegida de Juan Fernández, ya que no recibe directamente el oleaje del SW (mar de fondo reinante), a su vez, el oleaje incidente del SW sufre transformaciones importantes al llegar a la bahía. La dispersión angular se encuentra contenido casi en el primer cuadrante, su amplia dispersión se debe principalmente la fuerte difracción que genera la Isla de Robinson Crusoe al oleaje incidente del SW.

El oleaje reinante proviene de la dirección NNE con alturas significativas de hasta 0.6 m y periodos de 6.5 s, el oleaje dominante incide de la dirección NE con alturas significativas de hasta 1.2 m y periodos de 18 s.

Cumberland es un lugar con gran protección al oleaje generado por grandes tormentas del pacifico sur, y es un lugar particular ya que la dirección de incidencia es del NE. Fenómeno que en Chile continental no ocurre con frecuencia, solo en bahías particulares donde la fuerte difracción genere este efecto.

7.3 PRESENTACIÓN DE INFORMACIÓN

En la ilustración 62, se muestra la presentación de resultados de la red de oleaje; donde se selecciona el nodo de interés y posteriormente se desplegará la información de oleaje en clima medio y extremo.

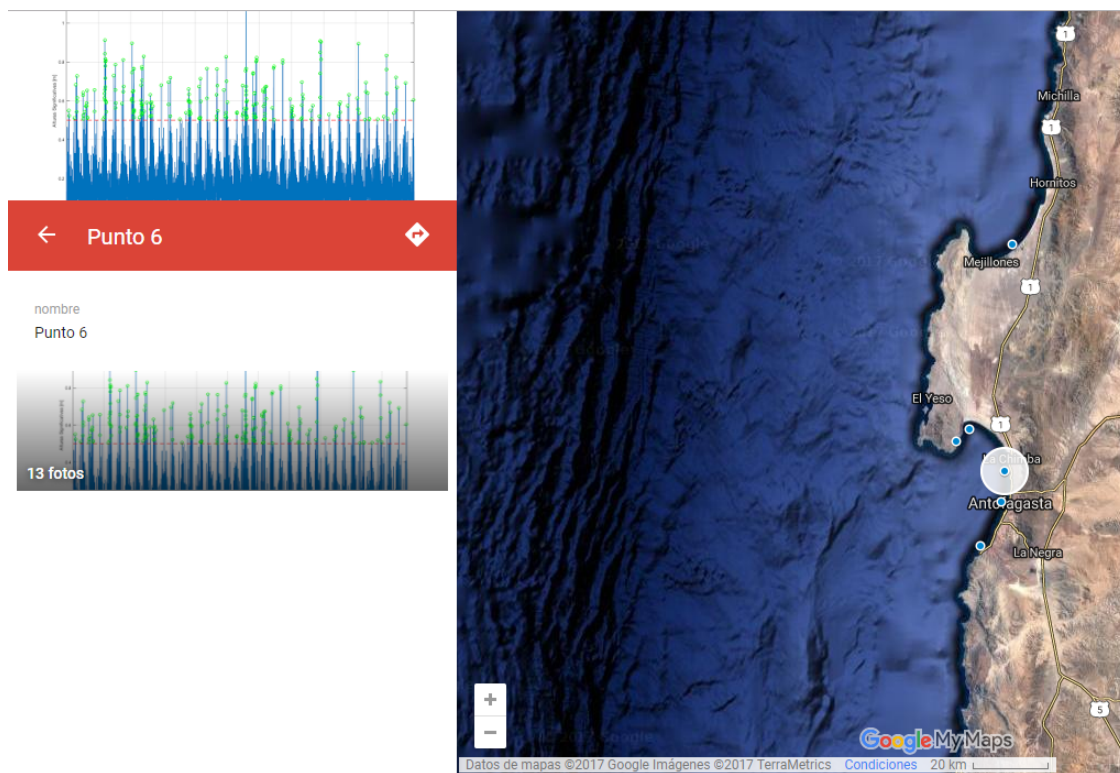


Ilustración 62, Web presentación de resultados red de oleaje

La información de oleaje presentada en este documento está publicada en el sitio web <http://www.oleajecostero.cl>.

8 CONCLUSIONES

En este documento, se presentó la habilitación y puesta en marcha del sistema de información de oleaje costero DOP, la cual, se encuentra disponible libremente a través del sitio web <http://www.oleajecostero.cl>. Para el desarrollo de esta memoria, se utilizó el modelo SWAN, que es gobernado por las ecuaciones de balance de acción, sin embargo, varios procesos de disipación son modelados.

Del desarrollo de esta memoria se enumeran las siguientes conclusiones.

1. En la región de Antofagasta, la península de Mejillones genera perturbaciones en el oleaje incidente del SW, sobre todo, en el sector norte de la península, por lo cual sus alturas de olas son bajas, y su propagación es exclusivamente del NW y NNW. Al sur de la región de mejillones, en el sector del balneario de Juan López, el oleaje proviene del E, con alturas pequeñas (ese sector fue correlacionado con datos de campo), esta información determinó un buen ajuste para los periodos medios sobre 7 [s], para periodos cortos (bajo 7[s]), la representación de clima es menos representativa, esto debido a la difracción. Los sectores al sur de la portada de Antofagasta, el oleaje es más alto y su componente SW es significativo.
2. La isla de Robinson Crusoe, sector de bahía Cumberland, es un sector protegido del oleaje SW, debido a que el oleaje proviene del cuadrante N – E, con alturas bajas. Lo efectos de disipación son importantes, sobre todo la difracción, refracción y asomeramiento.
3. La región de Valparaíso, bahía de Valparaíso cuenta con una protección natural, que hace disminuir las alturas de oleaje, y modificar las direcciones de incidencia, pero esa protección disminuye al acercarse al paseo Wheelwright y Juan de Saavedra. En la bahía de Quintero, también protegido del SW, las alturas significativas son menores, la dirección de incidencia es del NNW, las olas rondan los 2 [m], los efectos de disipación física importantes en la bahía de Quintero son la difracción, refracción y asomeramiento.
4. En la playa las Docas – sector de Curaumilla, el oleaje incidente del SW llega sin perturbaciones, las alturas de olas son mayores a 4 [m]. Con respecto a la bondad de ajuste cuantil - cuantil para H_{m0} , se observa gran dispersión en alturas significativas altas, el modelo sobreestima las alturas menores y subestima las mayores, el factor de correlación de Pearson es de 0.51.
5. El modelo representa la realidad, salvo cuando los periodos son pequeños donde la difracción es relevante. SWAN modela la difracción, sin embargo, se debe utilizar mallado grueso dado que, el modelo tiene problemas de convergencia en el mallado que se encuentre fuera del intervalo ($\frac{1}{5}$ a $\frac{1}{10}$ de la L_0). Se debe tener en cuenta las limitaciones del modelo, sobre todo en zonas donde los fenómenos no lineales son relevantes. Lo anterior debido a que, el modelo puede representar la difracción, pero pierde resolución, (el modelo se vuelve inestable y no converge).

Para representar estos fenómenos se recomienda utilizar modelos que resuelvan la fase.

6. El modelo presenta problemas al extraer información bajo los 20 [m] de profundidad. En esta zona se generan efectos físicos que el modelo no es capaz de simular, por lo cual, la extracción de información debe ser en profundidades mayores a los 20 [m]. Para la validación de la información de esta memoria, se compararon datos simulados y medidos, cuyo instrumento y nodo numérico se encontraba a 8 [m]. En consecuencia, la validación puede contener errores debido a las profundidades de la extracción.
7. Para efectos de esta memoria no se consideró la difracción, toda vez, que generaba complicaciones en el mallado fino, por lo anterior, se pueden observar diferencias entre los periodos bajos (en zonas donde la difracción sea importante). Sin embargo, para efectos de diseño, los periodos bajos son menos relevantes que los periodos medios y altos. En consecuencia, para efectos de diseño, los periodos altos afectan las estructuras.
8. Finalmente se puede concluir, que el modelo y transferencia espectral presentan leves diferencias con las mediciones, lo anterior basado en la curva de bondad de ajuste cuantil cuantil. Sin embargo, para el caso del balneario de Juan López las diferencias son mayores, debido a la alta difracción y también por fenómenos como el oleaje generado por viento local. El espectro sintético generado es válido para oleaje de mar de fondo, por lo cual, el modelo no representa la alta dispersión en los nodos. El propósito de esta memoria fue generar una metodología para el desarrollo de la red de oleaje costero DOP. La información proporcionada no debe reemplazar estudios locales de especialistas.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Pascual, C. V. (2007). *Movimientos de masas de agua en la plataforma continental*. Madrid: Universidad de Cantabria.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. New York: Cambridge University press.
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del Oleaje* (Vol. SD 49). Instituto de Ingeniería UNAM.
- Darlymple, D. &. (1984). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. USA: Cornell University.
- Hasselmann, e. a. (1973). *Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*.
- Winckler, P. (2016). *Modelado de procesos costeros*.
- Madsen, O. S. (1988). *Spectral Wave Attenuation by Bottom Friction*.
- Svendsen. (2006). *Introduction to Nearshore Hydrodynamics*.
- Alonso-Muñoyerro, M. d. (2007). *Caracterización estadística del oleaje*. Madrid: CEDEX.
- Garrido, J. M. (2007). *Propagación y Rotura del oleaje : Caracterización del medio y Técnicas Complementarias*. Madrid: CEDEX.
- Mitsuyasu. (1975). *Observations of the Directional Spectrum of Ocean Wave Using a Cloverleaf Buoy*. Journal of physical Oceanography.
- Tolman. (1991). *A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents*.
- Zijlema, M. (2007). *Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water*.
- Booij, N. L. (1996). *The "SWAN" wave model for shallow water*.
- Dalrymple, R. J. (1984). *Wave diffraction due to areas of energy dissipation, Journal of Waterways, Ports, Harbours and Coastal Engineering*.
- Holthuijsen, L. H. (2003). *Phase-decoupled refraction- diffraction for spectral wave models*.
Valentina Laface, G. M. (2016). *Peak over threshold vis-à-vis equivalent triangular storm: Return valuesensitivity to storm threshold*.

- Domínguez. (2014). Assessment of fast spectral wave transfer methodologies from deep to shallow waters in the framework of energy resource quantification in the Chilean coast.
- Suzuki, G. &. (1975). Computation of refraction and diffraction of sea waves with Mitsuyasu`s directional spectrum. *Tech. Note of port and Harbour Res. Inst*, 628.
- Goda. (2000). *Random seas and design of maritime structures*. Japón: World Scientific.
- Dominguez. (2011). *Analysis of spectral wave energy transfer methodologies from deep to shallow waters*. Pontificia Universidad Católica, Escuela de Ingeniería, Santiago.
- US Army Corps of Engineers. (1984). *Shore Protection Manual*. Washington: Coastal Engineering Research Center.
- Beyá J., A. M. (2016). *Atlas de Oleaje de Chile*. Universidad de Valparaíso.
- Fundación Chile, Aquaterra y Universidad de Valparaíso. (2014). Estrategia energética para el desarrollo de la energía marina en las comunidades costeras de la V Región. *Proyecto FIC Valparaíso*.
- Delft University of Technology. (2016). *User manual SWAN (cycle III version 41.10A)*. The Netherlands.
- Frigaard, L. &. (2001). *Generation and Analysis of random waves*. Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning Institutet for Vand, Jord og Miljøteknik Aalborg Universitet.
- Goda, Y. (2010). *Random Seas and Design of Maritime Structures*.
- Efron, B. (1993). *An introduction to the bootstrap*.
- Lladó, M. (2016). *Crecimiento Inmobiliario en el Borde Costero de Valparaíso*. Universidad de Chile.
- Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile. (8 de Junio de 2017). *MINREL Chile*. Obtenido de MINREL Chile: <http://www.minrel.gob.cl/chile-y-su-compromiso-con-nuestro-oceano/minrel/2017-06-08/155312.html>
- Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo. (2011). *Guía de zonificación costera para el ordenamiento territorial*. Chile: SUBDERE.
- UNICAN. (2000). *Dinámicas, Documento de referencia, Volumen 1*. Santander: Universidad de Cantabria.
- SHOA. (2005). *Instrucciones oceanográficas N°1, Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos. Tercera Edición*.

SHOA. (2005). *Publicación N° 3201. Instrucciones oceanográficas N°1: Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos 3ª Edición 2005. Obtenido de Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada.*

SHOA. (2007). *Atlas Hidrográfico de Chile.*

10 ANEXOS

10.1 TRANSFERENCIA ESPECTRAL

La ilustración 63, corresponde a la superposición de los espectros unitarios.

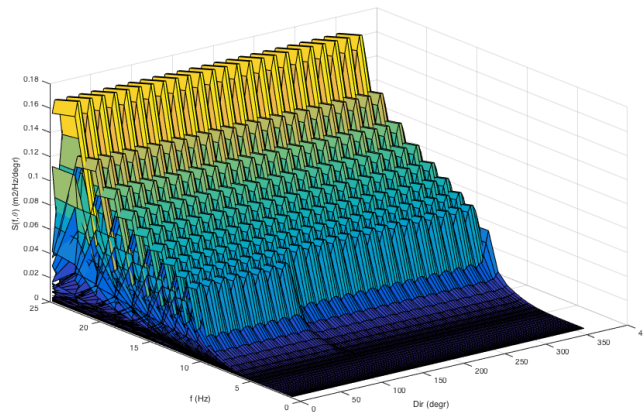


Ilustración 63, Superposición de espectros unitarios

Estos espectros unitarios son propagados y utilizados por el método de transferencia espectral, que será explicado a continuación.

En la primera etapa, se caracteriza el espectro real por medio de la combinación algebraica entre los coeficientes α , y espectros de altura unitaria, con el fin reemplazar el espectro real en aguas profundas, como se muestra en el siguiente ejemplo simplificado.

