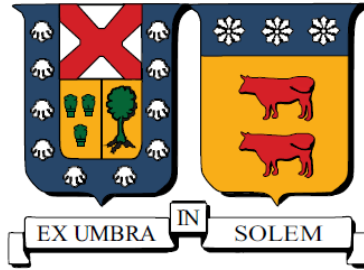


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO - CHILE



CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA DE LA MULTIMODALIDAD Y LOS VALORES
EXTREMOS DEL OLEAJE EN CHILE

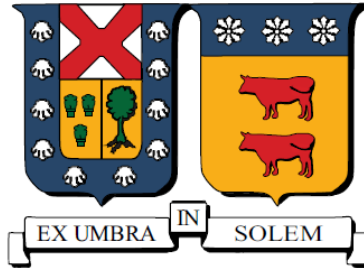
MARCO ANTONIO ÁLVAREZ RIVERA

Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
José Beyá Marshall

Marzo de 2018

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO - CHILE



CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA DE LA MULTIMODALIDAD Y LOS VALORES
EXTREMOS DEL OLEAJE EN CHILE

Memoria de titulación presentada por
MARCO ANTONIO ÁLVAREZ RIVERA

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
José Beyá Marshall
Profesor Co-referente
Patricio Catalán Mondaca

Marzo de 2018

*Dedicated to AiO
For her support and company in my college years*

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento entregado por el programa Fondef-IDeA de CONICYT para la realización del proyecto “Un Atlas de Oleaje para Chile” y el apoyo entregado por la Universidad de Valparaíso a través de la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica y el Centro de Investigación y Modelamiento de Fenómenos Aleatorios - Valparaíso (CIMFAV).

Agradezco también a mi familia por su apoyo incondicional, especialmente a mis padres por el sacrificio que han hecho para verme realizado profesionalmente. A Patricio Catalán y, en general, a todos los profesores de la Universidad Federico Santa María por sus enseñanzas durante mis años de estudio, a los profesores de la escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso por su apoyo al proyecto y principalmente a José Beyá por su constante y rigurosa supervisión.

A mis amigos de la Universidad Federico Santa María y a los que hice en la Universidad de Valparaíso durante el desarrollo del Atlas, principalmente a Ariel Gallardo, Héctor Hidalgo y Tracy González. También a Álvaro Ossandón, Felipe Lucero y Juan Carlos Dominguez por su ayuda de forma remota.

Finalmente agradezco a Charlotte Rech, Catalina Tejo, Valeria Rojas y a todas las personas que han influido de una u otra forma en mi vida, ya que me han ayudado a crecer y convertirme en quien soy ahora.

RESUMEN

En este trabajo se realiza una caracterización de la multimodalidad y los valores extremos del oleaje en Chile. Para esto se trabajó con una base de datos de 35 años de hindcast (reanálisis) generada para el proyecto “Un Atlas de Oleaje para Chile” mediante el modelo de generación numérica WaveWatch III. Esta base de datos fue calibrada y validada con mediciones de boyas y misiones satelitales, por lo que posee un alto grado de confiabilidad (Beyá et al., 2017).

El trabajo que se hizo con esta base involucra métodos de análisis clásicos utilizados ampliamente en el campo de la ingeniería marítima y técnicas desarrolladas en los últimos años que permiten describir el oleaje de forma más precisa. Además, se desarrollaron nuevas formas de caracterización del oleaje que se idearon con el fin de presentar la mayor cantidad de información de la forma más clara posible.

Uno de los análisis realizados en este estudio es la caracterización de los eventos extremos y el cálculo de periodos de retorno utilizando una y dos variables. El primer método es el que generalmente se usa para estimar la recurrencia de un evento energético caracterizado sólo por su altura, mientras que el método bivariado desarrollado en este estudio permite caracterizar estos eventos por medio de su altura significativa y periodo medio, obteniéndose valores muy distintos entre ambos métodos para aquellos eventos de periodos de oleaje atípicos. La caracterización de estos eventos mostró que las alturas van desde los 3.9 m a los 16.5 m, con periodos medios entre los 7 s y 16 s y que, si bien la mayoría de las tormentas tiene su origen lejos de la costa, en la zona Austral del océano Pacífico, existen otras cuyo origen está en el hemisferio norte o son de generación local.

Otro análisis corresponde a la cuantificación de la multimodalidad presente a lo largo de la costa de Chile, obteniéndose un gran porcentaje de oleaje bimodal durante los meses de verano para la zona centro y norte. Para el territorio insular la multimodalidad es aún más notoria llegando a tener en Isla de Pascua más de tres modos el 42% del tiempo. Los modos más recurrentes en la zona centro y norte corresponden a mar de fondo del suroeste y del noroeste, siendo el primero el más energético y, por consiguiente, el que presenta las mayores alturas de ola. A medida que se avanza hacia el sur el mar de fondo del suroeste se ve transformado gradualmente en uno del oeste debido a la dirección desde la que incide el oleaje, llegando a la zona austral prácticamente sin presencia de oleaje del sur.

Finalmente cabe destacar que existen varias publicaciones de índole internacional que respaldan este trabajo, entre las cuales destacan: “Comparación de análisis extremo uni y bivariado para marejadas recientes en Chile” (Álvarez et al., 2016), “Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database” (Beyá et al., 2017) y el “Atlas de Oleaje de Chile” (Beyá et al., 2016), documento que presenta gran parte de los resultados aquí expuestos y que se encuentra disponible para su descarga en www.oleaje.uv.cl.

Palabras clave: Oleaje extremo, periodo de retorno bivariado, multimodalidad, particionamiento espectral.

ABSTRACT

In this work a characterization of the multimodality and extreme values of the waves in Chile is made. For this, a database of 35 years of hindcast (reanalysis) generated for the project "A Wave Atlas for Chile" using the model of numerical generation WaveWatch III is used. This database was calibrated and validated with measurements of buoy and satellite missions, so it has a high degree of reliability (Beyá et al., 2017).

The work that was done with this base involves classic methods of analysis widely used in the field of maritime engineering and techniques developed in the last years that allow to describe the wave more accurately. In addition, new methods of wave characterization were developed in order to present as much information as clearly as possible.

One of the analyzes carried out in this study is the characterization of extreme events and the calculation of return periods using one and two variables. The first method is the one generally used to estimate the recurrence of an energetic event characterized only by its height, while the bivariate method developed in this study allows to characterize these events using their significant height and average period, obtaining very different values between both methods for events of atypical waves periods. The characterization of these events showed that the heights range from 3.9 m to 16.5 m, with mean periods between 7 and 16 s and that, although most of the storms have their origin far from the coast, in the Austral zone of the Pacific Ocean, there are others that originate in the northern hemisphere or are of local generation.

Another analysis corresponds to the quantification of the multimodality present along the coast of Chile, obtaining a great percentage of bimodal wave during the summer for the central and north zone. For the island territory, multimodality is even more noticeable showing in Easter Island more than three modes 42% of the time. The most recurrent modes in the central and north zone correspond to the southwest and northwest swell, being the first the most energetic and, consequently, the one with the highest wave heights. Towards the south zone, the southwest swell is gradually transformed into a west swell due to the direction from which the waves surge, reaching the southern zone with practically no southern waves.

Finally, it should be noted that there are publications of international nature that support this work, among which stand out: "Comparación de análisis extremo uni y bivariado para marejadas recientes en Chile" (Álvarez et al., 2016), "Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database" (Beyá et al., 2017) and the "Atlas de Oleaje de Chile" (Beyá et al., 2016), document that shows much of the results here exposed and that is available for download in www.oleaje.uv.cl.

Keywords: Extreme wave, bivariate return period, multimodality, spectral partitioning.

GLOSARIO

AOC1:	Base de datos modelada con vientos ERA-Interim.
AOC2:	Base de datos modelada con vientos NOAA CFSR.
Clima extremo:	Comportamiento estadístico de largo plazo correspondiente a los valores más altos.
Clima medio:	Comportamiento estadístico de largo plazo correspondiente a los valores medios.
D_m:	Dirección media del oleaje.
D_p:	Dirección pico del oleaje.
Espectro de oleaje:	Representación matemática de la energía del oleaje. Puede ser unidimensional si está en función de una sola variable; frecuencia o dirección, o bidimensional si está en función de ambas.
Estado de mar:	Condición de oleaje en el mar que se considera estadísticamente estacionaria (constante). Se acepta convencionalmente que la duración de un estado de mar es de 3 h. El estado de mar representa a todos los fenómenos de la dinámica del oleaje, admitiendo que éstos tienen una variación lo suficientemente lenta para considerar al proceso como estacionario durante un cierto período de tiempo.
Fetch:	Distancia horizontal sobre la superficie del agua en la que actúa el viento que genera oleaje.
f_p:	Frecuencia pico del oleaje.
H_{m0}:	Altura significativa espectral.
Mar de fondo:	Oleaje ordenado con ondas más suaves y relativamente regulares que se propaga fuera de la zona de generación.
Mar de viento:	Oleaje caótico, desordenado, con crestas y valles angulosos, y en algunos casos con rotura frecuente, que está presente en la zona de generación, es decir, donde el viento incide y produce oleaje.
Marejada:	Evento de oleaje extremo que está asociado al cese de las actividades marítimas y en ocasiones a naufragios y daños en el borde costero.
Modo:	Componente del oleaje que por sus características espectrales puede ser diferenciado del resto del estado de mar. El oleaje unimodal presenta solo una componente de período (o frecuencia espectral) y dirección importante. Los oleajes bi-, tri- y, en general, multimodales presentan oleajes de menor intensidad que el principal, que pueden distinguirse de los otros por sus características espectrales.
Nodo:	Punto geográfico en el cual se obtienen datos de oleaje y que coincide con la malla computacional de salida del modelo WaveWatch III.
Partición espectral:	Porción del espectro de frecuencias y direcciones que corresponde a un modo.

Período de retorno:	Intervalo de tiempo promedio en el que se repite un evento mayor o igual a una determinada magnitud.
Q_p:	Agudeza de pico del espectro.
s:	Parámetro de dispersión direccional del oleaje.
Sea:	Mar de viento.
SHOA:	Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada.
Surazo:	Viento sur provocado por un chorro atmosférico costero de baja altura de carácter sinóptico que ocurre entre las latitudes 40°S y 26°S de mayor frecuencia e intensidad durante los meses de primavera y verano.
Swell:	Mar de fondo.
$T_{0,1}$:	Período medio espectral estimado a partir de los momentos de orden 0 y 1.
T_m:	Período medio del oleaje. Equivalente a $T_{0,1}$.
Tormenta:	Para efectos de este documento se utiliza indistintamente con el concepto de marejada y evento extremo.
T_p:	Período pico del oleaje.
Watershed:	Técnica basada en morfología matemática, que permite extraer las fronteras de las regiones dentro de una matriz, clasificando los elementos según su proximidad espacial, gradientes y homogeneidad.
Wave-Age:	Edad del oleaje. Cuando se inicia un campo de oleaje, las olas son cortas y viajan más lentamente que el viento, pero la frecuencia de las olas se acaba reduciendo y la velocidad de propagación aumenta equiparándose con la del viento.
WaveWatch III:	Modelo de tercera generación desarrollado por la National Oceanic and Atmospheric Administration de los E.U.A. (NOAA), capaz de simular los fenómenos de generación, propagación y disipación del oleaje.
Wind sea:	Mar de viento.
ε:	Ancho espectral.
ν:	Ancho de banda espectral.
γ:	Parámetro de acentuación del máximo espectral.

CONTENIDO

Agradecimientos.....	1
Resumen.....	2
Abstract	3
Glosario	4
Contenido	6
Índice de Figuras.....	8
Índice de Tablas	12
Introducción	14
1 Estado del Arte	15
2 Objetivos.....	23
2.1 Objetivo General	23
2.2 Objetivos Específicos.....	23
3 Metodología	24
3.1 Análisis de Clima Extremo	24
3.1.1 Gráfico de periodos de retorno univariado	24
3.1.2 Gráfico de periodos de retorno bivariado	25
3.2 Cálculo de parámetros espectrales de forma	27
3.3 Análisis Modal	28
3.4 Características de la base de datos	30
4 Resultados	32
4.1 Clima Extremo.....	32
4.1.1 Gráfico de periodos de retorno univariado y bivariado	32
4.1.2 Gráficos polares de dispersión	35
4.1.3 Gráficos de variación latitudinal	37
4.2 Parámetros espectrales de forma.....	38
4.2.1 Gráficos de variación latitudinal	39
4.2.2 Espectros unidimensionales de frecuencia y dirección	40
4.3 Multimodalidad.....	42
4.3.1 Tabla de distribución de modos	42
4.3.2 Tabla de los estados de mar más recurrentes.....	46
4.3.3 Gráfico de distribución de la energía espectral por modo	49
4.3.4 Gráficos de variación latitudinal	52
4.3.5 Tabla de incidencia por modo	53
5 Análisis y Discusión.....	55
5.1 Clima Extremo.....	55
5.2 Parámetros espectrales de forma	56
5.3 Multimodalidad.....	57
Conclusiones.....	59
Referencias	60
ANEXO A: Métodos de clasificación “swell-sea”	63
A.1 Gilhousen y Hervey (2001)	63
A.2 Wang y Hwang (2001).....	63

ANEXO B: Gráficos y tablas de los nodos que no se incluyeron en el cuerpo de este documento.	64
B.1 Clima Extremo	64
B.1.1 Gráficos de periodos de retorno univariado y bivariado	64
B.1.2 Gráficos polares de dispersión	69
B.2 Parámetros espectrales de forma	74
B.2.1 Espectros unidimensionales de frecuencia y dirección	74
B.3 Multimodalidad.....	80
B.3.1 Tablas de distribución de modos	80
B.3.2 Tablas de los estados de mar más recurrentes	88
B.3.3 Gráfico de distribución de le energía espectral por modo	96
ANEXO C: Series de tiempo de las tormentas y caracterización por estaciones	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Proceso de generación de mar de viento y de fondo (Lizano, 2003)	17
Figura 1.2: Forma del espectro de energía para un oleaje de viento (izq.) y de fondo (der.) (Figuras de elaboración propia, imágenes de Beyá et al., 2016)	18
Figura 3.1: Demostración del método de particionamiento espectral (Hanson y Phillips, 2001)	28
Figura 3.2: Malla del modelo y ubicación de los nodos (Beyá et al., 2016).....	31
Figura 4.1: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Iquique	33
Figura 4.2: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de B. Inglesa	33
Figura 4.3: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Valparaíso ...	33
Figura 4.4: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de B. Mansa	34
Figura 4.5: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de I. Almagro ...	34
Figura 4.6: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de I. Pascua.....	34
Figura 4.7: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Iquique.....	35
Figura 4.8: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de B. Inglesa.....	35
Figura 4.9: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Valparaíso	36
Figura 4.10: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de B. Mansa	36
Figura 4.11: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de I. Almagro	36
Figura 4.12: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de I. Pascua	36
Figura 4.13: H_{m0} para $T_R=50$ años según el método univariado para las bases AOC1 y AOC2, y según el método bivariado utilizando distintos periodos de oleaje para la base AOC1.....	37
Figura 4.14: Valores promedio, mínimos y máximos de H_{m0} y T_m	38
Figura 4.15: Valores promedio, percentil 5 y 95 de ε , ν , Qp , γ y s (Elaboración propia)	39
Figura 4.16: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Iquique	40
Figura 4.17: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de B. Inglesa ...	40
Figura 4.18: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Valparaíso .	41
Figura 4.19: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de B. Mansa ...	41
Figura 4.20: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de I. Almagro ..	41
Figura 4.21: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de I. Pascua	42
Figura 4.22: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Iquique.....	50
Figura 4.23: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de B. Inglesa.....	50
Figura 4.24: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Valparaíso	50
Figura 4.25: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de B. Mansa	50
Figura 4.26: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de I. Almagro	51
Figura 4.27: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de I. Pascua	51
Figura 4.28: Distribución porcentual de la modalidad del oleaje en los meses de Dic-Feb (izq.) y Jun-Ago (der.).....	52
Figura 4.29: Distribución porcentual de la energía por modo en los meses de Dic-Feb (izq.) y Jun-Ago (der.)	52
Figura 5.1: Distribución y ajuste de H_{m0} y T_m para la serie de eventos extremos del nodo de Valparaíso (Elaboración propia)	55
Figura 5.2: Porcentaje de energía de cada componente para el nodo de Valparaíso durante los meses de Dic-Feb (Elaboración propia)	58
Figura B.1: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Arica	64
Figura B.2: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Mejillones ...	64

Figura B.3: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Taltal.....	65
Figura B.4: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Huasco.....	65
Figura B.5: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Tongoy.....	65
Figura B.6: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Constitución	66
Figura B.7: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Talcahuano .	66
Figura B.8: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Puerto Saavedra	66
Figura B.9: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Chiloé	67
Figura B.10: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Archipiélago de Los Chonos.....	67
Figura B.11: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Golfo de Penas	67
Figura B.12: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Isla Esmeralda	68
Figura B.13: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Isla Contreras	68
Figura B.14: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Isla London	68
Figura B.15: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Islas Desventuradas.....	69
Figura B.16: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Archipiélago Juan Fernández.....	69
Figura B.17: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Arica.....	69
Figura B.18: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Mejillones	70
Figura B.19: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Taltal	70
Figura B.20: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Huasco	70
Figura B.21: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Tongoy	70
Figura B.22: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Constitución	71
Figura B.23: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Talcahuano	71
Figura B.24: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Puerto Saavedra	71
Figura B.25: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Chiloé.....	71
Figura B.26: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Archipiélago de Los Chonos	72
Figura B.27: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Golfo de Penas	72
Figura B.28: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Isla Esmeralda.....	72
Figura B.29: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Isla Contreras.....	72
Figura B.30: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Isla London	73
Figura B.31: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Islas Desventuradas	73
Figura B.32: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Archipiélago Juan Fernández	73
Figura B.33: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Arica	74
Figura B.34: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Mejillones .	74
Figura B.35: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Taltal	74
Figura B.36: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Huasco	75
Figura B.37: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Tongoy	75

Figura B.38: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Constitución	75
Figura B.39: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Talcahuano	76
Figura B.40: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Puerto Saavedra	76
Figura B.41: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Chiloé	76
Figura B.42: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Archipiélago de Los Chonos.....	77
Figura B.43: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Golfo de Penas	77
Figura B.44: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Isla Esmeralda	77
Figura B.45: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Isla Contreras	78
Figura B.46: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Isla London	78
Figura B.47: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Islas Desventuradas.....	78
Figura B.48: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Archipiélago Juan Fernández.....	79
Figura B.49: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Arica.....	96
Figura B.50: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Mejillones	96
Figura B.51: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Taltal	96
Figura B.52: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Huasco	96
Figura B.53: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Tongoy	97
Figura B.54: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Constitución.....	97
Figura B.55: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Talcahuano	97
Figura B.56: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Puerto Saavedra	97
Figura B.57: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Chiloé.....	98
Figura B.58: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Archipiélago de Los Chonos.....	98
Figura B.59: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Golfo de Penas.....	98
Figura B.60: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Isla Esmeralda	98
Figura B.61: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Isla Contreras.....	99
Figura B.62: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Isla London.....	99
Figura B.63: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Islas Desventuradas	99
Figura B.64: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Archipiélago Juan Fernández	99
Figura C.1: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Arica	100
Figura C.2: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Iquique	101
Figura C.3: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Mejillones.....	101
Figura C.4: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Taltal.....	101
Figura C.5: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de B. Inglesa	102

Figura C.6: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Huasco.....	102
Figura C.7: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Tongoy.....	102
Figura C.8: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Valparaíso.....	103
Figura C.9: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Constitución	103
Figura C.10: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Talcahuano	103
Figura C.11: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Puerto Saavedra	104
Figura C.12: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de B. Mansa.....	104
Figura C.13: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Chiloé	104
Figura C.14: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Archipiélago de Los Chonos	105
Figura C.15: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Golfo de Penas	105
Figura C.16: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Isla Esmeralda	105
Figura C.17: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de I. Almagro	106
Figura C.18: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Isla Contreras	106
Figura C.19: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Isla London	106
Figura C.20: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Islas Desventuradas.....	107
Figura C.21: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de I. Pascua	107
Figura C.22: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Archipiélago Juan Fernández	107
Figura C.23: Valores promedio, mínimos y máximos de duración de las tormentas	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Número de identificación para cada tipo de partición	29
Tabla 3.2: Coordenadas de los nodos (Beyá et al., 2016)	30
Tabla 4.1: Nodos seleccionados para comparar resultados	32
Tabla 4.2: Parámetros espectrales promedio por nodo	38
Tabla 4.3: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Iquique	43
Tabla 4.4: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de B. Inglesa	43
Tabla 4.5: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Valparaíso	44
Tabla 4.6: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de B. Mansa	44
Tabla 4.7: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de I. Almagro	45
Tabla 4.8: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de I. Pascua	45
Tabla 4.9: Distribución porcentual de casos para el nodo de Iquique	46
Tabla 4.10: Distribución porcentual de casos para el nodo de B. Inglesa	47
Tabla 4.11: Distribución porcentual de casos para el nodo de Valparaíso	47
Tabla 4.12: Distribución porcentual de casos para el nodo de B. Mansa	48
Tabla 4.13: Distribución porcentual de casos para el nodo de I. Almagro	48
Tabla 4.14: Distribución porcentual de casos para el nodo de I. Pascua	49
Tabla 4.15: Incidencia porcentual de cada modo durante los meses de Dic-Feb	53
Tabla 4.16: Incidencia porcentual de cada modo durante los meses de Jun-Ago	54
Tabla B.1: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Arica	80
Tabla B.2: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Mejillones	80
Tabla B.3: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Taltal	81
Tabla B.4: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Huasco	81
Tabla B.5: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Tongoy	82
Tabla B.6: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Constitución	82
Tabla B.7: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Talcahuano	83
Tabla B.8: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Puerto Saavedra	83
Tabla B.9: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Chiloé	84
Tabla B.10: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Archipiélago de Los Chonos	84
Tabla B.11: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Golfo de Penas	85
Tabla B.12: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Isla Esmeralda	85
Tabla B.13: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Isla Contreras	86
Tabla B.14: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Isla London	86
Tabla B.15: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Islas Desventuradas	87
Tabla B.16: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Archipiélago de Juan Fernández	87
Tabla B.17: Distribución porcentual de casos para el nodo de Arica	88
Tabla B.18: Distribución porcentual de casos para el nodo de Mejillones	88
Tabla B.19: Distribución porcentual de casos para el nodo de Taltal	89
Tabla B.20: Distribución porcentual de casos para el nodo de Huasco	89
Tabla B.21: Distribución porcentual de casos para el nodo de Tongoy	90
Tabla B.22: Distribución porcentual de casos para el nodo de Constitución	90

Tabla B.23: Distribución porcentual de casos para el nodo de Talcahuano	91
Tabla B.24: Distribución porcentual de casos para el nodo de Puerto Saavedra	91
Tabla B.25: Distribución porcentual de casos para el nodo de Chiloé	92
Tabla B.26: Distribución porcentual de casos para el nodo de Archipiélago de Los Chonos	92
Tabla B.27: Distribución porcentual de casos para el nodo de Golfo de Penas	93
Tabla B.28: Distribución porcentual de casos para el nodo de Isla Esmeralda	93
Tabla B.29: Distribución porcentual de casos para el nodo de Isla Contreras	94
Tabla B.30: Distribución porcentual de casos para el nodo de Isla London	94
Tabla B.31: Distribución porcentual de casos para el nodo de Islas Desventuradas.....	95
Tabla B.32: Distribución porcentual de casos para el nodo de Archipiélago Juan Fernández	95

INTRODUCCIÓN

Si bien Chile posee un extenso litoral y el oleaje es un factor de gran importancia en las ciudades costeras, éste no ha sido estudiado a cabalidad y aspectos como la multimodalidad y los eventos extremos no se han profundizado lo suficiente. Las marejadas ocurridas en Valparaíso en los últimos años han mostrado el impacto que pueden tener eventos de este tipo en la infraestructura costera, sobre todo cuando sus características no son las típicas. Esta es una de las razones por las que conocer la naturaleza de estos eventos, y del oleaje en general, es fundamental para el correcto diseño de las obras en la zona.

En este contexto, el procedimiento común es que los estudios de oleaje sean elaborados por consultoras de ingeniería según la normativa del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada para la realización de proyectos costeros (SHOA, 2005). Estos se caracterizan por enfocarse sólo en el área de estudio, contener un análisis de clima medio, propagación a aguas someras si es el caso y cálculo de periodos de retorno para la determinación de alturas de diseño. Además, debido a su carácter privado, no están disponibles para el público general.

Esto muchas veces es insuficiente para caracterizar el oleaje de buena forma ya que, utilizando sólo parámetros espectrales, se pierden características importantes de los modos secundarios que pueden llegar a tener una influencia importante en las costas de Chile. Además, calculando periodos de retorno basados sólo en la altura de ola, se dejan de lado aspectos como periodo y dirección, los cuales permitirían estimar la recurrencia de estos eventos de forma más específica.

Para llenar este vacío nació el proyecto “Un Atlas de Oleaje para Chile”, cuyo objetivo fue entregar una descripción cualitativa y cuantitativa detallada del clima de oleaje de nuestro país a partir de una base de datos espectral de 35 años. Esta memoria se enmarca dentro de este proyecto y los análisis y métodos aquí presentados se utilizaron para el desarrollo del Atlas de Oleaje de Chile. Asimismo, los resultados obtenidos se presentan también dentro del Atlas, además de análisis comparativos de multimodalidad y oleaje extremo que se hicieron específicamente para este estudio.

Este trabajo posee la siguiente estructura: en el capítulo 1 se hace una revisión del estado del arte donde se presenta el conocimiento actual del tema y donde se repasa el trabajo y resultados de otros autores. En el capítulo 2 se presentan los objetivos de este estudio y en el capítulo 3 se da a conocer la metodología de trabajo y las características de la base de datos utilizada. En el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos y en el 5, su análisis y discusión. Finalmente se presentan algunas conclusiones.

1 ESTADO DEL ARTE

El Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada mediante las INSTRUCCIONES OCEANOGRÁFICAS N°1 (SHOA, 2005) exige un análisis estadístico de valores extremos, que arroje una estimación de la altura significativa de la ola con períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años, incluyendo parámetros claves (altura significativa, períodos de oleaje, dirección de incidencia, fecha y duración) asociados con cada tormenta (SHOA, 2005). Si se cuenta con espectros bidimensionales de energía de oleaje, algunos de esos parámetros se pueden obtener fácilmente utilizando las siguientes expresiones:

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (1.1)$$

$$f_p = f|_{E(f)=max} \quad (1.2)$$

$$T_p = 1/f_p \quad (1.3)$$

$$T_m = T_{0,1} = \frac{m_0}{m_1} \quad (1.4)$$

$$D_p = D|_{E(\theta)=max} \quad (1.5)$$

$$D_m = \arctan_2 \left(\frac{\int_0^{2\pi} E(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} E(\theta) \cos \theta d\theta} \right) \quad (1.6)$$

Donde $\arctan_2$ es la función arcotangente corregida para entregar valores entre 0 y 2π , m_0 y m_1 son los momentos espectrales de orden 0 y 1 respectivamente, calculados según la ecuación (1.7), $E(f)$ y $E(\theta)$ son los espectros unidimensionales de frecuencia y dirección calculados según (1.8) y (1.9), y $E(f, \theta)$ la representación matemática de la energía espectral en función de la frecuencia (f) y la dirección (θ).

$$m_i = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} E(f, \theta) f^i d\theta df \quad (1.7)$$

$$E(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta \quad (1.8)$$

$$E(\theta) = \int_0^\infty E(f, \theta) df \quad (1.9)$$

Con los valores de altura significativa es posible realizar una selección de los valores extremos para el cálculo de periodos de retorno. El SHOA exige, como mínimo, 20 eventos para una estadística de 20 años (la mayor tormenta por año), para cada una de las componentes del oleaje. Esto con el fin de observar el oleaje de diseño para diferentes direcciones y caracterizarlo en casos extremos, lo que se hace generalmente separando los eventos por cuadrante.

De esta forma el cálculo de periodos de retorno se ha transformado en uno de los análisis clásicos para evaluar el clima extremo, a pesar de que está muy condicionado por el grado de confiabilidad de la base de datos utilizada. Gallardo et al. (en publicación) realizó un análisis comparativo de eventos extremos para distintas bases de datos y concluyó que, para una misma altura de oleaje, existen grandes diferencias (mayores a 200 años) en los periodos de retorno dependiendo de la base, dejando en evidencia la gran incertidumbre presente en los valores extremos del oleaje en Chile.

Aun así, se han hecho esfuerzos por incorporar más variables, además de la altura, al cálculo probabilidades, siendo el periodo de oleaje la variable más utilizada. Lucas et al. (2015) probó 3 métodos para el cálculo de probabilidades conjuntas (Modelo condicional, Plackett y Box-Cox) obteniendo mejores resultados con el modelo condicional y para sistemas de oleaje separados (swell y sea). Corbella et al. (2013) utilizó cópulas Arquimedianas para simular eventos extremos. Además de la altura significativa y periodo medio, Corbella incluyó la duración de la tormenta en su análisis. En Chile, Meza (2015) utilizó el modelo condicional para generar gráficos de densidad de probabilidad de altura versus periodo de oleaje. Sin embargo, ninguno de estos autores llegó a calcular periodos de retorno utilizando ambas variables.

Dentro de los métodos multivariados, el uso de la técnica de las cópulas se ha extendido ampliamente, presentando como mayor ventaja una mejor caracterización de la relación de dependencia entre las variables, así como también de cada una de las variables al permitir el uso de diferentes funciones de distribución marginales. Requena et al. (2013) y Mediero et al. (2015), por ejemplo, utilizaron este método para evaluar la seguridad hidrológica del aliviadero de una presa, considerando el caudal punta y el volumen como variables que caracterizan un hidrograma de avenida.

Estas funciones tienen la propiedad de representar la relación de dependencia entre dos o más variables y permiten definir las funciones marginales de cada variable de forma independiente. La distribución de probabilidad conjunta queda definida entonces por las frecuencias marginales de cada una de las variables y la dependencia existente entre ambas (Sklar, 1959):

$$F_{X,Y}(x, y) = C(F_X(x), F_Y(y)) = P(X \leq x \wedge Y \leq y) \quad (1.10)$$

Donde $F_X(x)$ y $F_Y(y)$ son las funciones de distribución de probabilidad acumulada de las variables X e Y y $C: [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ es la función cópula utilizada para representar la ley de dependencia entre ambas. Esta puede ser de tipo paramétrico o empírico dependiendo de si su expresión responde o no a una ecuación paramétrica. En el primer caso, existe un parámetro (ρ) que cuantifica la relación de dependencia entre las variables, mientras que en el segundo no participa ningún parámetro y es la función cópula la que se ajusta de forma local a los datos. La familia de cópulas más utilizada es la Arquimediana, dentro de la cual destacan las cópulas Clayton, Frank y Gumbel. A continuación, se presentan algunas de las funciones cópulas más conocidas:

$$\circ \text{ Clayton} \quad [\max\{F_X^{-\rho} + F_Y^{-\rho} - 1; 0\}]^{-1/\rho} \quad (1.11)$$

$$\circ \text{ Frank} \quad -\frac{1}{\rho} \log\left[1 + \frac{(\exp(-\rho F_X) - 1)(\exp(-\rho F_Y) - 1)}{\exp(-\rho) - 1}\right] \quad (1.12)$$

$$\circ \text{ Gumbel} \quad \exp[-((-\log(F_X))^{\rho} + (-\log(F_Y))^{\rho})^{1/\rho}] \quad (1.13)$$

$$\circ \text{ Gaussiana} \quad \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(F_X)} \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(F_Y)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left(-\frac{x^2 - 2\rho xy + y^2}{2(1-\rho^2)}\right) dx dy \quad (1.14)$$

Donde Φ^{-1} es la inversa de la función de distribución estándar acumulada.

Utilizando este método es posible incorporar más variables al cálculo de periodos de retorno y así caracterizar el clima extremo de mejor manera.

Por otro lado, los métodos extremos no caracterizan el contenido de energía en la frecuencia. Marejadas cuyo periodo de oleaje o dirección de procedencia no son los típicos pueden causar daños importantes en el borde costero. Ejemplos de esto son la marejada de julio de 2013 que en Antofagasta generó daños

superiores a los 2 mil millones de pesos y la de agosto de 2015 que afectó a Valparaíso generando daños cercanos a los 5 mil millones de pesos; la primera de dirección suroeste pero con un periodo de oleaje muy elevado ($T_m=16.4$ s) y la segunda con un periodo típico ($T_m=13.0$ s) pero de dirección noroeste (Campos et al., 2015). Winckler et al. (2015) realizó un análisis detallado de la marejada de agosto de 2015, en el que presentó series de tiempo, gráficos polares de dispersión y gráficos univariados de periodos de retorno. Estos tipos de marejadas provenientes de distintas zonas de generación o con periodos de oleaje atípicos, sugieren la existencia de oleaje multimodal en las costas chilenas.

Cada modo presente en un estado de mar se puede clasificar de acuerdo a su dirección de procedencia y su cercanía a la zona de generación. Respecto a esto último se distinguen dos tipos: mar de viento ("sea") y mar de fondo ("swell") (Figura 1.1). Para el mar de viento la magnitud de la altura y el período del oleaje aumentan con la intensidad, la duración y el alcance del viento ("fetch"). Sin embargo, para el mar de fondo la altura disminuye y el período aumenta a medida que la distancia desde la zona de generación aumenta. Esto ocurre por los fenómenos de dispersión angular y de frecuencia, así como también por la disipación de la energía del oleaje y por la transferencia no lineal de energía entre frecuencias espectrales (Beyá et al., 2016).

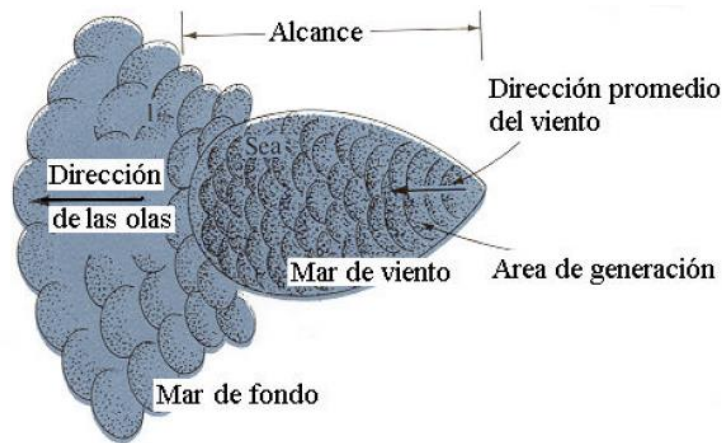


Figura 1.1: Proceso de generación de mar de viento y de fondo (Lizano, 2003)

En un campo de oleaje generado por viento, con distribución al azar de la energía de onda sobre todas las frecuencias de onda, la forma teórica del espectro de energía es similar al de una curva Gaussiana o distribución normal (Figura 1.2, izq.). Cuando sólo existen ondas generadas en un punto remoto, la energía está concentrada cerca de la frecuencia de la marejada de fondo y el espectro es mucho más angosto (Figura 1.2, der.) (Lizano, 2003).

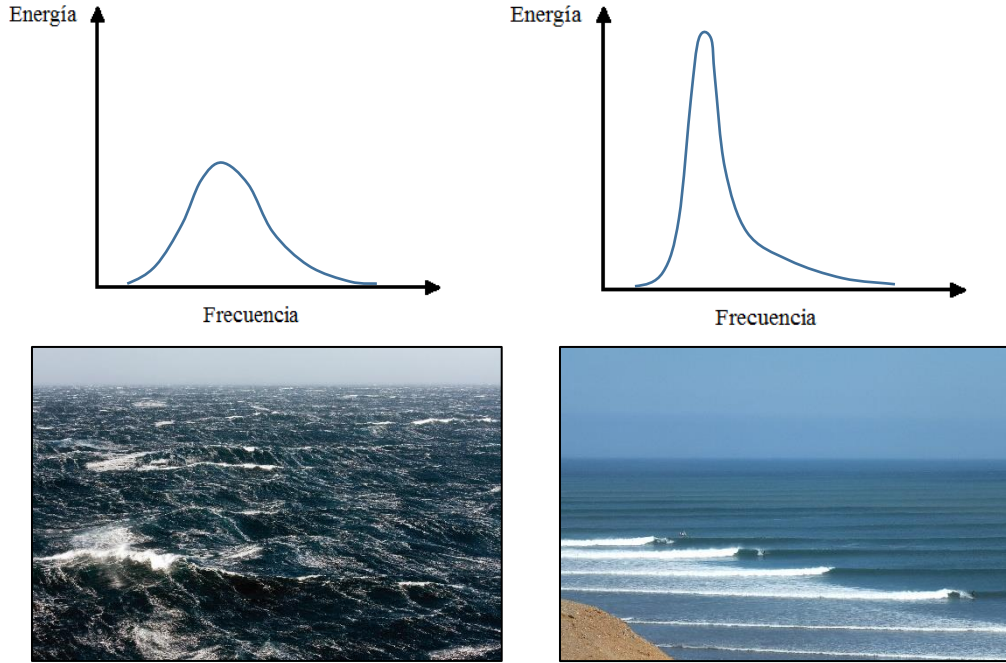


Figura 1.2: Forma del espectro de energía para un oleaje de viento (izq.) y de fondo (der.) (Figuras de elaboración propia, imágenes de Beyá et al., 2016)

Se han hecho varios esfuerzos para identificar la multimodalidad presente en el oleaje (Ortiz, 2003; Saulnier et al., 2012; Portilla et al., 2015; Scott et al., 2002; Ossandón, 2014; Semedo et al., 2011; Aguirre et al., 2017) y en todos los casos fue imprescindible contar con espectros de oleaje medidos o generados por modelos de reanálisis, ya sea uni o bidimensionales.

A partir del espectro unidimensional de frecuencias $E(f)$ se pueden extraer parámetros de forma espectral (ε , v y Q_p) que reflejan la dispersión de frecuencias presente en un estado de mar. El ancho espectral (ε , ecuación (1.15)) fue introducido por Cartwright y Longuet-Higgins (1956) y el ancho de banda espectral (v , ecuación (1.16)) por Longuet-Higgins (1957). Ambos parámetros están valorados entre 0 y 1 y sirven como índice de la anchura o estrechez del espectro; se dice que el espectro es estrecho cuando los valores de estos parámetros son muy pequeños.

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (1.15)$$

$$v = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1} \quad (1.16)$$

El oleaje tipo “swell” se define por un espectro de banda estrecha, y debido a eso los valores de ε son menores a los de “sea”. En la naturaleza los valores de “swell” son cercanos a 0.4, mientras que los de “sea”, al tener un espectro de banda ancha, se acercan a 0.8 (Ortiz, 2003).

La agudeza de pico espectral (Q_p , ecuación (1.17)), propuesto por Goda (1970) es otro parámetro que entrega información de la forma espectral. El valor de Q_p es infinito para un espectro de banda extremadamente estrecha y es igual a 1 para uno de banda extremadamente ancha. Goda (1976) presentó

un informe sobre los valores de Q_p para espectros de un solo pico en la costa japonesa, los cuales variaban entre 2 y 3. Luego, en 1985, señaló que Q_p es cercano a 2 para olas generadas por viento (Goda, 1985).