Se generan espectros unitarios de entrada, que se determinan como EU.

$$EU = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Se crean factores α

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$ER = \begin{bmatrix} 0.04 & 0 \\ 0.001 & 0.2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Se consideran espectros reales (ER), los cuales son espectros obtenidos desde el modelo (Wavewatch III (Tolman, 1991))

Se realiza la siguiente combinación lineal con el objetivo de obtener los coeficientes de agitación característicos (α_{11} , α_{12} , α_{21} , α_{22}).

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.04 & 0 \\ 0.001 & 0.2 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.04 & 0 \\ 0.001 & 0.2 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.04 & 0 \\ 0.001 & 0.2 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.04 & 0 \\ 0.001 & 0.2 \end{vmatrix}$$

Del conjunto de matrices, se realiza las ecuaciones necesarias para resolver la operación algebraica.

$$\begin{cases} \alpha_{11} * 1 + \alpha_{21} * 0 - 0.04 + \alpha_{12} * 1 + \alpha_{22} * 0 + \alpha_{11} * 0 + \alpha_{21} * 0 - 0.001 + \alpha_{12} * 0 + \alpha_{22} * 0 - 0.2 = 0 \\ \alpha_{11} * 0 + \alpha_{21} * 1 - 0.04 + \alpha_{12} * 0 + \alpha_{22} * 1 + \alpha_{11} * 0 + \alpha_{21} * 0 - 0.001 + \alpha_{12} * 0 + \alpha_{22} * 0 - 0.2 = 0 \\ \alpha_{11} * 1 + \alpha_{21} * 0 - 0.04 + \alpha_{12} * 0 + \alpha_{22} * 1 + \alpha_{11} * 0 + \alpha_{21} * 0 - 0.001 + \alpha_{12} * 1 + \alpha_{22} * 0 - 0.2 = 0 \\ \alpha_{11} * 0 + \alpha_{21} * 0 - 0.04 + \alpha_{12} * 0 + \alpha_{22} * 0 + \alpha_{11} * 0 + \alpha_{21} * 1 - 0.001 + \alpha_{12} * 0 + \alpha_{22} * 1 - 0.2 = 0 \end{cases}$$

$$\alpha_{11} = 0.04$$

$$\alpha_{12} = 0$$

$$\alpha_{21} = 0.001$$

$$\alpha_{22} = 0.2$$

Luego de realizar las operaciones algebraicas necesarias para obtener el resultado de los coeficientes, se realiza la segunda etapa, que implica obtener el espectro real propagado. Para realizar esta operación, se necesitan los coeficientes de agitación calculados anteriormente y los espectros propagados que se obtienen de la simulación con el modelo SWAN.

$$UP = \begin{vmatrix} 0.9 & 0 \\ 0.2 & 0.1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} 0 & 0.6 \\ 0.1 & 0.1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} 0.1 & 0 \\ 0.7 & 0.4 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} 0.3 & 0 \\ 0.1 & 0.8 \end{vmatrix} \quad (13)$$

$$\alpha = \begin{vmatrix} 0.04 & 0 \\ 0.001 & 0.2 \end{vmatrix} \quad (14)$$

$$ERprop = \begin{vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{vmatrix} \quad (15)$$

$$UP * \alpha = ERprop \quad (16)$$

La operación matricial de la ecuación 16 genera las soluciones para obtener el espectro propagado, implica que cada coeficiente de agitación es característico del espectro real, por lo cual, multiplicándolo por el espectro unitario propagado, se obtendría el espectro real propagado.

$$\begin{vmatrix} 0.9 & 0 \\ 0.2 & 0.1 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 0.04 & 0 \\ 0.001 & 0.2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0.6 \\ 0.1 & 0.1 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 0.04 & 0 \\ 0.001 & 0.2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 0.1 & 0 \\ 0.7 & 0.4 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 0.04 & 0 \\ 0.001 & 0.2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 0.3 & 0 \\ 0.1 & 0.8 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 0.04 & 0 \\ 0.001 & 0.2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 0.0.9 * 0.04 + 0 * 0.001 & 0.9 * 0 + 0 * 0.2 \\ 0.2 * 0.04 + 0.1 * 0.001 & 0.2 * 0 + 0.1 * 0.2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0 * 0.04 + 0.6 * 0.001 & 0 * 0 + 0.6 * 0.2 \\ 0.1 * 0.04 + 0.1 * 0.001 & 0.1 * 0 + 0.1 * 0.2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 0.1 * 0.04 + 0 * 0.001 & 0.1 * 0 + 0 * 0.2 \\ 0.7 * 0.04 + 0.4 * 0.001 & 0.7 * 0 + 0.4 * 0.2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 0.3 * 0.04 + 0 * 0.001 & 0.3 * 0 + 0 * 0.2 \\ 0.1 * 0.04 + 0.8 * 0.001 & 0.1 * 0 + 0.8 * 0.2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 0.0.9 * 0.04 + 0 * 0.001 - \delta_{11} + 0.1 * 0 + 0 * 0.2 - \delta_{12} + 0.7 * 0.04 + 0.4 * 0.001 - \delta_{21} + 0.7 * 0 + 0.4 * 0.2 - \delta_{22} = 0 \\ 0 * 0.04 + 0.6 * 0.001 - \delta_{11} + 0 * 0 + 0.6 * 0.2 - \delta_{12} + 0.1 * 0.04 + 0.1 * 0.001 - \delta_{21} + 0.1 * 0.04 + 0.8 * 0.001 - \delta_{22} = 0 \\ 0.1 * 0.04 + 0 * 0.001 - \delta_{11} + 0.1 * 0 + 0 * 0.2 - \delta_{12} + 0.7 * 0.04 + 0.4 * 0.001 - \delta_{21} + 0.7 * 0 + 0.4 * 0.2 - \delta_{22} = 0 \\ 0.3 * 0.04 + 0 * 0.001 - \delta_{11} + 0.3 * 0 + 0 * 0.2 - \delta_{12} + 0.1 * 0.04 + 0.8 * 0.001 - \delta_{21} + 0.1 * 0 + 0.8 * 0.2 - \delta_{22} = 0 \end{vmatrix}$$

Posterior al desarrollo algebraico, se obtiene el espectro propagado a un punto de interés. En el paso anterior, se realizó solo para un estado de mar, lo que implica, que este procedimiento se debe realizar por cada estado de mar.

Para el desarrollo de esta memoria se cuenta con 36 años de información espectral (108110 espectros), por lo cual, para realizar la transferencia espectral y resolver las matrices, se utilizan métodos numéricos.

10.2 CONFIGURACION DEL MODELO

El seteo (malla de cálculo) se configuró por medio del método de mallas estructuradas, con los comandos que se explican a continuación.

```
$*****HEADING*****  
$Propagación PROJ 'RED DE OLEAJE '01'  
SET NAUT
```

Se le da nombre a la modelación y se utiliza el comando SET NAUT para seleccionar coordenadas náuticas.

```
$*****MODEL INPUT*****  
MODE NONSTAT  
COORDINATES CART  
CGRID REGULAR 252990. 7062162 0. 200000. 510000. 399 1019 CIRCLE 120 flow 0.04  
msc 33  
INPGRID BOTTOM REGULAR 252990. 7062162 0. 2999 10199 50 50  
READINP BOTTOM -1. 'bat1_antof.txt' 3 0 FREE  
$  
BOUNDspec SEG IJ 399 1019 0 1019 0 1019 0 0 0 0 399 0 UNIF FILE 'Unitarios.bnd'
```

El input del modelo se configura con modo no estacionario, y las direcciones necesarias se ingresaron en coordenadas cartesianas. Lo anterior se justifica dado la utilización de espectros para la condición de borde, y la necesidad que el modelo simule todos los casos agrupados (480 casos en grupos de 50), el modelo es capaz de simular varios casos, pero se debe configurar el INPUT como no estacionario (no implica que las salidas sean no estacionarias, esto es solo para disminuir la cantidad de modelaciones)

Se utiliza el comando CGRID REGULAR para configurar la malla de cálculo. Donde los primeros dos términos son las coordenadas (0,0) de la malla, los dos términos siguientes son las dimensiones de la malla de cálculo (en metros) y los últimos dos términos son los espaciamientos de la malla (cantidad de celdas).

Con el comando CIRCLE 120 se indica al modelo que considere las direcciones espaciadas cada 3°, con el comando FLOW se indica que la frecuencia discretizada más baja es de 0.04 [Hz]. El comando MSC 33 define la resolución de la cuadrícula entre la frecuencia discreta más baja y más alta, esta distribución es logarítmica.

Con el comando INPGRID BOTTOM REGULAR, se configuró la malla batimétrica, donde los primeros dos términos corresponden al origen, los siguientes dos corresponden a la cantidad de espaciamientos de la malla y los últimos dos términos corresponden a la distancia entre espaciamientos (malla de 50 [m] x 50 [m]).

Los comandos READINP BOTTOM implican la lectura que realizó el modelo a la malla batimétrica de nombre -1. 'bat1_antof.txt', el modelo debe multiplicar por -1 a la malla para que pueda procesar los datos y resolver las ecuaciones.

Las condiciones de borde se configuran con los comandos BOUNDspec SEG IJ, con el comando UNIF FILE el modelo lee las condiciones de bordes asociados a un espectro unitario de aguas profundas.

El modo no estacionario (MODEL INPUT) es utilizado para que el modelo lea cada matriz, dado que el espectro unitario de entrada corresponde a una combinación entre frecuencias y direcciones (480 casos), es factible agruparlos en 50 casos (cada modelación con 50 espectros, que equivalen a 10 simulaciones por nodo), con el fin de minimizar la cantidad de modelaciones.

```
$*****PHYSICS*****  
OFF QUAD  
WCAP  
FRICION JONswap 0.038
```

Respecto a los procesos físicos, se desactivaron las interacciones no lineales ola a ola como son las quadruplets y triadas, fue activado whitecapping y la fricción de fondo.

```
$*****MODEL OUTPUT*****  
$  
NGRID 'CBORDE2' 288360. 7323768. 0. 100000. 180000. 499 899  
NESTOUT 'CBORDE2' 'Cond_Borde_inter'  
$  
GROUP 'salida1' SUBGRID 0 399 0 1019  
OUTPut OPTIons BLOCK 4 399  
BLOCK 'salida1' NOHEADER 'Hs_G.mat' LAY-OUT 3 HSIGN  
BLOCK 'salida1' NOHEADER 'Dir_G.mat' LAY-OUT 3 DIR  
BLOCK 'salida1' NOHEADER 'Dirp_G.mat' LAY-OUT 3 PDIR  
BLOCK 'salida1' NOHEADER 'Tm_G.mat' LAY-OUT 3 PER  
BLOCK 'salida1' NOHEADER 'Rtp_G.mat' LAY-OUT 3 RTP
```

La salida del modelo se configuró con los comandos NGRID que corresponden al anidado, los primeros dos términos corresponden al origen de la malla de cálculo anidada, el siguiente termino corresponde al ángulo (giro de la malla), los dos términos siguientes corresponden a las dimensiones de la malla (en metros), y los dos términos finales corresponden a los espaciamientos de la malla.

El comando NESTOUT se utilizó para guardar la condición de borde de la malla inferior, al interior del archivo guardado (condición de borde) existe información espectral de cada uno de los puntos frontera entre la malla superior e inferior.

Con los comandos GROUP y SUBGRID se definen las salidas del modelo y la dimensión de la matriz, con el comando OUTPUT OPTIONS BLOCK se indica que las salidas del modelo se realizaron en forma de matriz, formato útil para gráficos Mwd-Hs, Mwd- Tp, Pwd-Tp, Pwd-Hs, como se muestra en la ilustración 64.

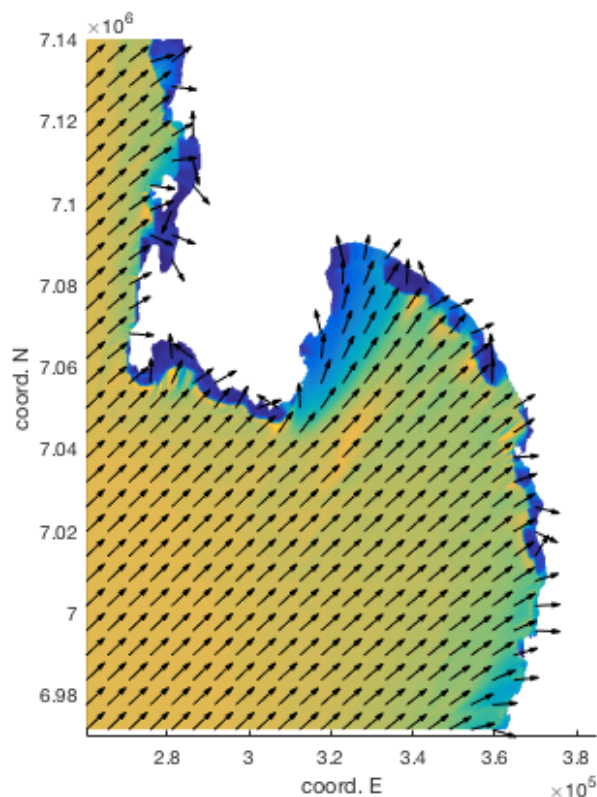


Ilustración 64, Propagación de oleaje sector Antofagasta – península de Mejillones

```

$*****CALCULATIONS*****
COMP STAT 20000101.010000
STOP

```

Con el comando COMP STAT se configuró la salida para que el modelo considere estados estacionarios.

Para el caso de las mallas intermedias y finas, las diferencias de los seteos son leves en relación a la configuración del mallado grueso, las diferencias se detallan a continuación.

```

BOUNDNEST1 NEST 'Cond_Borde_inter' CLOSED

```

Con el comando BOUNDNEST1 NEST el modelo absorbe las condiciones de contorno de la malla gruesa, es decir la frontera entre mallas gruesa – intermedia o intermedia – fina.

```
$RAY 'rname' 360847. 7379922. 363482. 7379834. 100 348211 7396400 348203 7393716
$ISo 'sname' 'rname' DEP 20
$
POINTS 'nodos' 360942 7379927
$
TABLE 'nodos' HEAD 'nodos1-1fN.tab' HS RTP DIR TM01 DEP XP YP
SPECout 'nodos' SPEC2D ABS 'espectroN1-1fN.spc'
```

Se presentan dos formas de extraer nodos con información, una de ellas es utilizando rayos e isoclinas (RAY ISo) y la otra es utilizando las coordenadas de los nodos (POINTS 'nodos' 360942 7379927) o grupos de nodos en una lista (POINTS 'nodos' 'nodoX.nod'). En el desarrollo de ésta memoria se utilizó el comando POINTS para obtener información de uno o varios nodos, el término posterior es la coordenada donde se ubica el nodo de extracción.

El comando TABLE se utilizó para extraer y grabar los parámetros de resumen Hm0, Tm02, MWD, RTpeak, Prof, coordenada X e Y del nodo. Con el comando SPECout se obtuvo el espectro unitario del nodo de interés.

10.3 DIFRACCIÓN DEL MODELO

La propagación de oleaje se constituye como una serie de fenómenos de transformación de energía, en este capítulo se analizará el comportamiento del modelo con respecto a la difracción. Para simular numéricamente el proceso físico, SWAN utiliza las ecuaciones de la pendiente suave omitiendo la fase.

Para determinar el comportamiento de la difracción se realizaron modelaciones activando y desactivando la difracción, este proceso se desarrolló en la península de Mejillones y en la isla de Juan Fernández.

10.3.1 METODOLOGÍA

Se realiza una modelación utilizando SWAN (V41.01), la zona de estudio corresponde a la región de Antofagasta, península de Mejillones, para realizar la modelación se utilizaron mallas estructuradas con la configuración que se presenta a continuación.

Mallado		
Malla Gruesa	x	500
	y	500
Malla Intermedia	x	300
	y	300
Malla Fina	x	100
	y	100

Tabla 7: Mallado caso difracción

La malla gruesa tiene una resolución de 500 metros, la malla intermedia tiene una resolución de 300 m y la malla fina tiene una resolución de 100 m.

La parametrización que realiza SWAN tiene una particularidad a la hora de realizar la modelación, con el fin de evitar divergencia, el Δx del mallado fino debe estar contenido entre $\frac{1}{5}$ y $\frac{1}{10}$ de la longitud de onda. El periodo utilizado para la revisión del mallado fue de 28 [s].

$$\frac{gT^2}{2\pi} \approx 976 \text{ m}$$
$$196 \text{ m} < \Delta x, \Delta y < 97 \text{ m}$$

Se consideró el archipiélago de Juan Fernández. El modelo se configuró con oleaje dirección Norte periodos desde los 3 a 15 [s].

Fuente: Google Earth



Ilustración 65, Zona de estudio Juan Fernández

Además, se consideró la península de Mejillones, dado su geografía, corresponde a una zona donde la difracción puede ser importante, la zona de estudio se puede observar en la ilustración 66.

Fuente: Google Earth

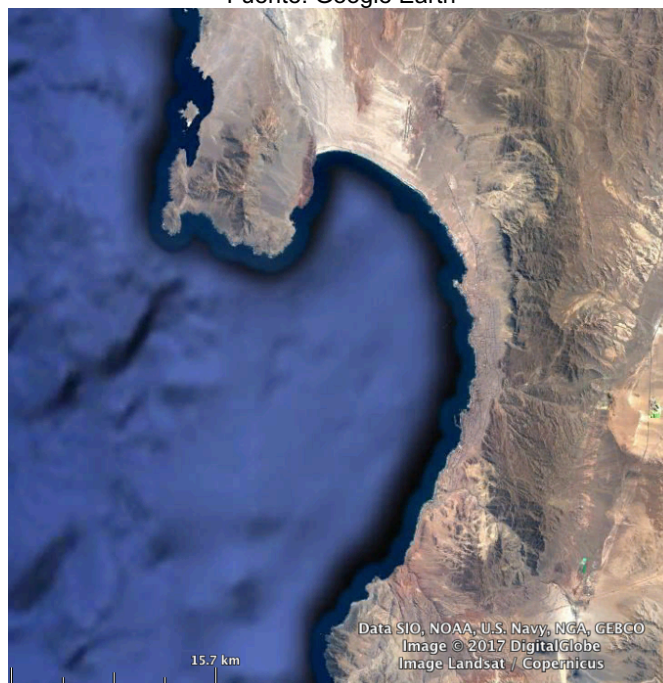


Ilustración 66, Zona de estudio – Dominio

La configuración del modelo adiciona la activación de la parametrización de difracción utilizando la codificación.

*******PHYSICS*******
DIFRACTION 1 0 0 1

El primer término del código SWAN corresponde a la activación de la difracción, el segundo término corresponde al parámetro de suavizado. Durante cada paso de suavizado el nodo de la malla de cálculo intercambia energía con el vecindario.

El tercer término corresponde al número de pasos del suavizado. Y el cuarto término corresponde a la adaptación de la velocidad de propagación en el espacio geográfico debido a la difracción.

La primera modelación se realizó en Juan Fernández, donde se utilizaron histogramas con el fin de observar las diferencias entre los coeficientes de agitación entre la difracción y la no difracción, se compararon los campos bidimensionales.

La difracción genera inestabilidad en el modelo, para los periodos desde los 15 [s] en adelante, para evitar esta complicación, se aumentaron las iteraciones a 500 (por defecto el modelo itera 50 veces) y se disminuyó el accuracy (convergencia) al 85%. Sin embargo, para periodos sobre 19, el modelo se vuelve inestable y no converge.

Para presentar los resultados, se utiliza la ecuación 17, con el fin de obtener el coeficiente de difracción, respecto a las direcciones, además se realiza un gráfico histograma comparativo, estos resultados se pueden ver en el punto 14.1.2 de la presente memoria.

$$K_d = \frac{H_{sig_d}}{H_{sig}}$$

Ecuación 17: Coeficiente de Agitación (Difracción)

10.3.2 RESULTADOS

En la ilustración 67 se observa una comparación entre diferencias de coeficientes de difracción (caso Tm02 9[s], Dir N), para lo cual se individualizó el coeficiente de agitación utilizando la ecuación 23.

Se utilizó la matriz del campo bidimensional para representar todo el dominio. Se observan que las variaciones comprenden entre los 0.95 y 1.05, con un peak en 1, que representa una diferencia del 2% entre ambos casos (difracción y no difracción).

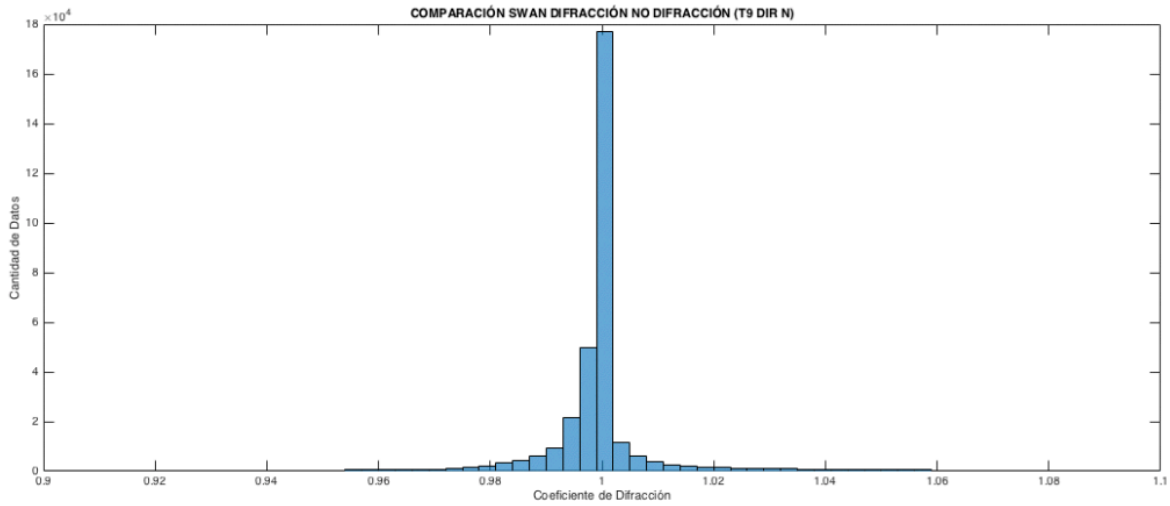


Ilustración 67, Histograma difracción - no difracción

Respecto a las direcciones, en la ilustración 68 se puede observar una escasa diferencia, con un peak obviamente en la dirección norte, y una dispersión angular asociada a los procesos de disipación principalmente por refracción.

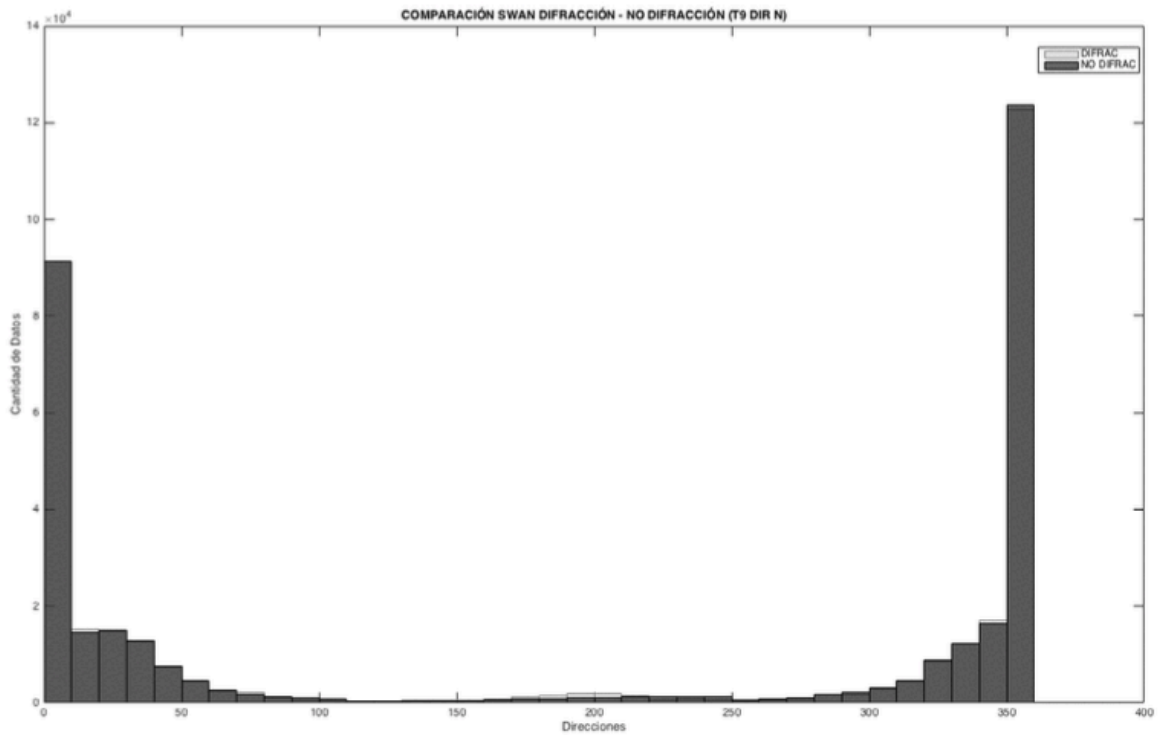


Ilustración 68, Histograma comparación difracción - no difracción

Respecto al campo bidimensional de la ilustración 69, se observa que la difracción tiene un pequeño suavizado, pero es poco perceptible, por lo cual se realizará el análisis en la península de mejillones, donde la ondulación puede ser más significativa.

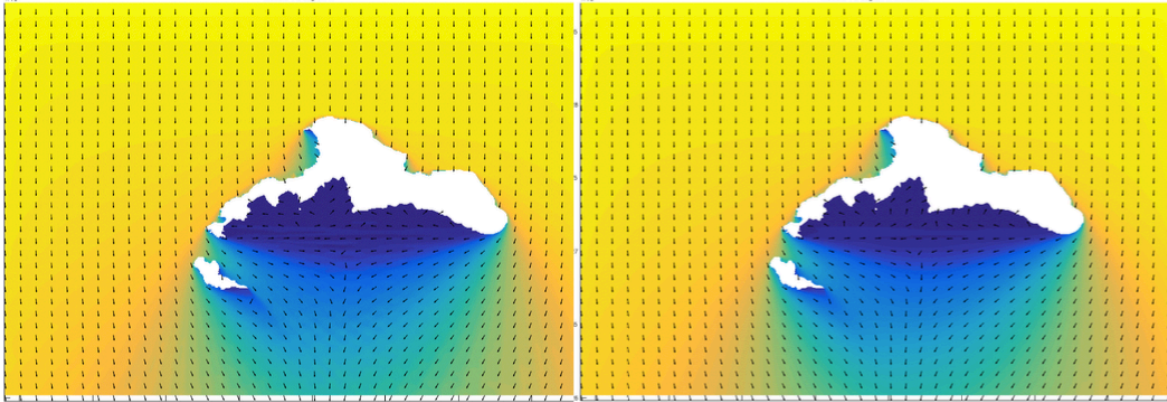


Ilustración 69, Campos bidimensionales – Comparación

Utilizando un periodo mayor, se tiene el caso dirección Norte, periodo T 11 [s], como se puede ver en la figura 130, donde se observan diferencias de un 2% con un peak en el coeficiente de agitación 1, que representa igualdad en los resultados, el comportamiento es gaussiano, las diferencias máximas se observan en el 5%, pero que representa una escasa cantidad de datos.