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^\infty E(f)^2 f df \quad (1.17)$$

Ortiz (2003) calculó estos parámetros espectrales para dos eventos energéticos en la costa catalana y corroboró la relación directa entre ε y v , e inversa entre ε y Q_p . Además, encontró que los estados de mar bimodales presentan valores de anchura espectral más altos que los unimodales, que los valores de anchura espectral observados difieren de los teóricos del estado del arte y que, a diferencia de lo que se podría esperar, el valor de ε aumenta a medida que aumenta el periodo pico, debido en parte a la influencia de la bimodalidad.

Otro parámetro que entrega información de la forma espectral es el parámetro de acentuación del máximo espectral (γ) del espectro JONSWAP (Hasselmann et al., 1973). El espectro JONSWAP fue derivado para condiciones de mar de viento en las cuales el espectro Pierson-Moskowitz (PM) no era capaz de representar las esbeltas olas del mar del Norte. Ambos corresponden a espectros sintéticos creados para simular los estados del mar presentes en el océano y así poder investigar su forma de manera sistemática, trabajando con un set de parámetros manejables y no redundantes (Hasselmann et al., 1973).

Desarrollado por Pierson y Moskowitz (1964), el PM es un espectro sencillo, uniparamétrico (sólo depende de la frecuencia pico del espectro) y creado para oleajes totalmente desarrollados. Asume que tanto el “fetch” como la duración del temporal son infinitos.

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \quad (1.18)$$

$$\alpha = 0.0081 \quad (1.19)$$

Posteriormente Hasselmann et al. (1973) desarrolló el espectro JONSWAP cuyo nombre es un acrónimo de “Joint North Sea Wave Project”. Este se derivó a partir del PM para incluir oleaje de estados de mar limitados por fetch, resultando un espectro con un pico espectral más agudo.

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[-\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right]} \quad (1.20)$$

$$\alpha = 0.076 \left[\frac{gF}{U_{10}^2} \right]^{-0.22} \quad (1.21)$$

$$1 \leq \gamma \leq 7 \quad (1.22)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f \leq f_p \\ 0.09 & f > f_p \end{cases} \quad (1.23)$$

α : Parámetro de escala

F : Longitud del fetch

f_p : Frecuencia pico

γ : Parámetro de acentuación del máximo espectral

U_{10} : Velocidad del viento a 10 m sobre la superficie del mar

Más tarde, Goda (1988) derivó una expresión aproximada del espectro JONSWAP en términos de la altura de ola significativa H_{m0} y de la frecuencia de pico espectral f_p (ecuaciones (1.24) y (1.25)).

$$S(f) = B_j H_{m0}^2 f_p^4 f^{-5} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4}} \gamma e^{\left(\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right)} \quad (1.24)$$

$$B_j = \frac{0.0624(1.094 - 0.01915 \ln(\gamma))}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \quad (1.25)$$

Existen numerosos estudios que han ajustado el parámetro de acentuación del máximo espectral a espectros de oleaje medidos en distintos puntos del planeta, obteniéndose mucha dispersión en los resultados. Hasselmann et al. (1973), mediante el ajuste de los parámetros de forma y escala, encontró valores de γ entre 1.5 y 6, con una media de 3.3. Goda (2000) menciona que, para aplicaciones de ingeniería, el espectro de mar de fondo puede ser aproximado al espectro JONSWAP eligiendo el parámetro γ entre 3 y 10, dependiendo de la distancia a la zona de generación. Chiswell y Kibblewhite (1981) encontraron valores de γ más bajos (1.55 promedio) utilizando mediciones de mar de viento en Nueva Zelanda. En Chile, Beyá y Beyá (2013) ajustaron espectros medidos por una boya oceanográfica ubicada frente a las costas de Chile Central, obteniendo un valor medio global de 4.2 con un rango entre 0.6 y 300. Además, concluyeron que, en promedio, valores bajos están asociados a oleaje de mayor altura y que valores altos se asocian a oleaje con periodo pico menor a 8 seg. (oleaje generalmente considerado como de mar de viento), lo que contradice la noción actual.

Si bien los espectros sintéticos son una buena herramienta cuando no se dispone de espectros medidos, el oleaje no puede ser descrito adecuadamente utilizando sólo estos espectros, por lo que se introdujo el concepto de espectro direccional para describir el estado de mar resultante de la superposición de componentes con distintas direcciones de propagación (Goda, 2000). Este espectro bidimensional representa la distribución de la energía del oleaje en el dominio de la frecuencia y la dirección, y generalmente se expresa como:

$$S(f, \theta) = S(f)G(\theta|f) \quad (1.26)$$

Donde $S(f, \theta)$ es la función de densidad espectral del oleaje direccional y $G(\theta|f)$ es la función de distribución direccional. Por lo tanto, el espectro de frecuencias $S(f)$ da el valor absoluto de la densidad de energía del oleaje en cada frecuencia, mientras que la función $G(\theta|f)$ representa la distribución de la energía del oleaje por direcciones. Mitsuyasu et al. (1975) ha propuesto la siguiente función, basada en datos medidos en diferentes campañas de campo:

$$G(\theta|f) = G_0 \cos^{2s} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (1.27)$$

$$G_0 = \left[\int_0^{2\pi} \cos^{2s} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta \right]^{-1} \quad (1.28)$$

Donde G_0 es un parámetro de escala que transforma la función $G(\theta|f)$ en una función unitaria y s es un parámetro dependiente de la frecuencia, el cual representa el grado de concentración de energía por direcciones. Este parámetro adquiere un valor máximo alrededor de la frecuencia de pico espectral y decrece hacia frecuencias menores o mayores.

Por otro lado, y a diferencia del espectro unidimensional de frecuencias $E(f)$, del espectro bidimensional se puede obtener información modal referente a periodos y dirección de oleaje de forma simultánea. La forma

de analizar esta información se hace generalmente por medio de métodos de partición espectral, los cuales se han ido perfeccionando a través del tiempo.

El primer algoritmo fue desarrollado por Gerlin (1992) y consiste en ubicar los valles energéticos entre dos peaks del espectro hasta que todos los sistemas hayan sido detectados, luego se determinan las particiones significativas a través de la comparación entre sus parámetros de oleaje. Posteriormente, Hasselmann et al. (1996) modificó el algoritmo de particionamiento por uno análogo al método de delimitación de cuencas hidrográficas utilizado en hidrología (watershed), además introdujo nuevos criterios para la combinación de particiones no significativas basados en la distancia mínima entre peaks, umbrales de energía mínima y contraste entre valores peak. Otros autores (Voorrips et al., 1997; Hanson y Phillips, 2001) utilizaron el método de Hasselmann con diferentes ajustes a los criterios de combinación de particiones.

Portilla et al. (2009) analizó estos métodos y encontró resultados inadecuados en algunos estados de mar, debido a la arbitrariedad de los criterios para evaluar si los sistemas de oleaje eran significativos o no. Esto hacía que la implementación de procedimientos automatizados fuera difícil, por lo que propuso el uso de un filtro digital para ayudar al algoritmo a conservar las características importantes del espectro y eliminar el ruido, además de nuevos criterios de combinación basados sólo en la energía espectral.

Una vez dividido el espectro es necesario identificar cada componente de acuerdo a su naturaleza física u origen. Para saber si la componente es de generación remota ("swell") o local ("sea") generalmente se trabaja con criterios de edad del oleaje ("wave-age"), los cuales utilizan datos de viento como velocidad y dirección. Sin embargo, estos datos no siempre están disponibles y complican su automatización, por lo que la práctica común termina siendo el uso de una frecuencia de separación. En Chile se acostumbra usar 0.125 Hz como frecuencia de corte, clasificando sistemas de oleaje con periodo superior a 8 segundos como mar de fondo y sistemas con periodo menor como mar de viento (Ossandón, 2014). El uso de un valor fijo, sin embargo, no siempre entrega resultados confiables debido a las diferentes características de los sistemas de oleaje, por lo que se han ideado métodos más consistentes basados en el espectro unidimensional de frecuencias. A continuación, se revisan algunos de ellos.

Wang y Gilhousen (1998) definieron una frecuencia de separación "swell-sea" utilizando el método de pendiente de ola. La pendiente de ola es una función que depende de la altura y número de ola, de forma que es influenciada principalmente por olas cortas (mar de viento) y una de sus principales ventajas es que no requiere datos de viento. Gilhousen y Hervey (2001) agregaron un nuevo criterio de separación a este método, comparando la frecuencia de separación basada en la pendiente de ola con una frecuencia basada en la forma del espectro Pierson-Moskowitz. Wang y Hwang (2001) mejoraron el método de Wang y Gilhousen (1998) manteniendo la independencia de información externa. Usando un espectro sintético similar al Pierson-Moskowitz, se encontró una relación empírica entre la velocidad del viento y la pendiente de ola, permitiendo dejar la frecuencia de separación (originalmente en función del viento) sólo en función de la pendiente. Posteriormente Portilla et al. (2009) comparó varios de estos métodos y propuso uno nuevo basado en la comparación del espectro de frecuencias con uno Pierson-Moskowitz.

Con las particiones ya clasificadas es posible cuantificar la multimodalidad presente en el lugar de estudio. Debido a la complejidad y la cantidad de información, este tipo de análisis se hace generalmente para uno o un par de nodos. Saulnier et al. (2012) hizo un estudio de este tipo en la costa norte de Cornualles (Reino Unido) utilizando un arreglo de cuatro boyas separadas entre sí 500 m aproximadamente. En su análisis utilizó el método watershed para la partición espectral y una frecuencia de separación basada en la velocidad del viento para la clasificación de las particiones. Otro estudio es el que hizo Portilla et al. (2015),

quién realizó una caracterización del mar colombiano analizando 4 puntos ubicados en la costa del Pacífico donde identificó 6 sistemas de oleaje principales; dos de ellos de naturaleza “swell” y cuatro “sea”. La forma en que presentó esta información fue a través de gráficos polares de probabilidad de ocurrencia y espectros promedio.

En Chile, Scott et al. (2002) tomando como referencia el trabajo Hanson y Phillips (2001) implementó el método de particionamiento espectral en 9 ubicaciones en aguas someras comprendidas entre Arica y el Golfo Coronados, obteniendo como resultado que la multimodalidad del oleaje aumenta de norte a sur y durante el verano. Ossandón (2014) presentó una caracterización del oleaje en aguas profundas para la zona centro-sur de Chile, en la cual realizó una partición espectral por medio del método watershed e identificó 4 sistemas de oleaje principales. Entre sus resultados también menciona el tiempo en que el oleaje es bimodal, obteniendo un porcentaje superior al 50% en la zona central.

También existen estudios que engloban un dominio más grande. Semedo et al. (2011) hizo una revisión global del mar de viento y de fondo utilizando la base ERA-40. La separación de las componentes la hizo mediante el modelo de generación WAM utilizando una frecuencia límite basada en la velocidad de fase. Entre los resultados que obtuvo se encuentran campos globales del peso que tiene el mar de fondo respecto a la energía total para las estaciones de invierno y verano del hemisferio norte. Aguirre et al. (2017) también cuantificó estas dos componentes del oleaje para las costas de Chile y Perú utilizando una base de reanálisis de 32 años generada con el modelo WaveWatch III, el cual trae un criterio de edad del oleaje para identificar mar de viento y de fondo. Sus resultados incluyen campos de oleaje de cada componente por estación, además de un análisis por mes en 4 zonas del Pacífico Este. De los resultados obtenidos por Semedo et al. (2011) se observa un gran porcentaje de mar de viento en la zona central de Chile durante los meses Dic-Feb (~30%), mientras que del estudio hecho por Aguirre et al. (2017) se extraen valores incluso mayores al 40% para la misma zona y meses.

En resumen, en la actualidad existe una gran cantidad de conocimiento y herramientas que no están siendo aprovechadas para los estudios de oleaje en Chile. Métodos multivariados, como el uso de cópulas permiten incorporar más variables al cálculo de periodos de retorno, y las técnicas de particionamiento espectral permiten caracterizar la multimodalidad de forma más precisa que los parámetros espectrales. Estos dos aspectos son de gran importancia para el país ya que, al conocer en detalle las características del oleaje, los distintos modos y las características de las tormentas, se pueden tomar medidas preventivas para disminuir el nivel de daños en la costa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Caracterizar de forma detallada el oleaje extremo y la multimodalidad en Chile continental e insular, por medio de análisis convencionales y desarrollando nuevas metodologías.

2.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar e implementar una metodología para realizar un análisis bivariado de los valores extremos de altura de ola considerando el periodo de oleaje.
- Calcular periodos de retorno en función de la altura de oleaje utilizando el método univariado y en función de la altura y el periodo de oleaje utilizando el método bivariado.
- Caracterizar la componente direccional de las tormentas por medio de gráficos de dispersión.
- Estudiar el comportamiento de algunos parámetros espectrales de forma y su respuesta frente a la presencia de multimodalidad.
- Desarrollar e implementar una metodología de estudio que permita revelar las características modales de una base de datos de oleaje espectral de 35 años.
- Identificar los principales modos de oleaje que llegan a la costa chilena, sus porcentajes de energía respecto a la energía total del espectro, incidencia de cada uno dentro de la estadística y las combinaciones más recurrentes.

3 METODOLOGÍA

3.1 Análisis de Clima Extremo

Utilizando Matlab 7.12.0 (R2011a) se calcularon algunos de los parámetros espectrales descritos en el estado del arte (H_{m0} , T_m y D_m) para cada nodo. Cabe mencionar que, debido a la naturaleza discreta de los espectros, las integrales fueron resueltas como sumatorias.

Para evaluar el clima extremo se utilizó sólo la parte de la estadística correspondiente a las mayores alturas de oleaje, de aquí en adelante llamadas tormentas o eventos extremos. Estos fueron seleccionados mediante el método de máximos sobre un umbral, que consiste en definir un valor de H_{m0} y seleccionar aquellas alturas que lo superan (Peak Over Threshold; Goda, 2000). Se definió un umbral diferente para cada nodo con el fin de obtener 30 eventos, y un espaciamiento temporal de por lo menos 4 días para asegurar su independencia (Gallardo et al., en publicación).

Con los eventos seleccionados se realizaron los siguientes análisis de clima extremo: gráfico de periodos de retorno univariado, gráfico de periodos de retorno bivariado y gráficos polares de dispersión. Además, en el ANEXO C, se presenta una normalización de la serie de altura de las tormentas y una caracterización de éstas por estación del año.

3.1.1 Gráfico de periodos de retorno univariado

Se calcularon periodos de retorno en función de la altura significativa de los eventos extremos seleccionados. Esto se hizo testeando varias distribuciones de probabilidad y seleccionando aquella que tuviera el mejor ajuste. Las distribuciones consideradas fueron: Normal, LogNormal, Gamma, Weibull, Gumbel, Frechet, Logistic, LogLogistic y la distribución de Pareto Generalizada. Para encontrar la distribución de mejor ajuste se hizo lo siguiente:

- Se calculó la probabilidad de excedencia empírica de cada valor de altura por medio de la fórmula de Weibull (ecuación (3.1)) y se obtuvo el periodo de retorno real de cada tormenta utilizando la ecuación (3.2). Notar que Goda (2000) incluye coeficientes para el cálculo de esta probabilidad, los cuales fueron omitidos en este caso por tratarse de metodología diferente.

$$P_{exc} = \frac{R_i}{n + 1} \quad (3.1)$$

$$T_R = \frac{u_T}{P_{exc}} \quad (3.2)$$

Donde R_i es el ranking de la i -ésima altura, n es el número de eventos extremos y u_T es el tiempo promedio de arribo entre dos eventos sucesivos (N° años/ N° eventos; Liu y Frigaard, 2001).

- Para cada distribución de probabilidad se encontraron los parámetros (de escala, forma y/o localización dependiendo del caso) que minimizaban el error entre el periodo de retorno teórico y el real de cada tormenta.

- Por medio del método de mínimos cuadrados, se realizaron iteraciones para encontrar los parámetros de mejor ajuste, tomando como valores iniciales los estimadores de máxima verosimilitud (MLE).
- Para la distribución generalizada de Pareto, no fue necesario iterar para encontrar el parámetro de localización ya que se utilizó el valor umbral obtenido del método POT.
- Con los parámetros de mejor ajuste de cada distribución se calculó la probabilidad de excedencia para cada tormenta y su correspondiente valor de periodo de retorno (teórico).
- Se seleccionó aquella distribución que generó la mayor correlación entre periodos de retornos reales y teóricos, y se generó una curva $H_{m0}-T_R$ (altura significativa versus periodo de retorno). Para esto se transformó una serie de periodos de retorno en probabilidades de excedencia, luego en probabilidades de no excedencia y, mediante la función inversa de la distribución y los parámetros obtenidos anteriormente, se calcularon las respectivas alturas significativas.
- Como una forma de cuantificar la correlación entre los valores reales y los teóricos, se calculó el coeficiente de determinación R^2 mediante la ecuación (3.3).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_m - y_a)^2}{\sum (y_m - \bar{y}_m)^2} \quad (3.3)$$

Donde y_m corresponde a los valores de la muestra e y_a a los valores del ajuste.

- Además, se calcularon bandas de confianza del 90% para demostrar la incertidumbre asociada al ajuste. Para esto se utilizó el método descrito en Liu y Frigaard (2001).

Se graficaron las alturas de los eventos extremos en función de sus periodos de retorno, la curva de la distribución de mejor ajuste y las bandas de confianza.

3.1.2 Gráfico de periodos de retorno bivariado

Como una forma de mostrar la influencia de otra variable en los periodos de retorno, se desarrolló un algoritmo que permite estimar la recurrencia de eventos extremos respecto a su altura significativa y su periodo medio. Se utiliza el periodo medio en lugar del periodo pico, ya que los valores de este último son más discretos y el ajuste es peor (Álvarez et al., 2016). Por medio de esta herramienta se obtiene un gráfico en que los periodos de retorno se muestran como curvas de nivel en función de las dos variables antes mencionadas.

Para este análisis se aplicaron modelos cópula de dos variables a la serie de alturas extremas y su correspondiente serie de periodos, la cual corresponde al conjunto de periodos medios de las tormentas seleccionadas mediante el método Peak Over Threshold descrito en la sección 3.1. El procedimiento general consiste en ajustar una distribución a la serie de alturas (X) y otra a la serie de periodos (Y) y encontrar la función cópula que mejor las relaciona (Requena et al., 2013).

Las distribuciones consideradas para la serie de alturas fueron las mismas que para el análisis univariado, así como también el proceso de ajuste. En tanto que, para la serie de periodos, por tratarse de valores no extremos, se tuvieron las siguientes consideraciones:

- No se testeó la distribución de Pareto Generalizada ya que su comportamiento no responde a este tipo.
- Se utilizaron los estimadores de máxima verosimilitud (MLE) como parámetros de mejor ajuste.
- La mejor distribución se hizo en base al test de Kolmogorov-Smirnov, escogiéndose aquella que tuviera el mayor p-valor para un nivel de significancia de 0.05.

Una vez seleccionadas las distribuciones de altura y periodo se testearon algunas funciones cópula (Frank, Clayton, Gumbel y Gaussiana) y se eligió la de mejor ajuste según el estadístico de Cramér-von Mises (S_n , ecuación (3.5), Requena et al., 2013), el cual cuantifica la diferencia entre la cópula empírica y la paramétrica testeada. Los pasos fueron los siguientes:

- Se calculó el τ de Kendall (ecuación (3.4)); un indicador que muestra la relación entre las variables. Este puede ser negativo, lo que se asocia a una relación inversa, o positivo, asociado a una directa. Además, su valor sirve para descartar algunas cópulas, por ejemplo, si es negativo la relación entre las variables no puede ser descrita por las cópulas Clayton ni Gumbel.

$$\tau = \frac{\text{número de pares concordantes} - \text{número de pares discordantes}}{n(n-1)/2} \quad (3.4)$$

Donde n es el número total de pares.

- Dependiendo del valor de Kendall, y para aquellas cópulas que todavía eran candidatas, se calculó el parámetro ρ . Este parámetro, junto con la probabilidad marginal de cada variable, permite calcular la probabilidad conjunta mediante la función cópula seleccionada.
- Se calculó la probabilidad conjunta de cada par de datos de la serie de eventos extremos utilizando las cópulas paramétricas que aún eran candidatas. También se consideró la posibilidad de que las variables tuvieran cero dependencia en cuyo caso la probabilidad conjunta se calculó como la multiplicación de las probabilidades marginales.
- Finalmente, y para cada cópula paramétrica, se calculó el estadístico Cramér-von-Mises (ecuación (3.5)) y se seleccionó aquella que arrojó el menor valor.

$$S_n = \sum_{i=1}^n \left\{ C_n \left(\frac{R_i}{n+1}, \frac{S_i}{n+1} \right) - C_{\rho_n} \left(\frac{R_i}{n+1}, \frac{S_i}{n+1} \right) \right\}^2 \quad (3.5)$$

$$C_n(u, v) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1 \left(\frac{R_i}{n+1} \leq u, \frac{S_i}{n+1} \leq v \right) \quad u, v \in [0,1] \quad (3.6)$$

Donde C_n es la cópula empírica estimada a partir de la ecuación (3.6), C_{ρ_n} es la cópula paramétrica evaluada con las probabilidades empíricas marginales de cada variable, R_i y S_i son los rankings de los valores de altura y periodo respectivamente asociados a la tormenta i y n es el número de eventos extremos.

Una vez identificada la función de distribución conjunta formada por las leyes de frecuencia marginales y la cópula, se calculó la probabilidad acumulada para un conjunto de valores de altura y periodo, y luego se calculó el periodo de retorno asociado a cada par de datos.

Se definió el periodo de retorno bivariado de forma distinta dependiendo de si el valor de la variable Y (periodo medio) estaba en la cola inferior o superior de la distribución. Esto se hizo debido a que la serie de periodos no corresponde a una serie de valores extremos y no tiene sentido calcular la probabilidad de

excedencia de un periodo de oleaje muy bajo; en esos casos se calculó la probabilidad de ocurrencia (o no excedencia).

Si el valor se encontraba sobre el punto máximo de la función densidad (en la cola superior), el periodo de retorno conjunto se definió de la forma clásica; a partir de la probabilidad de excedencia de alturas y de periodos (Requena et al., 2013). Dicho de otra forma, este valor refleja el número de años en que se volverá a exceder cierto valor de altura significativa y de periodo medio.

$$T_{X,Y+} = \frac{u_T}{P(X > x \wedge Y > y)} = \frac{u_T}{1 - F_X(x) - F_Y(y) + C(F_X(x), F_Y(y))} \quad (3.7)$$

Por otro lado, si el valor de la variable Y se encontraba bajo el punto máximo de la función densidad (en la cola inferior), el periodo de retorno conjunto se definió a partir de la probabilidad de excedencia de alturas y la probabilidad de ocurrencia de periodos. Esto refleja la cantidad de años en que se volverá a producir una tormenta de altura mayor a cierto valor X y periodo menor a cierto valor Y.

$$T_{X,Y-} = \frac{u_T}{P(X > x \wedge Y \leq y)} = \frac{u_T}{F_Y(y) - F_X(x) + C(F_X(x), (1 - F_Y(y)))} \quad (3.8)$$

Donde $C(F_X(x), F_Y(y)) = P(X \leq x \wedge Y \leq y)$ y u_T es el tiempo promedio de arribo entre dos eventos sucesivos (N° años/N° eventos; Liu y Frigaard, 2001).

Luego se graficó la matriz de valores de periodos de retorno como curvas de nivel junto con los eventos extremos utilizados para realizar este análisis.

3.2 Cálculo de parámetros espectrales de forma

Para analizar la forma espectral del oleaje por nodo, se calcularon algunos parámetros de forma a partir del espectro bidimensional $E(f, \theta)$ y de los espectros unidimensionales de frecuencia $E(f)$ y dirección $E(\theta)$.

De forma similar al cálculo de H_{m0} , T_m y D_m , se calcularon los parámetros ε , v y Q_p , descritos en el estado del arte y cuyas expresiones corresponden a las ecuaciones (1.15), (1.16) y (1.17) respectivamente.

Además, a cada espectro de frecuencias $E(f)$ se le ajustó, mediante mínimos cuadrados, un espectro JONSWAP $S(f)$ modificado (Goda, 1988) para obtener el parámetro de acentuación del máximo espectral (γ). Se utilizó la expresión de Goda ya que, al estar en términos de la altura significativa H_{m0} y de la frecuencia pico f_p , no necesita datos de viento (ecuaciones (1.24) y (1.25)).

Lo mismo se hizo con el espectro de direcciones $E(\theta)$, al que se le ajustó una función $G(\theta)$ (Goda, 2000) para obtener el parámetro de dispersión direccional (s). Aunque la función $G(\theta)$ depende también de la frecuencia, en este análisis se ignoró esa variable ya que se trabajó con el espectro de direcciones integrado.

Para obtener un mejor ajuste del parámetro s se usó sólo la ecuación (1.27) y se dejó el parámetro G_0 libre. Además, se realizó una traslación del espectro de direcciones de forma que el valor pico pasara por cero y la curva fuera similar a la función coseno.

3.3 Análisis Modal

Para analizar la multimodalidad del oleaje se realizó un método de particionamiento que consiste en dividir el espectro según su distribución de energía. El método utilizado es análogo al concepto de delimitación de cuencas usado en hidrología, aplicado al espectro invertido. Las diferentes particiones del espectro se definieron asociando cada punto de la matriz espectral a un único valor vecino; el de mayor energía. Puntos de la malla asociados al mismo máximo local son agrupados y cada una de esas agrupaciones se definió como una partición (Figura 3.1, Hanson y Phillips, 2001).

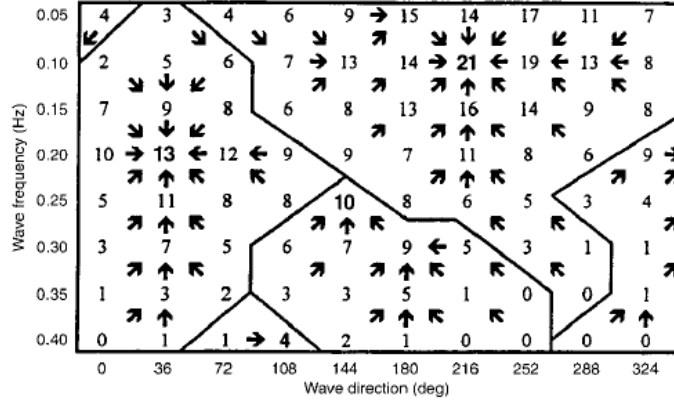


Figura 3.1: Demostración del método de particionamiento espectral (Hanson y Phillips, 2001)

Se realizó un proceso de suavizado para eliminar el ruido presente en los espectros y una combinación de particiones para descartar aquellas particiones menos energéticas (Portilla et al., 2009). A continuación, se describe el algoritmo utilizado:

- Cada espectro se dividió según el algoritmo de Hanson y Phillips (2001).
- Particiones de muy poca energía se unieron a la partición energética más cercana usando la ecuación (3.9). Siguiendo la recomendación de Portilla et al., se estableció un límite inferior de energía del 1% respecto de la energía total del espectro.
- Si el número de particiones era mayor al pre-establecido, el espectro se filtraba (suavizado), se volvía a dividir y las particiones menos energéticas se unían a las más energéticas adyacentes. Se definió un límite máximo de 6 particiones, siguiendo la recomendación de Portilla et al. (2009).
- El paso 3 se repitió hasta que el número de particiones detectadas fuera igual o menor al pre-establecido.

La combinación de particiones se hizo de acuerdo a la mínima distancia entre peaks, que se calcula como:

$$\Delta f^2 = (f_x^{(1)} - f_x^{(2)})^2 + (f_y^{(1)} - f_y^{(2)})^2 \quad (3.9)$$

$$f_x = f \cos \theta \quad (3.10)$$

$$f_y = f \sin \theta \quad (3.11)$$

Donde f es la frecuencia y θ es la dirección asociados al valor peak de la partición.

Luego de esto se aplicaron otros dos criterios propios de combinación de particiones:

- Se definió que una partición correspondía a un modo de oleaje si la altura asociada a ésta era al menos 0.1 m; valor que corresponde al comienzo de las olas en la escala de Douglas. Particiones cuya altura significativa era menor a 0.1 m se definieron como mar de calma y se unieron a la partición energética más cercana.
- Se clasificó cada partición según su frecuencia y dirección pico¹, y se combinaron aquellas que entraban dentro de la misma clasificación. Estas podían corresponder a Mar de Fondo o Mar de Viento dependiendo de su frecuencia, y ser del Norte, Noreste, Este, Sureste, Sur, Suroeste, Oeste o Noroeste dependiendo de la dirección de procedencia. Esto se hizo para tener un número acotado de combinaciones posibles y facilitar el proceso de automatización.

Para saber si la partición correspondía a Mar de Fondo o Mar de Viento se utilizó el método de Portilla et al. (2009). Este se basa en el hecho de que la energía para la frecuencia pico de una partición correspondiente a Mar de Fondo no puede ser mayor que el valor del espectro PM para la misma frecuencia. Esto sucede porque el espectro PM asume una condición de oleaje totalmente desarrollado lo que sobreestima la energía del oleaje que se tiene en la realidad. Con esta hipótesis se realizó el siguiente algoritmo de clasificación:

- Se calculó la razón (γ^*) entre el peak de energía de una partición y la energía de un PM asociada a la misma frecuencia pico.
- Si γ^* estaba sobre un valor umbral ($\gamma^* > 1.0$), la partición se clasificaba como Mar de Viento; de otro modo, se consideraba Mar de Fondo.

Una vez clasificadas las particiones, se calculó la energía espectral (m_0) para cada una y se asignó un número de clasificación según la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Número de identificación para cada tipo de partición

Tipo de partición	Abreviación	Número de clasificación
Mar de Fondo del Norte	MF-N	1
Mar de Fondo del Noreste	MF-NE	2
Mar de Fondo del Este	MF-E	3
Mar de Fondo del Sureste	MF-SE	4
Mar de Fondo del Sur	MF-S	5
Mar de Fondo del Suroeste	MF-SO	6
Mar de Fondo del Oeste	MF-O	7
Mar de Fondo del Noroeste	MF-NO	8
Mar de Viento del Norte	MV-N	9
Mar de Viento del Noreste	MV-NE	10
Mar de Viento del Este	MV-E	11
Mar de Viento del Sureste	MV-SE	12
Mar de Viento del Sur	MV-S	13
Mar de Viento del Suroeste	MV-SO	14
Mar de Viento del Oeste	MV-O	15
Mar de Viento del Noroeste	MV-NO	16

¹ La frecuencia y dirección pico corresponden, en este caso, a los valores asociados al pico de energía del espectro bidimensional y no a los valores de los espectros unidimensionales como es lo habitual.

Luego, para cada espectro, se generó un “código de multimodalidad” que nace de la concatenación de los números de los modos presentes en ese espectro. De este código se pudo deducir cuantos modos tenía cada estado de mar y a qué tipo de oleaje correspondía cada uno según su clasificación.

Utilizando los códigos de multimodalidad, se calculó la frecuencia con la que ocurrían estados de mar unimodales, bimodales, trimodales y multimodales, y la frecuencia con la que ocurría cada uno de los modos presentes en ellos. Con esto se hicieron tablas de incidencia por modo y por casos de oleaje. Además, se hicieron gráficos estacionales del porcentaje de energía de cada modo dentro del espectro.

3.4 Características de la base de datos

La base de datos corresponde a la que se generó para el proyecto “Un Atlas de Oleaje para Chile”, AOC1 (Beyá et al., 2016), la cual posee un nivel de ajuste, en general, superior al de otras bases de datos respecto a mediciones satelitales y de boyas (Gallardo y Álvarez, 2017b). Esta se generó con el modelo WaveWatch III y fue calibrada para clima medio utilizando como forzante vientos ERA-Interim (Gallardo y Álvarez, 2017a). La base de datos se compone de:

- Campos de altura significativa, periodo medio y dirección media para una malla de resolución espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ que abarca el océano Pacífico desde 64°S , 110°E hasta 64°N , 60°O .
- Espectros bidimensionales de energía en función de la frecuencia y dirección. Esta energía está discretizada de forma exponencial con un factor de 1.1 en el sentido de la frecuencia con un mínimo de 0.0345 Hz y un máximo de 0.4975 Hz, y de forma lineal cada 15° en el sentido de la dirección con un mínimo de 7.5° y un máximo de 352.5° .

La resolución temporal de campos y espectros es de 3 horas y su extensión es de 35 años; desde 01/01/1980 00:00 hasta 31/12/2015 21:00.

La información espectral corresponde a 22 nodos ubicados en aguas profundas, 19 de los cuales están distribuidos a lo largo de Chile continental separados cada 2° (en latitud), y 3 corresponden a islas ubicadas mar adentro (Figura 3.2). La Tabla 3.2 muestra las coordenadas de los nodos y una ciudad o localidad referencial, cercana en latitud a la ubicación del nodo.

Tabla 3.2: Coordenadas de los nodos (Beyá et al., 2016)

Macrozona	Nodo	Latitud [°]	Longitud [°]	Profundidad [m]	Localidad
Zona Norte Grande	N1	-19	-72	-5181	Arica
	N2	-21	-72	-4191	Iquique
	N3	-23	-72	-4455	Mejillones
	N4	-25	-72	-4685	Taltal
Zona Norte Chico	N5	-27	-72	-5178	Bahía Inglesa
	N6	-29	-73	-4395	Huasco
	N7	-31	-73	-4750	Tongoy
Zona Centro	N8	-33	-73	-4515	Valparaíso
	N9	-35	-73	-1792	Constitución
Zona Sur	N10	-37	-75	-4404	Talcahuano
	N11	-39	-75	-3825	Puerto Saavedra

	N12	-41	-75	-2464	Bahía Mansa
Zona Austral	N13	-43	-76	-3612	Chiloé
	N14	-45	-76	-2633	Archipiélago de los Chonos
	N15	-47	-77	-3346	Golfo de Penas
	N16	-49	-77	-3293	Isla Esmeralda
	N17	-51	-77	-3798	Isla Diego de Almagro
	N18	-53	-76	-2903	Isla Contreras
	N19	-55	-73	-1625	Isla London
Territorio Insular	N20	-27	-81	-3923	Islas Desventuradas
	N21	-28	-110	-2789	Isla de Pascua
	N22	-35	-81	-3818	Archipiélago de Juan Fernández

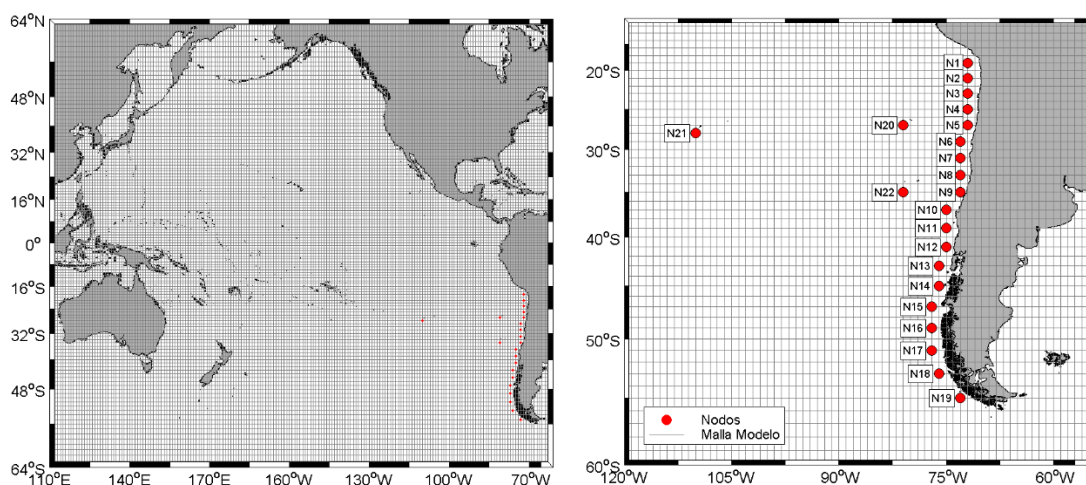


Figura 3.2: Malla del modelo y ubicación de los nodos (Beyá et al., 2016)

Se analizó además la base de datos AOC2 (Beyá et al., 2016), generada también para el proyecto pero calibrada para clima extremo utilizando vientos CFSR (Gallardo y Álvarez, 2017a). Si bien esta base se generó desde 1979, se detectaron algunos valores atípicos dentro de los años 80, por lo que se consideró sólo desde el año 1990 en adelante. La extensión de esta base llega hasta el año 2009 ya que hasta ese año se disponía de datos de viento CFSR (en la actualidad se dispone de datos hasta 2011).

Con esta base se realizó sólo el análisis de eventos extremos y los resultados se incorporaron dentro del gráfico de periodos de retorno univariado en el que se puede apreciar la diferencia de estos valores con la base AOC1.

4 RESULTADOS

Debido a la gran cantidad de nodos estudiados, en esta sección sólo se muestran los resultados obtenidos para seis de ellos; uno de cada macrozona geográfica y uno del territorio insular (Tabla 4.1). Aunque sólo se analizan algunos de ellos en detalle, se presentan los gráficos y tablas de los seis nodos para tener una visión global del oleaje en Chile. Los resultados de los demás nodos se encuentran en el ANEXO B.

En esta sección también se presentan gráficos de variación latitudinal en los que sí se incluyen todos los nodos, a excepción de los del territorio insular.

Tabla 4.1: Nodos seleccionados para comparar resultados

Macrozona	Nodo	Latitud [°]	Longitud [°]	Profundidad [m]	Localidad
Zona Norte Grande	N2	-21	-72	-4191	Iquique
Zona Norte Chico	N5	-27	-72	-5178	Bahía Inglesa
Zona Centro	N8	-33	-73	-4515	Valparaíso
Zona Sur	N12	-41	-75	-2464	Bahía Mansa
Zona Austral	N17	-51	-77	-3798	Isla Diego de Almagro
Territorio Insular	N21	-28	-110	-2789	Isla de Pascua

4.1 Clima Extremo

Con los eventos seleccionados, y de acuerdo a la metodología descrita en la sección 3.1, para cada nodo se generaron los gráficos de periodo de retorno uni y bivariado, y un gráfico polar de dispersión.

4.1.1 Gráfico de periodos de retorno univariado y bivariado

Se graficaron periodos de retorno en función de la altura significativa (caso univariado) y en función de la altura significativa y el periodo medio (caso bivariado). Con el objetivo de comparar valores entre distintas bases, en el análisis univariado se incluyó la base AOC2 de color azul. Estos gráficos también se presentan en el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016).

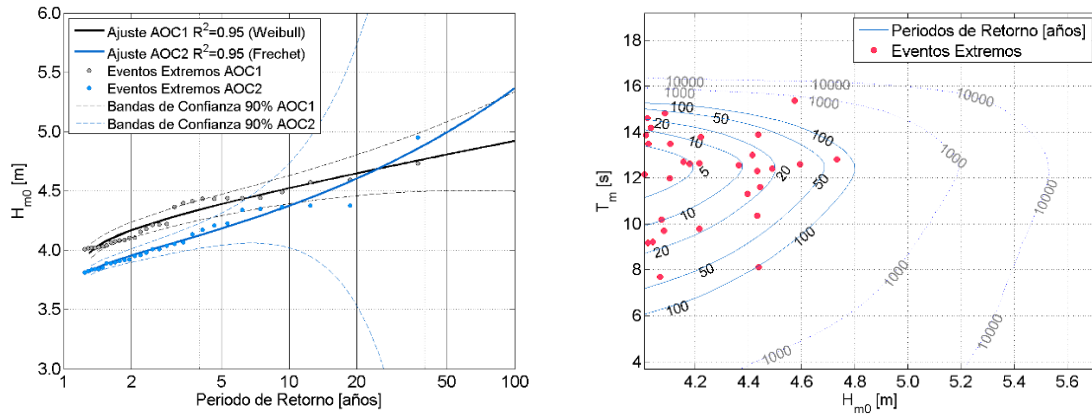


Figura 4.1: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Iquique

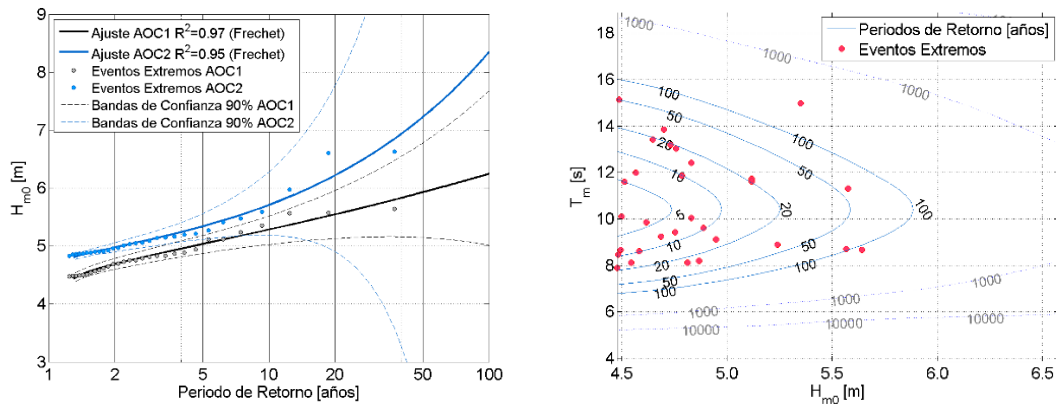


Figura 4.2: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de B. Inglesa

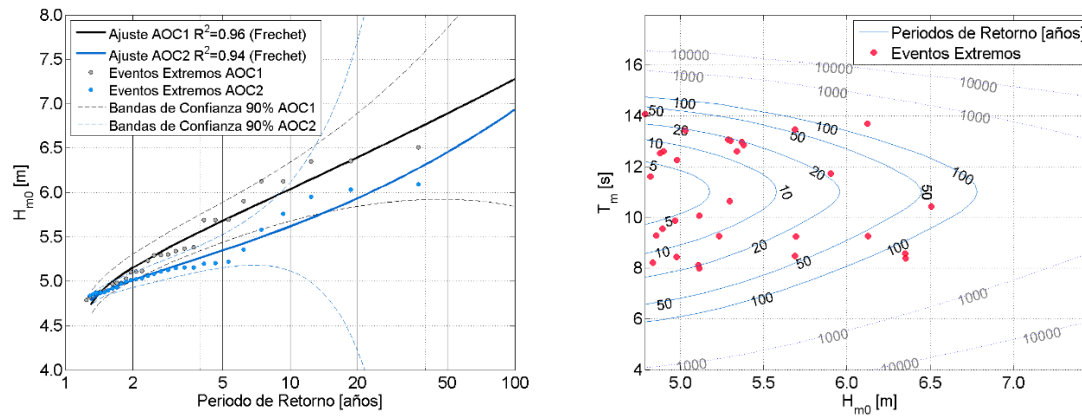


Figura 4.3: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Valparaíso

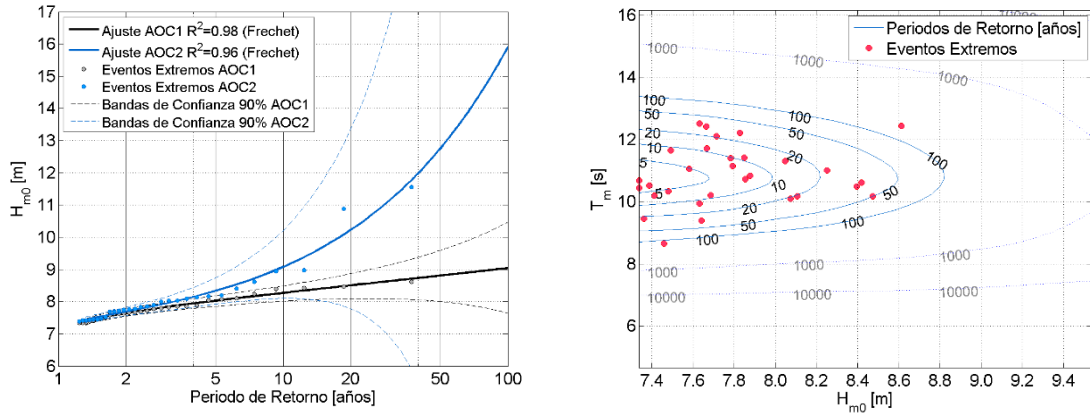


Figura 4.4: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de B. Mansa

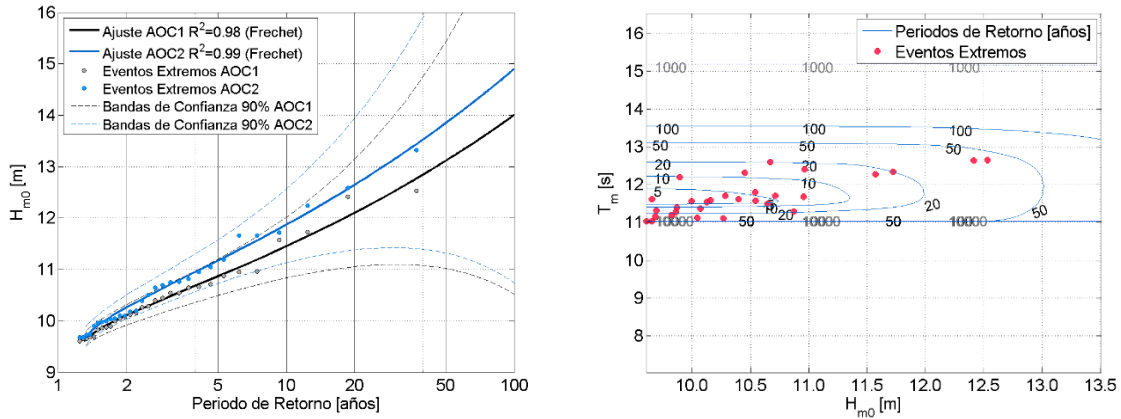


Figura 4.5: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de I. Almagro

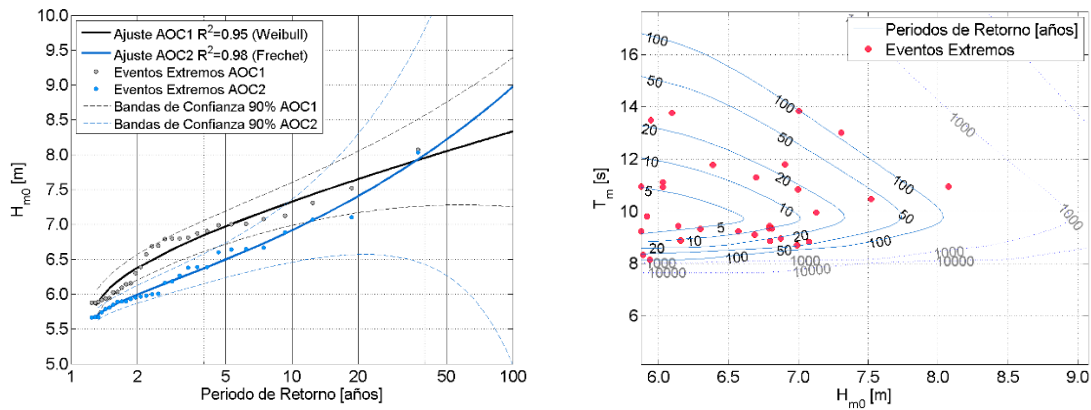


Figura 4.6: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de I. Pascua

Se observan diferencias importantes en los eventos extremos seleccionados de cada base de datos, sobre todo para los nodos de B. Inglesa y B. Mansa, en los cuales la base AOC2 muestra alturas muy superiores a la base AOC1. El tipo y nivel de ajuste también difiere entre las bases, obteniéndose distribuciones de

probabilidad diferentes para un mismo nodo y bandas de confianza mucho más grandes para una base que para otra.

Respecto al gráfico bivariado, se observan valores superiores a los 100 años para aquellos eventos de periodo medio elevado. Destaca el hecho de que eventos de menor altura significativa tienen mayor periodo de retorno que otros de mayor altura. Esto se explica por el valor del periodo medio, que en aquellos casos se aleja de la media. Comparado con los valores del gráfico univariado, los periodos de retorno del bivariado son similares para aquellos eventos de periodo medio típico y difieren en mayor medida para aquellos eventos de periodo medio poco común.

4.1.2 Gráficos polares de dispersión

Se construyó un gráfico polar que muestra la altura significativa de los eventos en el eje radial, la dirección media en el eje angular y el periodo medio en una escala de colores. Estos gráficos también se presentan en el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016).

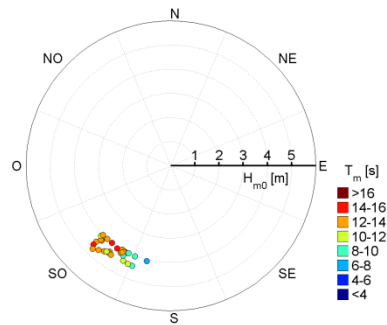


Figura 4.7: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Iquique

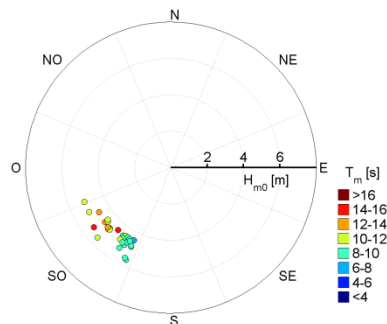


Figura 4.8: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de B. Inglesa

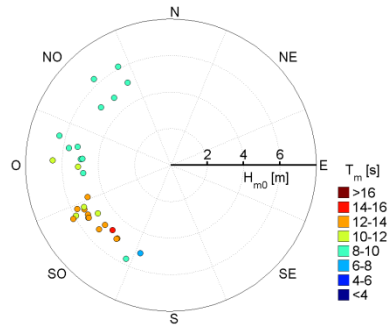


Figura 4.9: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Valparaíso

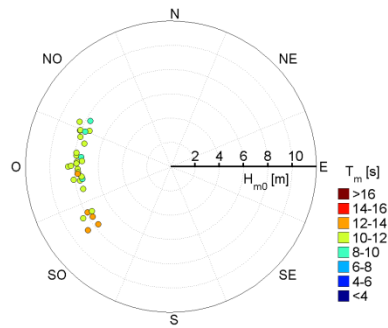


Figura 4.10: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de B. Mansa

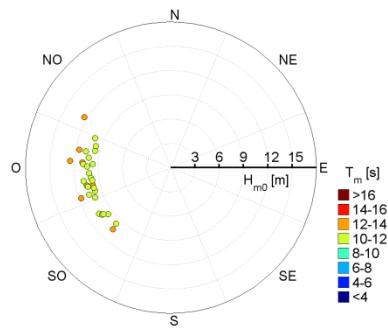


Figura 4.11: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de I. Almagro

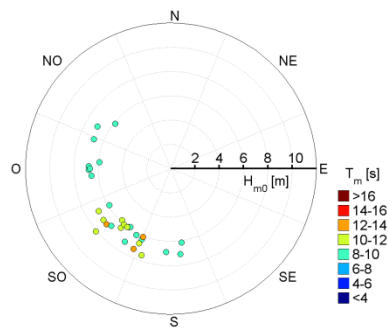


Figura 4.12: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de I. Pascua

En general, los parámetros espectrales de las tormentas tienen un comportamiento similar a los del clima medio; a medida que se avanza hacia el sur las alturas tienden a aumentar, los periodos a disminuir y la dirección de procedencia pasa de ser suroeste a oeste. Sin embargo, destaca la gran dispersión de direcciones en la zona centro, esto tanto para el nodo de Valparaíso como para el de Isla de Pascua, donde se tienen tormentas de dirección sur hasta noroeste.

4.1.3 Gráficos de variación latitudinal

Con el objetivo de comparar el análisis univariado con el bivariado, se calculó la altura correspondiente a un periodo de retorno de 50 años para cada caso. Como el caso bivariado entrega muchos pares de H_{m0} - T_m para un mismo periodo de retorno, se utilizaron tres valores de T_m para estimar la correspondiente altura; el valor promedio de T_m de las tormentas seleccionadas ($T_{m p}$), el valor promedio menos una desviación estándar ($T_{m p-de}$) y el valor promedio más una desviación estándar ($T_{m p+de}$).

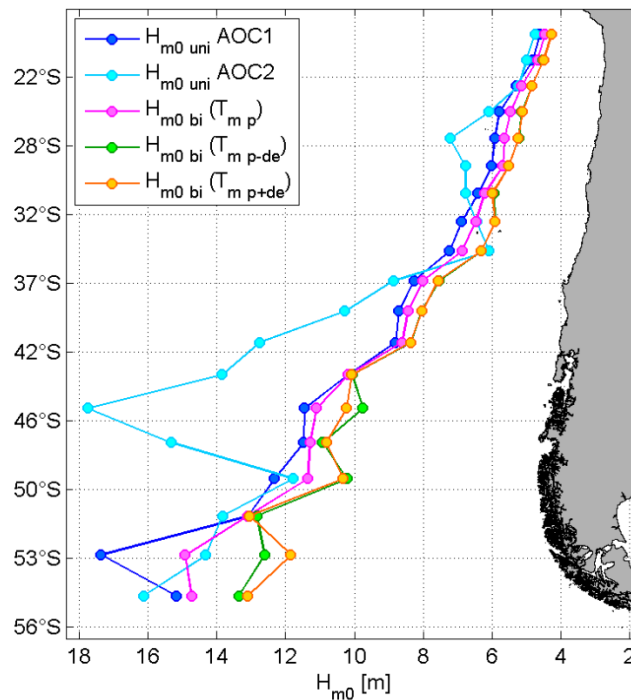


Figura 4.13: H_{m0} para $T_R=50$ años según el método univariado para las bases AOC1 y AOC2, y según el método bivariado utilizando distintos periodos de oleaje para la base AOC1.

Al comparar las dos bases de datos con el método univariado, se observa que en 15 de 22 nodos la altura significativa de la base AOC2 es superior a la de la base AOC1 para $T_R=50$ años. En cuanto al análisis bivariado, éste presenta valores menores de altura respecto al univariado en todos los nodos.

Los valores de altura obtenidos sumando y restando una desviación estándar al periodo promedio resultaron ser bastante similares entre sí en 16 de los 19 casos, lo que demuestra cierta simetría en la forma de la distribución de periodos. Por otro lado, también existen casos en que la distribución de periodos está tan acotada inferiormente que resulta imposible estimar periodos de retorno para periodos de oleaje muy bajos (nodo 6).

A continuación, y a modo de comparación, se presentan gráficos con los valores promedio, mínimos y máximos de altura significativa y periodo medio de las tormentas, por nodo.

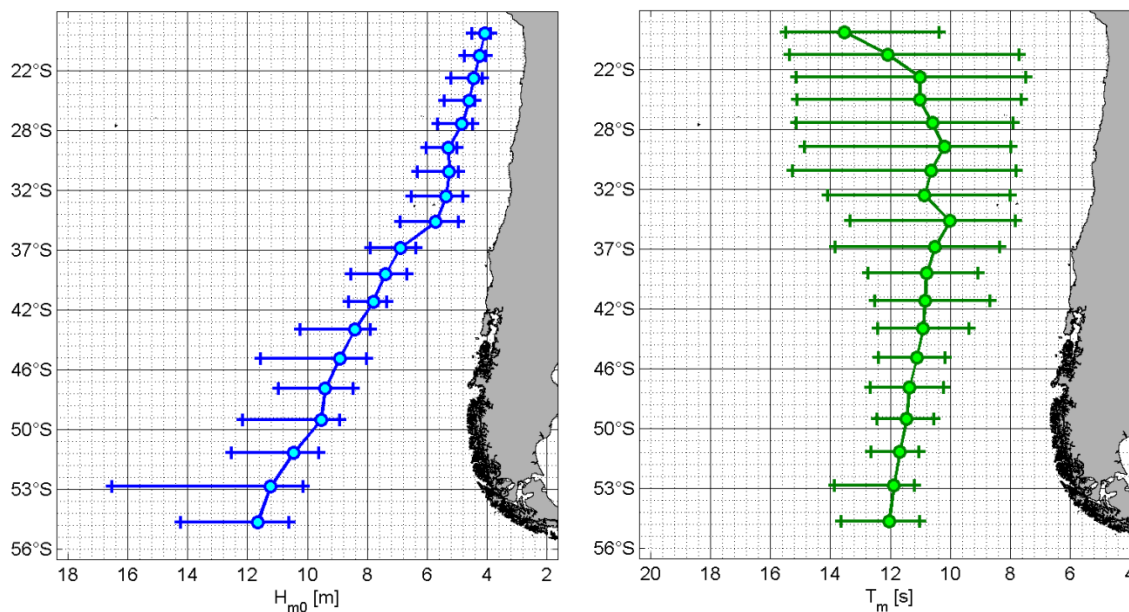


Figura 4.14: Valores promedio, mínimos y máximos de H_{m0} y T_m de las tormentas

Se confirma el aumento de la altura significativa hacia el sur y la gran dispersión de periodos medios en el norte y centro del país. Los valores promedio de altura van desde los 4.1 m en el extremo norte a los 11.7 m en el extremo sur, mientras que los periodos medios promedio oscilan entre 10 s y 14 s.

4.2 Parámetros espectrales de forma

La Tabla 4.2 muestra los parámetros espectrales de forma promedio calculados para cada uno de los seis nodos en estudio utilizando toda la estadística.

Tabla 4.2: Parámetros espectrales promedio por nodo

	Iquique	B. Inglesa	Valparaíso	B. Mansa	I. Almagro	I. Pascua
ϵ	0.83	0.81	0.80	0.81	0.78	0.80
ν	0.56	0.54	0.53	0.51	0.47	0.51
Q_p	2.15	1.94	1.94	2.06	1.93	2.02
γ	1.61	1.42	1.42	1.43	1.26	1.45
s	28.2	24.2	21.9	16.6	8.6	22.3

Se observa una leve disminución de ϵ y ν hacia el sur, mientras que el valor de Q_p oscila entre valores cercanos a 2. Los parámetros γ y s también disminuyen de norte a sur, lo que refleja una disminución de la estrechez del espectro.

Isla de Pascua escapa del análisis latitudinal por encontrarse demasiado lejos de la costa, sin embargo, sus valores son similares a los de la zona central del país.

4.2.1 Graficos de variación latitudinal

A continuación, se presentan gráficos de variación latitudinal de los parámetros espectrales de forma (ε , v , Q_p , γ y s). Para cada variable se graficó el promedio y los percentiles 5 y 95, por nodo.

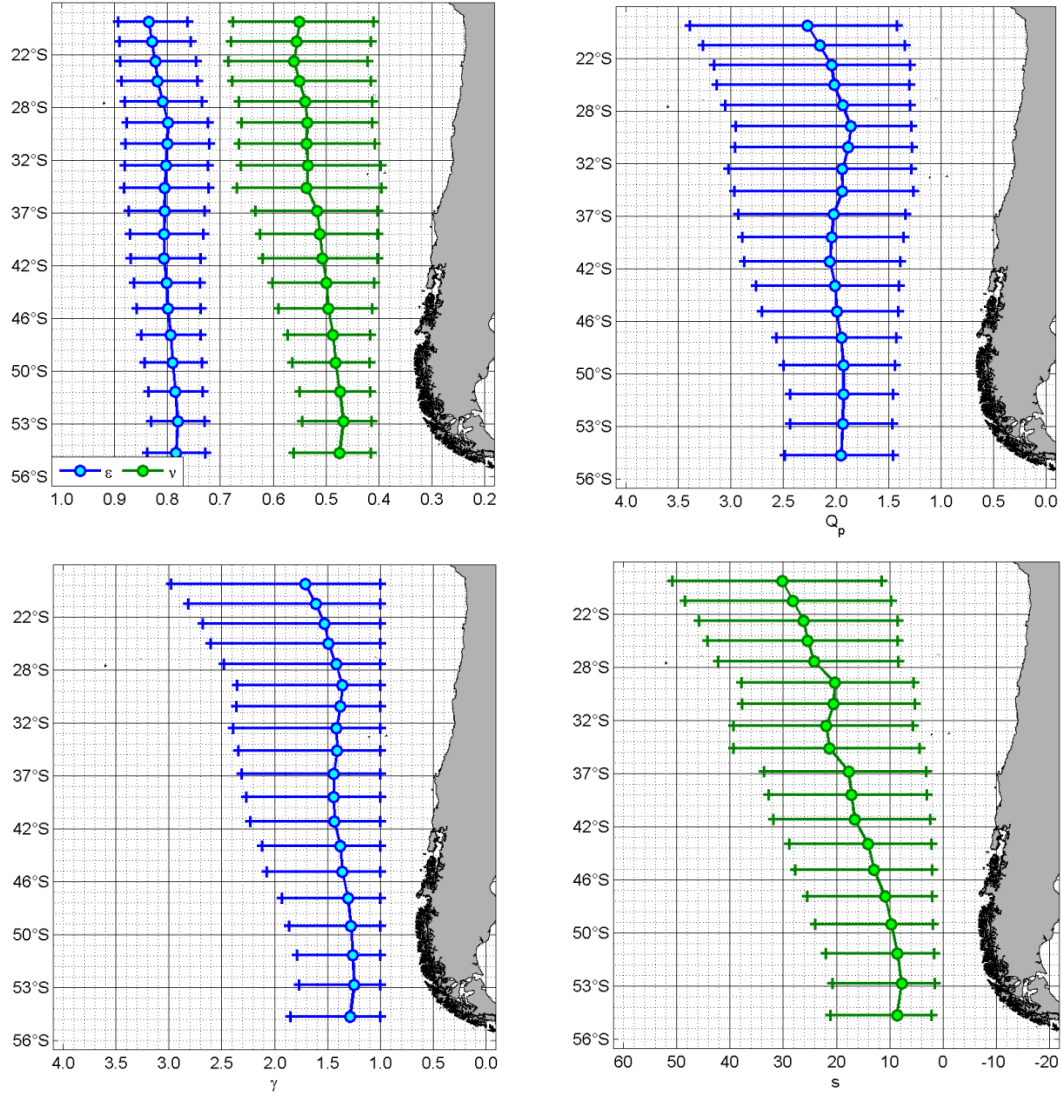


Figura 4.15: Valores promedio, percentil 5 y 95 de ε , v , Q_p , γ y s

Se observa que los parámetros de ancho espectral (ε y v) tienden a disminuir, lo que se nota más en los valores de v , mientras que los valores de Q_p disminuyen hasta la latitud 29°S, luego aumentan hasta la latitud 41°S y vuelven a disminuir hasta la zona austral. Los valores promedio de ε están entre 0.83 y 0.78, los de v entre 0.56 y 0.47, y los de Q_p entre 2.3 y 1.8.

Los valores de γ y s también disminuyen hacia el sur y, al igual que los demás parámetros de forma, disminuyen también su rango. El parámetro γ disminuye de 1.7 a 1.25 y el spreading de 30 a 8. En ambos casos el máximo se produce en la latitud 19°S y el mínimo en la latitud 53°S.

4.2.2 Espectros unidimensionales de frecuencia y dirección

Para cada nodo se graficó el espectro promedio de frecuencias, espectros correspondientes a los percentiles 5, 50 y 95 y un espectro JONSWAP calculado a partir del γ promedio. Asimismo, se graficó el espectro promedio de direcciones, los percentiles 5, 50 y 95 y un espectro basado en la función $G(\theta)$ utilizando un s promedio. Estos gráficos también se presentan en el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016).

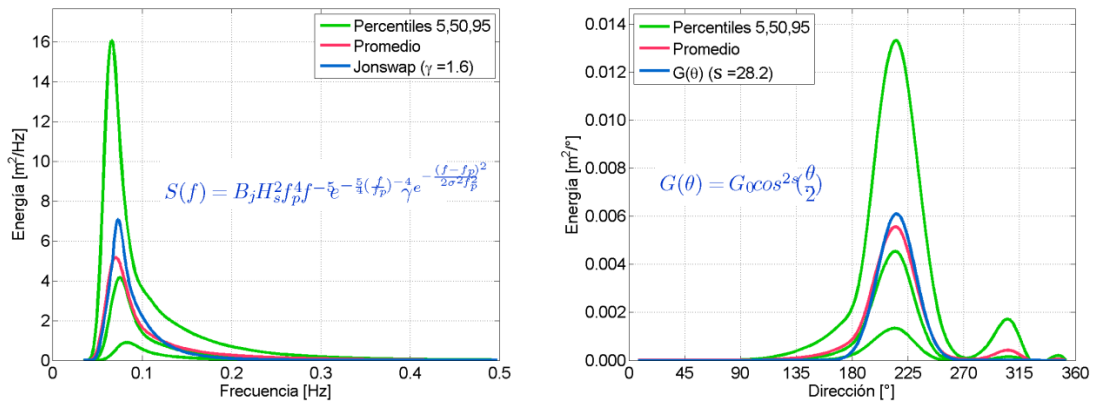


Figura 4.16: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Iquique

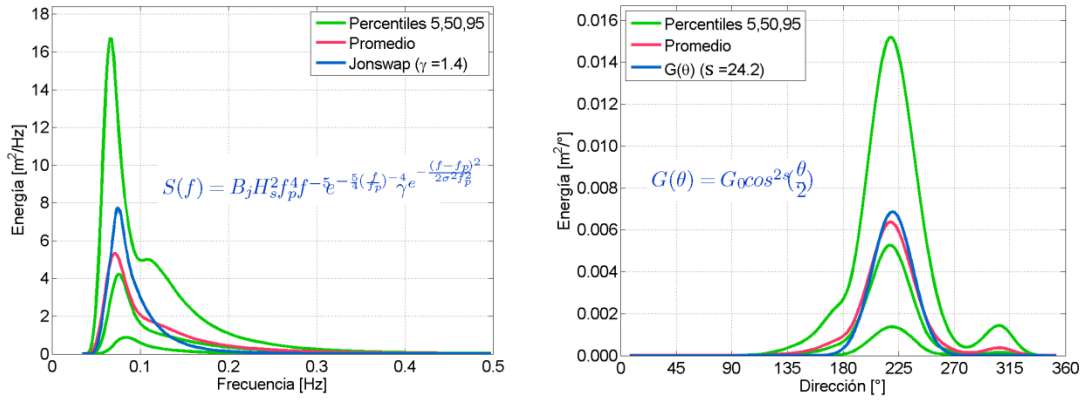


Figura 4.17: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de B. Inglesa

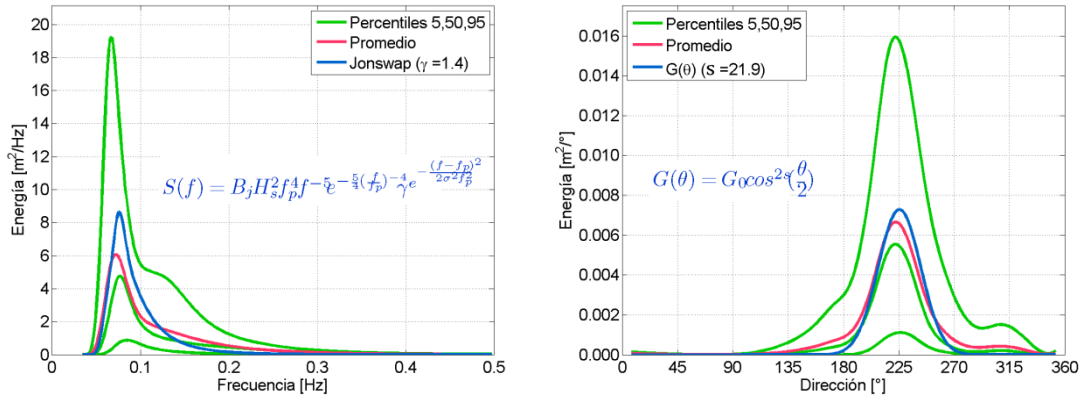


Figura 4.18: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Valparaíso

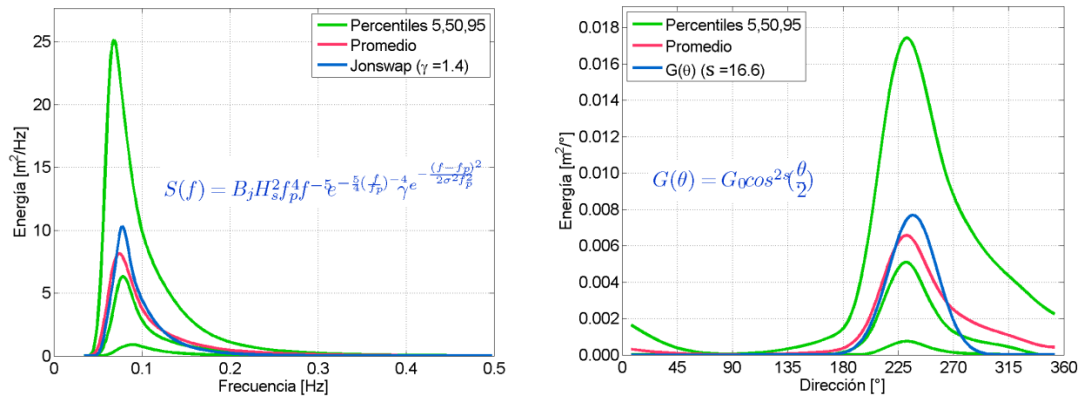


Figura 4.19: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de B. Mansa

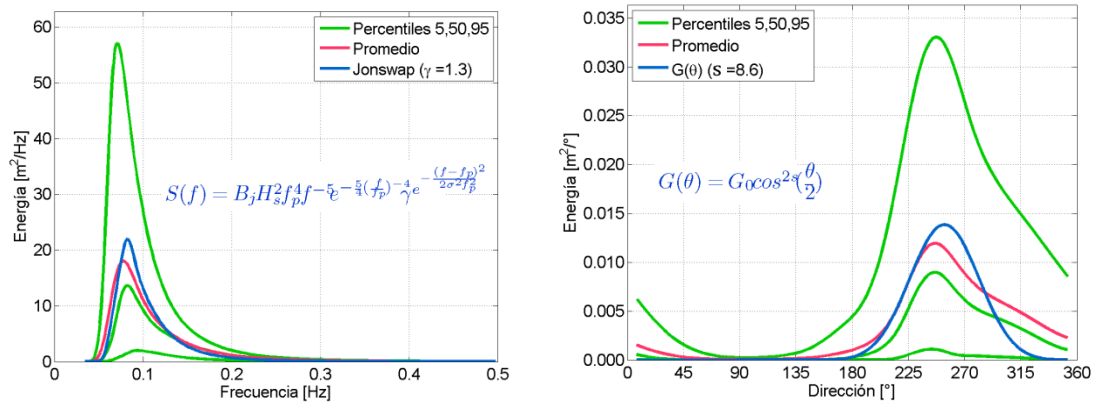


Figura 4.20: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de I. Almagro

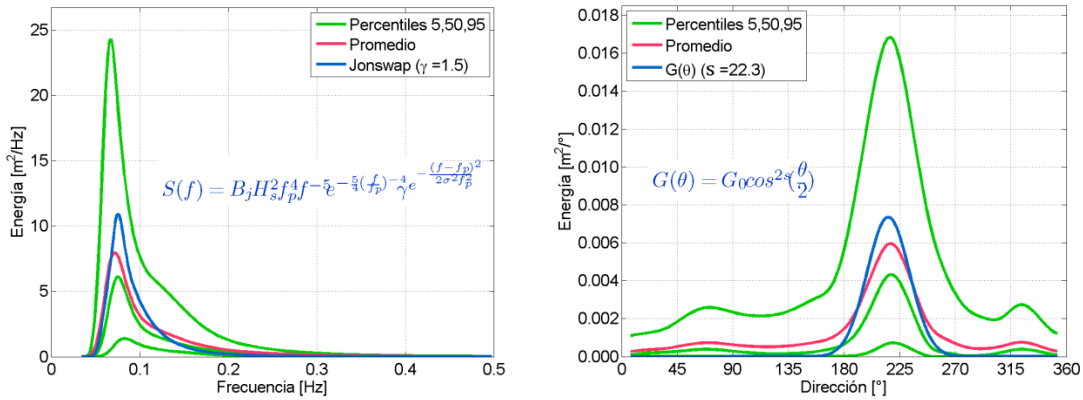


Figura 4.21: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de I. Pascua

De los espectros de frecuencia se puede ver en los nodos B. Inglesa y Valparaíso (norte chico y zona centro) un segundo peak menos energético que el principal pero de mayor frecuencia, lo que correspondería a una componente de oleaje de menor periodo. Dejando de lado este segundo peak, se observa que los espectros del norte son más esbeltos que los del sur, lo que se ve reflejado en los valores de γ .

Respecto a los espectros de dirección, se observa que el peak de energía está asociado a la dirección suroeste ($\sim 220^\circ$) para los nodos del norte y que, a medida que se avanza hacia el sur, se va trasladando hacia el oeste ($\sim 260^\circ$). Además, para los nodos del norte y centro, existe un segundo peak que indica la presencia de oleaje del noroeste ($\sim 310^\circ$). Al igual que los espectros de frecuencia, los de dirección disminuyen su esbeltez hacia el sur, lo que se traduce en menores valores de s .

En el nodo de Isla de Pascua también se ve presencia de oleaje de menor periodo y proveniente de distintas direcciones. Además del peak principal de la dirección suroeste y el secundario de la dirección noroeste, existe energía asociada a todas las direcciones destacándose un peak de la dirección este.

4.3 Multimodalidad

Se calcula la incidencia de cada modo y las combinaciones de modos más recurrentes. Esta información se presenta en las tablas que se muestran a continuación. Además, se presentan gráficos de distribución de energía que permiten conocer la influencia de cada modo en los estados de mar. Recordar que MF es la abreviación de Mar de Fondo y MV la abreviación de Mar de Viento. N, NE, E, SE, S, SO, O, NO corresponden a las direcciones de procedencia.

4.3.1 Tabla de distribución de modos

Se muestra la incidencia o frecuencia porcentual relativa de los distintos modos de oleaje clasificados por tipo y dirección. Los porcentajes están referidos a la categoría inmediatamente anterior. Por ejemplo, para el nodo de Iquique, el 51.5% del tiempo se presenta un oleaje bimodal. De ese porcentaje, el 92.9% del tiempo el segundo modo corresponde a mar de fondo. Cuando ocurre este segundo modo de mar de fondo,

se presenta el 86.7% del tiempo desde la dirección noroeste. Estas tablas también se presentan en el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016).