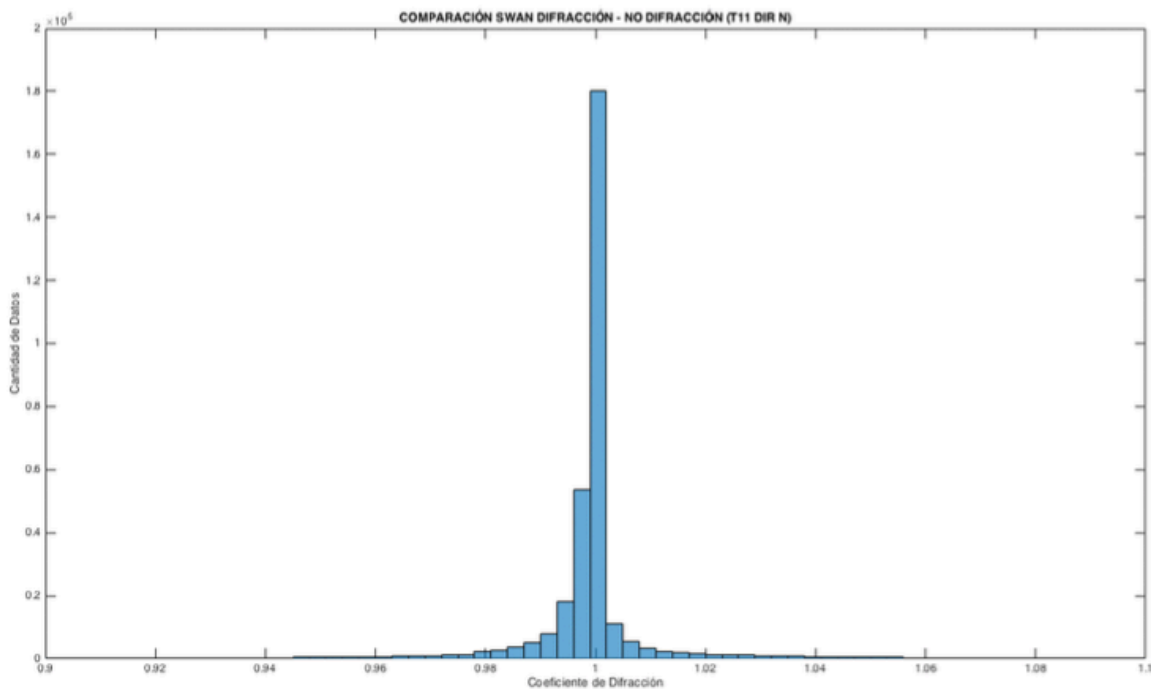


Ilustración 70, Histograma comparación difracción - no difracción

En términos de direcciones, en la ilustración 71 se observan leves diferencias, un peak con dirección norte, dispersión angular de aproximadamente 50°.

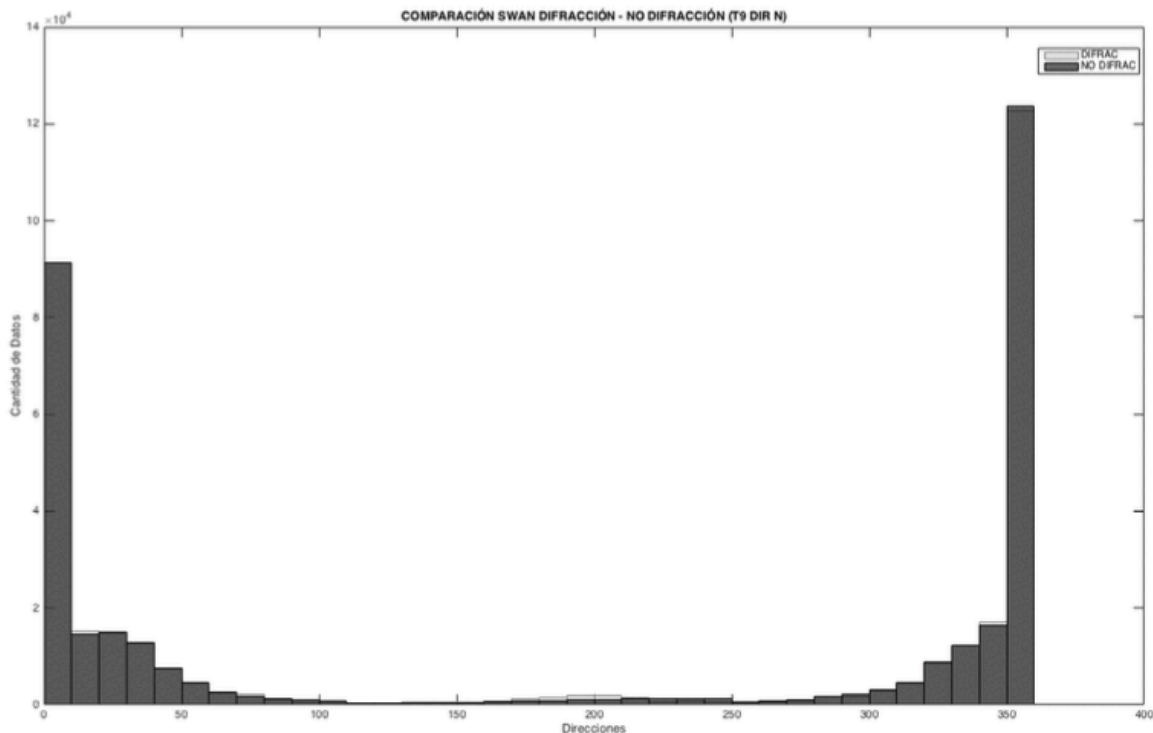


Ilustración 71, Histograma comparación direcciones - difracción - no difracción

Sin embargo, se consideran periodos bajos, donde aún no se generan problemas de convergencia en el modelo, por lo cual se revisan periodos mayores, como se muestra en la ilustración 72.

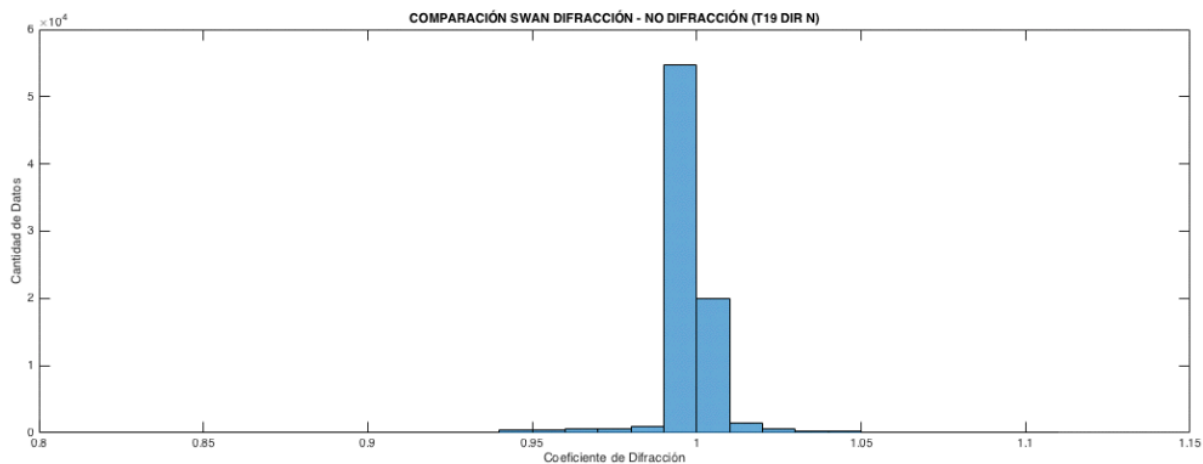


Ilustración 72, Histograma comparación swan difracción - no difracción

Se puede observar que el peak se encuentra en 0.99, lo que incurre en una diferencia en el peak de un 1%, y la máxima diferencia se puede apreciar en torno a un 5%. Se observan pequeñas diferencias entre los campos bidimensionales, utilizando difracción y no difracción.

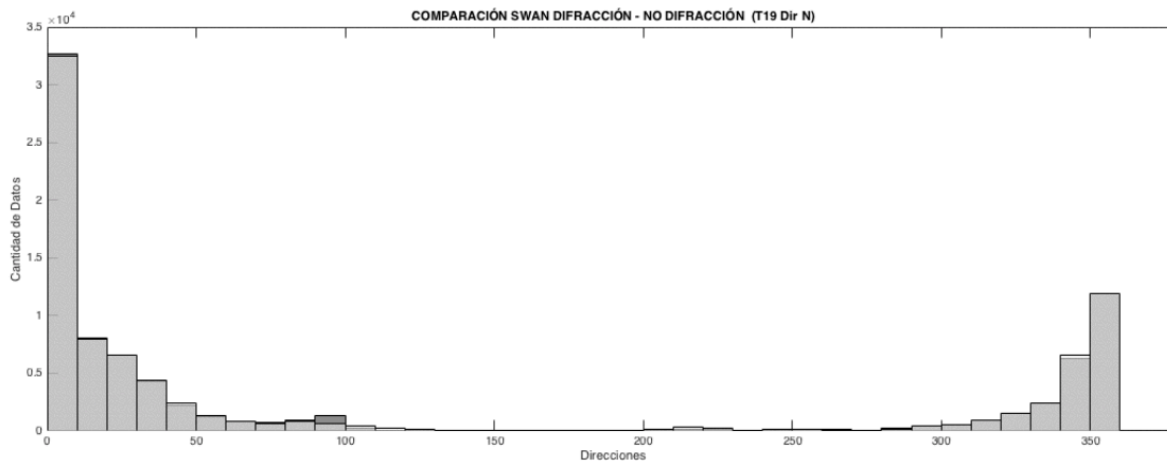


Ilustración 73, Histograma comparación direcciones difracción - no difracción

En la ilustración 74 se observa el campo bidimensional, donde diferencias respecto a las direcciones son menores, en la zona sombría de la propagación se observan algunas ondulaciones numéricas asociadas a la no difracción y a la parametrización utilizada por SWAN para la difracción, para revisar con más detalles este efecto, se realizará el mismo análisis en el sector península de Mejillones.

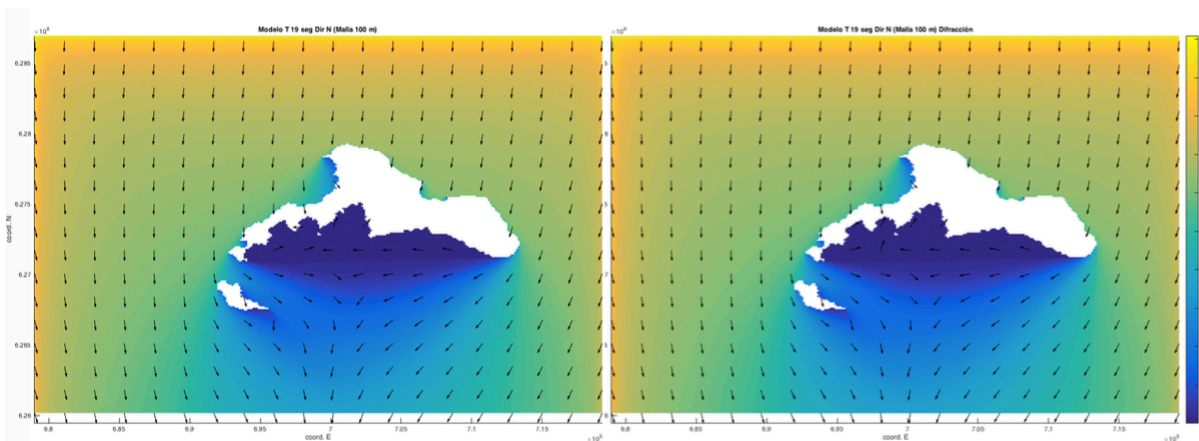


Ilustración 74, Campos bidimensionales

Como se observó en las ilustraciones anteriores, se puede ver ondulaciones numéricas en el modelo, con el objetivo de analizar con mayor detalle estas ondulaciones, se considera la ilustración 75, donde se muestra el dominio de Antofagasta.

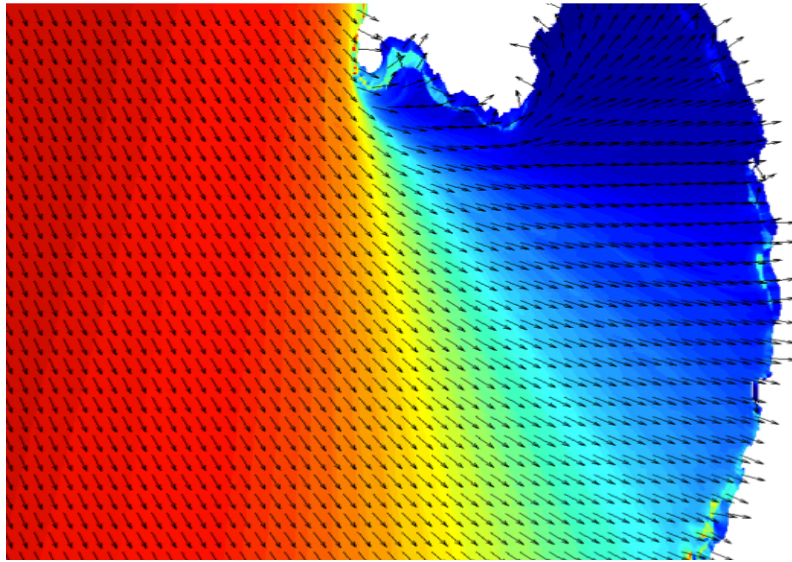


Ilustración 75, Campos bidimensionales

En la ilustración 76 se muestran las ondulaciones numéricas, para realizar un análisis de las distintas fases de la ondulación, se han elegido 2 nodos cercanos que estén en distintas fases de la ondulación, cuyas coordenadas se pueden revisar en la tabla 14.