Tabla 4.3: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Iquique

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 34.3	primer modo	mar de fondo	100.0			<0.1	99.7	0.2			
		mar de viento	<0.1				100.0				
bimodal 51.5	primer modo	mar de fondo	99.5			0.5	98.0	1.3	0.3		
		mar de viento	0.5			13.7	86.3				
	segundo modo	mar de fondo	92.9			7.8	1.8	3.7	86.7		
		mar de viento	7.1			70.0	30.0				
trimodal 13.1	primer modo	mar de fondo	98.7			3.9	90.4	4.1	1.7		
		mar de viento	1.3			37.3	62.7				
	segundo modo	mar de fondo	82.1			36.3	9.3	8.9	45.5		
		mar de viento	17.9			75.3	24.6	<0.1			
	tercer modo	mar de fondo	83.6		<0.1	29.4	2.7	10.4	57.5	<0.1	
		mar de viento	16.4			78.9	21.1				

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 1.2 % de la totalidad de casos

Tabla 4.4: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de B. Inglesa

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 32.7	primer modo	mar de fondo	99.7				97.6	2.4			
		mar de viento	0.3				100.0				
bimodal 54.9	primer modo	mar de fondo	96.9			<0.1	95.1	4.6	0.2		
		mar de viento	3.1			2.0	97.9			<0.1	
	segundo modo	mar de fondo	92.1			0.7	6.8	7.2	85.1	0.2	
		mar de viento	7.9			8.1	89.5	<0.1	0.5	1.8	
trimodal 11.3	primer modo	mar de fondo	83.7			0.5	83.3	14.7	1.4		
		mar de viento	16.3			3.3	96.6		<0.1	<0.1	
	segundo modo	mar de fondo	71.7			6.8	33.2	24.8	34.9	0.3	
		mar de viento	28.3			6.2	92.5		0.3	1.0	
	tercer modo	mar de fondo	86.1			5.7	5.6	14.6	71.2	2.8	<0.1
		mar de viento	13.9			7.8	89.9	<0.1	0.7	1.6	

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 1.0 % de la totalidad de casos

Tabla 4.5: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Valparaíso

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 26.0	primer modo	mar de fondo	99.8			<0.1	89.6	10.4	<0.1		
		mar de viento	0.2			4.7	83.7		2.3	9.3	
bimodal 51.4	primer modo	mar de fondo	95.8			<0.1	90.2	9.1	0.6	<0.1	
		mar de viento	4.2			14.9	77.1	<0.1	2.2	5.8	
	segundo modo	mar de fondo	86.7	<0.1	<0.1	2.5	10.6	7.8	77.4	1.4	0.2
		mar de viento	13.3		<0.1	39.9	50.4	0.2	2.9	6.6	
trimodal 19.9	primer modo	mar de fondo	78.6			0.4	77.4	20.1	1.8	0.3	
		mar de viento	21.4			12.3	83.7	<0.1	0.9	3.1	
	segundo modo	mar de fondo	68.5		<0.1	5.6	41.0	23.3	27.6	2.4	0.1
		mar de viento	31.5	<0.1	<0.1	27.2	66.5	<0.1	1.6	4.6	
	tercer modo	mar de fondo	89.9	<0.1	0.4	4.6	8.6	11.9	71.0	3.3	0.2
		mar de viento	10.1	<0.1		29.2	58.5	0.6	5.2	6.4	0.1

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 2.7 % de la totalidad de casos

Tabla 4.6: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de B. Mansa

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 33.2	primer modo	mar de fondo	99.2			<0.1	68.6	30.6	0.7	<0.1	
		mar de viento	0.8				9.1	52.7	34.1	4.2	
bimodal 47.0	primer modo	mar de fondo	98.3			<0.1	71.7	21.8	5.8	0.7	<0.1
		mar de viento	1.7	0.9		2.6	4.8	5.8	41.9	41.9	2.1
	segundo modo	mar de fondo	95.5	<0.1	0.4	2.5	14.8	8.1	69.7	4.1	0.2
		mar de viento	4.5	2.3	3.5	35.3	12.6	0.8	17.5	24.0	4.1
trimodal 16.9	primer modo	mar de fondo	95.5	<0.1		0.8	58.9	30.8	6.7	2.7	<0.1
		mar de viento	4.5	1.7	0.4	21.5	12.2	3.4	20.5	37.9	2.4
	segundo modo	mar de fondo	85.5	0.3	1.0	13.2	26.1	22.8	28.4	7.6	0.5
		mar de viento	14.5	1.4	3.8	45.8	19.0	1.0	9.4	17.3	2.3
	tercer modo	mar de fondo	93.7	0.5	2.1	7.4	14.0	11.8	55.2	8.1	0.9
		mar de viento	6.3	3.0	6.7	32.4	23.8	1.4	10.8	16.7	5.2

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 2.9 % de la totalidad de casos

Tabla 4.7: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de I. Almagro

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 40.1	primer modo	mar de fondo	87.5		<0.1	0.2	30.1	65.3	4.3	0.1	
		mar de viento	12.5		<0.1	0.6	21.9	55.9	18.5	3.1	
bimodal 38.9	primer modo	mar de fondo	89.5	<0.1	<0.1	1.8	31.3	46.4	17.3	3.1	
		mar de viento	10.5		1.1	3.0	6.7	14.5	47.2	27.5	<0.1
	segundo modo	mar de fondo	94.0	<0.1	0.3	6.2	13.0	19.4	51.8	9.2	<0.1
		mar de viento	6.0	0.8	4.3	4.7	1.7	6.6	52.3	28.5	1.2
trimodal 15.7	primer modo	mar de fondo	87.5	<0.1	0.5	10.5	28.0	37.6	15.9	7.5	<0.1
		mar de viento	12.5	0.1	6.9	9.8	4.6	6.2	39.7	31.7	0.9
	segundo modo	mar de fondo	87.2	0.2	1.3	14.3	20.1	24.1	25.5	14.3	0.2
		mar de viento	12.8	1.8	7.6	10.4	5.1	5.9	39.8	27.9	1.6
	tercer modo	mar de fondo	94.5	0.6	2.3	14.4	14.9	11.6	42.6	13.1	0.4
		mar de viento	5.5	7.1	12.7	12.9	11.1	8.0	24.9	17.5	5.7

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 5.3 % de la totalidad de casos

Tabla 4.8: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de I. Pascua

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 5.2	primer modo	mar de fondo	98.6	<0.1	0.8	8.0	82.7	8.5	<0.1		
		mar de viento	1.4	3.8	9.0	33.3	20.5	28.2	1.3		3.8
bimodal 19.2	primer modo	mar de fondo	96.0	5.7	4.7	7.9	71.5	8.2	1.0	0.1	0.9
		mar de viento	4.0	23.6	27.3	4.0	4.0	9.5	17.6	6.2	7.9
	segundo modo	mar de fondo	95.2	31.2	8.5	8.4	19.6	4.5	10.1	5.7	12.0
		mar de viento	4.8	21.5	22.9	4.1	1.4	2.7	19.5	14.9	12.9
trimodal 33.9	primer modo	mar de fondo	95.7	8.3	3.1	7.3	71.7	6.5	1.3	0.3	1.4
		mar de viento	4.3	28.1	21.3	3.0	1.7	5.8	16.4	12.9	10.8
	segundo modo	mar de fondo	93.3	30.2	7.2	7.6	18.4	5.4	14.7	6.8	9.7
		mar de viento	6.7	18.3	21.3	6.8	2.5	3.4	16.1	20.4	11.3
	tercer modo	mar de fondo	97.4	17.3	6.3	7.3	5.2	4.5	27.9	21.3	10.2
		mar de viento	2.6	9.6	11.2	9.6	4.9	6.3	15.7	26.8	15.8

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 41.7 % de la totalidad de casos

Se observa que la mayor parte del tiempo (~50%) se tiene un oleaje bimodal a lo largo de la costa continental, a excepción de la zona austral donde el nodo I. Almagro presenta porcentajes similares de oleaje uni y bimodal (~40%). Por otro lado, en Isla de Pascua, más del 40% del tiempo coexisten más de 3 modos de oleaje al mismo tiempo.

Respecto al tipo de modo más recurrente, en el caso unimodal la mayoría de las veces corresponde a mar de fondo del suroeste, exceptuando nuevamente el nodo I. Almagro cuyo modo más frecuente para el caso unimodal es el mar de fondo del oeste.

Las veces que se produce oleaje bimodal, el primer modo (el más energético) generalmente corresponde al mismo modo del caso unimodal mientras que el segundo, si bien casi siempre corresponde a mar de fondo del noroeste, las veces que se trata de mar de viento llega de direcciones diferentes según la zona. Cuando se produce mar de viento, en las zonas norte grande y sur predomina el oleaje del sur, en las zonas norte chico y centro, del suroeste, y en la zona austral, del noroeste. Para el caso de Isla de Pascua los porcentajes de incidencia del segundo modo se distribuyen entre todas las direcciones, siendo el oleaje del este uno de los más recurrentes.

Cuando se produce oleaje trimodal destaca el hecho de que la probabilidad de que el segundo modo sea mar de viento es mayor que para el caso bimodal. Este segundo modo tiende a ser del sur o suroeste cuando es mar de viento y no muestra una tendencia clara cuando es de fondo, exceptuando nuevamente al nodo austral cuyo segundo modo suele ser del noroeste. Por otro lado, el tercer modo tiende a parecerse al segundo modo del caso bimodal.

4.3.2 Tabla de los estados de mar más recurrentes

Se muestran las 10 combinaciones de modos más recurrentes y sus porcentajes de incidencia, para la estadística completa y separada por estaciones del año. Estas tablas también se presentan en el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016).

Tabla 4.9: Distribución porcentual de casos para el nodo de Iquique

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SO + MF del NO	19.2	13.1	0.7	8.5	41.5
MF del SO	0.8	5.7	16.2	11.5	34.2
MF del S + MF del SO + MF del NO	2.5	2.5	0.3	1.1	6.3
MF del S + MF del SO	0.0	0.6	2.1	0.9	3.6
MF del SO + MF del NO + MV del S	1.2	1.2	0.1	0.4	3.0
MF del SO + MV del S	0.0	0.5	1.4	0.6	2.5
MF del SO + MF del O	0.0	0.1	1.4	0.5	2.0
MF del SO + MV del SO	0.0	0.2	0.7	0.4	1.3
MF del SO + MF del O + MF del NO	0.3	0.4	0.2	0.2	1.1
MF del S + MF del SO + MF del O	0.0	0.1	0.7	0.2	1.0
Otros	0.6	0.8	1.3	0.7	3.5
Suma	25	25	25	25	100

Tabla 4.10: Distribución porcentual de casos para el nodo de B. Inglesa

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SO + MF del NO	20.3	13.9	0.7	8.0	42.9
MF del SO	0.8	5.8	14.5	10.7	31.8
MF del SO + MF del O	0.0	0.4	3.8	1.1	5.3
MF del SO + MF del NO + MV del SO	2.0	1.8	0.1	1.1	5.0
MF del SO + MV del SO	0.0	0.7	2.6	1.7	5.0
MF del SO + MF del O + MF del NO	0.7	1.2	0.6	0.8	3.3
MF del SO + MF del O + MV del SO	0.0	0.1	0.7	0.3	1.0
MF del S + MF del SO + MF del NO	0.3	0.3	0.0	0.2	0.9
MF del O	0.0	0.1	0.6	0.1	0.8
MF del SO + MF del O + MF del NO + MV del SO	0.1	0.2	0.2	0.1	0.6
Otros	0.5	0.7	1.4	0.8	3.3
Suma	25	25	25	25	100

Tabla 4.11: Distribución porcentual de casos para el nodo de Valparaíso

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SO + MF del NO	16.4	10.4	0.9	6.2	33.8
MF del SO	1.4	4.5	9.3	8.0	23.3
MF del SO + MF del NO + MV del SO	3.7	2.2	0.0	1.6	7.6
MF del SO + MF del O	0.0	0.6	3.8	1.4	5.8
MF del SO + MF del O + MF del NO	1.0	2.0	0.8	1.3	5.1
MF del SO + MV del SO	0.3	0.8	1.5	2.1	4.7
MF del O	0.0	0.3	2.0	0.4	2.7
MF del SO + MV del S	0.0	0.5	1.5	0.7	2.7
MF del SO + MF del NO + MV del S	0.5	0.8	0.1	0.4	1.7
MF del S + MF del SO	0.0	0.2	0.5	0.4	1.1
Otros	1.3	2.8	4.9	2.6	11.6
Suma	25	25	25	25	100

Tabla 4.12: Distribución porcentual de casos para el nodo de B. Mansa

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SO + MF del NO	12.9	8.0	2.4	5.4	28.7
MF del SO	2.4	5.8	6.6	7.8	22.6
MF del O	0.7	1.9	4.9	2.6	10.1
MF del SO + MF del O	0.2	0.9	3.3	2.2	6.6
MF del SO + MF del O + MF del NO	2.3	1.9	0.6	1.6	6.3
MF del O + MF del NO	2.1	1.3	0.6	1.1	5.1
MF del S + MF del SO + MF del NO	1.1	0.7	0.1	0.3	2.1
MF del N + MF del SO + MF del NO	0.2	0.4	0.4	0.3	1.3
MF del N + MF del SO	0.0	0.3	0.7	0.2	1.2
MF del SO + MF del NO + MV del S	0.6	0.4	0.0	0.2	1.2
Otros	2.2	3.7	5.5	3.4	14.8
Suma	25	25	25	25	100

Tabla 4.13: Distribución porcentual de casos para el nodo de I. Almagro

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del O	6.0	5.5	4.8	6.5	22.9
MF del O + MF del NO	5.6	2.8	1.6	2.8	12.8
MF del SO	1.4	2.8	3.1	3.3	10.6
MF del SO + MF del NO	2.9	2.7	2.4	2.6	10.5
MF del N + MF del O	0.4	0.7	1.0	0.8	2.9
MV del O	0.7	0.7	0.7	0.7	2.8
MF del SO + MF del O + MF del NO	0.9	0.5	0.3	0.5	2.2
MF del SO + MF del O	0.3	0.5	0.6	0.5	1.9
MF del O + MV del NO	0.4	0.5	0.4	0.6	1.9
MF del S + MF del O	0.3	0.4	0.7	0.5	1.9
Otros	5.8	8.0	9.5	6.3	29.5
Suma	25	25	25	25	100

Tabla 4.14: Distribución porcentual de casos para el nodo de I. Pascua

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del E + MF del SO + MF del NO	3.5	1.8	0.1	1.7	7.2
MF del E + MF del SO	0.1	1.1	2.7	2.2	6.1
MF del N + MF del E + MF del SO	1.2	1.5	0.2	1.6	4.6
MF del SO	0.0	1.0	2.3	0.9	4.2
MF del NE + MF del SO + MF NO	1.1	0.6	0.1	0.6	2.4
MF del NE + MF del SO	0.0	0.4	1.0	0.6	2.1
MF del SE + MF del SO	0.0	0.5	1.1	0.5	2.1
MF del SO + MF del NO	0.6	0.6	0.2	0.4	1.8
MF del S + MF del SO	0.0	0.3	1.0	0.3	1.6
MF del E + MF del S + MF del SO	0.0	0.2	0.9	0.5	1.6
Otros	18.0	17.3	15.5	15.6	66.4
Suma	25	25	25	25	100

La combinación más recurrente desde la zona norte a la zona sur es un oleaje bimodal compuesto de dos sistemas de mar de fondo; uno del suroeste y otro del noroeste. El siguiente caso más recurrente es un oleaje unimodal correspondiente a mar de fondo del suroeste. Los siguientes casos pueden corresponder a un oleaje uni, bi o trimodal dependiendo de la zona. En la zona norte grande aparece mar de fondo del sur que se combina con los casos anteriores formando oleaje bi y trimodal, a las zonas norte chico y centro llega mar de viento del suroeste generando el mismo efecto, y a la zona sur incide mar de fondo del oeste que pasa a ser el oleaje más recurrente en la zona austral. Por otro lado, en Isla de Pascua, las combinaciones más recurrentes son oleajes bi y trimodales con gran presencia de mar de fondo del este.

Respecto al análisis estacional cabe destacar que el oleaje unimodal es característico de los meses de invierno y los oleajes bi y trimodales se presentan principalmente en los meses de verano. Esto ocurre porque los sistemas de oleaje que acompañan al modo principal (mar de fondo del suroeste) llegan a las costas de Chile durante esos meses, ya sea mar de fondo del noroeste, mar de viento del suroeste o una combinación de ambos.

4.3.3 Gráfico de distribución de la energía espectral por modo

Para cada estación del año se crearon gráficos de porcentaje de energía espectral promedio por modo. Para esto se calculó el porcentaje de energía espectral (m_0) de cada modo respecto a la energía total del espectro para cada estado de mar. En los casos que no se presentó algún modo, se consideró su energía igual a cero. Luego se promediaron estos porcentajes para cada modo y cada estación del año. Estos gráficos también se presentan en el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016).

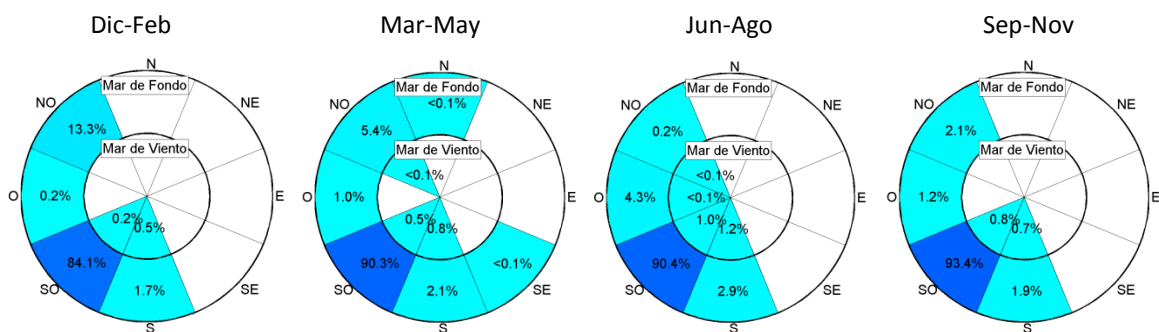


Figura 4.22: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Iquique

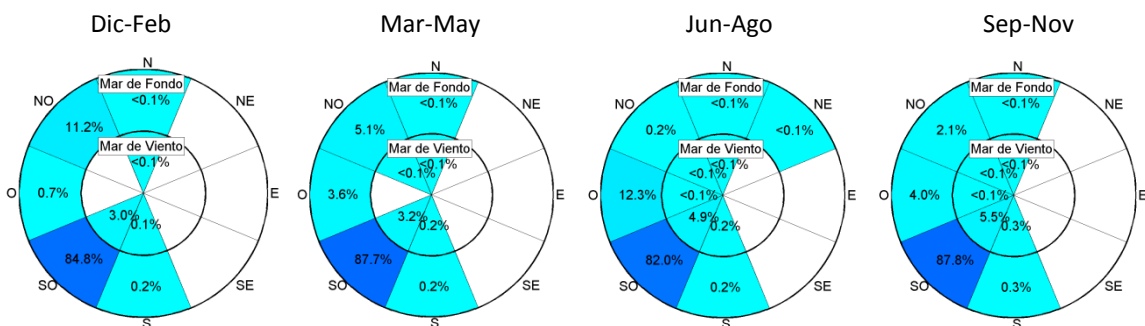


Figura 4.23: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de B. Inglesa

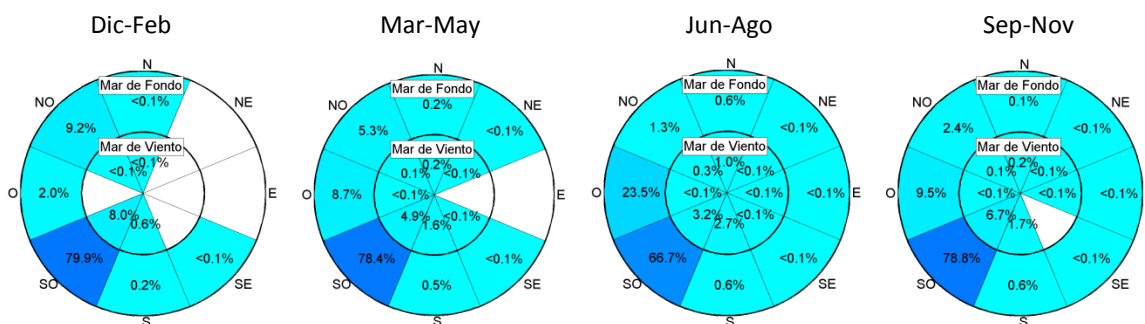


Figura 4.24: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Valparaíso

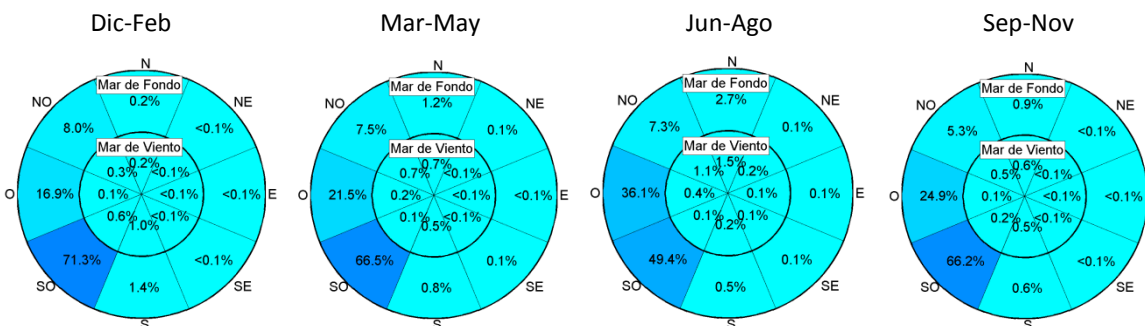


Figura 4.25: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de B. Mansa

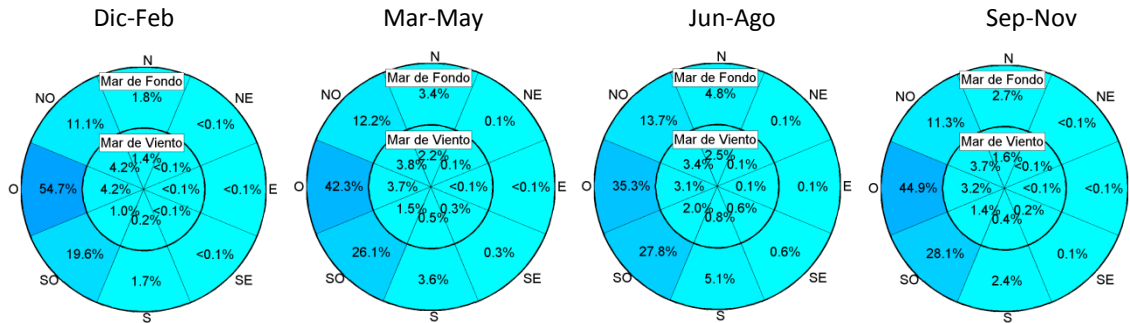


Figura 4.26: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de I. Almagro

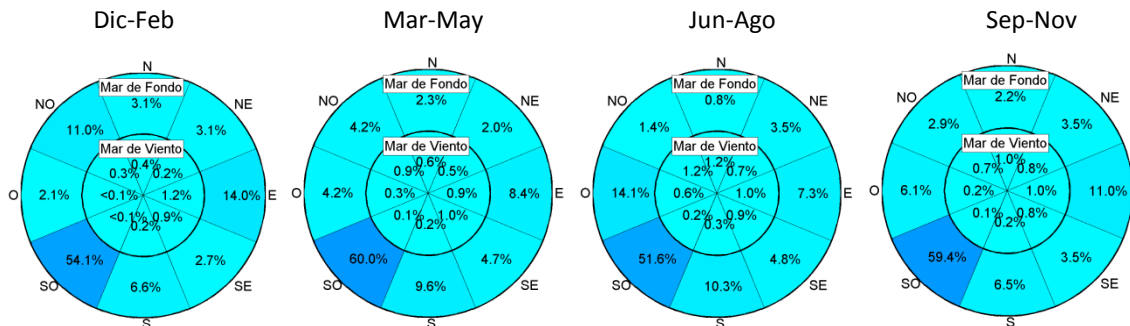


Figura 4.27: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de I. Pascua

Estos gráficos de energía por modo entregan información similar a la que se puede extraer de los espectros unidimensionales de frecuencia y dirección, aunque de manera más completa, ya que muestra la información combinada. Para el nodo de Iquique, el mayor porcentaje de energía espectral está asociada a mar de fondo del suroeste con valores sobre el 90% durante todo el año, excepto en verano donde un 13% de la energía corresponde a mar de fondo del noroeste. Para el nodo de B. Inglesa, los porcentajes de energía de mar de fondo del noroeste se mantienen similares al nodo de Iquique, mientras que los del suroeste disminuyen un poco y aparecen otros como mar de fondo del oeste en invierno (12%) y mar de viento del suroeste en primavera (6%). En el nodo de Valparaíso hay aún menos porcentaje de mar de fondo del suroeste (menos de 80%) y se incrementan otros como el mar de fondo del oeste en invierno (24%) y el mar de viento del suroeste en verano (8%). En B. Mansa prácticamente desaparece el mar de viento presente en los dos nodos anteriores, mientras que el mar de fondo del suroeste disminuye aún más y el del oeste aumenta (49% para el primero y 36% para el segundo en invierno). En el nodo más austral en estudio, I. Almagro, el mar de fondo del oeste domina por sobre el del suroeste y el mar de fondo del noroeste, que siempre estuvo presente pero que iba en disminución, vuelve a aumentar sobre el 10%. Además, aparecen algunos porcentajes de energía asociados a mar de viento, principalmente desde la dirección oeste. Respecto a Isla de Pascua, si bien también predomina el mar de fondo del suroeste, en ninguna estación este modo se lleva más del 60% de la energía. El resto de la energía se reparte entre las demás direcciones como mar de fondo principalmente, ya que prácticamente no hay presencia de mar de viento.

4.3.4 Gráficos de variación latitudinal

Los siguientes gráficos de barra muestran de forma esquemática la distribución porcentual de cada categoría caracterizada por un color específico. Los dos primeros están referidos al porcentaje del tiempo en que se produce un oleaje uni, bi, tri, o multimodal (más de tres modos) para los meses de Dic-Feb (verano) y Jun-Ago (invierno) respectivamente. Los otros dos gráficos muestran la distribución porcentual de la energía de los modos más energéticos de cada nodo para los mismos meses mencionados anteriormente.

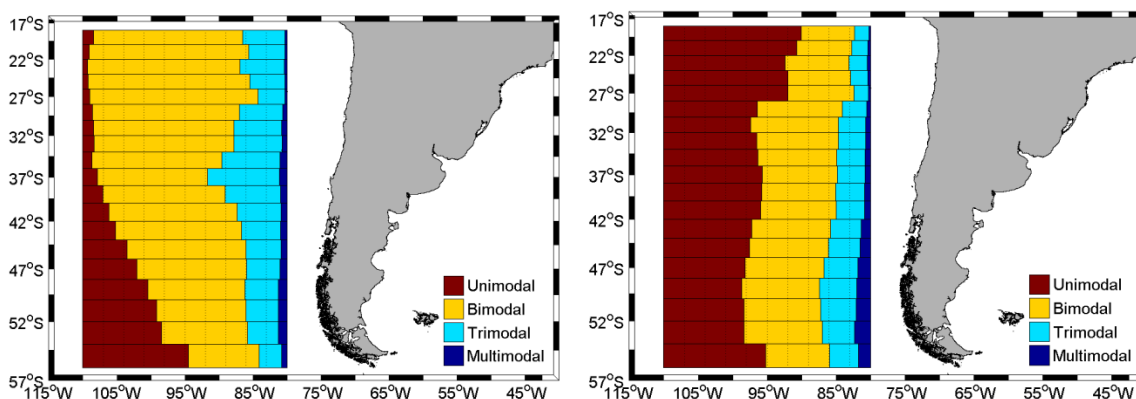


Figura 4.28: Distribución porcentual de la modalidad del oleaje en los meses de Dic-Feb (izq.) y Jun-Ago (der.)

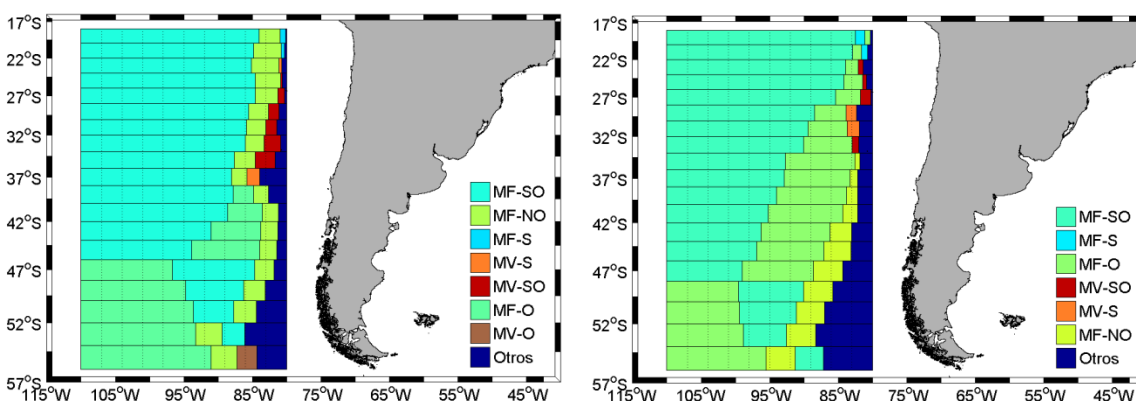


Figura 4.29: Distribución porcentual de la energía por modo en los meses de Dic-Feb (izq.) y Jun-Ago (der.)

De los primeros gráficos se aprecia claramente el gran porcentaje de tiempo que existe oleaje bimodal a lo largo de Chile para los meses de verano y que éste disminuye hacia el sur, mientras que en invierno este porcentaje disminuye hasta equipararse con el oleaje unimodal llegando a ser incluso menor en la zona norte grande.

De los gráficos de energía se observa como el oleaje clasificado como mar de fondo del suroeste se va transformando en uno del oeste, pasando a ser el más energético desde la latitud 47° hacia el sur en verano. También se ve que el mar de fondo del noroeste está presente en la zona sur y austral durante las dos estaciones, pero en la zona norte sólo en verano y que el mar de viento del suroeste se presenta principalmente en la zona norte chico y centro abarcando una extensión mayor en esa misma estación.

4.3.5 Tabla de incidencia por modo

Esta tabla muestra la incidencia o porcentaje del tiempo en que se presenta cada uno de los modos dentro de la estadística separada por estaciones para cada nodo.

Tabla 4.15: Incidencia porcentual de cada modo durante los meses de Dic-Feb

Lat [°]	Lon [°]	MF- N	MF- NE	MF- E	MF- SE	MF- S	MF- SO	MF- O	MF- NO	MV- N	MV- NE	MV- E	MV- SE	MV- S	MV- SO	MV- O	MV- NO
-19	-72	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	99.9	1.6	93.9	0.0	0.0	0.0	0.0	5.7	0.2	0.0	0.0
-21	-72	0.0	0.0	0.0	0.0	10.9	99.9	2.1	96.5	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	1.7	0.0	0.0
-23	-72	0.0	0.0	0.0	0.0	7.2	99.9	2.6	97.3	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	5.7	0.0	0.0
-25	-72	0.2	0.0	0.0	0.0	4.8	99.9	3.1	97.1	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	5.3	0.0	0.0
-27	-72	1.2	0.0	0.0	0.0	1.6	99.7	3.6	96.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	9.1	0.0	0.0
-29	-73	1.8	0.0	0.0	0.0	5.2	99.3	4.5	94.5	0.0	0.0	0.0	0.0	5.1	10.1	0.0	0.0
-31	-73	1.6	0.0	0.0	0.0	4.1	99.1	5.6	93.6	0.0	0.0	0.0	0.0	7.8	11.6	0.0	0.0
-33	-73	1.4	0.0	0.0	0.0	1.8	98.9	7.0	92.8	0.1	0.0	0.0	0.0	2.3	18.3	0.0	0.1
-35	-73	1.6	0.0	0.0	0.0	0.8	96.8	14.2	93.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.4	21.6	1.0	0.2
-37	-75	1.1	0.2	0.0	0.2	15.2	95.3	13.4	87.8	0.3	0.0	0.0	0.0	15.1	6.5	0.1	0.2
-39	-75	1.3	0.1	0.0	0.1	11.3	92.6	18.1	85.8	0.5	0.0	0.0	0.0	8.2	5.0	0.1	0.5
-41	-75	1.5	0.0	0.0	0.3	7.3	87.0	25.7	84.8	0.6	0.0	0.0	0.0	3.8	2.7	0.2	0.7
-43	-76	1.6	0.1	0.0	0.4	7.2	78.0	33.2	81.8	0.7	0.0	0.0	0.0	3.2	1.4	0.5	1.5
-45	-76	2.2	0.1	0.1	0.0	3.7	68.6	42.3	75.5	1.1	0.1	0.0	0.0	1.7	3.2	0.7	2.0
-47	-77	3.3	0.3	0.0	0.0	5.8	54.0	54.4	69.9	1.7	0.1	0.0	0.0	1.8	1.0	1.1	3.2
-49	-77	4.8	0.1	0.0	0.1	6.9	40.8	63.4	62.6	3.3	0.1	0.0	0.1	1.4	0.9	2.7	6.1
-51	-77	6.6	0.1	0.0	0.3	8.7	30.2	69.0	56.6	2.7	0.1	0.1	0.2	0.7	1.3	4.7	7.2
-53	-76	8.1	0.1	0.1	1.3	8.5	18.7	73.6	52.3	2.4	0.1	0.2	0.3	0.8	1.6	7.7	9.3
-55	-73	0.7	0.4	0.2	3.2	8.0	8.8	78.8	41.0	0.7	0.7	0.5	0.4	0.8	2.0	11.1	7.4
-27	-81	2.3	0.0	0.0	48.0	43.2	98.2	4.7	96.9	0.0	0.0	0.0	7.4	2.4	0.1	0.0	0.1
-28	-110	37.6	39.8	62.3	15.9	25.0	94.9	12.4	81.0	1.8	1.4	3.1	2.8	0.8	0.2	0.3	1.4
-35	-81	1.2	0.0	0.2	38.0	15.7	96.4	13.3	92.3	0.1	0.0	0.1	2.9	2.1	0.9	0.8	0.7

Tabla 4.16: Incidencia porcentual de cada modo durante los meses de Jun-Ago

Lat [°]	Lon [°]	MF- N	MF- NE	MF- E	MF- SE	MF- S	MF- SO	MF- O	MF- NO	MV- N	MV- NE	MV- E	MV- SE	MV- S	MV- SO	MV- O	MV- NO
-19	-72	0.0	0.0	0.0	0.0	21.7	98.5	9.7	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	1.0	0.0	0.0
-21	-72	0.0	0.0	0.0	0.0	15.3	98.1	13.2	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	8.6	3.7	0.0	0.0
-23	-72	0.0	0.0	0.0	0.0	10.9	97.6	17.4	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	11.5	8.6	0.0	0.0
-25	-72	0.1	0.0	0.0	0.1	7.1	96.7	21.8	7.0	0.1	0.0	0.0	0.0	10.4	7.4	0.0	0.1
-27	-72	0.5	0.0	0.0	0.0	1.7	95.4	26.5	7.3	0.4	0.0	0.0	0.0	1.4	15.5	0.0	0.1
-29	-73	1.5	0.5	0.0	0.0	9.5	91.3	31.9	7.8	1.2	0.0	0.0	0.0	14.1	11.9	0.0	0.2
-31	-73	2.5	0.6	0.0	0.3	7.2	89.6	36.5	9.2	2.0	0.0	0.0	0.0	18.2	9.2	0.0	0.7
-33	-73	4.1	0.5	0.1	0.5	4.5	86.8	40.6	11.2	3.2	0.0	0.0	0.0	10.4	9.7	0.0	1.2
-35	-73	6.9	0.5	0.1	0.5	3.7	78.4	50.2	13.7	4.8	0.2	0.0	0.0	4.6	8.1	0.2	1.4
-37	-75	6.5	2.9	0.1	0.9	10.0	76.8	48.4	14.0	2.5	0.6	0.1	0.1	5.8	0.6	0.3	1.6
-39	-75	9.7	1.4	0.7	2.2	7.1	74.1	50.0	17.2	3.5	0.4	0.3	0.7	2.7	0.3	0.3	2.0
-41	-75	11.6	1.2	0.9	2.1	4.5	70.2	51.4	21.2	3.6	0.8	0.4	0.7	1.3	0.3	0.5	2.1
-43	-76	12.1	2.0	0.8	2.2	8.9	67.3	49.5	27.4	3.4	1.0	0.6	0.9	1.1	0.7	0.8	2.9
-45	-76	13.4	1.8	1.7	1.0	7.7	65.3	48.3	31.8	3.6	1.9	1.4	0.8	1.1	1.3	0.9	2.8
-47	-77	15.4	2.7	0.7	0.6	12.8	58.0	51.3	34.2	4.2	1.8	0.5	0.6	1.7	1.1	1.1	3.4
-49	-77	17.5	1.5	0.5	0.4	16.1	51.9	52.9	35.2	5.6	1.3	0.5	0.5	2.0	1.5	2.1	5.3
-51	-77	17.8	0.6	0.9	3.0	16.6	45.0	54.0	34.4	4.6	0.4	0.5	1.8	1.7	2.5	3.7	5.8
-53	-76	16.6	1.2	2.4	3.1	15.5	34.3	58.6	35.0	3.8	1.3	3.5	1.7	1.4	3.3	5.7	7.3
-55	-73	2.6	1.9	0.9	4.4	13.4	20.4	69.1	34.8	2.0	4.4	2.3	0.9	1.4	4.6	8.4	5.7
-27	-81	0.3	0.1	1.8	42.4	31.0	87.9	27.6	9.9	0.3	0.1	0.2	6.4	1.9	0.5	0.6	1.1
-28	-110	9.6	22.1	36.5	21.3	32.8	82.5	33.4	10.1	5.0	2.4	2.5	2.4	1.0	0.6	1.3	4.0
-35	-81	2.4	1.0	2.3	10.6	23.9	75.7	44.3	12.0	1.5	0.6	0.9	1.6	1.1	0.9	1.6	2.6

5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

5.1 Clima Extremo

Existen diferencias importantes en las alturas obtenidas para valores extremos de oleaje utilizando las bases AOC1 y AOC2, llegando, por ejemplo, a los 6.3 m en el nodo 14 para $T_R=50$ años, lo que se debe principalmente a la utilización de distintas forzantes en el modelo de generación de oleaje. Esta diferencia entre bases de datos también fue observada por Gallardo et al. (en publicación), quien calculó periodos de retorno para distintos modelos de reanálisis ampliamente utilizados en ingeniería, encontrando gran dispersión en los resultados.

Para el caso bivariado, se encontró una gran aleatoriedad en los periodos medios de las tormentas seleccionadas. A diferencia de la serie de alturas, la de periodos no es una serie de valores extremos; estos oscilan en el mismo rango de periodos que se tiene para clima medio, por lo que en algunos nodos el ajuste fue deficiente. A modo de ejemplo se muestra el ajuste de altura significativa y periodo medio de los eventos extremos seleccionados para el nodo de Valparaíso.

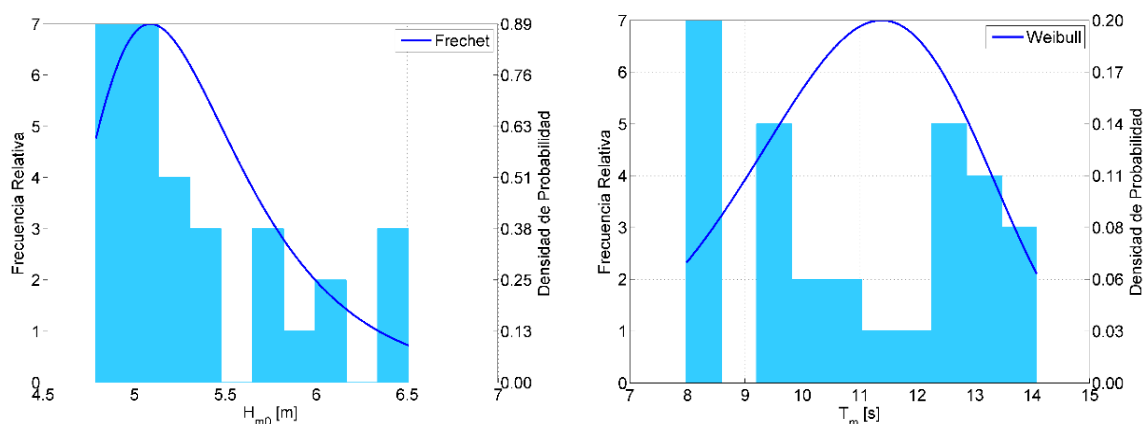


Figura 5.1: Distribución y ajuste de H_{m0} y T_m para la serie de eventos extremos del nodo de Valparaíso (Elaboración propia)

Sin embargo, hacia la zona austral se encontró cierto nivel de dependencia entre las variables debido a la cercanía con la zona de generación (Aguirre et al., 2017), lo que mejoró el ajuste de la serie de periodos y, por consiguiente, el de la función cópula. Esto debido a que el parámetro ρ con el que se define la función cópula esta en directa relación con el τ de Kendall que refleja la dependencia entre las variables, generándose un mejor ajuste de la función respecto a los datos.

Si se comparan los periodos de retorno obtenidos mediante el método univariado con el bivariado, este último siempre entrega valores similares o superiores ya que, al incorporar una variable más al cálculo, disminuye la probabilidad de ocurrencia o excedencia (dependiendo del caso), sobre todo si los eventos presentan periodos de oleaje atípicos. Esto quedó en evidencia en un estudio donde se compararon los periodos de retorno obtenidos mediante ambos métodos para dos marejadas ocurridas en Valparaíso (Álvarez et al., 2016). Una de estas tormentas (julio de 2013) presentó un periodo pico tan poco común

($T_p=20$ s) que el análisis bivariado arrojó un periodo de retorno superior a 10.000 años para AOC1 y superior a 500 años para AOC2.

Una forma más fácil de comparar periodos de retorno entre los dos métodos es suponer que los eventos del análisis univariado tienen, todos, el mismo periodo de oleaje y que éste corresponde al valor en que se produce el punto de inflexión de las curvas del gráfico bivariado. Recordar que este valor no corresponde necesariamente al promedio ni a la moda de la serie de datos, sino que es al valor en que se produce el máximo de la función densidad de la distribución de periodos de oleaje. Dicho de otra forma, el gráfico de periodos de retorno univariado podría tomarse como una “rebanada” del gráfico bivariado que pasa por el plano $T_m = T_m|_{f(T_m)=max}$ donde f es la función densidad. Si los periodos de retorno entre ambos gráficos parecen no coincidir utilizando este método de comparación, puede ser por el hecho de que las curvas del método bivariado fueron suavizadas para eliminar las discontinuidades generadas al trabajar con datos discretos o por el ajuste de la función cópula. Aun cuando no se utilizó el periodo para el cual la función densidad tiene su máximo, en la Figura 4.13 se observan valores similares entre ambos métodos para los nodos 13 y 17.