Ilustración 76, Campos bidimensionales - comparación difracción - no difracción

	Coordenadas	
	Este	Norte
Nodo 1	348397	7388497
Nodo 2	348688	7388778

Tabla 8: Localización nodos

En la tabla 9, se observa una comparación de los nodos cuyas coordenadas se pueden revisar en la tabla anterior, se tiene una diferencia en altura de 1.7 [mm], en la dirección se tiene una diferencia de 1.3° y en el periodo se tiene una diferencia de 0.2 [s].

Hsig	RTPeak	Dir	Periodo
0,2538	10,6024	299,445	9,2119
0,2368	10,6024	298,109	9,0105

Tabla 9: Comparación parámetros de resumen

10.3.3 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

La difracción es un importante efecto no lineal de propagación de energía, que el modelo SWAN no resuelve, la difracción corresponde a una parametrización de las ecuaciones de la pendiente suave omitiendo la fase.

La parametrización de la difracción tiene varias limitaciones que lo hacen complejo de desarrollar, sobre todo cuando el estudio implica resoluciones mayores a la que el modelo con difracción no puede calcular, generando divergencias e inestabilidades.

Para efectos de esta memoria no se consideró la activación de la difracción, ya que, para efectos de la malla de cálculo utilizada, el modelo generaba divergencia en periodos altos, mientras que, en periodos bajos, si bien los efectos de la difracción son importantes, no representan grandes amenazas en el diseño.

Si requiere realizar un estudio donde la difracción sea relevante, se recomienda utilizar modelos que resuelvan la fase, como modelos Boussinesq, MSE (parabólicos o elípticos) o NLSWE, donde no modelen la difracción, sino que la resuelvan.

10.4 INFORMACIÓN DE OLEAJE TRANSFERIDO

A continuación, se presentan los gráficos de clima de oleaje en las regiones estudiadas, estos gráficos se encuentran en detalle en el sitio web <http://www.oleajecostero.cl>, sitio web desarrollado como visor de contenido para el desarrollo de esta memoria.

10.4.1 REGIÓN DE ANTOFAGASTA

10.4.1.1 NODO 2-3

Fuente: Google Earth.

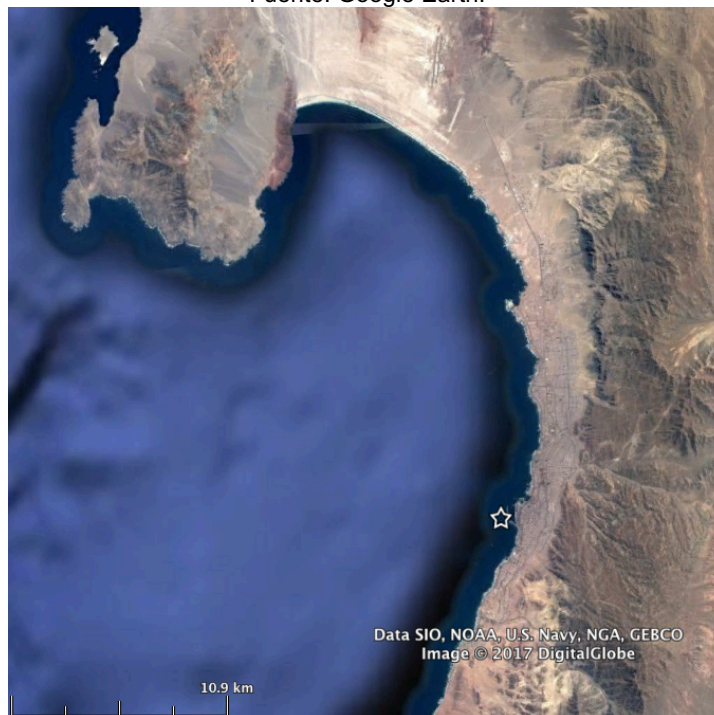


Ilustración 77, Georreferenciación Nodo 2-3

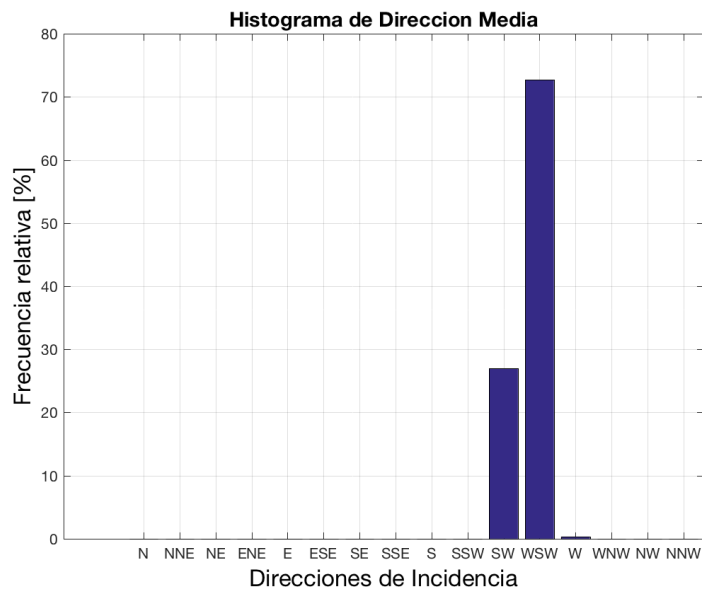


Ilustración 78, Histograma Dir

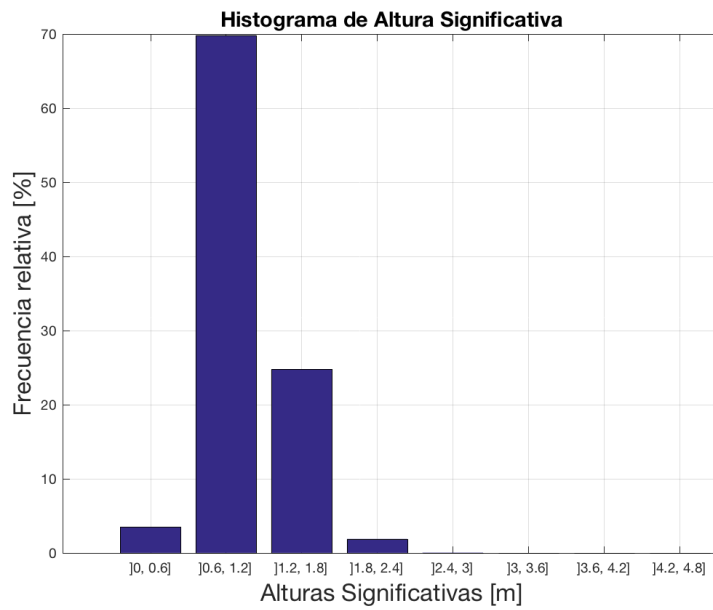


Ilustración 79, Histograma Hm0

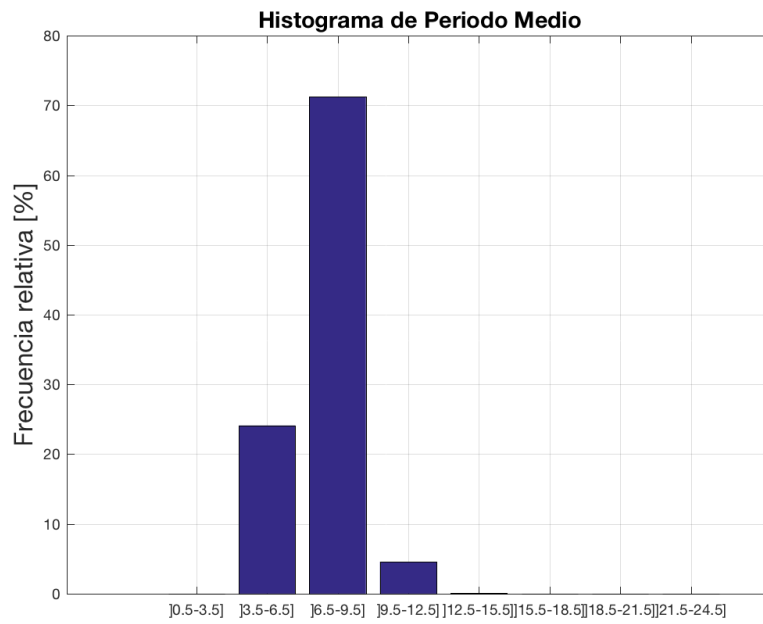


Ilustración 80, Histograma Tm

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	% Real	% Acumulado
0 - 0.5	0	0	0	0	0	3393	1789	0	4.7933	4.7933
0.5 - 1	0	0	0	0	0	42525	31692	0	68.6495	73.4428
1 - 1.5	0	0	0	0	0	15703	10414	0	24.1578	97.6006
1.5 - 2	0	0	0	0	0	996	1518	0	2.3254	99.9260
2 - 2.5	0	0	0	0	0	0	79	0	0.0731	99.9991
2.5 - 3	0	0	0	0	0	0	1	0	9.2498e-04	100
3 - 3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3.5 - 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
% Real	0	0	0	0	0	57.9197	42.0803	0	0	0
% Acumulado	0	0	0	0	0	57.9197	100	100	0	0

Ilustración 81, Tabla de Incidencia Dir - Hm0

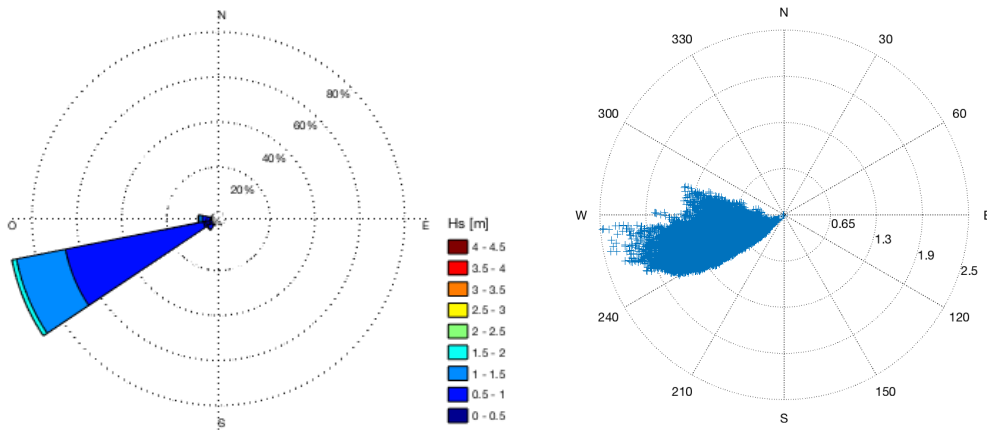


Ilustración 82, Rosa de oleaje y rosa de dispersión

	0.5 - 3.5	3.5 - 6.5	6.5 - 9.5	9.5 - 12.5	12.5 - 15.5	15.5 - 18.5	18.5 - 21.5	21.5 - 24.5	% Real	% Acumulado
0 - 0.6	0	7553	7219	118	0	0	0	0	13.7730	13.7730
0.6 - 1.2	0	32032	45826	2833	8	0	0	0	74.6453	88.4183
1.2 - 1.8	0	4833	6593	728	44	0	0	0	11.2830	99.7012
1.8 - 2.4	0	4	265	30	20	0	0	0	0.2951	99.9963
2.4 - 3	0	0	1	0	3	0	0	0	0.0037	100.0000
3 - 3.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
3.6 - 4.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
4.2 - 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
% Real	0	41.0896	55.4102	3.4308	0.0694	0	0	0	0	0
% Acumulado	0	41.0896	96.4999	99.9306	100	100	100	100	0	0

Ilustración 83, Tabla de Incidencia $T_m - H_m0$

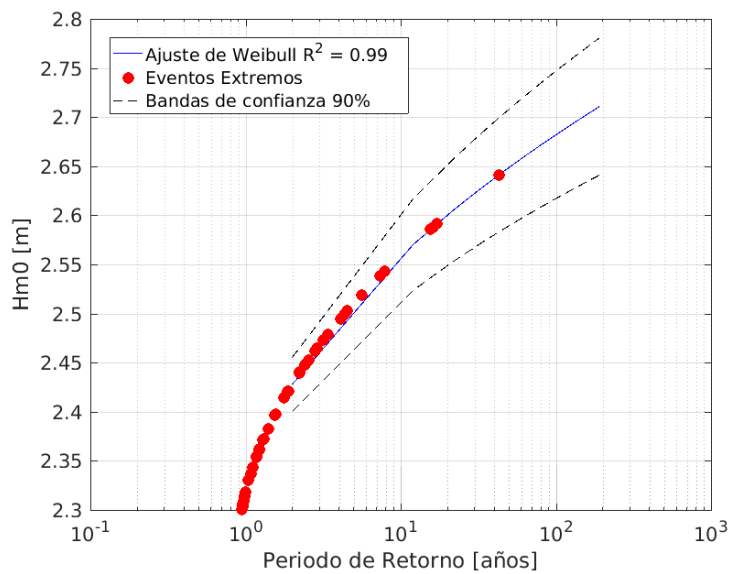


Ilustración 84, Clima Extremo

10.4.1.2 NODO 2-4

Fuente: Elaboración propia

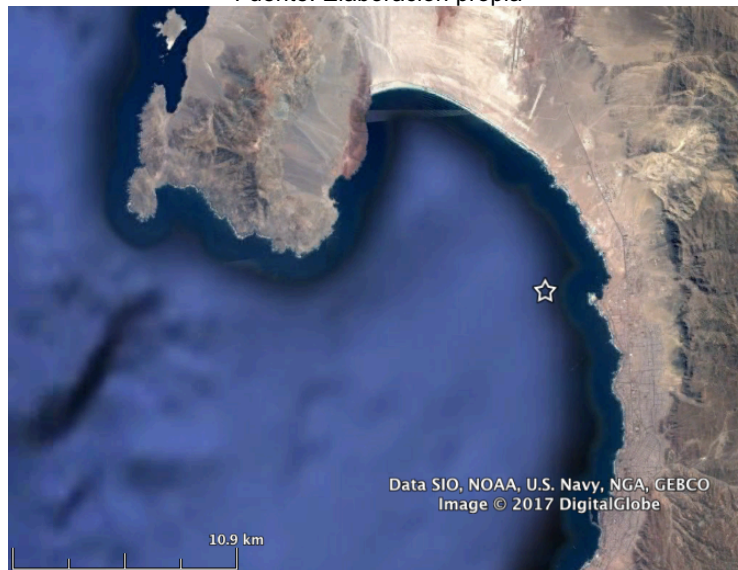


Ilustración 85, Georreferenciación Nodo 2-4

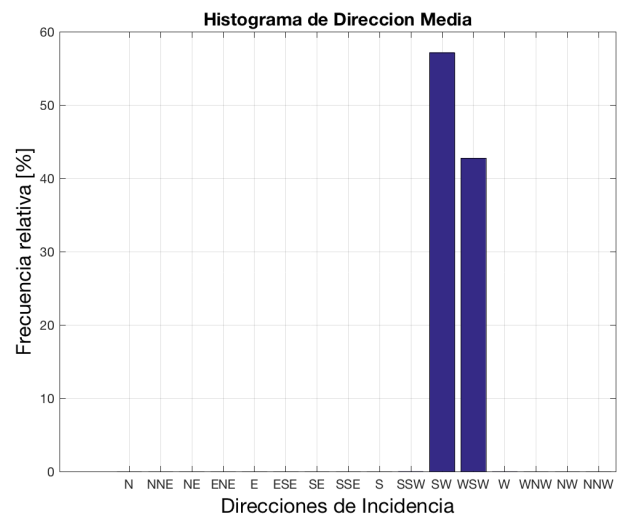


Ilustración 86, Histograma Dir

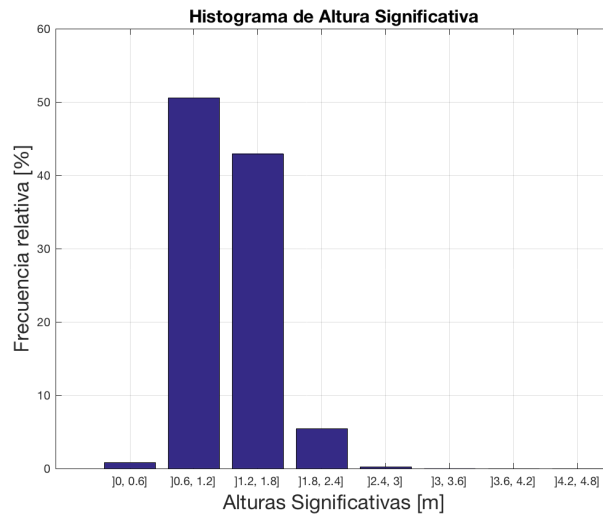


Ilustración 87, Histograma Hm0

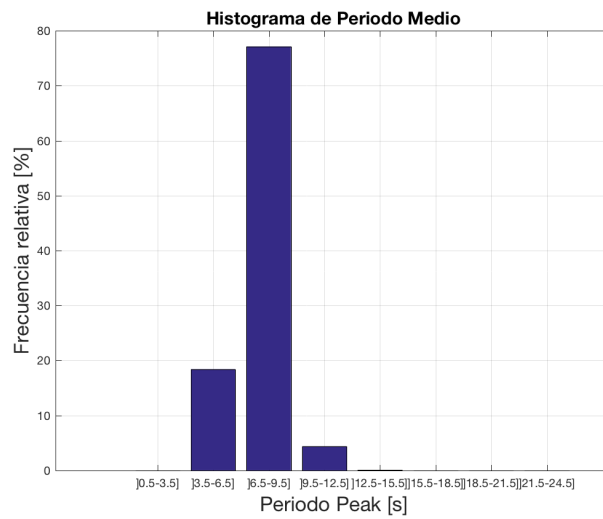


Ilustración 88, Histograma Tm

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	% Real	% Acumulado
0.5 - 3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5 - 6.5	0	0	0	0	0	19912	0	0	18.4183	18.4183
6.5 - 9.5	0	0	0	0	0	81830	1560	0	77.1344	95.5527
9.5 - 12.5	0	0	0	0	0	3492	1268	0	4.4029	99.9556
12.5 - 15.5	0	0	0	0	0	21	27	0	0.0444	100
15.5 - 18.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
18.5 - 21.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
21.5 - 25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
% Real	0	0	0	0	0	97.3592	2.6408	0	0	0
% Acumulado	0	0	0	0	0	97.3592	100	100	0	0

Ilustración 89, Histograma Dir – Tm

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	% Real	% Acumulado
0 - 0.5	0	0	0	0	0	197	7	0	0.1887	0.1887
0.5 - 1	0	0	0	0	0	25088	475	0	23.6454	23.8341
1 - 1.5	0	0	0	0	0	61718	1520	0	58.4941	82.3282
1.5 - 2	0	0	0	0	0	15886	747	0	15.3853	97.7134
2 - 2.5	0	0	0	0	0	2261	92	0	2.1765	99.8899
2.5 - 3	0	0	0	0	0	95	13	0	0.0999	99.9898
3 - 3.5	0	0	0	0	0	10	1	0	0.0102	100.0000
3.5 - 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
% Real	0	0	0	0	0	97.3592	2.6408	0	0	0
% Acumulado	0	0	0	0	0	97.3592	100	100	0	0

Ilustración 90, Histograma Dir – Hm0

	0.5 - 3.5	3.5 - 6.5	6.5 - 9.5	9.5 - 12.5	12.5 - 15.5	15.5 - 18.5	18.5 - 21.5	21.5 - 24.5	% Real	% Acumulado
0 - 0.6	0	281	587	14	0	0	0	0	0.8158	0.8158
0.6 - 1.2	0	10431	42354	1872	2	0	0	0	50.5587	51.3745
1.2 - 1.8	0	8719	35290	2445	11	0	0	0	42.9794	94.3539
1.8 - 2.4	0	481	4989	370	17	0	0	0	5.4176	99.7715
2.4 - 3	0	0	166	53	17	0	0	0	0.2183	99.9898
3 - 3.6	0	0	4	6	1	0	0	0	0.0102	100.0000
3.6 - 4.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
4.2 - 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
% Real	0	18.4183	77.1344	4.4029	0.0444	0	0	0	0	0
% Acumulado	0	18.4183	95.5527	99.9556	100	100	100	100	0	0

Ilustración 91, Histograma Tm – Hm0

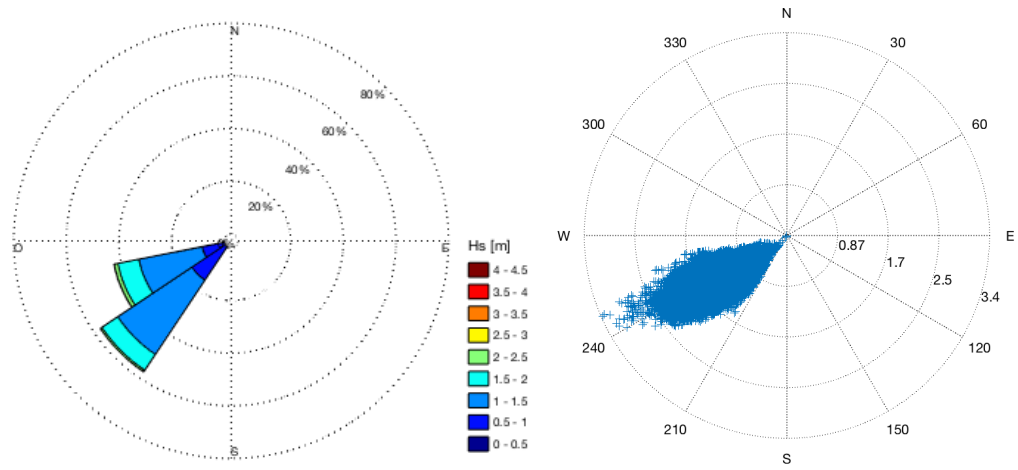


Ilustración 92, Rosas de oleaje y rosas de dispersión radial

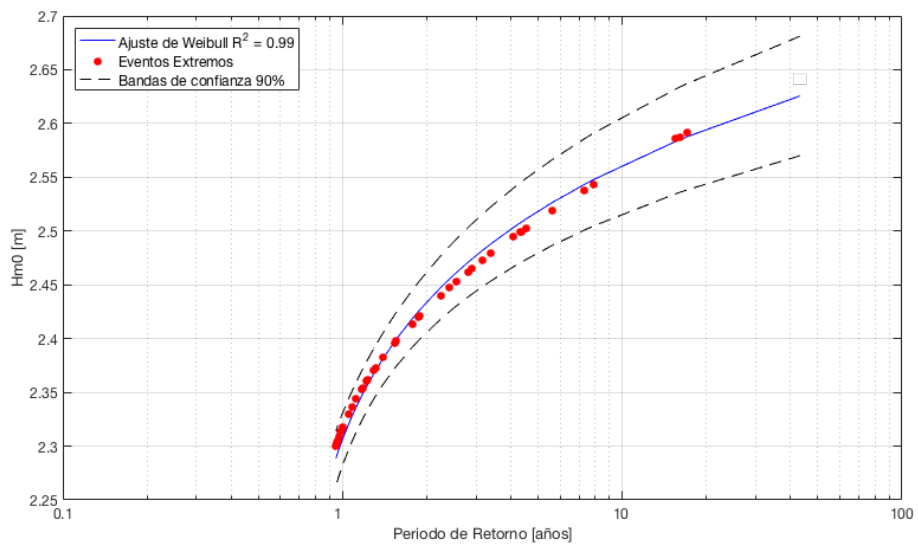


Ilustración 93, Clima Extremo

10.4.2 REGIÓN DE VALPARAISO

10.4.2.1 NODO 5-3

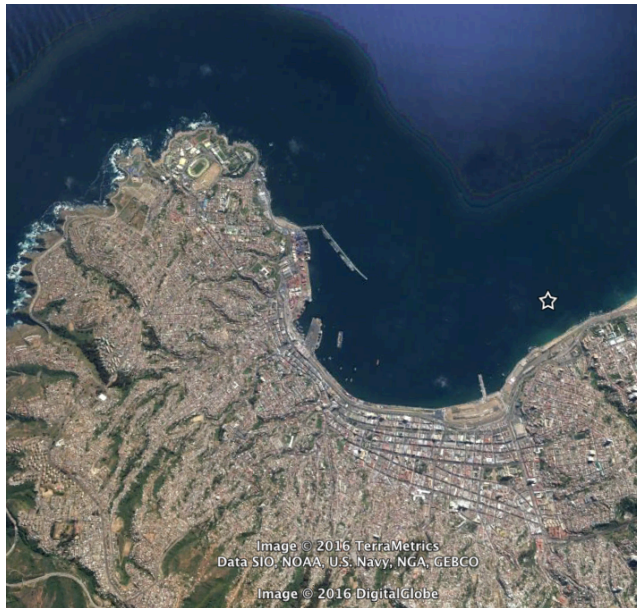


Ilustración 94, Georreferenciación nodo 2

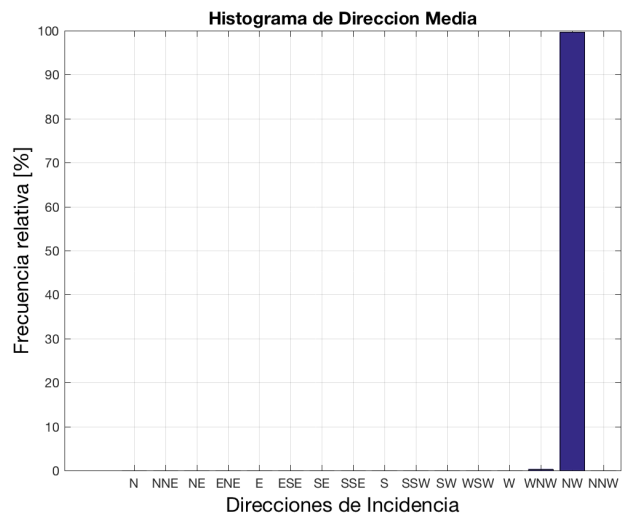


Ilustración 95, Histograma Dir

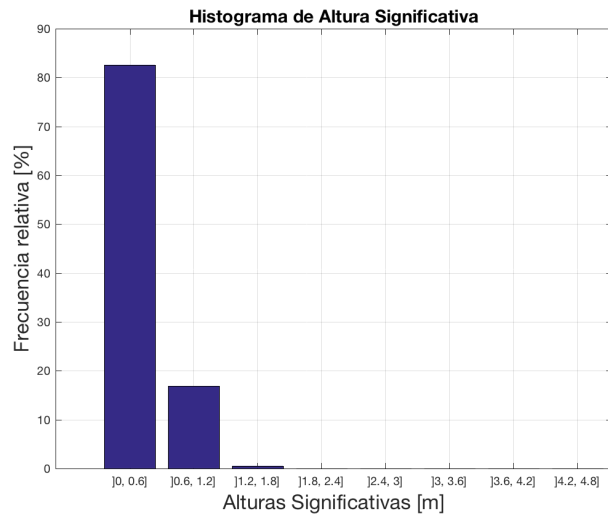


Ilustración 96, Histograma H_{m0}

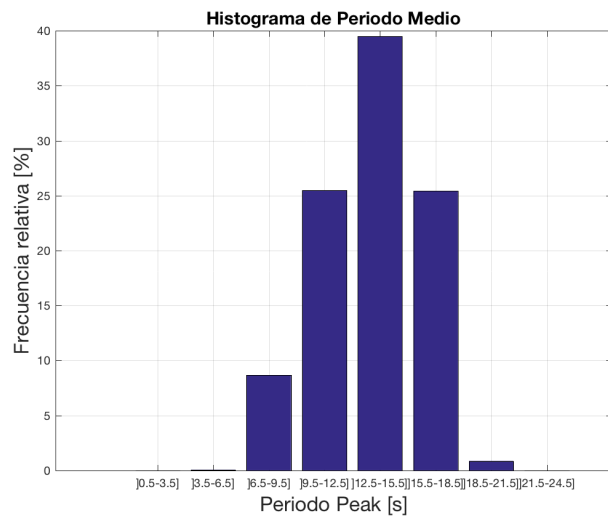


Ilustración 97, Histograma T_m

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	% Real	% Acumulado
0.5 - 3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5 - 6.5	0	0	0	0	0	57	0	0	0.0527	0.0527
6.5 - 9.5	0	0	0	0	0	28719	240	0	26.7866	26.8393
9.5 - 12.5	0	0	0	0	0	67561	2328	1	64.6471	91.4864
12.5 - 15.5	0	0	0	0	0	6983	1496	1	7.8439	99.3303
15.5 - 18.5	0	0	0	0	0	527	111	2	0.5920	99.9223
18.5 - 21.5	0	0	0	0	0	83	1	0	0.0777	100.0000
21.5 - 25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
% Real	0	0	0	0	0	96.1336	3.8627	0.0037	0	0
% Acumulado	0	0	0	0	0	96.1336	99.9963	100	0	0