La caracterización de las tormentas indica un aumento de las alturas significativas máximas hacia el sur, con valores promedio que van desde los 4 m a los 12 m aproximadamente, periodos medios que tienen sus valores promedio máximos en el extremo norte (~ 14 s) y mínimos en la zona norte chico y centro (~ 10 s), y direcciones de incidencia promedio que pasan de suroeste en el norte a oeste en el sur.

En la zona centro, además, se registra la mayor cantidad de tormentas del cuarto cuadrante (oeste a norte) afectando sectores costeros que normalmente presentan condiciones calmas. Estas marejadas pueden presentarse como mar de viento o de fondo y ser originadas tanto local como remotamente. Ejemplos de esto son la tormenta de enero de 2013 que se generó en latitudes tropicales del océano Pacífico y que llegó como mar de fondo del noroeste a las costas de Chile, y la que se produjo en invierno de 2015 debido a la llegada de un ciclón extratropical a la costa chilena, generando una marejada de origen local y dirección también noroeste.

5.2 Parámetros espectrales de forma

Dado que la costa chilena se encuentra expuesta al océano Pacífico, es frecuente encontrar estados de mar que presentan oleajes provenientes de distintos periodos y direcciones. Los valores de ancho espectral y agudeza de pico (ε , ν y Q_p), si bien entregan información que puede traducirse en presencia o no de multimodalidad, ésta sólo se refiere a distintos periodos de oleaje.

Los parámetros de ancho espectral disminuyen levemente hacia el sur, lo que significa un aumento de la estrechez del espectro de frecuencias debido a una menor presencia de modos secundarios. Esto concuerda con lo obtenido por Ossandón (2014) y Ortiz (2003), aunque resulta un poco contra-intuitivo ya que se creería que la zona sur-austral, por estar más cerca de la zona de generación, tiene una mayor dispersión de frecuencias y un espectro más ancho. Sin embargo, el efecto que esto tiene en el cálculo de ε y ν parece ser menor al efecto que tiene la presencia de mar de viento en la zona centro-norte. Este tipo de oleaje de periodo más elevado podría ser la razón de la disminución de la estrechez del espectro hacia el norte.

Por otro lado, el valor de agudeza de pico oscila entre valores cercanos a 2 presentando dos mínimos en las latitudes 31°S y 51°S , los que dan cuenta de un espectro menos esbelto que en el resto de los nodos debido

a la dispersión de frecuencias en la zona austral y la presencia de mar de viento en la zona centro (Aguirre et al., 2017).

El valor de γ , al ser un parámetro de acentuación del máximo espectral, cumple el mismo objetivo del parámetro Q_p y su comportamiento es similar a éste, aunque parece estar menos influenciado por peaks secundarios (modos asociados a mar de viento). Su valor se obtuvo mediante el ajuste de una función (espectro JONSWAP) al espectro de frecuencias por lo que sus resultados se consideran más representativos de la forma espectral. Comparado con el valor recomendado por Hasselmann et al. (1973) ($\gamma=3.3$), los valores promedio obtenidos en este estudio resultaron ser mucho menores; entre 1.25 y 1.71. Esto es un indicativo de la alta multimodalidad presente a lo largo de Chile y no sólo de la presencia de mar de viento como pudiese interpretarse.

El último parámetro espectral analizado y el único asociado al espectro de direcciones es el valor s que cuantifica la dispersión direccional. Al igual que el parámetro γ este valor se obtuvo del ajuste de una función (coseno), por lo que es poco influenciado por peaks secundarios (modos asociados a oleaje del noroeste). Al ser un exponente de la función coseno, el valor más alto ($s=30$) ubicado en el extremo norte implica un espectro más esbelto y menor dispersión, mientras que el valor más bajo ($s=8$) ubicado en la zona austral refleja gran dispersión direccional.

5.3 Multimodalidad

El oleaje generado en las latitudes medias del Pacífico sur, responsable de generar los modos más recurrentes y energéticos, se define como oleaje reinante. En la zona norte se presenta como un mar de fondo del suroeste pero a medida que se avanza hacia el sur, el cambio de dirección de incidencia en la costa de Chile hace que a veces se clasifique como mar de fondo del oeste o incluso del noroeste en la zona austral. Debido a la cercanía con la zona de generación, en esta zona también puede presentarse como mar de viento del oeste y/o noroeste, lo que es consecuente con la disminución de los periodos medios. Estos modos tienen su origen en la misma zona de generación y abarcan los mayores porcentajes de energía; cerca del 90% de la energía total del espectro en la zona norte y casi el 100% en la zona austral.

Otra fuente de generación de oleaje son los ciclones extratropicales que se generan en las latitudes medias del Pacífico Norte a partir de los vientos Oeste. Este oleaje se propaga a través del océano Pacífico, llegando a las costas de Chile como mar de fondo del noroeste con porcentajes de energía mucho menores a los del oleaje reinante (~5%) pero una incidencia muy alta, principalmente en los meses de primavera y verano (invierno en el hemisferio norte). Debido a la “protuberancia” occidental de Sudamérica, el extremo norte está un poco más protegido de este oleaje que el resto del país, por lo que la mayor incidencia se produce en la latitud 23°S (97% en verano), desde donde comienza a disminuir hacia el sur. Si bien existe presencia de mar de fondo del noroeste hasta la zona austral, el método de clasificación aquí utilizado no permite saber si este es realmente generado en el hemisferio norte. Una forma de mejorar esto sería subclasificar el mar de fondo de acuerdo a su periodo de oleaje, asociando oleaje de origen más lejano con periodos más altos. Esto se explica debido a la transferencia de energía no-lineal entre componentes del espectro que hace que aumente el periodo a medida que se propaga el oleaje (Young y Van Vledder, 1993).

Un tercer modo de relativa importancia corresponde al mar de viento producido en la zona centro y norte chico (27°S-35°S), responsable de la disminución de los periodos medios entre esas latitudes. Este oleaje es

producido principalmente por el “surazo”, un chorro atmosférico costero, de baja altura y de carácter sinóptico, más frecuente e intenso durante primavera y verano. Este chorro viaja de sur a norte por el borde costero generando mar de viento de dirección sur o suroeste (Rahn y Garreaud, 2013). Su aporte energético es del mismo orden de magnitud que el mar de fondo del noroeste y su incidencia es bastante menor llegando sólo al 22% en la latitud 35°S durante los meses de verano.

La forma en que estos modos se combinan determina el grado de multimodalidad presente. Debido a que la mayor incidencia de mar de fondo del noroeste y mar de viento del sur-suroeste se produce durante los meses de verano y primavera, es en estas estaciones que se tienen los mayores porcentajes de oleaje bi y trimodal, llegando a abarcar juntos más del 90% de la incidencia en las zonas norte, centro y sur. El territorio insular, al estar expuesto a todo el rango de direcciones, presenta componentes del primer y segundo cuadrante. Debido a esto, la incidencia de oleaje multimodal es mucho mayor, presentando en Isla de Pascua un 42% del tiempo oleaje con más de tres componentes modales y niveles de energía para mar de fondo del este cercanos al 10%. Este oleaje podría ser causado por la refracción o reflexión del oleaje incidente en las costas de Chile continental.

Los resultados obtenidos en este estudio concuerdan en algunos aspectos con los obtenidos por Ossandón (2014) pero difieren en otros. Se obtuvieron valores similares para la incidencia de oleaje bimodal en la zona centro-sur (~50%) y se observó una disminución de la multimodalidad hacia el sur. Respecto a la energía asociada al mar de viento presente en la zona central durante los meses de verano, Ossandón y otros autores (Aguirre et al., 2017; Semedo et al., 2011) presentan porcentajes de energía bastante mayores a los aquí obtenidos (sobre 30% de la energía total), lo que podría deberse al método utilizado para identificar oleaje de este tipo. Aguirre et al. (2017) y Semedo et al. (2011) utilizaron criterios de viento incorporados en los modelos de generación WaveWatch III y WAM respectivamente, mientras que Ossandón calculó la energía por cuadrante y usó un periodo de separación igual a 8 seg.

A modo de comparación, se probaron otros dos métodos de separación swell-sea, además del utilizado en este estudio (Portilla et al., 2009), para cuantificar el mar de viento presente en el nodo de Valparaíso durante los meses de verano. Los métodos utilizados corresponden a los de Wang y Hwang (2001), y Gilhousen y Hervey (2001); ambos descritos en el ANEXO A y cuyos resultados se muestran a continuación.

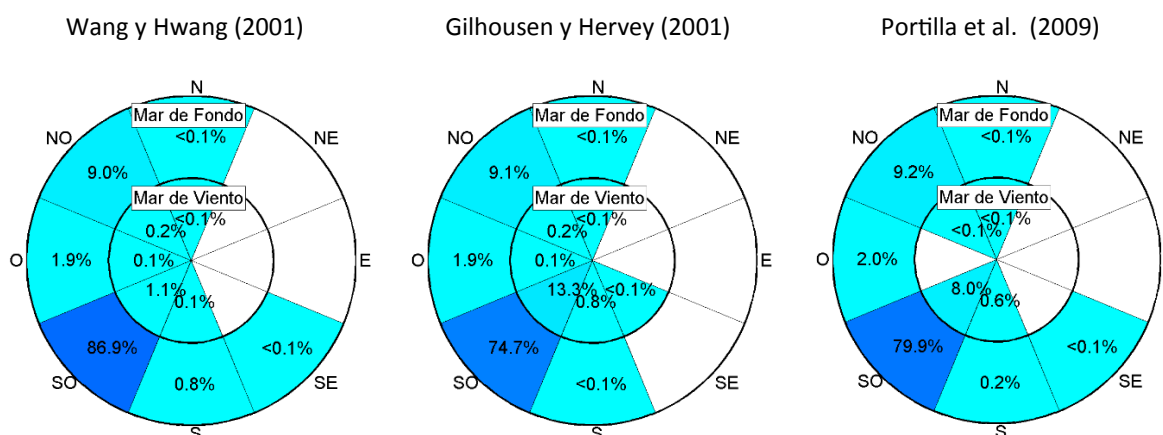


Figura 5.2: Porcentaje de energía de cada componente para el nodo de Valparaíso durante los meses de Dic-Feb (Elaboración propia)

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado una caracterización detallada de la multimodalidad y del oleaje extremo presente en Chile continental e insular. Utilizando datos espectrales de 22 nodos ubicados en aguas profundas se calcularon parámetros espectrales y se aplicó un método de particionamiento espectral para su posterior análisis. Además de los métodos ya existentes, se desarrollaron nuevas herramientas de análisis tales como el cálculo de periodos de retorno bivariado e incidencia modal.

Debido a su gran extensión de costa, Chile está expuesto a diferentes tipos de oleaje y marejadas. Es por esta razón, que el diseño de obras portuarias debería considerar, además de la altura de diseño, variables tan importantes como periodo y dirección de oleaje.

El análisis bivariado tiene el potencial de entregar información más detallada para el diseño de obras costeras, permitiendo conocer la recurrencia de eventos extremos caracterizados por periodos de oleaje atípicos. Sin embargo, debido a la cantidad de variables involucradas y a la incorporación de funciones cópulas, su nivel de incertidumbre aumenta bastante comparado con el análisis univariado (Alvarez et al, 2016). Por otro lado, la falta de mediciones continuas obliga al uso de modelos de reanálisis para reconstruir estadística de oleaje (Gallardo et al., en publicación). Estos modelos no siempre son capaces de reproducir las marejadas con precisión, por lo que agregan otro grado de incertidumbre tanto al análisis univariado como bivariado.

Si bien es cierto que los parámetros espectrales sirven para analizar grandes bases de datos, estos no permiten caracterizar de forma óptima la naturaleza multimodal del oleaje en Chile. Estos parámetros describen adecuadamente un espectro de oleaje compuesto por un sistema único, pero son menos representativos para estados de mar que poseen diferentes sistemas de oleaje de forma simultánea. Es cierto que algunos parámetros permiten intuir la existencia de multimodalidad, como ε , v y Q_p , pero esto no es suficiente para caracterizar cada modo, ya que sólo reflejan la dispersión de frecuencias y dejan fuera del análisis la dirección.

En ese sentido, los métodos de particionamiento espectral representan una excelente herramienta para identificar los sistemas de oleaje de forma independiente. El que se utilizó en este estudio (Hanson y Phillips, 2001 con modificaciones propias y de Portilla et al., 2009) mostró buenos resultados, identificando los peaks más significativos. Sin embargo, el método utilizado para clasificar cada sistema (Portilla et al., 2009) subestimó la presencia de mar de viento respecto a otros métodos. Aun así, este fue uno de los modos más recurrentes junto con el mar de fondo del noroeste y el mar de fondo reinante (suroeste u oeste). Los dos primeros tienen gran incidencia en zona norte y centro durante el verano, pero aportan poca energía al espectro, mientras que el último está siempre presente y es responsable de las mayores alturas de ola, principalmente en invierno.

Se recomienda como trabajo futuro, realizar un análisis de clima extremo multivariado que permita calcular periodos de retorno en función de tres (altura, periodo y dirección de oleaje) o más variables. También se sugiere el uso de otros métodos de clasificación swell-sea que permitan obtener mayores porcentajes de mar de viento en las zonas donde fue subestimado.

REFERENCIAS

- Aguirre C., Rutllant J. A. y Falvey M. (2017). Wind waves climatology of the Southeast Pacific Ocean. *Int. J. Climatol.* doi:10.1002/joc.5084
- Álvarez M., Gallardo A. y Beyá J. (2016). Comparación de análisis extremo uni y bivariado para marejadas recientes en Chile. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica LADHI. Lima, Perú.
- Beyá J., Álvarez M., Gallardo A., Hidalgo H., Aguirre C., Valdivia J., Parra C., Méndez L., Contreras F., Winckler P., Molina M. (2016). Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica – Universidad de Valparaíso. 172 pp.
- Beyá J., Álvarez M., Gallardo A., Hidalgo H., Winckler P. y Molina M. (2017). Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database. *Ocean Modelling*, 116, 16-32.
- Beyá I. y Beyá J. (2013). Variación del parámetro de acentuación del máximo del espectro sintético JONSWAP ajustado a mediciones de oleaje frente a las costas de Chile Central. XXI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Concepción, Chile.
- Campos R., Beyá J. y Mena M. (2015). Cuantificación de los daños históricos a infraestructura costera por marejadas en las costas de Chile. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Santiago, Chile.
- Cartwright D. E. y Longuet-Higgins M. S. (1956). The statistical distribution of the maxima of random function. *Proc. Roy. Soc. London, Ser A* 237, 212-232.
- Chiswell S. M. y Kibblewhite A. C. (1981). Spectra of the fully developed wind-generated ocean wave field west of central New Zealand, *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 15 (1), 81-84.
- Corbella S. y Stretch D. (2013). Simulating a multivariate sea storm using Archimedean copulas. *Coastal Engineering*, 76, 68–78.
- Cruz J., Thompson M. D. y Stavroulia E. (2009). Preliminary Site Selection—Chilean Marine Energy Resources. Tech. Rep. 100513/BR/02. Garrad-Hassan.
- Dominguez J. C. (2011). Analysis of spectral wave energy transfer methodologies from deep to shallow water. Tesis de Magister, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- Gallardo A. y Álvarez M. (2017a). Informe Técnico 02: Calibración del modelo WavewatchIII. Un Atlas de Oleaje para Chile, Universidad de Valparaíso. Santiago, Chile. <http://www.oleaje.uv.cl/descargables> [consulta: 8 de mayo de 2017].
- Gallardo A. y Álvarez M. (2017b). Informe Técnico 05: Comparación del Atlas con otras bases de datos. Un Atlas de Oleaje para Chile, Universidad de Valparaíso. Santiago, Chile. <http://www.oleaje.uv.cl/descargables> [consulta: 8 de mayo de 2017].
- Gallardo A., Valdivia J., Beyá J. (en publicación). Incertidumbre en los Valores Extremos del Oleaje en Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*.
- Gerlin T. W. (1992). Partitioning sequences and arrays of directional ocean wave spectra into component wave systems. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 9, 444 – 458.
- Gilhousen D. B. y Hervey R. (2001). Improved estimates of swell from moored buoys. *Proc. Fourth Int. Symp. WAVES 2000*, Alexandria, VA, ASCE, 387–393.

- Goda, Y. (1970). Numerical experiments on wave statistics with spectral simulations. Port and Harbour Res Inst, Vol. 9, 3-57.
- Goda, Y. (1976). On Wave Groups, Proc. Conf. Behaviour of Offshore Structures, Trondheim, Norway, Vol. 1, 115-128.
- Goda, Y. (1985). Random seas and design of maritime structures. University of Tokyo Press, 323 pp.
- Goda, Y. (1988). Statistical variability of sea state parameters as a function of a wavespectrum. Coastal Engineering in Japan, 31(1), 39-52.
- Goda Y. (2000). Random seas and design of maritime structures, 2nd ed. Yokohama National University. Yokohama, Japan. 443 pp.
- Hanson J. L., y Phillips O. M. (2001). Automated analysis of ocean surface directional wave spectra. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 18 (2), 277-293.
- Hasselmann K., P. Barnett T., Bouws E., Carlson H., E. Cartwright D., Enke K., A Ewing J., Gienapp H., E. Hasselmann D., Kruseman P., Meerburg A., Maller P., Olbers D., Richter K., Sell W. y Walden H. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deut. Hydrogr. Z., 8, 1-95
- Hasselmann S., Bruning C., Hasselmann K. & Heimbach P. (1996). An improved algorithm for retrieval of ocean wave spectra from synthetic aperture radar image spectra. J. Geophys. Res., 101, 16,615-16,629.
- Liu Z. y Frigaard P. (2001). Generation and Analysis of Random Waves. Laboratory for Hydraulik og Havnebygning, Institutet for Vand, Jord og Miljøteknik. Aalborg Universitet. Aalborg, Dinamarca. 81 pp.
- Lizano O. (2003). Técnicas de pronóstico de oleaje para las costas de Costa Rica. Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Universidad de Costa Rica. 49 pp.
- Longuet-Higgins M. S. (1957). The statistical analysis of a random, moving surface. Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A (966) 249, 321-387.
- Losada M. A. y Jiménez-Curto L. A. (1978). Análisis estadístico y espectral de regímenes. Curso de Puertos, Universidad de Santander, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Santander, España. 56 pp.
- Lucas C. y Guedes Soares C. (2015). Bivariate distributions of significant wave height and mean wave period of combined sea states. Ocean Engineering, 106, 341-353.
- Mediero O. y Garrote de Marcos L. (2015). Comprobación de la seguridad hidrológica de aliviaderos mediante un análisis multivariado con la técnica de las cópulas. IV Jornadas de Ingeniería de Agua. Córdoba, España.
- Medina J. (2009). Ingeniería Marítima y Costera. Unidad 01 - Oscilaciones del mar. Universidad Europea de Madrid. 118 pp.
- Meza C. (2015). Análisis multivariado de valores extremos de oleaje en Chile. Memoria de título para optar al título de Ing. Civil Oceánico. Universidad de Valparaíso, Santiago, Chile. 95 pp.
- Ortíz N. (2003). Caracterización espectral de tormentas intensas en la costa Catalana y su aplicación a la predicción de oleaje. Tesis para optar al título de Máster universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

- Ossandón Á. (2014). Caracterización del recurso energético del oleaje en la zona centro-sur de Chile. Memoria de título para optar al título de Ing. Civil y al grado de Magister en Ciencias de la Ing. Civil. UTFSM, Valparaíso, Chile. 151 pp.
- Pierson y Moskowitz (1964). A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodskii. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 69, nro. 24.
- Portilla J., Ocampo-Torres F. y Monbaliu J. (2009). Spectral Partitioning and Identification of Wind Sea and Swell. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26, 107-122.
- Portilla J., Caicedo A. L., Padilla-Hernandez R. y Cavaleri L. (2015). Spectral wave conditions in the Colombian Pacific Ocean. *Ocean Modelling*, 92, 149–168.
- Rahn D. y Garreaud R. (2013). A synoptic climatology of the near-surface wind along the west coast of South America. *International Journal of Climatology*, 34, 780-792.
- Requena A. I., Mediero L. y Garrote L. (2013). A bivariate return period based on copulas for hydrologic damdesign: accounting for reservoir routing in risk estimation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 3023–3038.
- Saulnier J. B., Maisondieu C., Ashton I. y Smith G. (2012). Refined sea state analysis from an array of four identical directional buoys deployed off the Northern Cornish coast (UK). *Applied Ocean Research*, 37, 1– 21.
- Scott D., Resio D., y Pantoja C. (2002). Swell propagation and nearshore wave climate, in 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Meteorological Service of Canada.
- Semedo A., Suselj K., Rutgersson A. y Sterl A. (2011). A Global View on the Wind Sea and Swell Climate and Variability from ERA-40. *Journal of Climate*, 24, 1461-1479
- SHOA (2005). Publicación N° 3201. Instrucciones oceanográficas N°1: Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos 3ª Edición 2005. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada. Santiago, Chile.
- Silva R. (2005). Análisis y descripción estadística del oleaje. Instituto de Ingeniería UNAM. 186 pp.
- Sklar A. (1959). Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges. *Publications de l'Institut de Statistique de L'Université de Paris*, Vol. 8, 229-231.
- Voorrips A. C., Makin V. K., y Hasselmann S. (1997). Assimilation of wave spectra from pitchand-roll buoys in a north sea wave model. *Journal of Geophysical Research*, 102, 5829–5849.
- Wang D. y Gilhousen D. (1998). Separation of seas and swells from NDBC buoy wave data. Fifth Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Melbourne, FL, ASCE, 155–162.
- Wang D. W. y Hwang P. A. (2001). An Operational Method for Separating Wind Sea and Swell from Ocean Wave Spectra. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18, 2052-2062.
- Winckler P., Contreras M., Beyá J. y Molina M. (2015). El temporal del 8 de Agosto de 2015 en la bahía de Valparaíso. XXII Congreso Chileno de Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Santiago, Chile.
- Young I. R. y Van Vledder G. Ph. (1993). A review of the central role of nonlinear interactions in wind-wave evolution. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, Vol. 342, 505-524.

ANEXO A: MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN “SWELL-SEA”

A.1 Gilhousen y Hervey (2001)

La función pendiente de ola depende de su altura y número de ola, es decir, es influenciada principalmente por olas cortas. La contribución de la componente “swell” es casi insignificante, debido a sus largas longitudes de onda (números de ola pequeños). Como consecuencia, el peak de la función pendiente está muy cerca del peak de la componente “sea” del espectro. Para la separación “swell-sea”, la función pendiente se define como la razón entre su altura H y su longitud L integrada desde una frecuencia dada hasta la frecuencia máxima del espectro.

$$\xi(f) = \frac{H_s(f)}{L(f)} = \frac{2\pi H_s(f)}{gT_z^2(f)} = \frac{8\pi m_2(f)}{g\sqrt{m_0(f)}} \quad (\text{A.1})$$

Wang y Gilhousen (1998), definieron la frecuencia de separación como $f_{sw} = 0.9f_{m0}$, donde f_{m0} es la frecuencia peak de $\xi(f)$. Como consecuencia, la separación de “swell-sea” no requiere datos de viento. Gilhousen y Hervey (2001) modificaron el método de pendiente de ola definiendo la frecuencia de separación como:

$$f_{sG} = \max(0.75f_{m0}, 0.90f_{PM}) \quad (\text{A.2})$$

Donde f_{PM} es la frecuencia peak del espectro Pierson-Moskowitz para oleaje de viento completamente desarrollado (Pierson y Moskowitz, 1964), dada para un $c_{PM} \approx 1.25U_{10}$, donde c_{PM} es la velocidad de fase de la componente y U_{10} es la velocidad neutral del viento a 10 m de altura sobre el nivel medio del mar (Gilhousen y Hervey, 2001).

A.2 Wang y Hwang (2001)

Wang y Hwang (2001) modificaron el método de Wang y Gilhousen (1998) manteniendo la independencia de información externa. Usando un espectro sintético similar al modelo de Pierson-Moskowitz, se encontró una relación empírica entre U_{10} y f_{m0} .

$$U_{10} = 0.379f_{m0}^{-1.746} \quad (\text{A.3})$$

Asumiendo que las componentes de “sea” se propagan a una velocidad menor a la del viento, ellos definieron la frecuencia de separación “swell-sea” como:

$$f_{s0} = \frac{g}{2\pi U_{10}} \quad (\text{A.4})$$

Sustituyendo (A.3) dentro de (A.4), f_{s0} queda entonces en función de f_{m0} para la separación “swell-sea” sin necesidad de usar U_{10}

$$f_{s0} = 4.112f_{m0}^{1.746} \quad (\text{A.5})$$

ANEXO B: GRÁFICOS Y TABLAS DE LOS NODOS QUE NO SE INCLUYERON EN EL CUERPO DE ESTE DOCUMENTO.

Todos los gráficos y tablas que se presentan a continuación también están dentro del Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016).

B.1 Clima Extremo

B.1.1 Gráficos de periodos de retorno univariado y bivariado

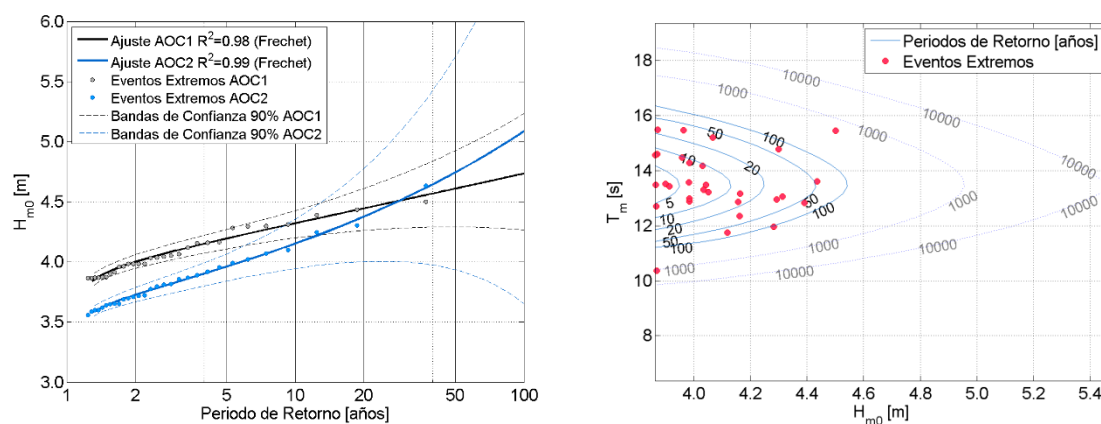


Figura B.1: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Arica

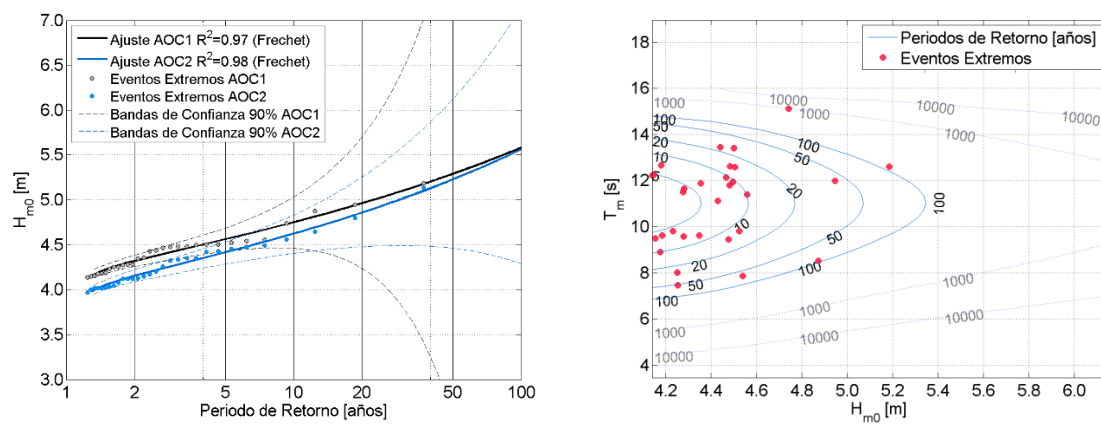


Figura B.2: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Mejillones

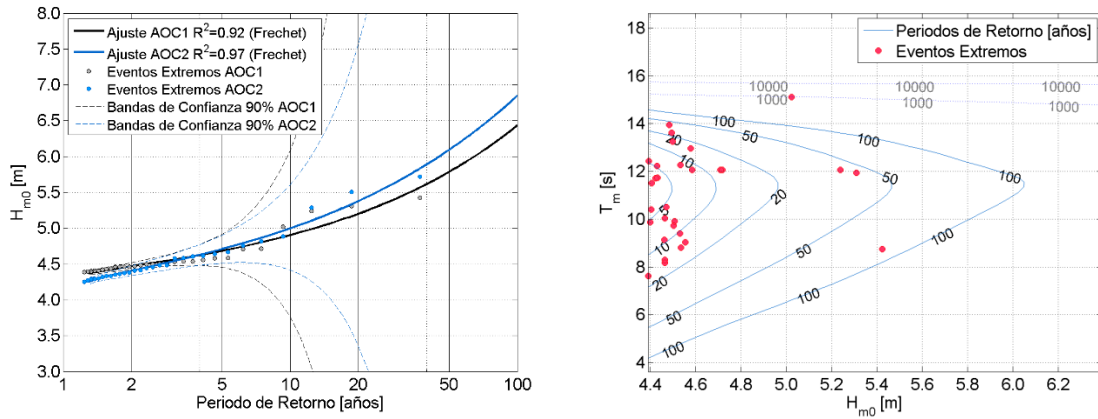


Figura B.3: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Taltal

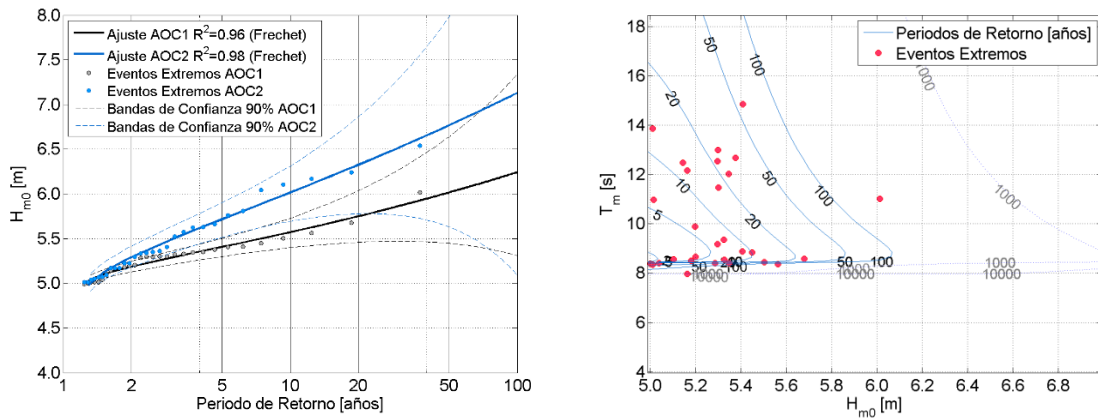


Figura B.4: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Huasco

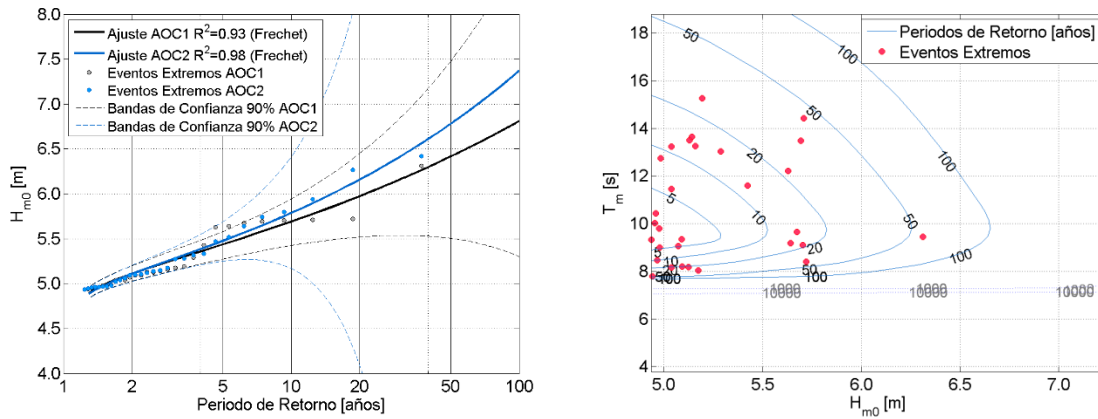


Figura B.5: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Tongoy

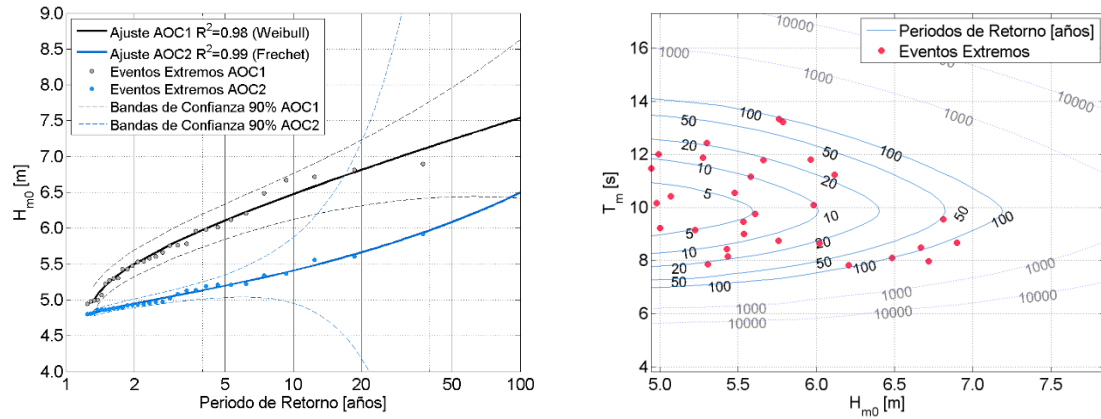


Figura B.6: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Constitución

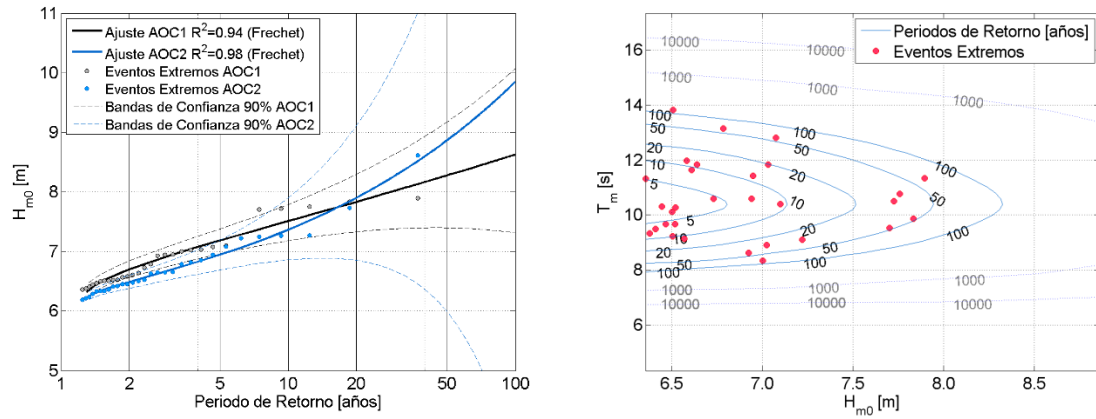


Figura B.7: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Talcahuano

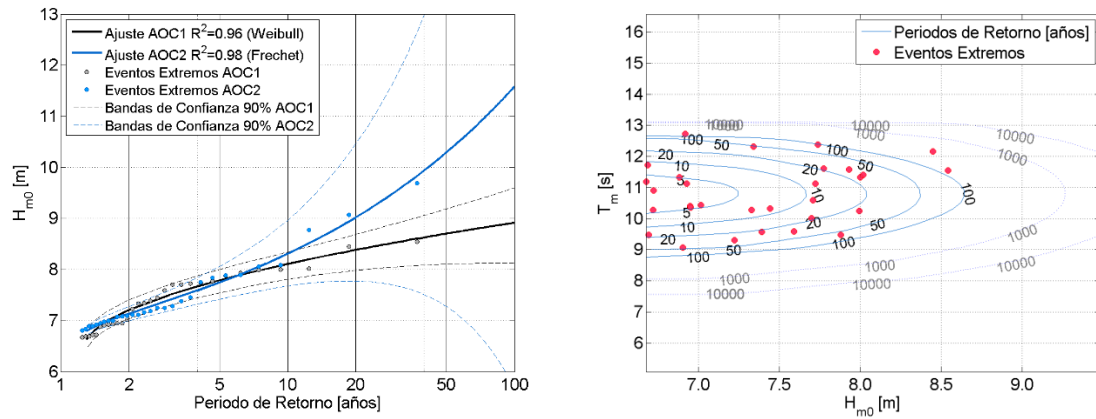


Figura B.8: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Puerto Saavedra

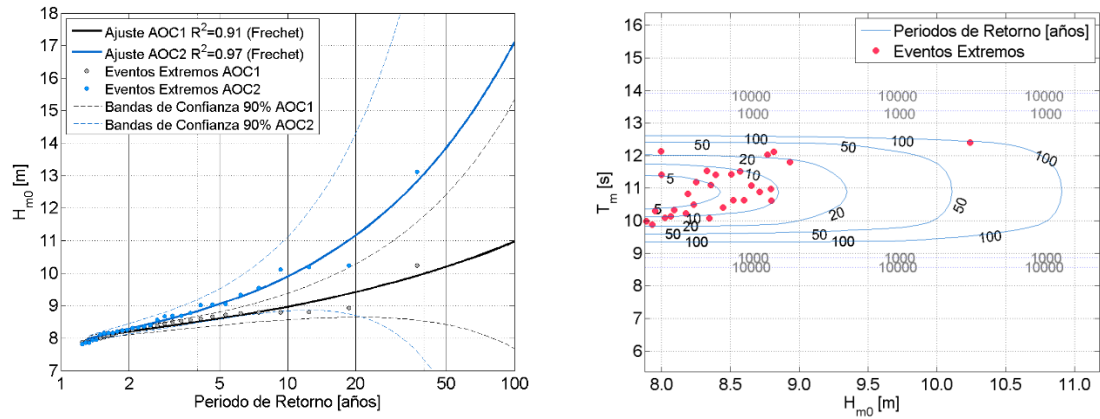


Figura B.9: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Chiloé

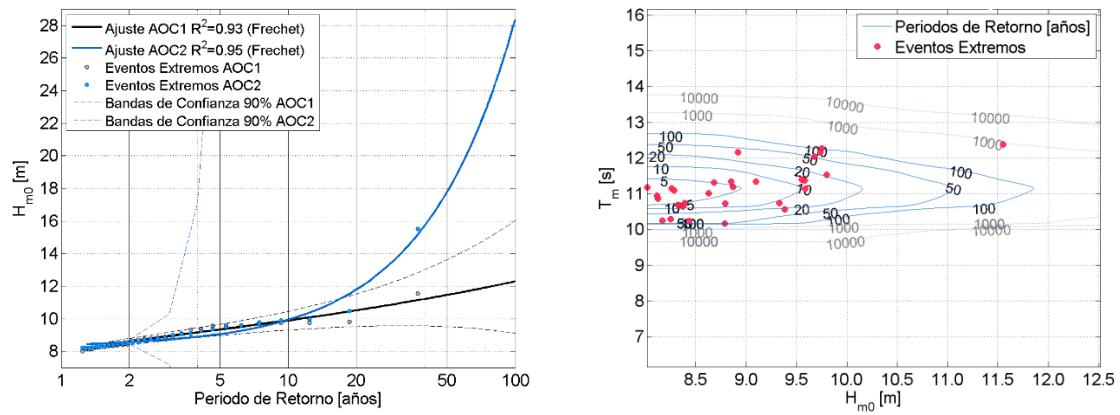


Figura B.10: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Archipiélago de Los Chonos