Ilustración 98, Tabla de Incidencia Dir – Tm

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	% Real	% Acumulado
0 - 0.5	0	0	0	0	0	0	0	79657	73.6814	73.6814
0.5 - 1	0	0	0	0	0	0	0	26310	24.3363	98.0178
1 - 1.5	0	0	0	0	0	0	0	2024	1.8722	99.8899
1.5 - 2	0	0	0	0	0	0	0	119	0.1101	100
2 - 2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
2.5 - 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3 - 3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3.5 - 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
% Real	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0
% Acumulado	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0

Ilustración 99, Tabla de Incidencia Dir – Hm0

	0.5 - 3.5	3.5 - 6.5	6.5 - 9.5	9.5 - 12.5	12.5 - 15.5	15.5 - 18.5	18.5 - 21.5	21.5 - 24.5	% Real	% Acumulado
0 - 0.6	0	52	9300	27554	41485	10810	98	0	82.6001	82.6001
0.6 - 1.2	0	17	64	5	1203	16325	629	0	16.8745	99.4746
1.2 - 1.8	0	0	0	0	0	365	200	0	0.5226	99.9972
1.8 - 2.4	0	0	0	0	0	0	3	0	0.0028	100
2.4 - 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3 - 3.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3.6 - 4.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
4.2 - 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
% Real	0	0.0638	8.6615	25.4916	39.4857	25.4371	0.8602	0	0	0
% Acumulado	0	0.0638	8.7254	34.2170	73.7027	99.1398	100	100	0	0

Ilustración 100, Tabla de Incidencia Tm – Hm0

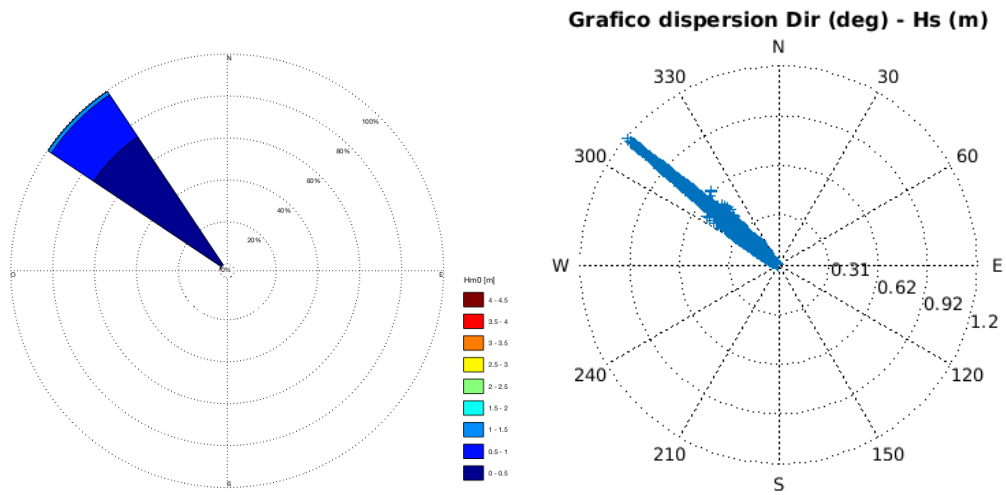


Ilustración 101, Rosa de oleaje y rosa de dispersión radial

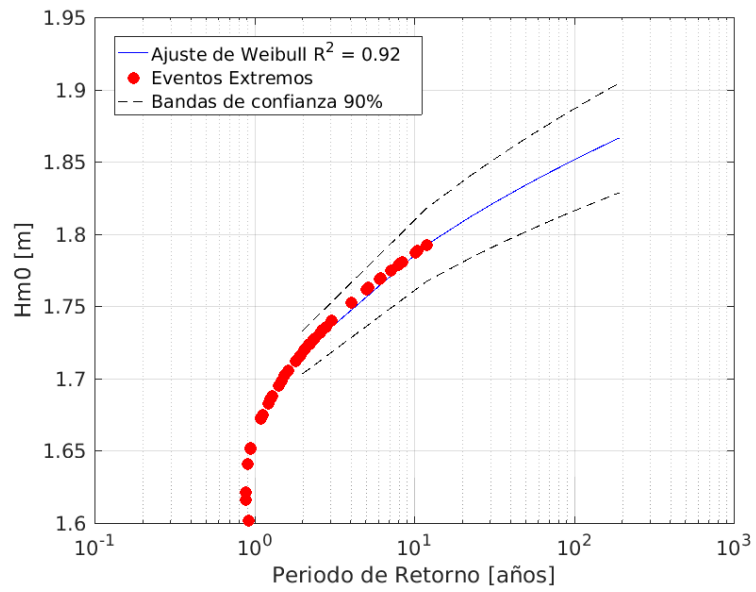


Ilustración 102, Clima Extremo – intervalos de confianza

10.4.2.2 NODO 5-4

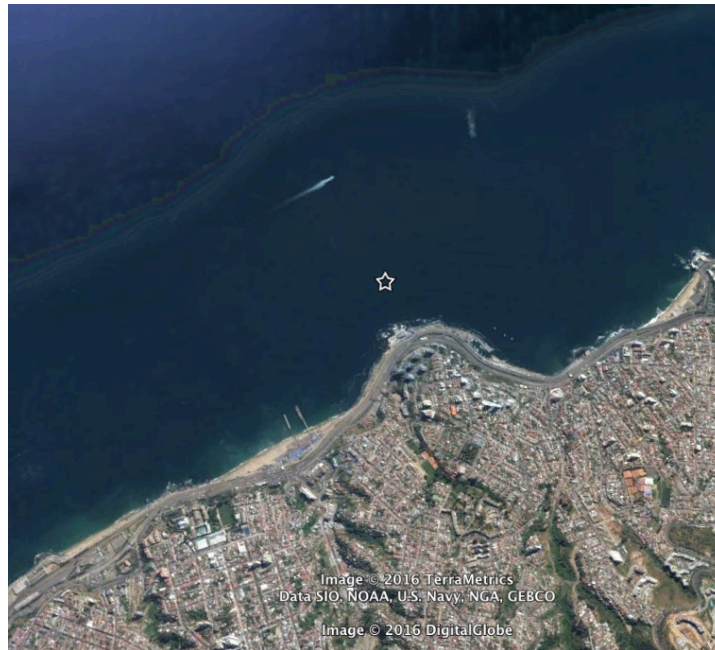


Ilustración 103, Georreferenciación nodo 3

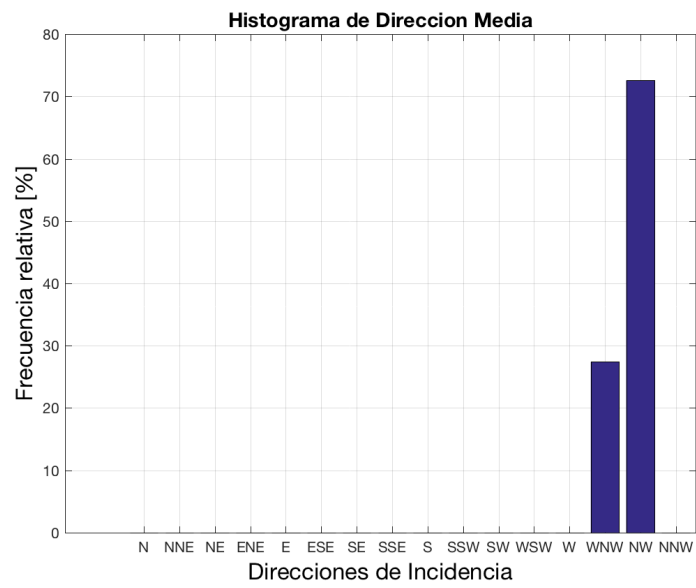


Ilustración 104, Histograma Dir

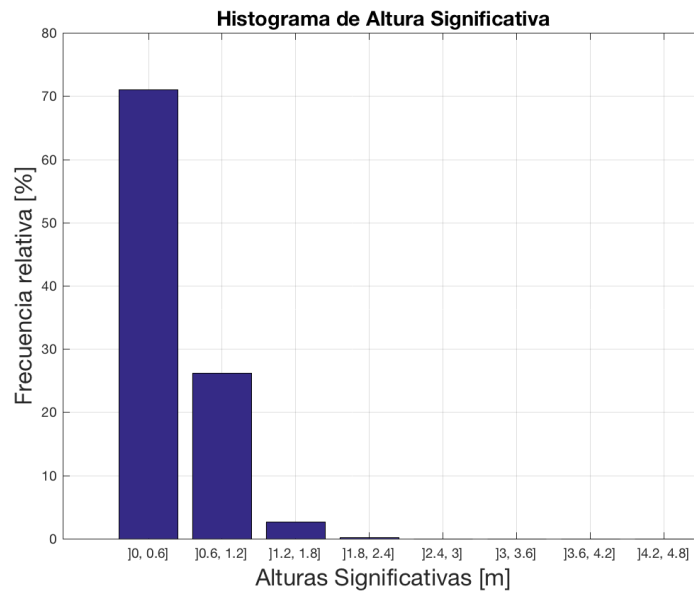


Ilustración 105, Histograma Hm0

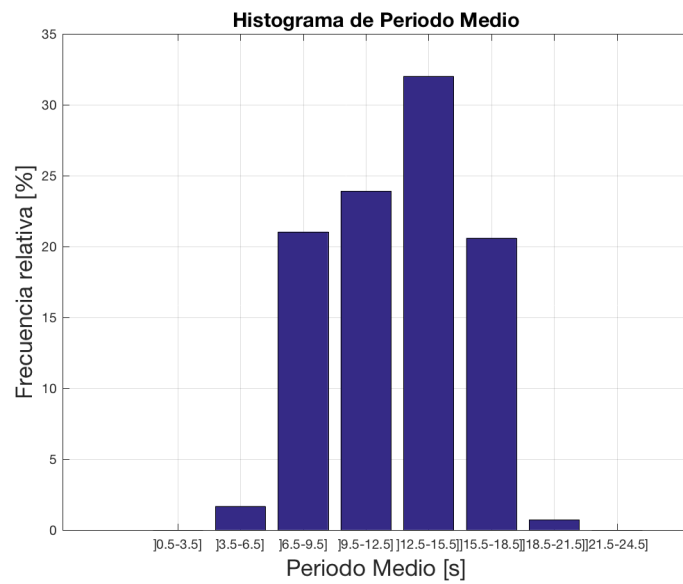


Ilustración 106, Histograma Tm

Fuente: Elaboración propia

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	% Real	% Acumulado
0.5 - 3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5 - 6.5	0	0	0	0	0	0	500	1318	1.6816	1.6816
6.5 - 9.5	0	0	0	0	0	0	121	22628	21.0425	22.7241
9.5 - 12.5	0	0	0	0	0	0	0	25852	23.9127	46.6368
12.5 - 15.5	0	0	0	0	0	0	0	34622	32.0248	78.6615
15.5 - 18.5	0	0	0	0	0	0	0	22279	20.6077	99.2693
18.5 - 21.5	0	0	0	0	0	0	0	790	0.7307	100
21.5 - 25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
% Real	0	0	0	0	0	0	0.5744	99.4256	0	0
% Acumulado	0	0	0	0	0	0	0.5744	100	0	0

Ilustración 107, Histograma Dir – Tm

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	% Real	% Acumulado
0 - 0.5	0	0	0	0	0	0	621	65318	60.9925	60.9925
0.5 - 1	0	0	0	0	0	0	0	34945	32.3236	93.3161
1 - 1.5	0	0	0	0	0	0	0	6540	6.0494	99.3655
1.5 - 2	0	0	0	0	0	0	0	610	0.5642	99.9297
2 - 2.5	0	0	0	0	0	0	0	76	0.0703	100.0000
2.5 - 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
3 - 3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
3.5 - 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
% Real	0	0	0	0	0	0	0.5744	99.4256	0	0
% Acumulado	0	0	0	0	0	0	0.5744	100	0	0