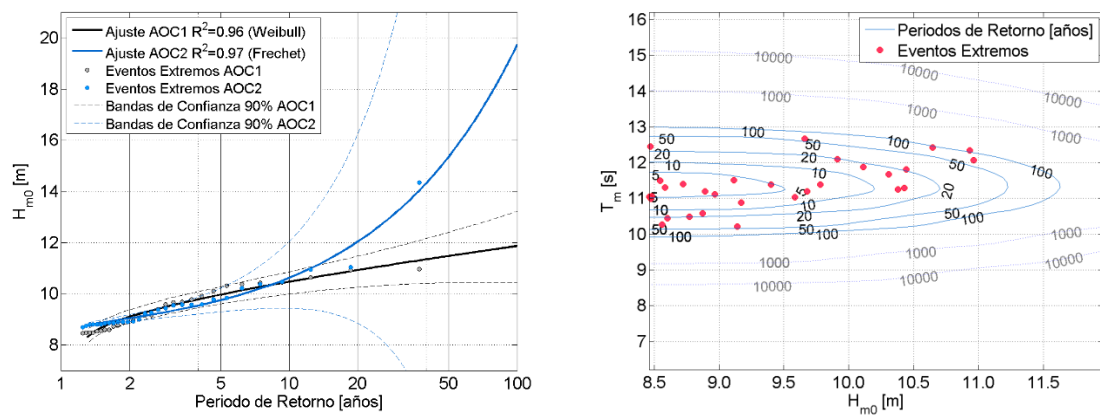


Figura B.11: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Golfo de Penas

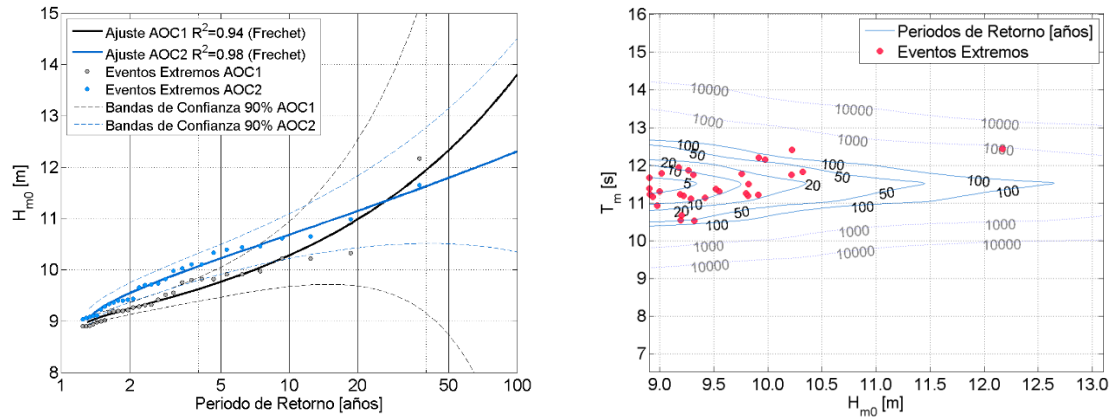


Figura B.12: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Isla Esmeralda

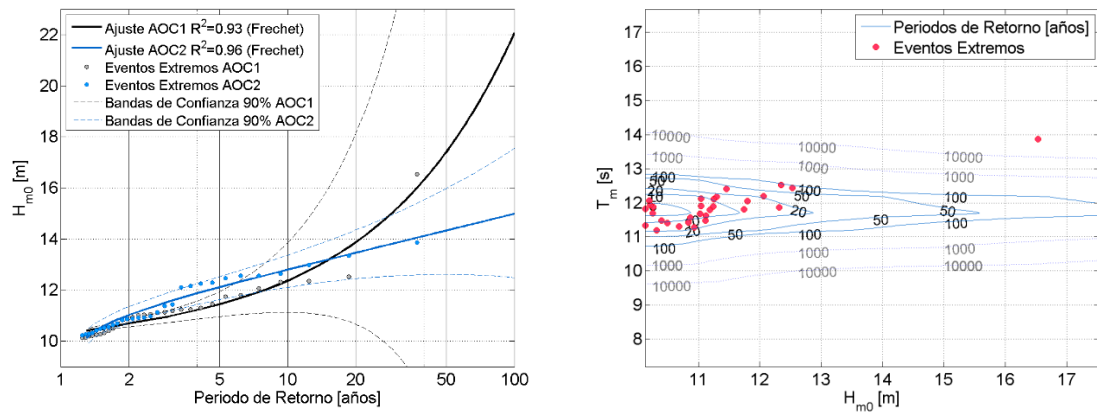


Figura B.13: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Isla Contreras

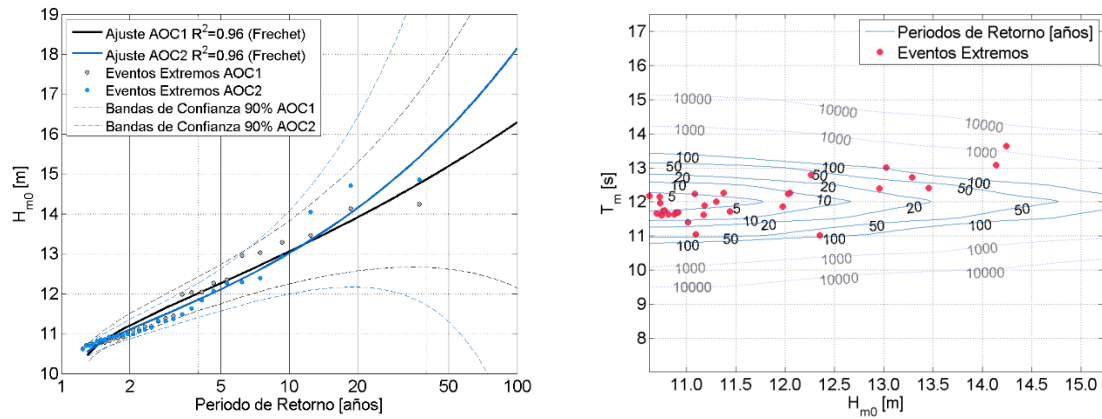


Figura B.14: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Isla London

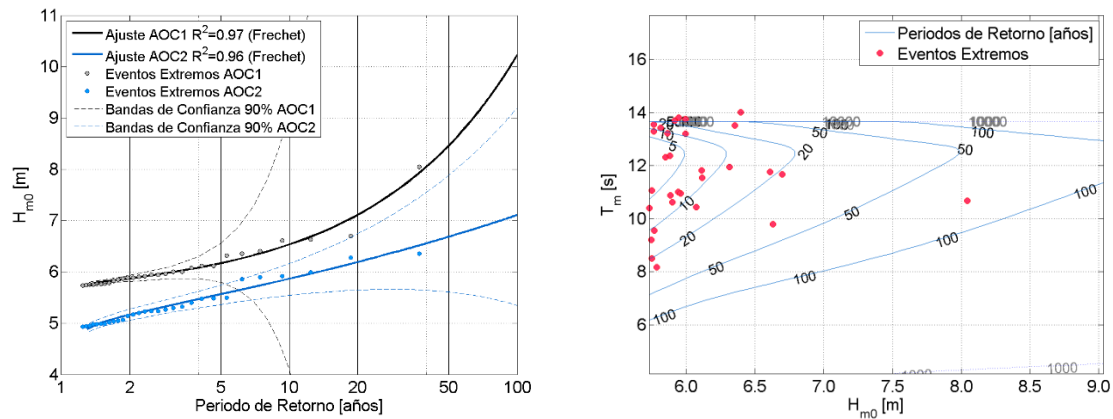


Figura B.15: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Islas Desventuradas

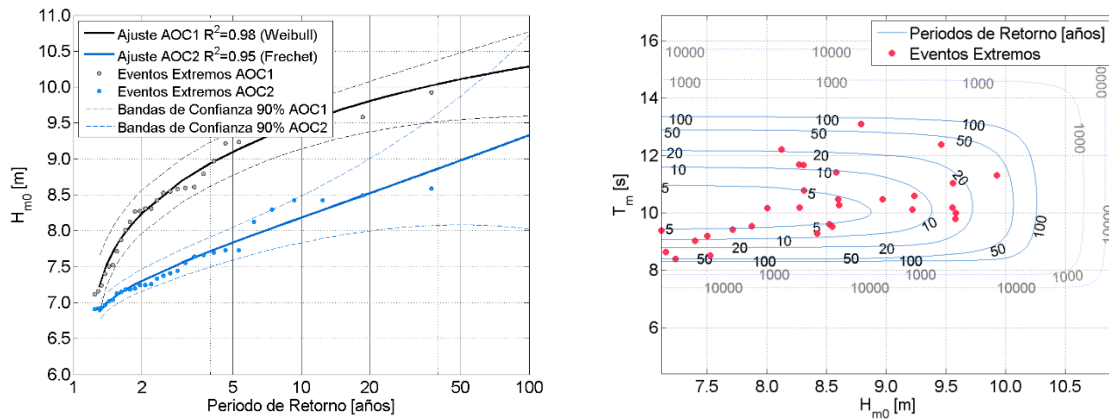


Figura B.16: Gráfico de periodos de retorno univariado (izq.) y bivariado (der.) para el nodo de Archipiélago Juan Fernández

B.1.2 Gráficos polares de dispersión

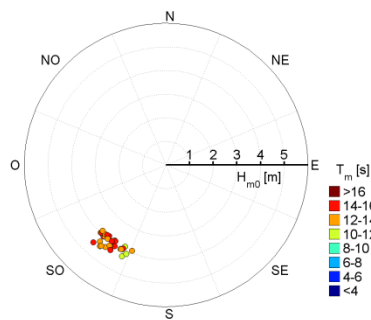


Figura B.17: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Arica

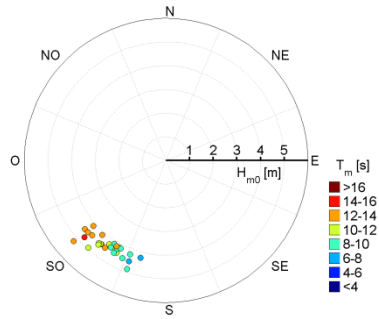


Figura B.18: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Mejillones

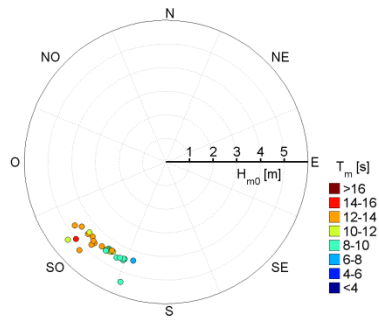


Figura B.19: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Taltal

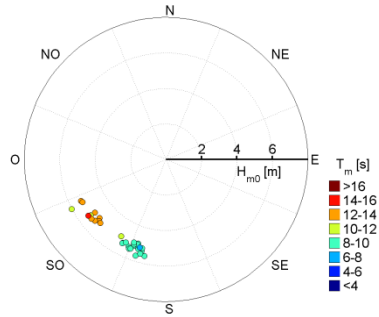


Figura B.20: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Huasco

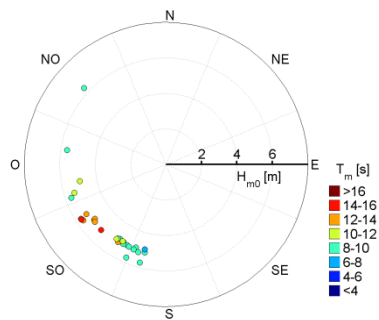


Figura B.21: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Tongoy

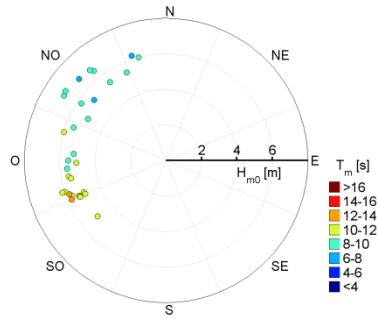


Figura B.22: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Constitución

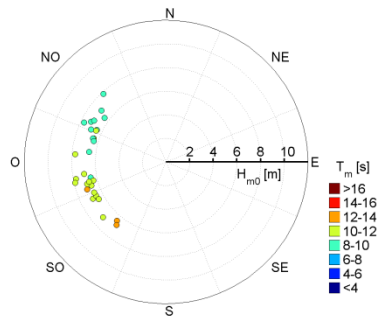


Figura B.23: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Talcahuano

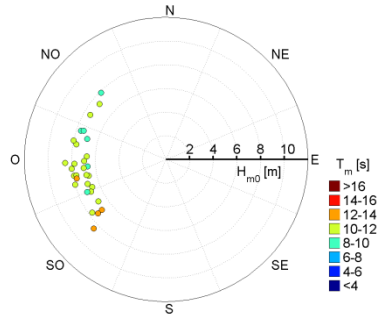


Figura B.24: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Puerto Saavedra

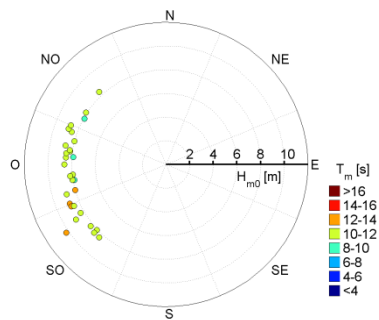


Figura B.25: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Chiloé

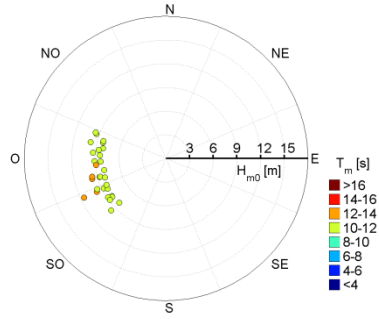


Figura B.26: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Archipiélago de Los Chonos

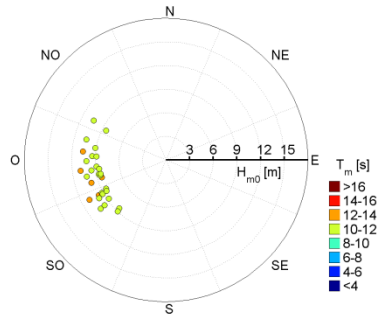


Figura B.27: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Golfo de Penas

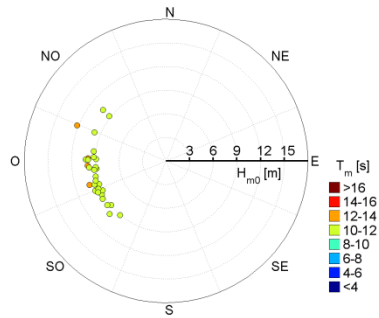


Figura B.28: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Isla Esmeralda

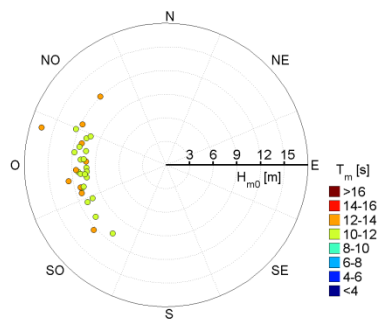


Figura B.29: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Isla Contreras

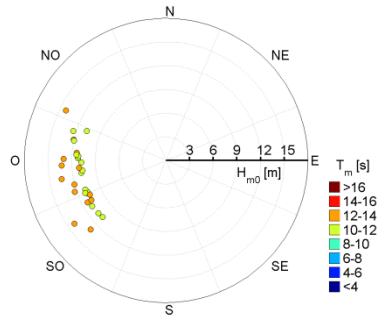


Figura B.30: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Isla London

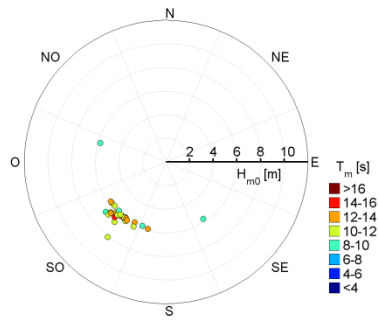


Figura B.31: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Islas Desventuradas

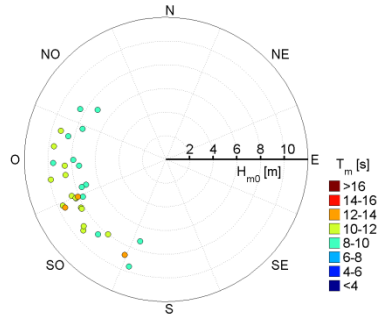


Figura B.32: Gráfico polar con las características de los eventos para el nodo de Archipiélago Juan Fernández

B.2 Parámetros espectrales de forma

B.2.1 Espectros unidimensionales de frecuencia y dirección

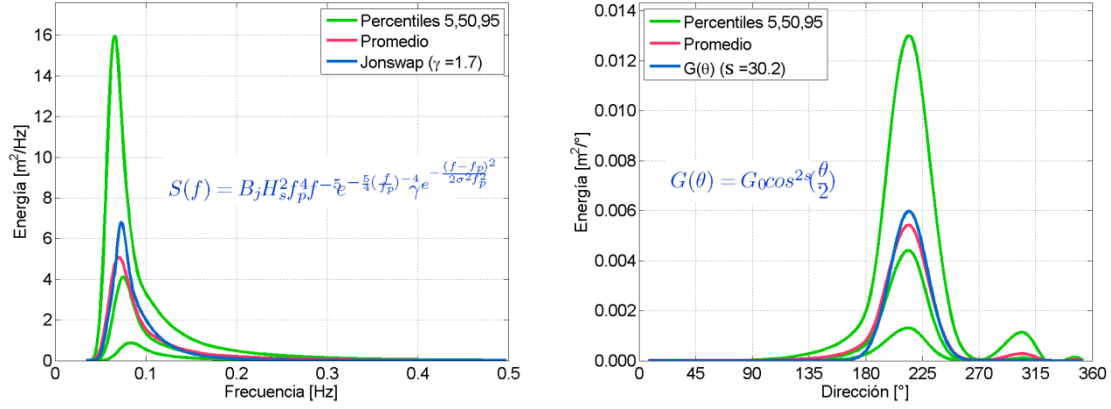


Figura B.33: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Arica

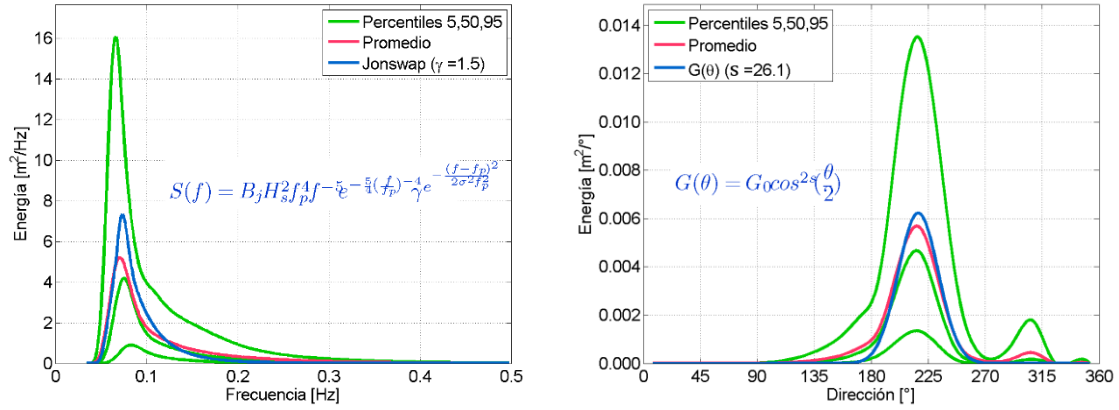


Figura B.34: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Mejillones

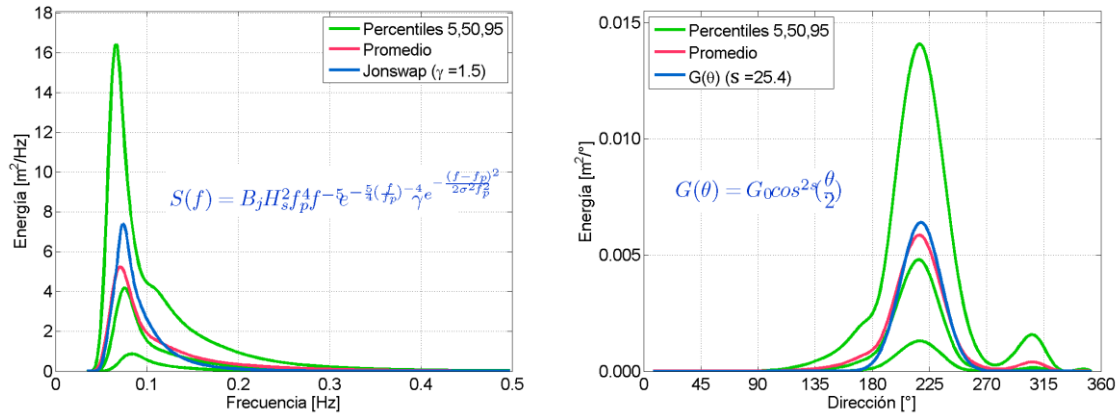


Figura B.35: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Taltal

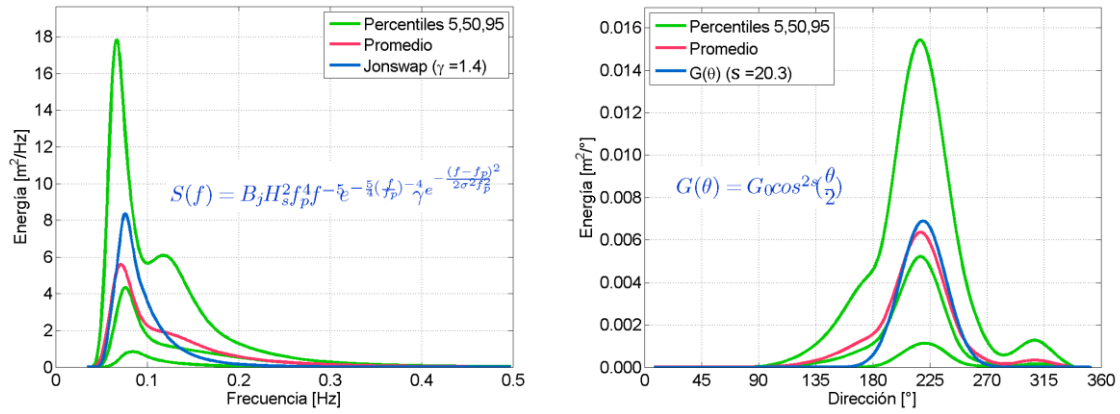


Figura B.36: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Huasco

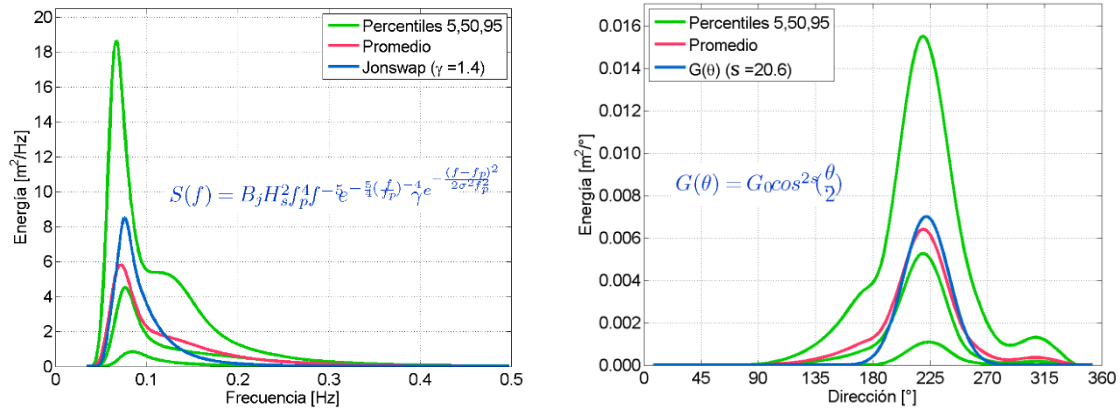


Figura B.37: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Tongoy

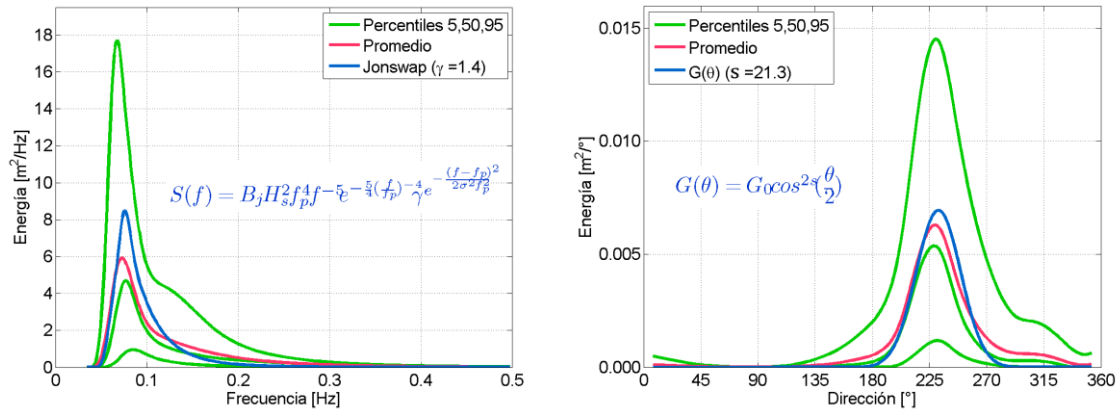


Figura B.38: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Constitución

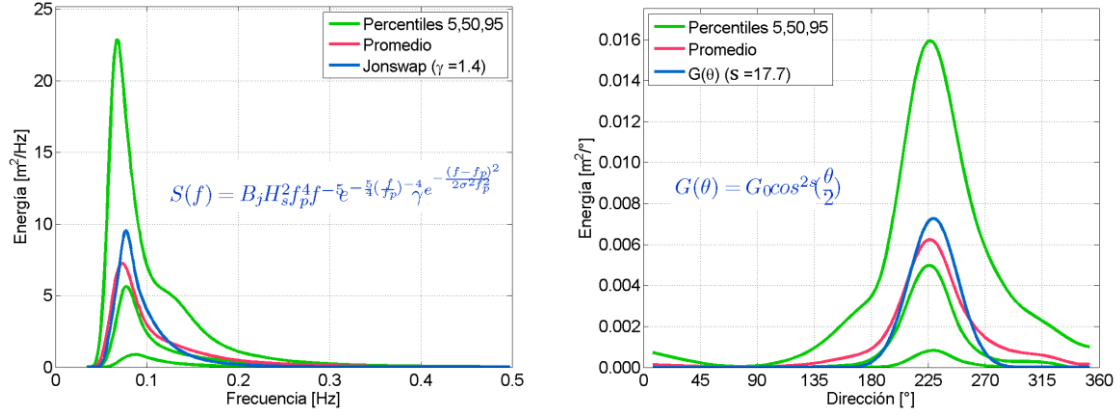


Figura B.39: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Talcahuano

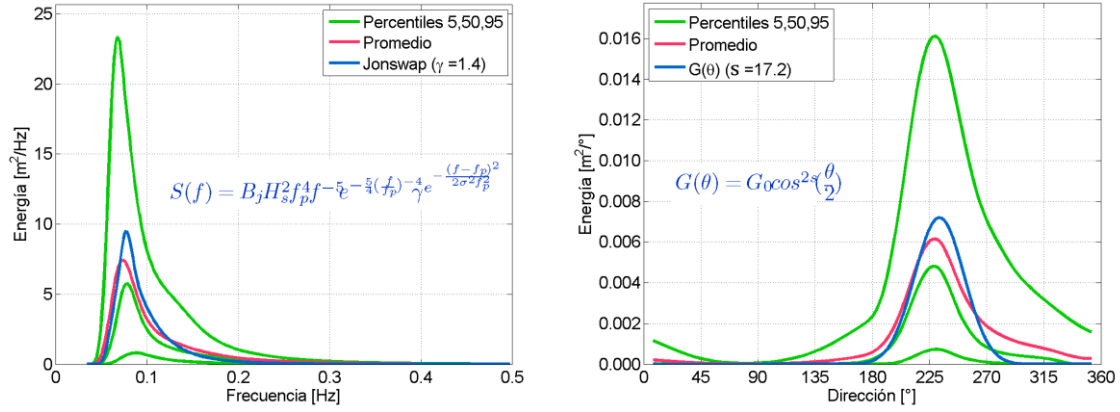


Figura B.40: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Puerto Saavedra

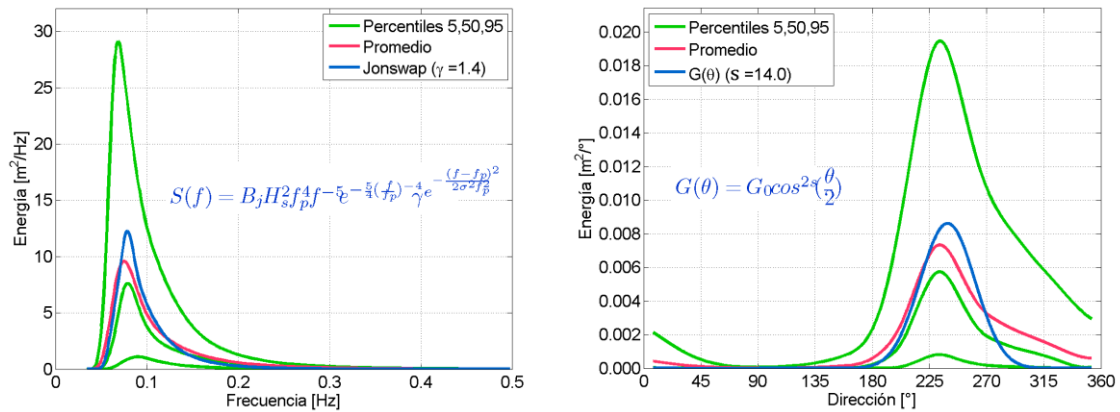


Figura B.41: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Chiloé

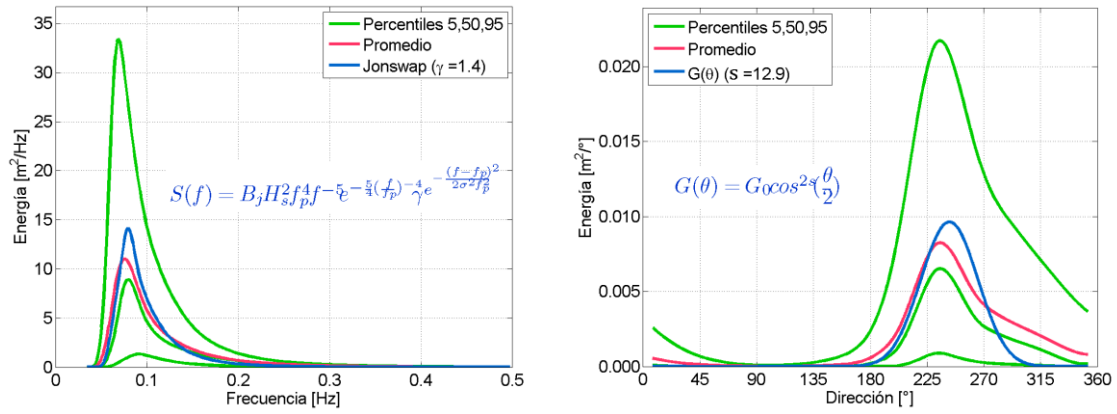


Figura B.42: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Archipiélago de Los Chonos

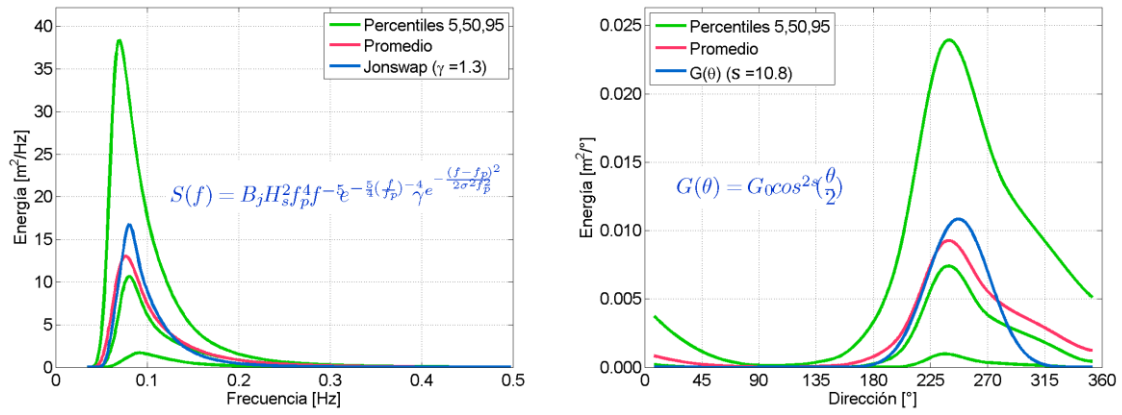


Figura B.43: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Golfo de Penas

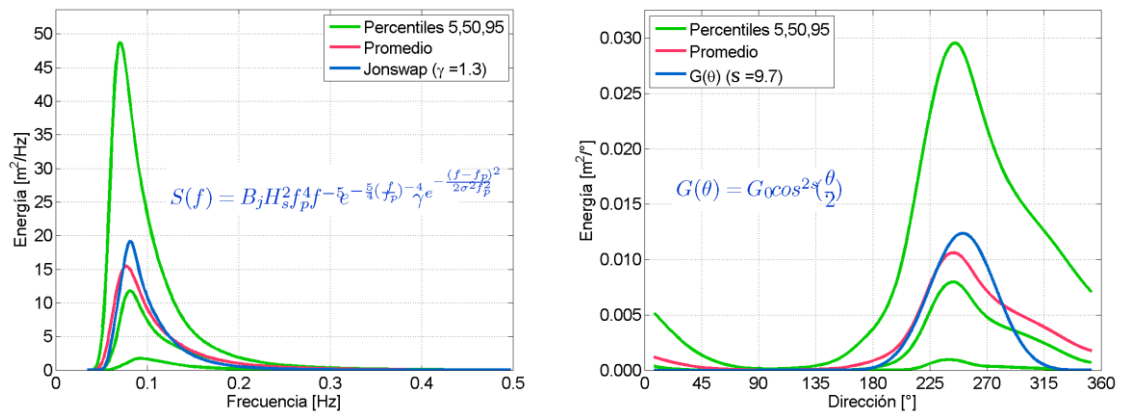


Figura B.44: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Isla Esmeralda

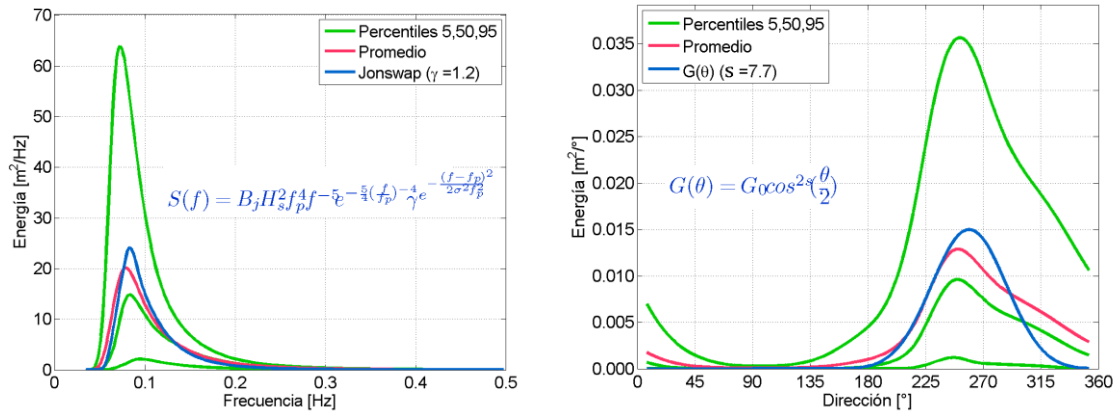


Figura B.45: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Isla Contreras

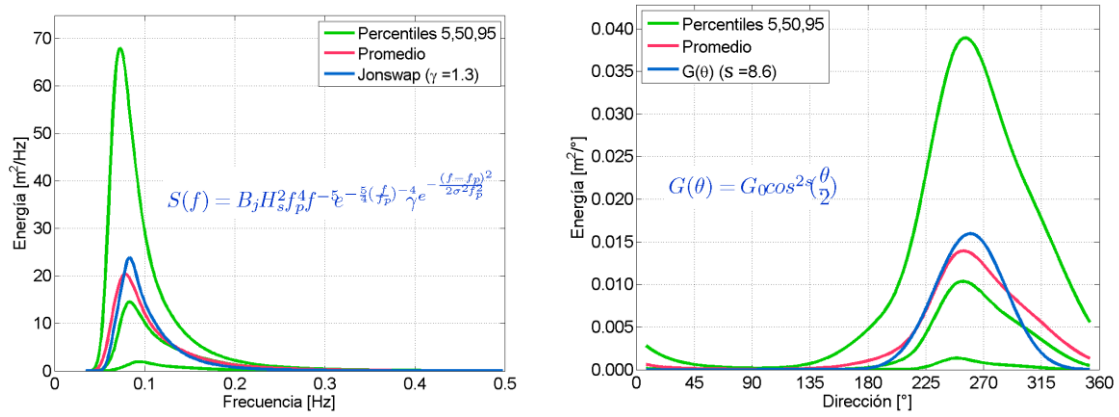


Figura B.46: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Isla London

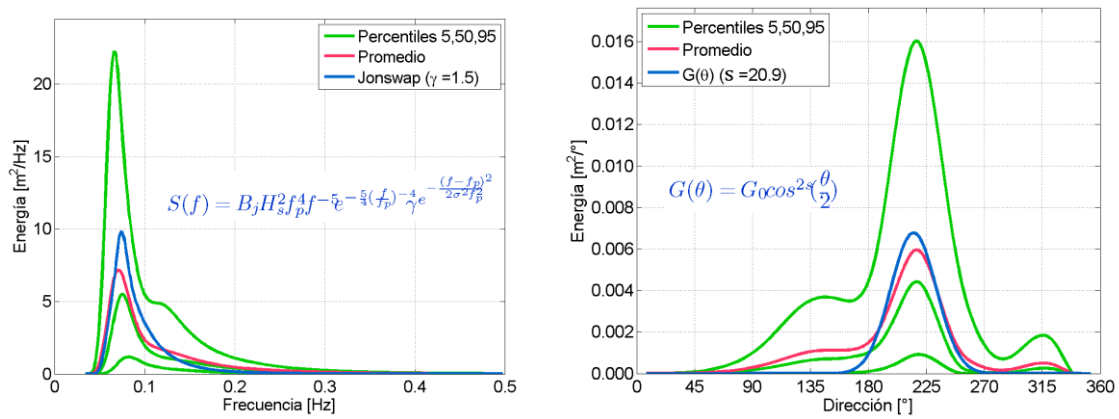


Figura B.47: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Islas Desventuradas

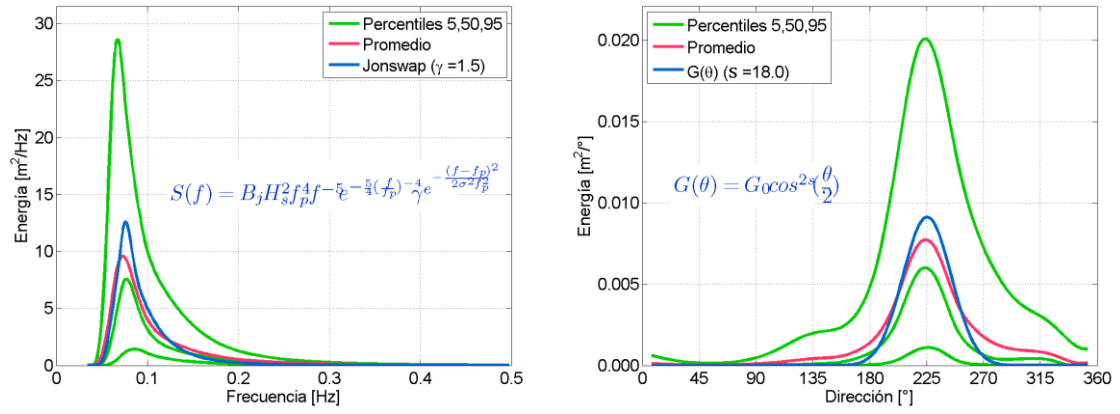


Figura B.48: Espectros unidimensionales de frecuencia (izq.) y dirección (der.) para el nodo de Archipiélago Juan Fernández

B.3 Multimodalidad

B.3.1 Tablas de distribución de modos

Tabla B.1: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Arica

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 38.4	primer modo	mar de fondo	100.0			0.2	99.7	<0.1			
	mar de viento		0.0								
bimodal 47.1	primer modo	mar de fondo	99.9			1.1	97.8	0.9	0.2		
	mar de viento		0.1			13.8	86.2				
	segundo modo	mar de fondo	94.5			14.7	1.6	3.0	80.7		
	mar de viento		5.5			86.3	13.7				
	primer modo	mar de fondo	99.9			5.5	91.2	2.7	0.6		
	mar de viento		0.1			25.0	75.0				
trimodal 13.5	segundo modo	mar de fondo	89.9			48.3	7.2	5.9	38.6		
	mar de viento		10.1		<0.1	90.7	9.2				
	tercer modo	mar de fondo	86.3			30.2	2.1	7.9	59.9		
	mar de viento		13.7		0.1	96.9	3.0				

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 0.9 % de la totalidad de casos

Tabla B.2: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Mejillones

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 31.0	primer modo	mar de fondo	100.0			<0.1	99.5	0.5			
	mar de viento		0.0				100.0				
bimodal 51.5	primer modo	mar de fondo	98.2			0.2	97.6	2.0	0.3		
	mar de viento		1.8			29.3	70.7				
	segundo modo	mar de fondo	88.9			5.1	3.5	4.7	86.7		
	mar de viento		11.1			57.3	42.6	<0.1	<0.1	<0.1	
	primer modo	mar de fondo	94.6			2.0	91.6	4.9	1.5		
	mar de viento		5.4			42.1	57.9				
trimodal 16.0	segundo modo	mar de fondo	67.2			22.2	14.3	12.0	51.5		
	mar de viento		32.8			60.1	39.8		<0.1		
	tercer modo	mar de fondo	78.7		<0.1	20.1	3.3	11.1	65.4	<0.1	
	mar de viento		21.3			64.5	35.4	<0.1		<0.1	

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 1.6 % de la totalidad de casos

Tabla B.3: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Taltal

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 32.1	primer modo	mar de fondo	99.9			<0.1	98.8	1.2			
	modo	mar de viento	0.1				100.0				
bimodal 52.9	primer modo	mar de fondo	98.9			<0.1	96.7	3.0	0.2		
	modo	mar de viento	1.1			18.3	81.7				
	segundo modo	mar de fondo	90.6			3.3	3.6	6.1	87.1	<0.1	<0.1
	modo	mar de viento	9.4			58.9	40.3		0.5	0.3	
trimodal 13.5	primer modo	mar de fondo	95.1			1.5	88.4	8.8	1.3		
	modo	mar de viento	4.9			38.6	61.4				
	segundo modo	mar de fondo	69.8			16.1	15.7	17.7	50.5	<0.1	
	modo	mar de viento	30.2			54.6	45.1	<0.1	0.1	0.1	
	tercer modo	mar de fondo	76.3		<0.1	16.8	4.4	13.2	64.9	0.6	
	modo	mar de viento	23.7			59.2	39.9	0.1	0.3	0.4	

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 1.5 % de la totalidad de casos

Tabla B.4: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Huasco

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 26.6	primer modo	mar de fondo	99.4			0.1	96.0	3.8			
	modo	mar de viento	0.6			20.5	79.5				
bimodal 53.2	primer modo	mar de fondo	92.8			0.7	93.6	5.6	0.1		
	modo	mar de viento	7.2			34.5	65.3		<0.1	0.1	
	segundo modo	mar de fondo	87.5			4.7	11.1	7.4	76.1	0.5	0.1
	modo	mar de viento	12.5			52.1	44.2	<0.1	0.6	2.8	0.1
trimodal 17.7	primer modo	mar de fondo	74.6			2.8	81.6	14.4	1.2	<0.1	
	modo	mar de viento	25.4			34.6	65.2		0.1	<0.1	
	segundo modo	mar de fondo	74.4			14.7	40.0	18.8	25.6	0.8	0.2
	modo	mar de viento	25.6			50.8	46.7	<0.1	0.4	2.0	<0.1
	tercer modo	mar de fondo	92.0	<0.1		9.4	6.5	11.9	69.1	2.9	0.3
	modo	mar de viento	8.0			49.4	43.4	0.3	1.7	4.9	0.3

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 2.5 % de la totalidad de casos

Tabla B.5: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Tongoy

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 24.8	primer modo	mar de fondo	99.7			<0.1	93.3	6.7			
	modo	mar de viento	0.3			28.4	71.6				
bimodal 52.3	primer modo	mar de fondo	94.0			0.4	92.1	7.1	0.3	<0.1	
	modo	mar de viento	6.0			43.0	55.2	<0.1	0.4	1.4	
	segundo modo	mar de fondo	84.7		<0.1	4.2	11.3	7.7	75.8	0.9	0.2
	modo	mar de viento	15.3			61.5	33.4	<0.1	1.4	3.6	<0.1
trimodal 19.8	primer modo	mar de fondo	76.5			1.3	81.4	15.8	1.4	0.1	
	modo	mar de viento	23.5			37.8	60.7	<0.1	0.3	1.2	
	segundo modo	mar de fondo	68.7			11.0	40.2	21.1	26.2	1.4	0.2
	modo	mar de viento	31.3			58.2	38.2	<0.1	0.9	2.7	<0.1
	tercer modo	mar de fondo	90.5		0.3	6.9	7.5	12.0	70.3	2.6	0.3
	modo	mar de viento	9.5	<0.1		49.7	43.2	0.3	2.6	4.1	<0.1

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 3.0 % de la totalidad de casos

Tabla B.6: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Constitución

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 25.0	primer modo	mar de fondo	99.8				79.5	20.4	0.1		
	modo	mar de viento	0.2				19.6	37.3	23.5	19.6	
bimodal 49.5	primer modo	mar de fondo	97.3			<0.1	83.6	15.0	1.3	0.1	
	modo	mar de viento	2.7			2.3	74.3	1.1	7.9	14.3	<0.1
	segundo modo	mar de fondo	90.5	<0.1	<0.1	1.6	11.4	8.4	75.8	2.6	<0.1
	modo	mar de viento	9.5		<0.1	21.4	59.5	1.5	3.6	13.6	0.3
trimodal 22.0	primer modo	mar de fondo	81.4			0.1	68.4	28.0	3.0	0.5	
	modo	mar de viento	18.6			1.4	92.0	0.8	1.4	4.4	<0.1
	segundo modo	mar de fondo	74.4	<0.1	<0.1	2.4	39.5	24.8	29.8	3.4	<0.1
	modo	mar de viento	25.6	0.1	<0.1	12.0	75.2	2.2	2.3	7.9	0.3
	tercer modo	mar de fondo	89.1	<0.1	0.3	3.0	10.9	12.3	68.4	4.6	0.5
	modo	mar de viento	10.9	<0.1	<0.1	10.6	63.0	7.9	5.3	12.1	1.1

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 3.4 % de la totalidad de casos

Tabla B.7: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Talcahuano

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 28.7	primer modo	mar de fondo	99.7			<0.1	78.7	21.1	0.2	<0.1	
	modo	mar de viento	0.3			10.1	24.7	40.4	20.2	4.5	
bimodal 44.7	primer modo	mar de fondo	96.4		<0.1	1.3	80.8	15.6	2.1	<0.1	<0.1
	modo	mar de viento	3.6		0.2	57.9	21.0	1.2	11.4	8.0	0.4
	segundo modo	mar de fondo	90.1	<0.1	0.2	7.1	14.3	9.1	65.9	2.4	1.0
	modo	mar de viento	9.9	0.2	0.4	69.7	13.6	0.9	5.5	7.6	2.0
trimodal 23.1	primer modo	mar de fondo	88.1		<0.1	4.9	70.5	21.1	2.9	0.5	<0.1
	modo	mar de viento	11.9		0.2	67.3	24.6	0.3	2.7	4.1	0.7
	segundo modo	mar de fondo	77.3	<0.1	0.3	22.0	31.1	18.6	23.7	3.4	0.9
	modo	mar de viento	22.7	<0.1	0.2	70.0	19.7	0.4	3.3	5.2	1.0
	tercer modo	mar de fondo	95.1	<0.1	0.9	8.7	7.5	9.4	67.9	3.6	1.9
	modo	mar de viento	4.9	0.7	0.7	46.2	27.0	2.8	5.9	13.5	3.1

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 3.5 % de la totalidad de casos

Tabla B.8: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Puerto Saavedra

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 31.4	primer modo	mar de fondo	99.5			<0.1	74.5	25.0	0.5	<0.1	
	modo	mar de viento	0.5				11.6	46.5	36.1	5.8	
bimodal 45.9	primer modo	mar de fondo	97.6	<0.1	<0.1	0.5	77.4	18.2	3.6	0.4	<0.1
	modo	mar de viento	2.4	0.9	1.3	31.7	13.5	2.6	24.6	24.4	0.9
	segundo modo	mar de fondo	93.1	<0.1	0.5	5.0	14.3	8.7	67.7	3.5	0.3
	modo	mar de viento	6.9	0.6	2.6	53.8	14.3	1.0	10.5	15.7	1.4
trimodal 19.4	primer modo	mar de fondo	91.3	<0.1	<0.1	3.1	65.3	25.5	4.6	1.4	<0.1
	modo	mar de viento	8.7	0.2	0.7	53.7	22.6	1.1	7.0	14.1	0.6
	segundo modo	mar de fondo	82.1	0.2	1.1	18.8	28.9	20.7	24.1	5.8	0.4
	modo	mar de viento	17.9	0.7	2.5	56.0	21.6	0.6	7.0	10.4	1.1
	tercer modo	mar de fondo	95.4	0.4	1.4	8.1	9.8	11.2	62.1	6.2	0.8
	modo	mar de viento	4.6	2.0	4.0	31.1	27.5	2.8	13.9	16.2	2.6

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 3.3 % de la totalidad de casos

Tabla B.9: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Chiloé

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 33.6	primer modo	mar de fondo	98.8			0.2	63.7	34.8	1.3	<0.1	
		mar de viento	1.2				16.1	44.1	36.9	2.9	
bimodal 46.4	primer modo	mar de fondo	97.5		<0.1	0.6	65.0	24.6	9.0	0.8	<0.1
		mar de viento	2.5		0.3	4.0	4.5	6.7	51.6	30.8	2.1
	segundo modo	mar de fondo	96.3	<0.1	0.3	2.6	16.1	8.5	68.1	3.9	0.5
		mar de viento	3.7	1.8	4.9	28.8	9.3	3.2	25.7	22.3	4.0
trimodal 16.2	primer modo	mar de fondo	94.0	<0.1	<0.1	4.2	51.5	31.6	9.6	2.8	0.1
		mar de viento	6.0	0.7	0.9	18.7	8.0	5.4	29.7	33.1	3.5
	segundo modo	mar de fondo	86.5	0.2	1.0	11.4	26.9	21.5	30.2	7.8	1.1
		mar de viento	13.5	1.8	4.4	35.3	11.5	3.3	19.5	19.7	4.5
	tercer modo	mar de fondo	93.5	0.5	2.0	10.4	14.4	12.2	50.4	8.7	1.4
		mar de viento	6.5	5.1	9.6	25.3	13.5	4.8	13.1	18.7	9.8

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 3.7 % de la totalidad de casos

Tabla B.10: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Archipiélago de Los Chonos

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 36.2	primer modo	mar de fondo	98.2			<0.1	57.9	40.2	1.8	<0.1	
		mar de viento	1.8				17.1	51.9	27.6	3.4	
bimodal 44.4	primer modo	mar de fondo	96.9	<0.1	<0.1	0.4	58.0	28.3	12.1	1.1	<0.1
		mar de viento	3.1	0.8	1.2	4.3	6.8	7.5	50.4	26.6	2.4
	segundo modo	mar de fondo	95.9	0.1	<0.1	2.1	17.9	9.3	65.6	4.6	0.3
		mar de viento	4.1	5.9	3.4	15.0	18.7	2.8	22.1	24.1	8.0
trimodal 15.5	primer modo	mar de fondo	91.4	<0.1		3.0	46.7	34.1	12.3	3.9	0.1
		mar de viento	8.6	2.1	0.8	12.4	17.9	4.4	27.9	28.7	5.8
	segundo modo	mar de fondo	83.2	0.5	0.3	6.5	30.6	21.6	30.0	9.4	1.1
		mar de viento	16.8	4.6	2.8	16.5	27.5	3.2	16.2	21.4	7.8
	tercer modo	mar de fondo	92.5	1.4	0.7	8.6	15.2	12.2	50.1	9.9	1.8
		mar de viento	7.5	8.2	5.9	14.2	17.6	5.4	10.5	23.5	14.7

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 3.9 % de la totalidad de casos

Tabla B.11: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Golfo de Penas

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 37.4	primer	mar de fondo	96.9			0.2	46.0	51.3	2.4	<0.1	
	modo	mar de viento	3.1			<0.1	13.5	50.9	32.0	3.5	
bimodal 42.6	primer	mar de fondo	95.5			1.0	47.3	35.3	14.5	1.7	<0.1
	modo	mar de viento	4.5			<0.1	3.6	5.3	9.6	49.4	28.5
	segundo	mar de fondo	96.1	<0.1	<0.1	3.2	17.9	10.9	61.7	5.7	0.5
	modo	mar de viento	3.9	1.3	2.3	14.8	6.4	3.6	33.1	31.6	6.8
trimodal 15.6	primer	mar de fondo	90.3			6.4	38.4	36.2	13.3	5.4	0.4
	modo	mar de viento	9.7	0.4	0.2	12.5	7.0	3.5	31.2	36.2	9.1
	segundo	mar de fondo	86.1	0.2	0.1	11.1	26.2	21.0	29.0	10.9	1.5
	modo	mar de viento	13.9	1.3	1.9	19.9	9.7	2.3	25.8	30.2	8.8
	tercer	mar de fondo	93.3	0.5	0.5	12.0	17.1	11.6	46.2	10.3	1.8
	modo	mar de viento	6.7	4.0	5.8	19.1	15.1	6.2	14.2	24.7	11.0

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 4.5 % de la totalidad de casos

Tabla B.12: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Isla Esmeralda

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 38.1	primer	mar de fondo	93.1			0.2	36.9	59.5	3.3	0.1	
	modo	mar de viento	6.9			0.6	16.6	55.2	23.8	3.9	
bimodal 40.5	primer	mar de fondo	92.2			1.5	38.9	41.1	16.1	2.3	<0.1
	modo	mar de viento	7.8			2.7	3.9	12.0	48.6	32.0	0.8
	segundo	mar de fondo	93.8	<0.1	<0.1	4.6	16.0	15.2	56.5	7.6	<0.1
	modo	mar de viento	6.2	1.0	1.2	9.8	2.6	4.0	46.6	31.5	3.3
trimodal 16.2	primer	mar de fondo	87.8			8.6	32.9	36.8	15.0	6.6	0.2
	modo	mar de viento	12.2	0.1	0.2	11.3	4.6	4.2	35.8	39.9	3.8
	segundo	mar de fondo	84.7	<0.1	<0.1	12.9	22.9	22.5	28.5	12.5	0.5
	modo	mar de viento	15.3	0.6	1.2	15.0	5.8	3.9	33.7	36.0	3.9
	tercer	mar de fondo	93.4	0.3	0.2	13.4	17.2	11.2	44.7	12.0	1.0
	modo	mar de viento	6.6	3.9	5.4	15.8	10.1	5.1	19.8	29.3	10.6

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 5.1 % de la totalidad de casos

Tabla B.13: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Isla Contreras

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 40.9	primer	mar de fondo	79.9			0.2	20.6	72.3	6.7	0.2	
	modo	mar de viento	20.1	<0.1	<0.1	0.5	18.6	55.2	22.8	2.9	
bimodal 38.7	primer	mar de fondo	85.0	<0.1	<0.1	1.8	22.3	52.2	20.1	3.6	<0.1
	modo	mar de viento	15.0	1.1	0.4	2.5	6.4	17.0	50.0	22.3	0.3
	segundo	mar de fondo	93.3	0.2	0.9	6.7	8.8	27.0	46.3	9.9	<0.1
	modo	mar de viento	6.7	3.2	2.7	4.9	3.1	12.8	50.3	19.8	3.2
trimodal 14.6	primer	mar de fondo	84.0	0.2	0.2	9.6	21.6	42.4	18.1	7.7	<0.1
	modo	mar de viento	16.0	9.2	4.1	8.3	5.0	8.8	39.7	21.2	3.6
	segundo	mar de fondo	87.4	0.4	1.9	13.7	15.3	29.8	24.4	14.0	0.4
	modo	mar de viento	12.6	11.3	7.1	7.1	5.8	10.0	35.2	16.0	7.6
	tercer	mar de fondo	93.5	1.7	3.9	14.3	11.5	13.3	42.6	12.2	0.5
	modo	mar de viento	6.5	20.0	11.5	7.0	10.9	9.4	18.5	12.3	10.5

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 5.7 % de la totalidad de casos

Tabla B.14: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Isla London

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 53.0	primer	mar de fondo	79.0			0.1	10.1	82.6	7.2		<0.1
	modo	mar de viento	21.0			0.6	18.5	64.8	15.9	<0.1	<0.1
bimodal 31.1	primer	mar de fondo	87.1	<0.1	0.2	2.7	14.2	59.3	23.3	0.1	<0.1
	modo	mar de viento	12.9	0.7	0.7	5.3	13.6	27.3	45.4	2.8	4.2
	segundo	mar de fondo	89.4	<0.1	3.0	11.2	5.3	32.7	45.5	1.4	0.8
	modo	mar de viento	10.6	3.7	4.0	6.0	4.8	17.3	34.8	12.0	17.3
trimodal 11.9	primer	mar de fondo	84.8	<0.1	1.1	9.4	18.1	51.0	19.5	0.4	0.4
	modo	mar de viento	15.2	4.8	2.6	12.6	10.4	16.6	31.9	6.0	15.1
	segundo	mar de fondo	80.7	0.2	4.5	16.4	9.1	34.8	31.1	2.4	1.4
	modo	mar de viento	19.3	9.3	5.1	5.6	5.8	13.5	26.4	12.6	21.7
	tercer	mar de fondo	89.3	1.0	8.3	14.9	5.9	18.8	44.9	3.7	2.6
	modo	mar de viento	10.7	14.0	9.9	4.7	5.9	10.8	16.3	14.0	24.3

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 4.0 % de la totalidad de casos

Tabla B.15: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Islas Desventuradas

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 9.9	primer modo	mar de fondo	99.7		<0.1	3.4	90.4	6.1			
	modo	mar de viento	0.3		26.9	7.7	50.0	15.4			
bimodal 30.1	primer modo	mar de fondo	96.6	<0.1	8.0	9.9	76.6	5.5	<0.1		
	modo	mar de viento	3.4	0.2	83.4	10.8	1.8	1.7	2.0	0.2	
	segundo modo	mar de fondo	91.9	0.7	40.7	12.0	20.3	4.4	21.7	<0.1	<0.1
	modo	mar de viento	8.1	1.3	76.0	14.0	2.3	1.8	3.4	0.9	0.4
trimodal 49.8	primer modo	mar de fondo	96.6		12.5	15.7	67.5	3.6	0.7	<0.1	
	modo	mar de viento	3.4	<0.1	86.3	11.8	0.2	0.5	1.0	0.2	
	segundo modo	mar de fondo	94.0	0.2	33.5	19.2	28.2	3.4	15.5	<0.1	
	modo	mar de viento	6.0	0.5	74.7	17.1	2.2	1.9	2.7	0.8	0.1
	tercer modo	mar de fondo	98.6	0.3	10.8	8.9	4.3	3.5	71.9	0.3	<0.1
	modo	mar de viento	1.4	2.2	30.2	39.6	7.7	7.5	9.2	2.9	0.7

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 10.3 % de la totalidad de casos

Tabla B.16: Distribución porcentual de modos por tipo y dirección para el nodo de Archipiélago de Juan Fernández

				E	SE	S	SO	O	NO	N	NE
unimodal 25.3	primer modo	mar de fondo	98.8			1.7	80.9	17.3	<0.1	<0.1	
	modo	mar de viento	1.2			7.6	33.3	49.4	9.7		
bimodal 37.8	primer modo	mar de fondo	97.9	<0.1	1.1	4.9	77.3	14.9	1.7	<0.1	
	modo	mar de viento	2.1	0.1	27.8	13.5	8.5	15.5	29.6	4.6	0.5
	segundo modo	mar de fondo	95.7	0.5	10.9	7.4	14.4	8.3	57.9	0.5	<0.1
	modo	mar de viento	4.3	4.5	26.2	16.5	6.9	10.4	19.5	12.3	3.7
trimodal 28.0	primer modo	mar de fondo	97.0	<0.1	5.5	9.6	69.4	13.4	1.9	<0.1	<0.1
	modo	mar de viento	3.0	1.4	46.9	15.4	5.3	6.7	16.2	6.6	1.5
	segundo modo	mar de fondo	93.1	0.4	27.7	13.2	20.9	10.7	26.4	0.7	<0.1
	modo	mar de viento	6.9	4.0	34.8	20.1	6.2	7.9	18.2	6.6	2.1
	tercer modo	mar de fondo	96.7	1.1	17.6	9.1	5.4	6.9	58.4	1.2	0.4
	modo	mar de viento	3.3	6.4	8.6	21.7	13.7	17.1	18.2	10.3	3.9

NOTA: estados de mar con más de 3 modos abarcan el 8.8 % de la totalidad de casos

B.3.2 Tablas de los estados de mar más recurrentes

Tabla B.17: Distribución porcentual de casos para el nodo de Arica

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SO	1.3	7.2	16.7	13.2	38.3
MF del SO + MF del NO	17.8	11.0	0.4	6.7	36.0
MF del S + MF del SO + MF del NO	3.6	3.2	0.3	1.4	8.5
MF del S + MF del SO	0.1	1.4	3.6	1.7	6.7
MF del SO + MF del NO + MV del S	1.2	0.8	0.1	0.3	2.5
MF del SO + MV del S	0.1	0.5	1.1	0.5	2.2
MF del SO + MF del O	0.0	0.1	1.0	0.4	1.5
MF del S + MF del SO + MF del O	0.0	0.1	0.8	0.2	1.1
MF del SO + MF del O + MF del NO	0.2	0.2	0.1	0.1	0.6
MF del S + MF del SO + MF del O + MF del NO	0.1	0.2	0.1	0.1	0.4
Otros	0.2	0.4	1.1	0.4	2.1
Suma	25	25	25	25	100

Tabla B.18: Distribución porcentual de casos para el nodo de Mejillones

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SO + MF del NO	18.3	12.6	0.7	8.1	39.7
MF del SO	0.6	5.2	14.7	10.4	30.8
MF del SO + MF del NO + MV del S	2.0	1.9	0.2	0.8	4.9
MF del S + MF del SO + MF del NO	1.6	1.7	0.2	0.7	4.1
MF del SO + MV del S	0.0	0.6	1.9	0.9	3.4
MF del SO + MF del NO + MV del SO	1.3	1.1	0.1	0.8	3.3
MF del SO + MV del SO	0.0	0.4	1.5	1.0	3.0
MF del SO + MF del O	0.0	0.2	1.9	0.5	2.6
MF del S + MF del SO	0.0	0.3	1.3	0.6	2.2
MF del SO + MF del O + MF del NO	0.4	0.5	0.3	0.3	1.5
Otros	0.3	0.8	2.4	0.9	4.4
Suma	25	25	25	25	100

Tabla B.19: Distribución porcentual de casos para el nodo de Taltal

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SO + MF del NO	19.4	13.4	0.7	8.2	41.7
MF del SO	0.6	5.5	14.8	10.8	31.7
MF del SO + MF del O	0.0	0.3	2.8	0.8	3.9
MF del SO + MF del NO + MV del S	1.4	1.4	0.1	0.6	3.5
MF del SO + MF del NO + MV del SO	1.2	1.0	0.1	0.6	2.9
MF del SO + MV del S	0.0	0.5	1.7	0.7	2.9
MF del S + MF del SO + MF del NO	1.0	1.0	0.1	0.5	2.6
MF del SO + MV del SO	0.0	0.3	1.2	0.9	2.4
MF del SO + MF del O + MF del NO	0.5	0.8	0.4	0.5	2.3
MF del S + MF del SO	0.0	0.2	0.8	0.4	1.4
Otros	0.3	0.9	2.5	1.0	4.7
Suma	25	25	25	25	100

Tabla B.20: Distribución porcentual de casos para el nodo de Huasco

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SO + MF del NO	17.5	11.0	0.5	6.1	35.1
MF del SO	1.1	5.0	10.6	8.7	25.4
MF del SO + MV del SO	0.1	0.9	2.0	1.9	5.0
MF del SO + MF del NO + MV del SO	2.1	1.5	0.0	1.1	4.7
MF del SO + MF del O	0.0	0.4	3.1	1.0	4.5
MF del SO + MV del S	0.0	0.7	2.2	1.2	4.2
MF del SO + MF del NO + MV del S	1.1	1.5	0.1	0.7	3.3
MF del SO + MF del O + MF del NO	0.6	1.2	0.6	0.6	3.0
MF del S + MF del SO + MF del NO	1.0	1.0	0.1	0.6	2.6
MF del S + MF del SO	0.0	0.3	1.1	0.7	2.2
Otros	1.0	1.8	4.9	2.3	10.0
Suma	25	25	25	25	100

Tabla B.21: Distribución porcentual de casos para el nodo de Tongoy

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SO + MF del NO	16.6	10.3	0.6	5.7	33.2
MF del SO	1.3	4.6	9.3	7.9	23.1
MF del SO + MV del S	0.1	1.0	2.8	1.7	5.6
MF del SO + MF del NO + MV del SO	2.4	1.5	0.1	1.1	5.0
MF del SO + MF del O	0.0	0.5	3.4	1.1	5.0
MF del SO + MF del NO + MV del S	1.6	1.8	0.1	1.0	4.5
MF del SO + MV del SO	0.2	0.7	1.4	1.7	4.0
MF del SO + MF del O + MF del NO	0.7	1.5	0.7	0.9	3.8
MF del S + MF del SO + MF del NO	0.8	0.6	0.0	0.5	1.9
MF del S + MF del SO	0.0	0.4	0.8	0.6	1.9
Otros	1.1	2.4	6.0	2.6	12.0
Suma	25	25	25	25	100

Tabla B.22: Distribución porcentual de casos para el nodo de Constitución

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SO + MF del NO	14.8	10.2	1.1	6.1	32.2
MF del SO	1.1	3.8	7.9	7.1	19.9
MF del SO + MF del NO + MV del SO	4.2	1.9	0.1	1.5	7.8
MF del SO + MF del O + MF del NO	2.0	2.7	0.8	2.2	7.7
MF del SO + MF del O	0.1	0.8	4.2	1.9	7.0
MF del O	0.0	0.6	3.5	1.0	5.1
MF del SO + MV del SO	0.3	0.6	0.9	1.4	3.2
MF del O + MF del NO	0.4	0.8	0.4	0.6	2.3
MF del SO + MF del O + MF del NO + MV del SO	0.4	0.5	0.1	0.4	1.3
MF del SO + MV del S	0.0	0.2	0.5	0.2	0.9
Otros	1.3	3.0	5.7	2.7	12.6
Suma	25	25	25	25	100

Tabla B.23: Distribución porcentual de casos para el nodo de Talcahuano

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SO + MF del NO	11.6	7.6	1.3	4.7	25.2
MF del SO	1.7	5.2	8.1	7.6	22.5
MF del SO + MF del O	0.1	0.9	3.7	1.8	6.4
MF del O	0.1	0.8	3.9	1.3	6.0
MF del SO + MF del O + MF del NO	1.4	1.9	0.6	1.5	5.4
MF del SO + MF del NO + MV del S	2.8	1.5	0.1	0.7	5.0
MF del S + MF del SO + MF del NO	2.6	1.3	0.1	0.8	4.8
MF del SO + MV del S	0.5	0.9	0.9	1.4	3.6
MF del S + MF del SO	0.4	0.6	0.7	1.0	2.7
MF del O + MF del NO	0.5	0.7	0.3	0.5	2.1
Otros	3.1	3.8	5.6	3.6	16.1
Suma	25	25	25	25	100

Tabla B.24: Distribución porcentual de casos para el nodo de Puerto Saavedra

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SO + MF del NO	12.7	7.7	1.8	5.1	27.3
MF del SO	2.2	5.8	7.4	8.0	23.3
MF del O	0.2	1.3	4.4	1.9	7.8
MF del SO + MF del O	0.1	1.0	3.7	2.1	6.8
MF del SO + MF del O + MF del NO	1.8	2.0	0.6	1.5	5.9
MF del S + MF del SO + MF del NO	1.8	1.0	0.1	0.5	3.4
MF del O + MF del NO	1.1	0.9	0.4	0.8	3.2
MF del SO + MF del NO + MV del S	1.4	0.8	0.1	0.3	2.5
MF del S + MF del SO	0.3	0.5	0.4	0.7	1.9
MF del SO + MV del S	0.3	0.4	0.4	0.8	1.8
Otros	2.7	3.9	6.1	3.4	16.1
Suma	25	25	25	25	100

Tabla B.25: Distribución porcentual de casos para el nodo de Chiloé

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SO + MF del NO	11.6	7.3	2.9	5.5	27.2
MF del SO	2.5	5.5	5.8	7.3	21.1
MF del O	1.3	2.7	4.5	3.0	11.5
MF del O + MF del NO	3.1	1.7	0.8	1.4	6.9
MF del SO + MF del O	0.2	0.9	2.6	1.7	5.5
MF del SO + MF del O + MF del NO	2.0	1.6	0.5	1.2	5.4
MF del S + MF del SO + MF del NO	0.7	0.6	0.3	0.3	1.9
MF del N + MF del SO + MF del NO	0.2	0.4	0.4	0.3	1.2
MF del N + MF del SO	0.0	0.2	0.7	0.2	1.2
MF del SO + MF del NO + MV del S	0.5	0.3	0.0	0.2	0.9
Otros	2.5	4.1	6.7	3.7	17.1
Suma	25	25	25	25	100

Tabla B.26: Distribución porcentual de casos para el nodo de Archipiélago de Los Chonos

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SO + MF del NO	9.5	6.3	3.3	5.2	24.3
MF del SO	2.8	5.5	5.3	7.0	20.6
MF del O	2.4	3.5	4.5	3.8	14.3
MF del O + MF del NO	4.1	1.9	0.9	1.6	8.4
MF del SO + MF del O + MF del NO	2.0	1.3	0.5	1.1	4.9
MF del SO + MF del O	0.3	0.9	2.1	1.5	4.8
MF del N + MF del SO + MF del NO	0.2	0.4	0.4	0.3	1.4
MF del N + MF del SO	0.0	0.2	0.7	0.2	1.2
MF del N + MF del O	0.0	0.2	0.6	0.3	1.1
MF del S + MF del SO + MF del NO	0.2	0.3	0.2	0.2	1.0
Otros	3.1	4.6	6.4	3.8	17.9
Suma	25	25	25	25	100

Tabla B.27: Distribución porcentual de casos para el nodo de Golfo de Penas

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SO + MF del NO	6.9	4.9	3.2	4.5	19.6
MF del O	4.0	4.5	4.9	5.2	18.6
MF del SO	2.3	4.5	4.3	5.6	16.7
MF del O + MF del NO	5.3	2.4	1.2	2.0	10.8
MF del SO + MF del O + MF del NO	1.6	1.0	0.4	0.8	3.8
MF del SO + MF del O	0.3	0.8	1.5	1.1	3.7
MF del S + MF del SO + MF del NO	0.4	0.4	0.4	0.4	1.6
MF del N + MF del O	0.1	0.3	0.8	0.4	1.5
MF del N + MF del SO	0.0	0.2	0.7	0.3	1.3
MF del N + MF del SO + MF del NO	0.2	0.4	0.4	0.3	1.2
Otros	3.7	5.7	7.5	4.4	21.3
Suma	25	25	25	25	100

Tabla B.28: Distribución porcentual de casos para el nodo de Isla Esmeralda

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del O	5.2	5.1	4.8	6.0	21.1
MF del SO + MF del NO	4.5	3.7	2.8	3.4	14.4
MF del SO	1.8	3.5	3.5	4.2	13.1
MF del O + MF del NO	5.5	2.5	1.4	2.5	11.9
MF del SO + MF del O + MF del NO	1.1	0.7	0.4	0.7	2.9
MF del SO + MF del O	0.3	0.6	1.0	0.6	2.6
MF del N + MF del O	0.2	0.5	1.0	0.6	2.2
MF del S + MF del SO + MF del NO	0.3	0.5	0.6	0.4	1.8
MF del O + MV del NO	0.3	0.4	0.4	0.4	1.5
MF del S + MF del O + MF del NO	0.5	0.4	0.3	0.3	1.5
Otros	4.8	7.3	9.2	5.7	27.0
Suma	25	25	25	25	100

Tabla B.29: Distribución porcentual de casos para el nodo de Isla Contreras

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del O	6.3	5.8	5.0	6.7	23.6
MF del O + MF del NO	5.6	3.3	2.1	3.4	14.4
MF del SO	0.8	1.8	2.1	2.1	6.7
MF del SO + MF del NO	1.5	1.6	1.9	1.7	6.6
MV del O	1.2	1.2	1.0	1.2	4.6
MF del N + MF del O	0.6	0.8	1.1	1.0	3.5
MF del O + MV del NO	0.6	0.7	0.7	0.9	2.9
MF del NO	0.6	0.5	0.6	0.5	2.2
MF del S + MF del O + MF del NO	0.7	0.6	0.4	0.4	2.1
MF del S + MF del O	0.4	0.5	0.7	0.5	2.1
Otros	6.4	8.5	9.7	6.6	31.2
Suma	25	25	25	25	100

Tabla B.30: Distribución porcentual de casos para el nodo de Isla London

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del O	9.1	8.4	7.5	9.7	34.6
MF del O + MF del NO	5.0	3.3	2.4	3.2	13.9
MV del O	1.8	1.7	1.5	2.2	7.2
MF del SO	0.4	1.0	1.5	1.4	4.2
MF del S + MF del O	0.6	0.8	1.0	0.7	3.1
MF del NO	0.9	0.7	0.8	0.6	3.0
MF del SO + MF del NO	0.5	0.7	1.0	0.7	3.0
MF del O + MV del NO	0.6	0.6	0.6	0.7	2.4
MF del S + MF del O + MF del NO	0.7	0.7	0.6	0.5	2.4
MV del SO	0.2	0.6	0.8	0.6	2.1
Otros	5.0	6.8	7.6	4.7	24.1
Suma	25	25	25	25	100

Tabla B.31: Distribución porcentual de casos para el nodo de Islas Desventuradas

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SE + MF del SO + MF del NO	9.5	6.8	0.3	5.1	21.7
MF del S + MF del SO + MF del NO	7.9	4.6	0.2	2.6	15.3
MF del SE + MF del SO	0.4	2.3	5.5	4.7	12.9
MF del SO	0.0	1.4	5.6	1.9	8.9
MF del SO + MF del NO	1.4	2.5	0.4	1.2	5.5
MF del S + MF del SO	0.2	0.8	2.1	1.7	4.7
MF del SO + MF del NO + MV del SE	1.4	0.9	0.0	0.8	3.1
MF del SE + MF del S + MF del SO + MF del NO	1.0	1.1	0.1	0.8	3.0
MF del SO + MV del SE	0.1	0.4	1.0	1.0	2.6
MF del SE + MF del S + MF del SO	0.0	0.3	1.3	0.6	2.2
Otros	2.8	4.1	8.7	4.6	20.1
Suma	25	25	25	25	100

Tabla B.32: Distribución porcentual de casos para el nodo de Archipiélago Juan Fernández

	Dic-Feb	Mar-May	Jun-Ago	Sep-Nov	Anual
MF del SO	0.9	4.7	8.1	6.6	20.3
MF del SO + MF del NO	8.7	6.0	0.8	4.4	20.0
MF del SE + MF del SO + MF del NO	6.5	2.9	0.1	1.8	11.3
MF del SO + MF del O	0.0	0.7	2.9	1.4	5.0
MF del O	0.0	0.6	2.8	0.9	4.3
MF del S + MF del SO + MF del NO	1.9	1.4	0.3	0.8	4.3
MF del SE + MF del SO	0.5	0.9	1.0	1.7	4.0
MF del SO + MF del O + MF del NO	1.0	1.2	0.3	1.0	3.5
MF del S + MF del SO	0.1	0.5	1.1	0.8	2.4
MF del S + MF del O	0.0	0.2	1.1	0.3	1.6
Otros	5.0	6.2	6.8	5.3	23.3
Suma	25	25	25	25	100