Ilustración 108, Histograma Dir – Hm0

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	% Real	% Acumulado
0 - 0.5	0	0	0	0	0	0	621	65318	60.9925	60.9925
0.5 - 1	0	0	0	0	0	0	0	34945	32.3236	93.3161
1 - 1.5	0	0	0	0	0	0	0	6540	6.0494	99.3655
1.5 - 2	0	0	0	0	0	0	0	610	0.5642	99.9297
2 - 2.5	0	0	0	0	0	0	0	76	0.0703	100.0000
2.5 - 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
3 - 3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
3.5 - 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
% Real	0	0	0	0	0	0	0.5744	99.4256	0	0
% Acumulado	0	0	0	0	0	0	0.5744	100	0	0

Ilustración 109, Histograma Tm

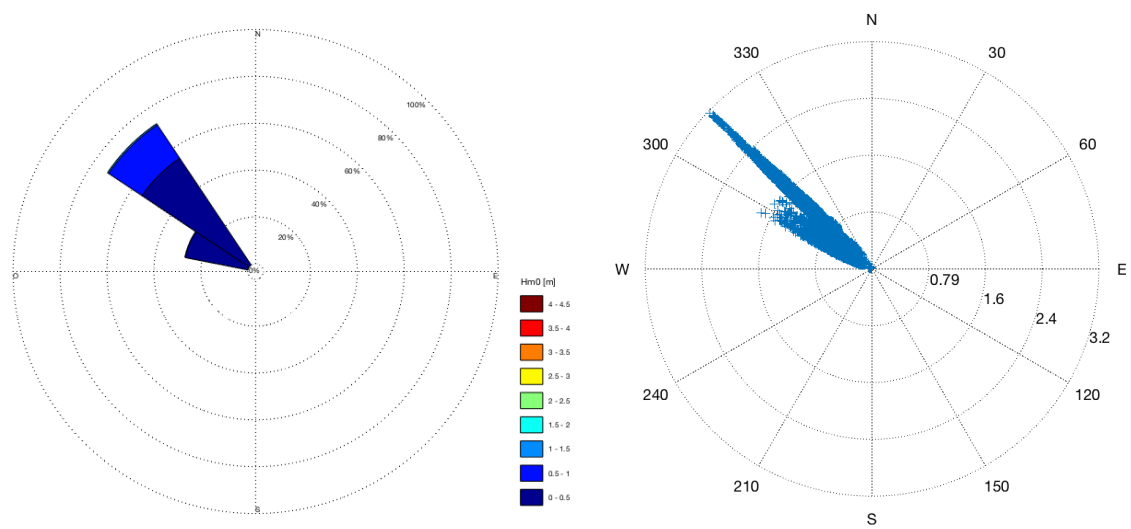


Ilustración 110, Rosa de oleaje y rosa de dispersión radial

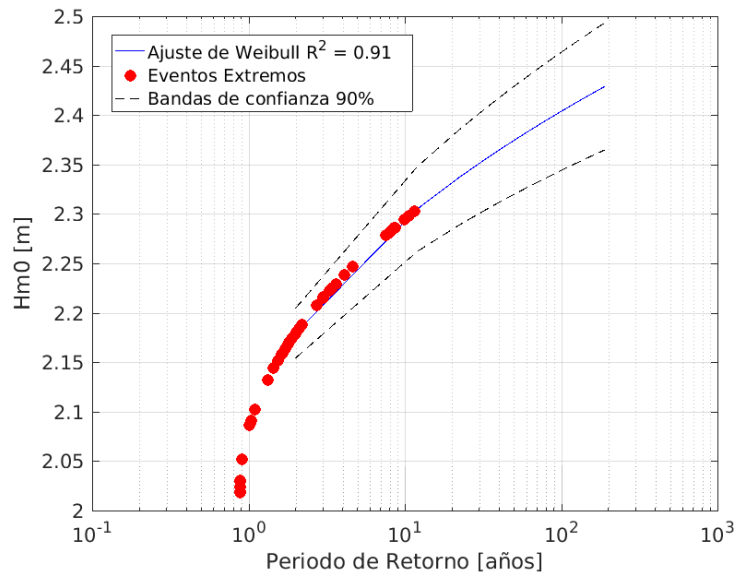


Ilustración 111, Clima Extremo – intervalos de confianza

10.4.2.3 NODO 5-5

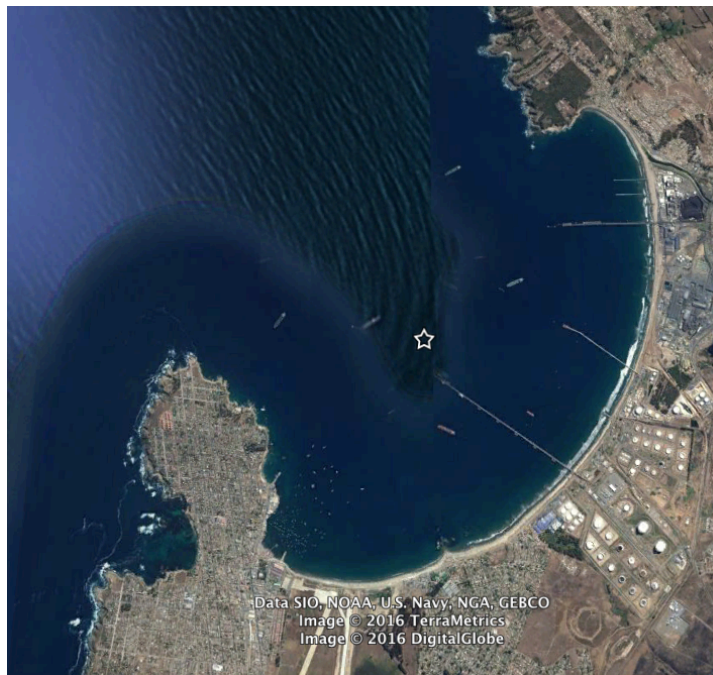


Ilustración 112, Georreferenciación nodo 5

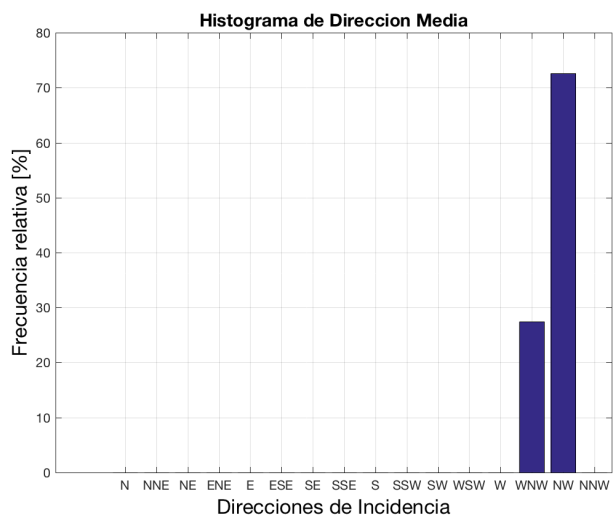


Ilustración 113, Histograma Dir

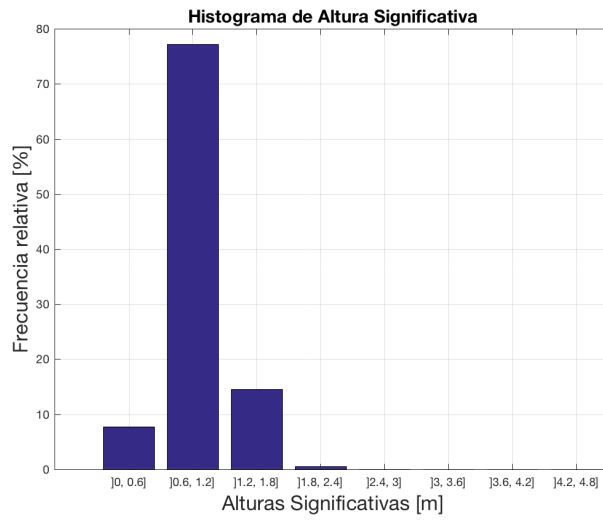


Ilustración 114, Histograma Hm0

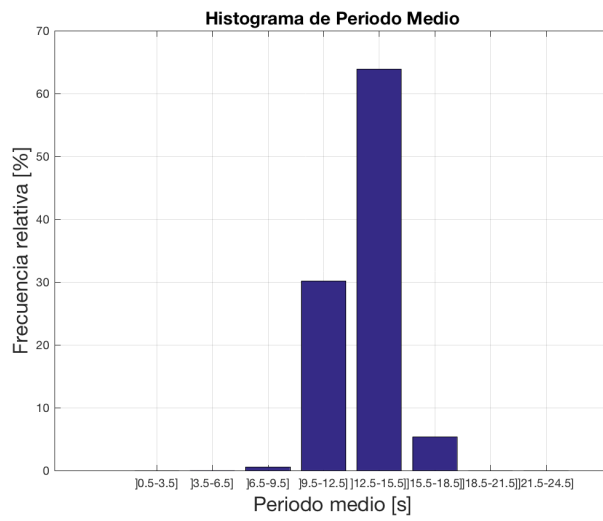


Ilustración 115, Histograma Tm

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	% Real	% Acumulado
0.5 - 3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5 - 6.5	0	0	0	0	0	0	11	2	0.0120	0.0120
6.5 - 9.5	0	0	0	0	0	0	520	88	0.5624	0.5744
9.5 - 12.5	0	0	0	0	0	0	13925	18675	30.1545	30.7289
12.5 - 15.5	0	0	0	0	0	0	0	69076	63.8942	94.6231
15.5 - 18.5	0	0	0	0	0	0	0	5809	5.3732	99.9963
18.5 - 21.5	0	0	0	0	0	0	0	4	0.0037	100.0000
21.5 - 25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.0000
% Real	0	0	0	0	0	0	13.3716	86.6284	0	0
% Acumulado	0	0	0	0	0	0	13.3716	100	0	0

Ilustración 116, Tabla de Incidencia Dir – Tm

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	% Real	% Acumulado
0 - 0.5	0	0	0	0	0	0	929	1651	2.3865	2.3865
0.5 - 1	0	0	0	0	0	0	10116	55456	60.6530	63.0395
1 - 1.5	0	0	0	0	0	0	3308	33307	33.8683	96.9078
1.5 - 2	0	0	0	0	0	0	103	3055	2.9211	99.8289
2 - 2.5	0	0	0	0	0	0	0	172	0.1591	99.9880
2.5 - 3	0	0	0	0	0	0	0	12	0.0111	99.9991
3 - 3.5	0	0	0	0	0	0	0	1	9.2498e-04	100
3.5 - 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
% Real	0	0	0	0	0	0	13.3716	86.6284	0	0
% Acumulado	0	0	0	0	0	0	13.3716	100	0	0

Ilustración 117, Tabla de Incidencia Dir – Hm0

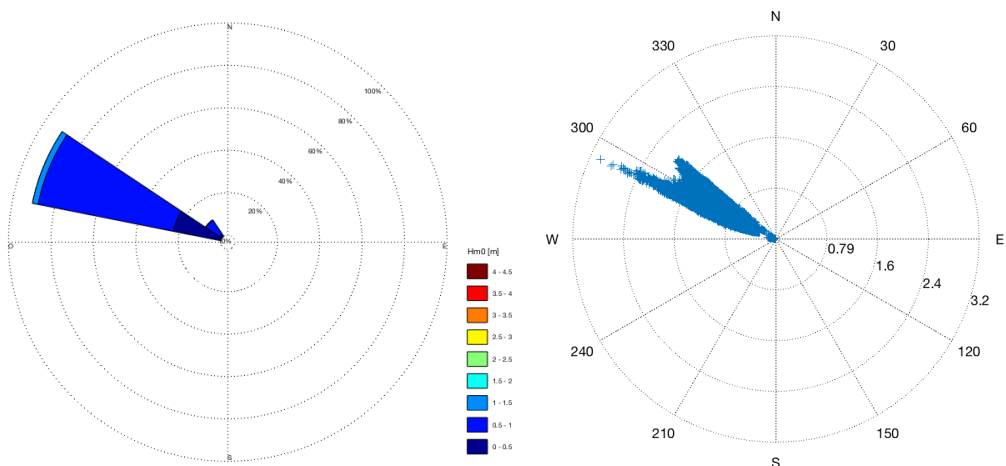


Ilustración 118, Rosas de oleaje y rosas de dispersión radial

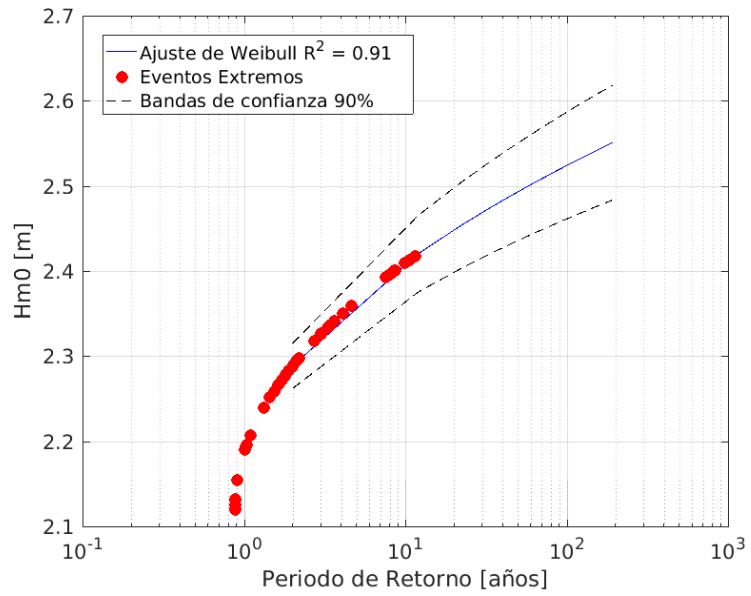


Ilustración 119, Clima Extremo – intervalo de confianza