B.3.3 Gráfico de distribución de le energía espectral por modo

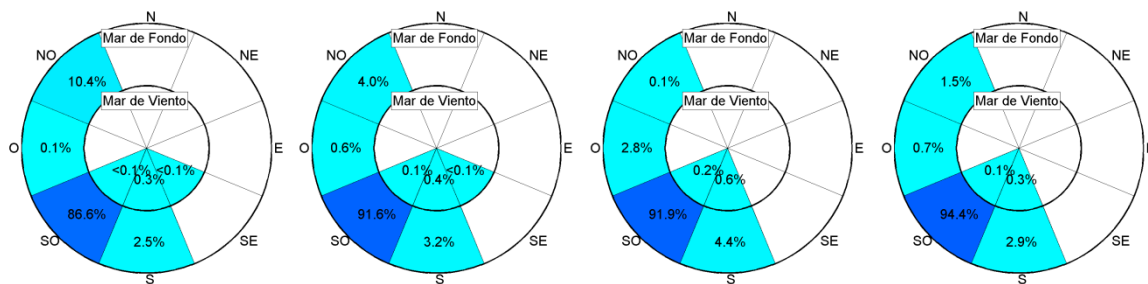


Figura B.49: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Arica

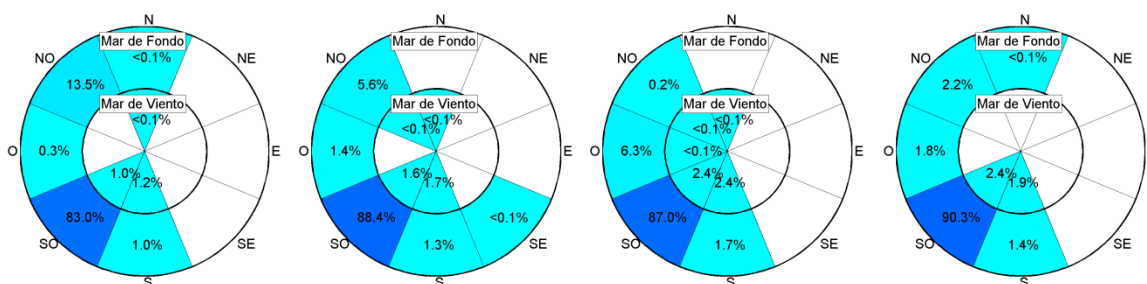


Figura B.50: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Mejillones

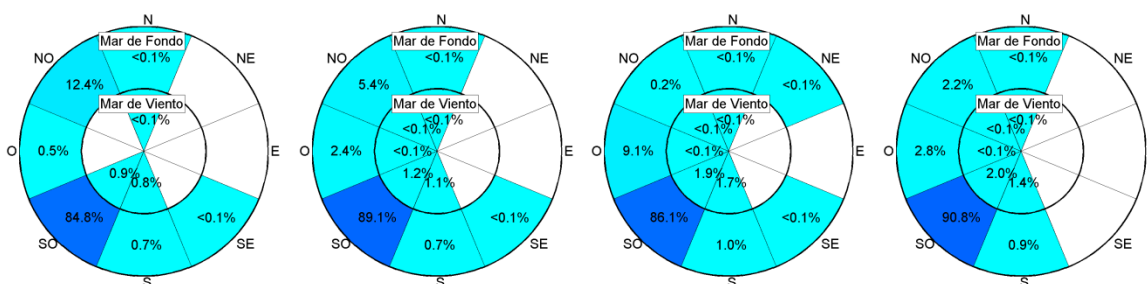


Figura B.51: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Taltal

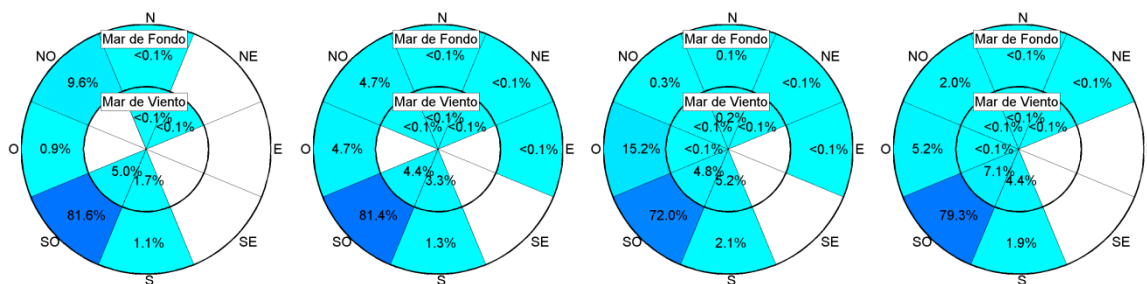


Figura B.52: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Huasco

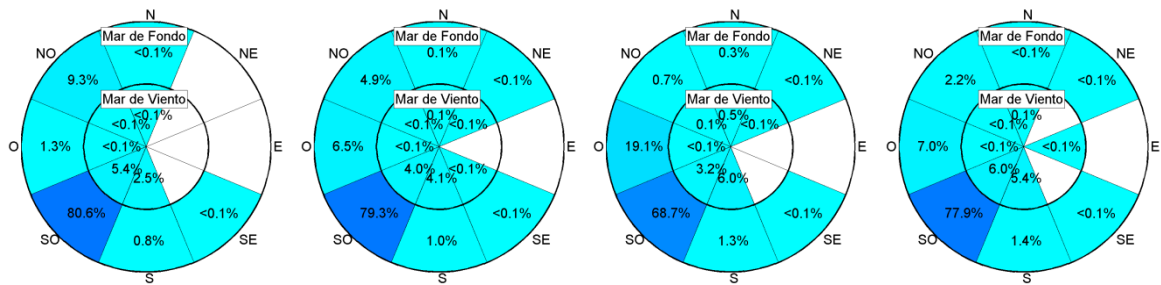


Figura B.53: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Tongoy

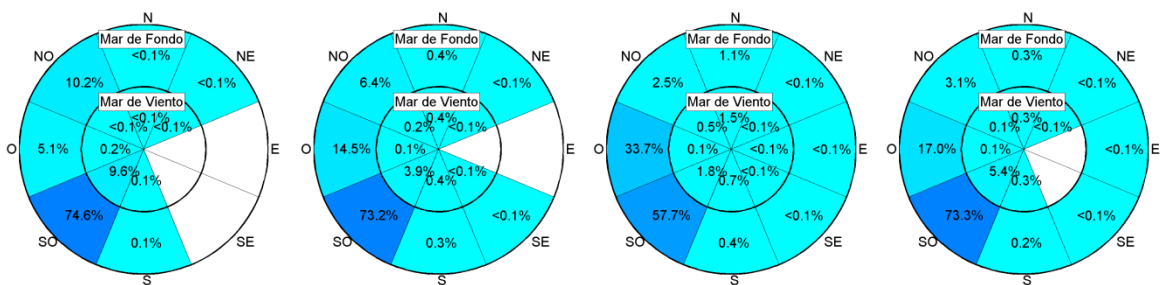


Figura B.54: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Constitución

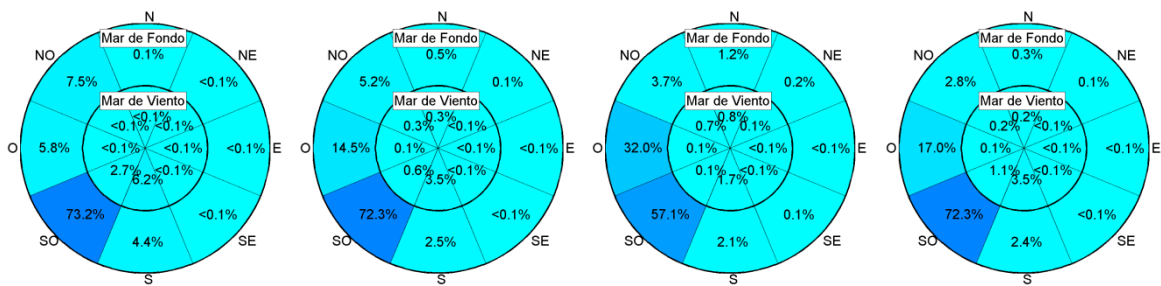


Figura B.55: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Talcahuano

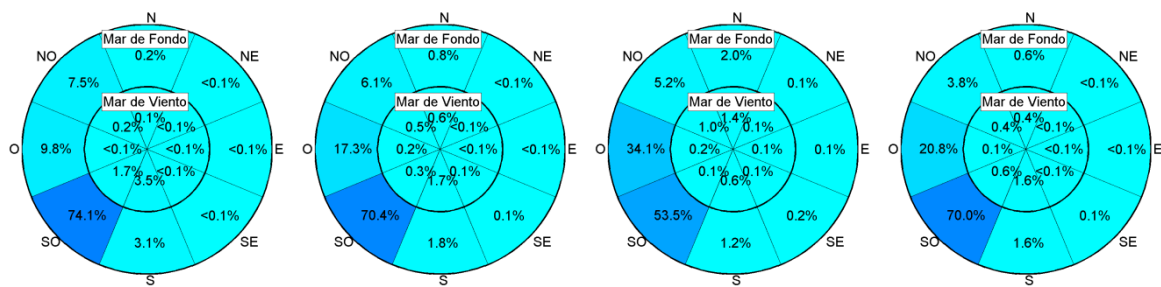


Figura B.56: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Puerto Saavedra

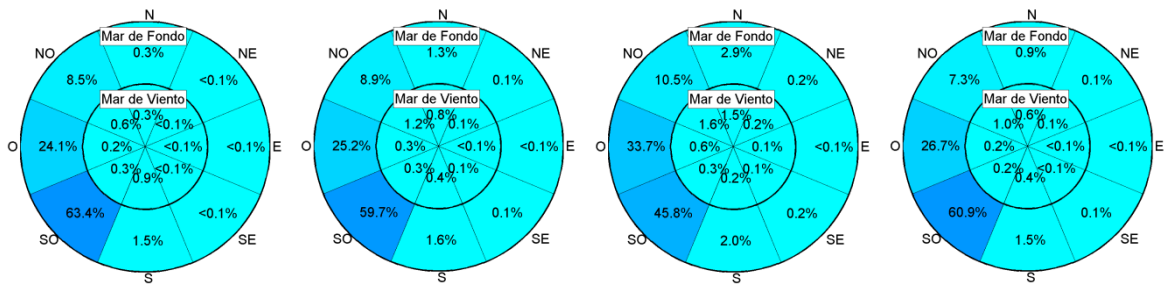


Figura B.57: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Chiloé

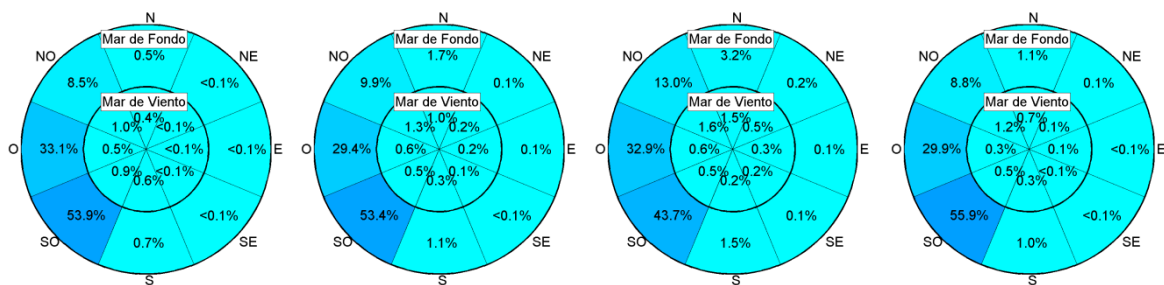


Figura B.58: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Archipiélago de Los Chonos

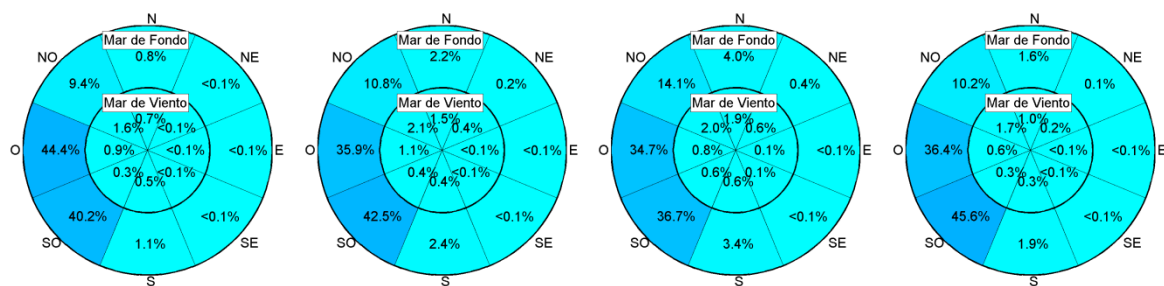


Figura B.59: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Golfo de Penas

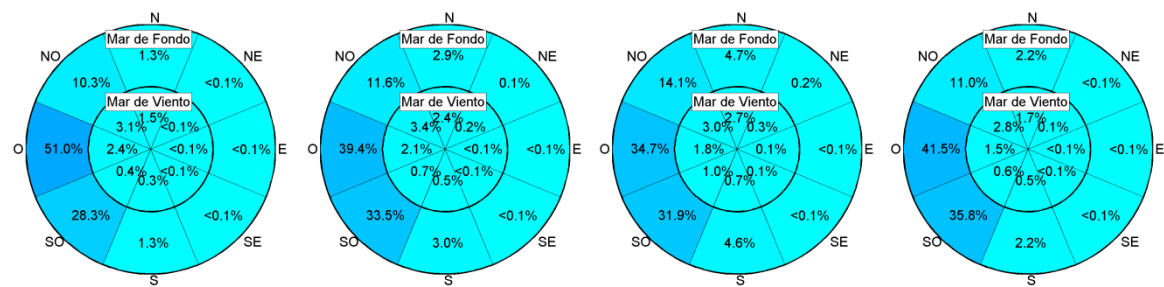


Figura B.60: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Isla Esmeralda

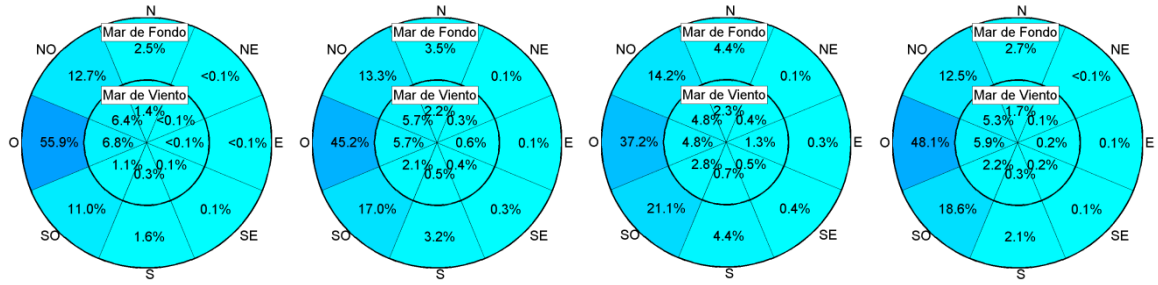


Figura B.61: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Isla Contreras

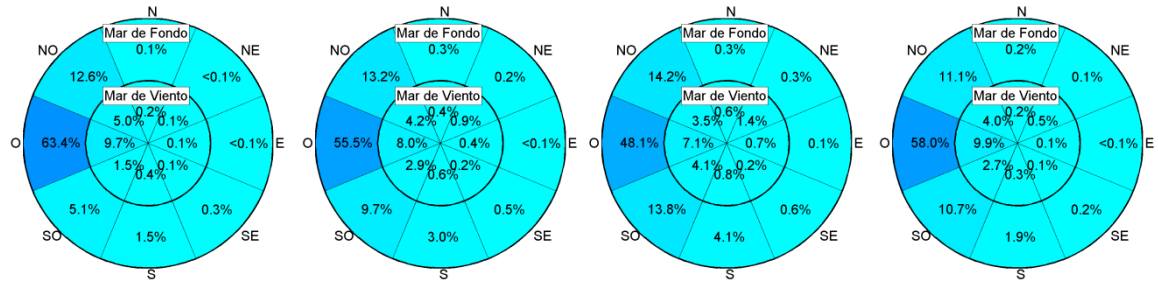


Figura B.62: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Isla London

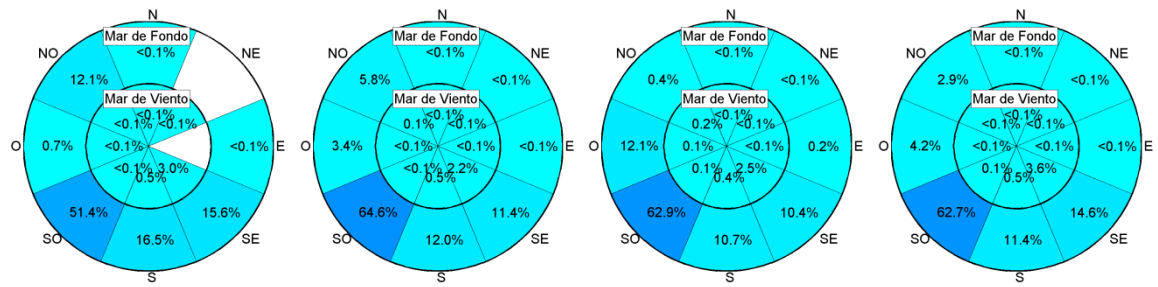


Figura B.63: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Islas Desventuradas

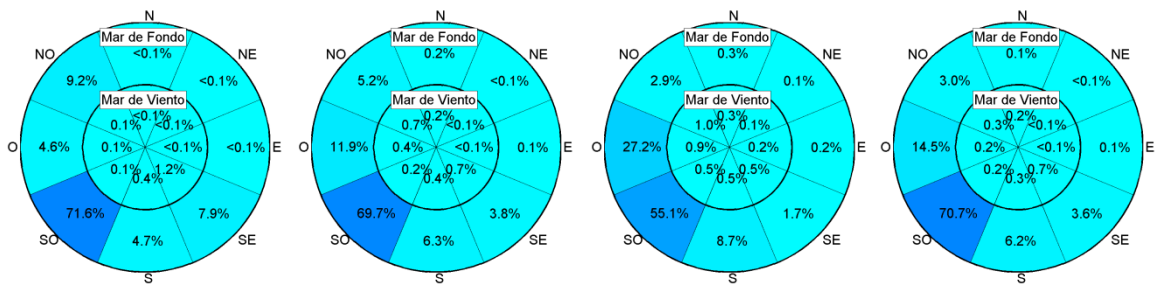


Figura B.64: Porcentaje de energía espectral por modo para el nodo de Archipiélago Juan Fernández

ANEXO C: SERIES DE TIEMPO DE LAS TORMENTAS Y CARACTERIZACIÓN POR ESTACIONES

Se graficaron las series de tiempo de altura significativa de los eventos extremos centradas en su valor pico desde que la tormenta llega al nodo hasta que se aleja o desaparece. Si bien el inicio de una tormenta es relativo, para efectos de este análisis se definió como el mínimo local inmediatamente anterior al valor pico. Asimismo, el fin de la tormenta se definió como el mínimo local inmediatamente posterior a este valor. Debido a que durante la tormenta hay momentos en que la altura disminuye y aumenta de forma intermitente generando varios mínimos (ruido), se suavizó la serie de tiempo m veces por medio de un promedio móvil de 3 valores.

$$H_{m0}'(1) = H_{m0}(1) \quad (C.1)$$

$$H_{m0}'(t) = \frac{\sum_{i=t-1}^{t+1} H_{m0}(i)}{3} \quad \text{para } t = 2, \dots, n-1 \quad (C.2)$$

$$H_{m0}'(n) = H_{m0}(n) \quad (C.3)$$

Donde H_{m0} es la serie de alturas original, H_{m0}' es la serie de tiempo suavizada y n es el número de datos de la serie.

Se observó que para $m=5$ se obtenían series de tiempo lo suficientemente suaves que permitían identificar el inicio y fin de la tormenta, aunque este valor se tuvo que aumentar para algunos nodos de la zona austral.

Adicionalmente se calculó una curva promedio de las series de tiempo de las tormentas. Para esto se normalizó en el sentido del tiempo la cola inferior de cada serie y se obtuvo una cola inferior promedio de duración unitaria. Luego se amplificó su duración por la duración promedio de las colas inferiores. Se hizo lo mismo con la cola superior y se unieron las dos curvas en el instante en que se producía el valor pico.

Además, como una forma de caracterizar otros aspectos de estos eventos, se crearon gráficos de torta que muestran su incidencia y los parámetros promedio más importantes por estación del año.

Estos dos gráficos también se presentan en el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016).

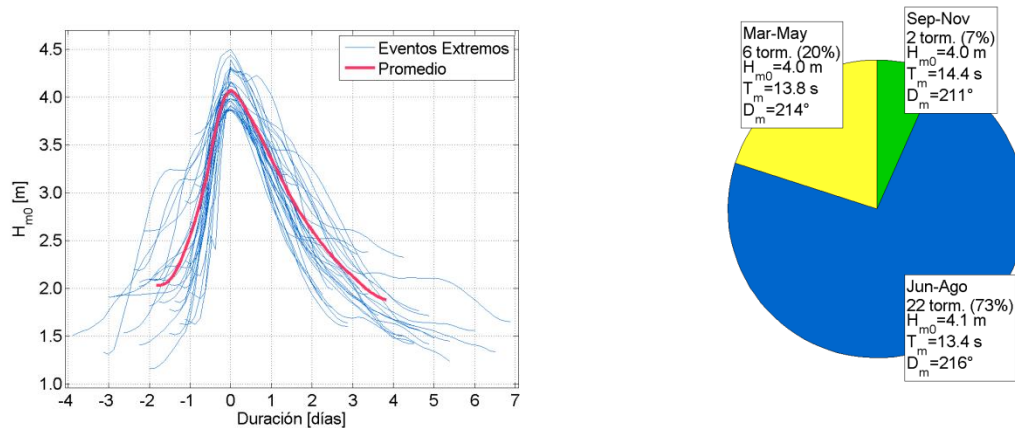


Figura C.1: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Arica

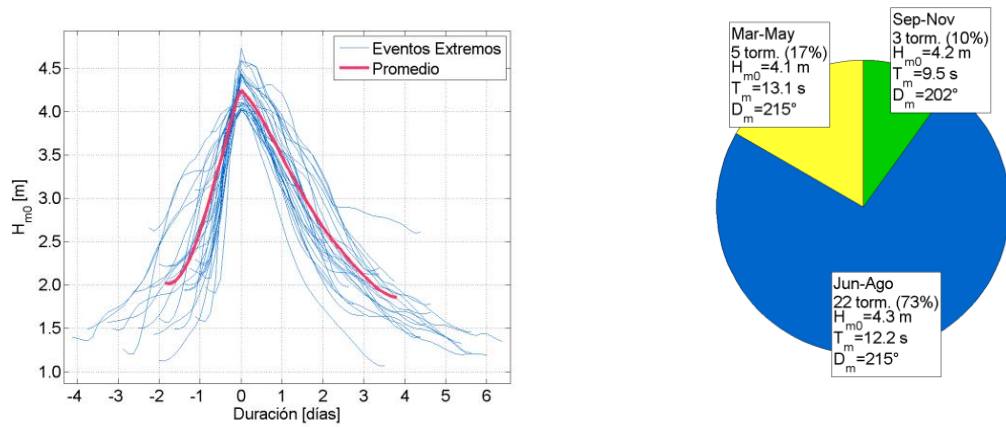


Figura C.2: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Iquique

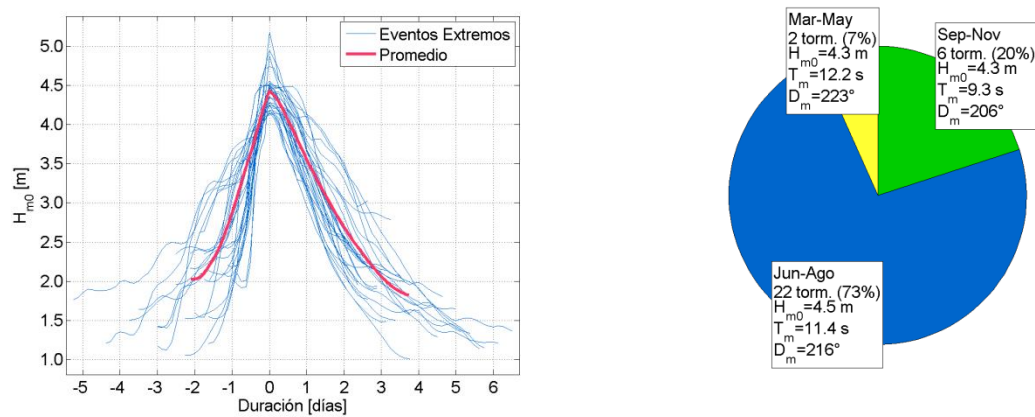


Figura C.3: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Mejillones

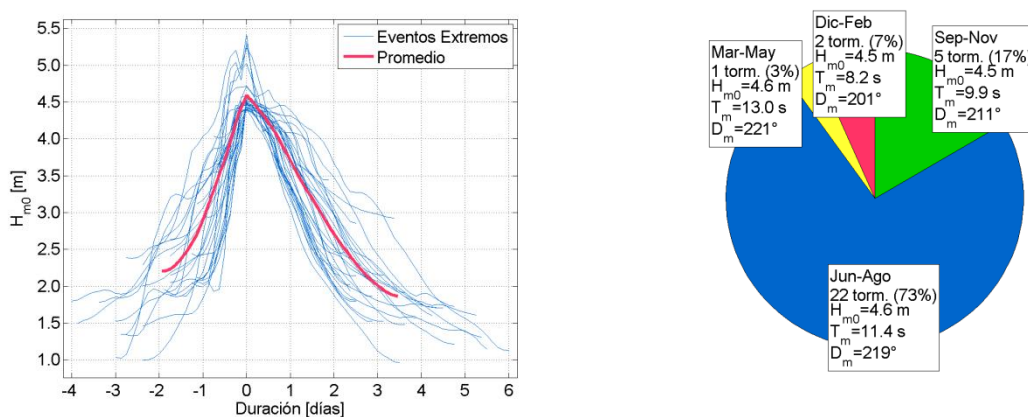


Figura C.4: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Taltal

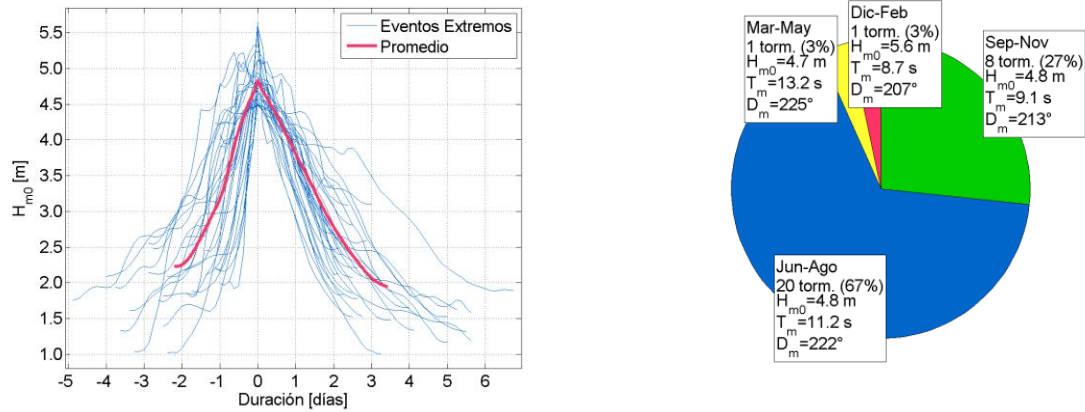


Figura C.5: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de B. Inglesa

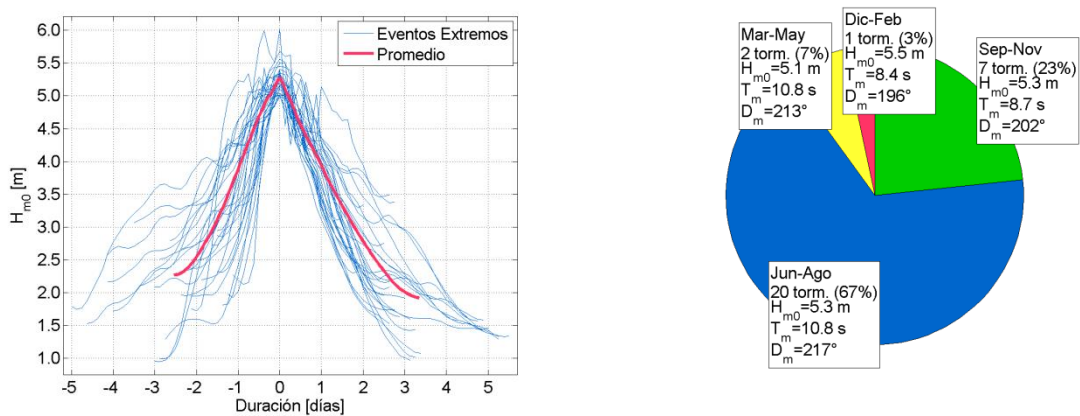


Figura C.6: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Huasco

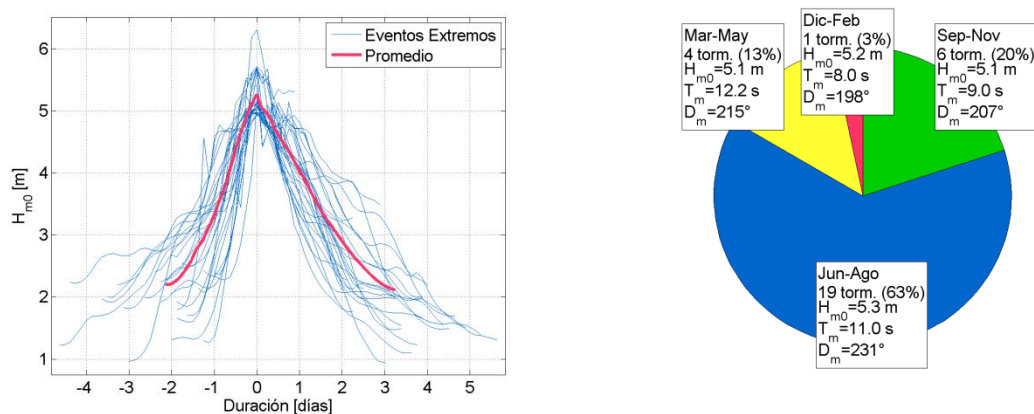


Figura C.7: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Tongoy

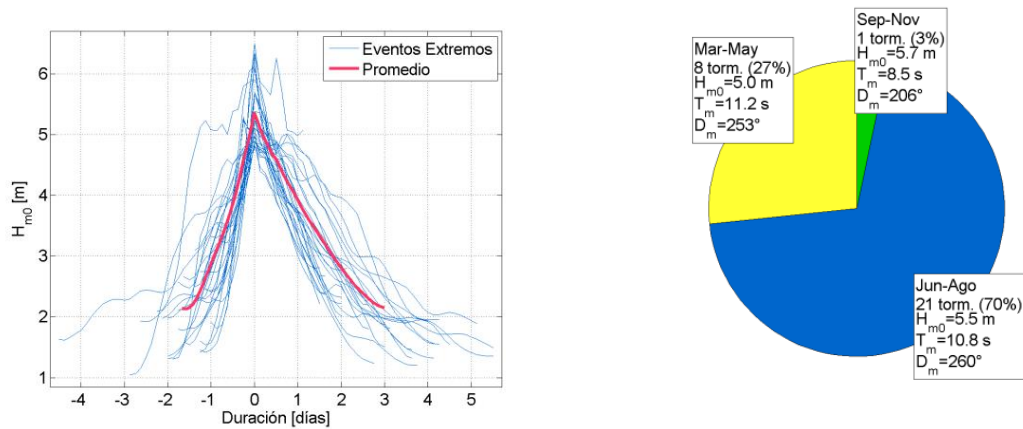


Figura C.8: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Valparaíso

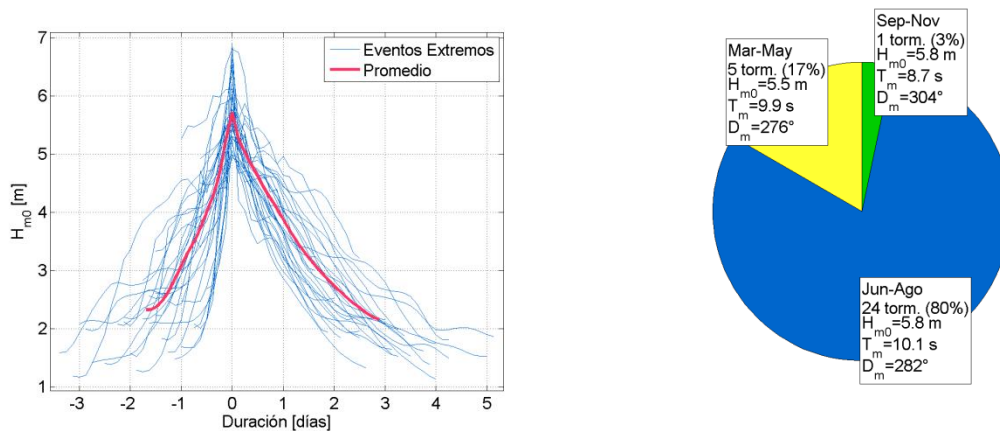


Figura C.9: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Constitución

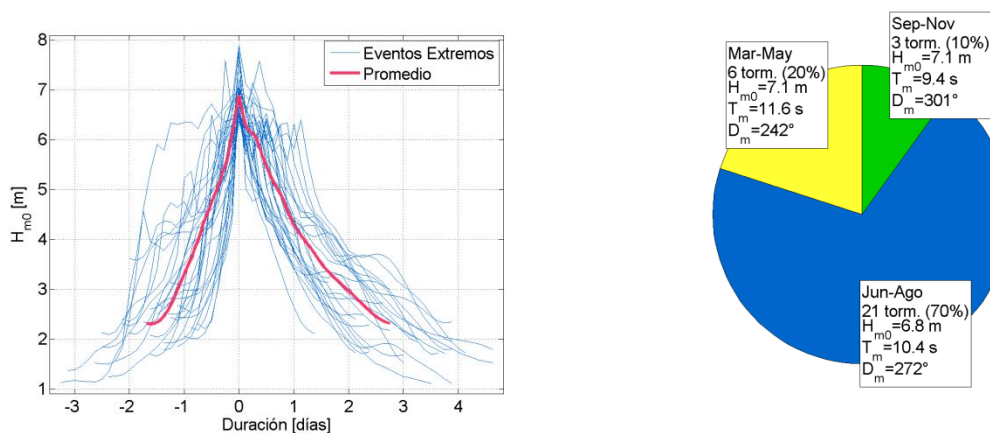


Figura C.10: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Talcahuano

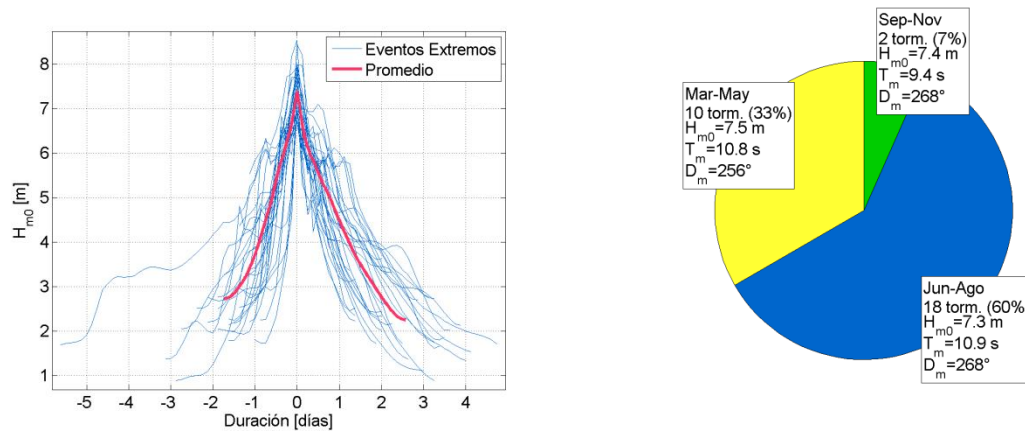


Figura C.11: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Puerto Saavedra

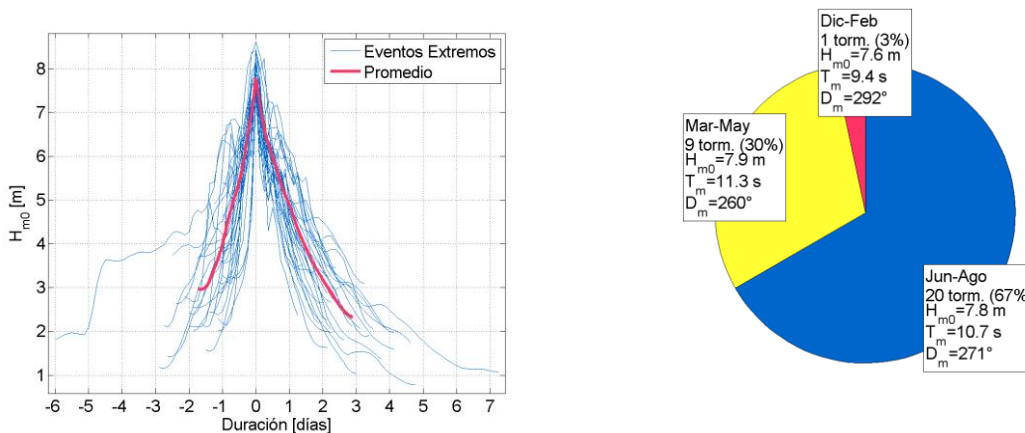


Figura C.12: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de B. Mansa

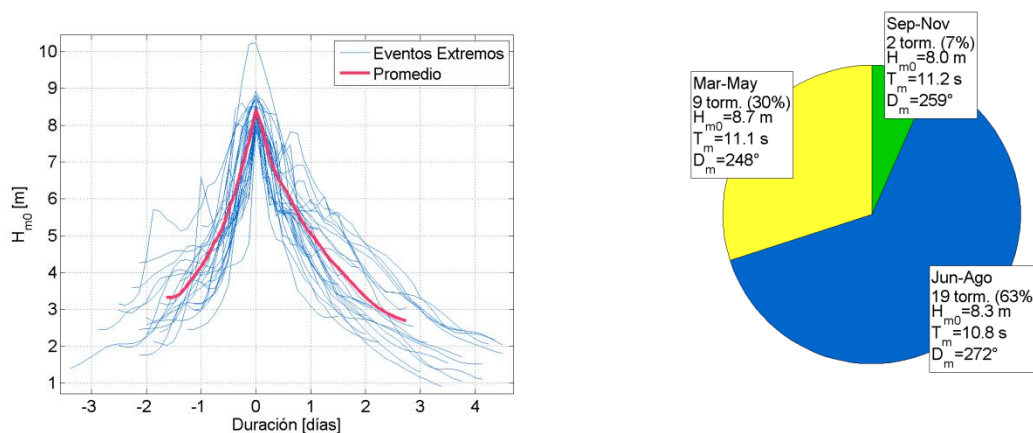


Figura C.13: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Chiloé

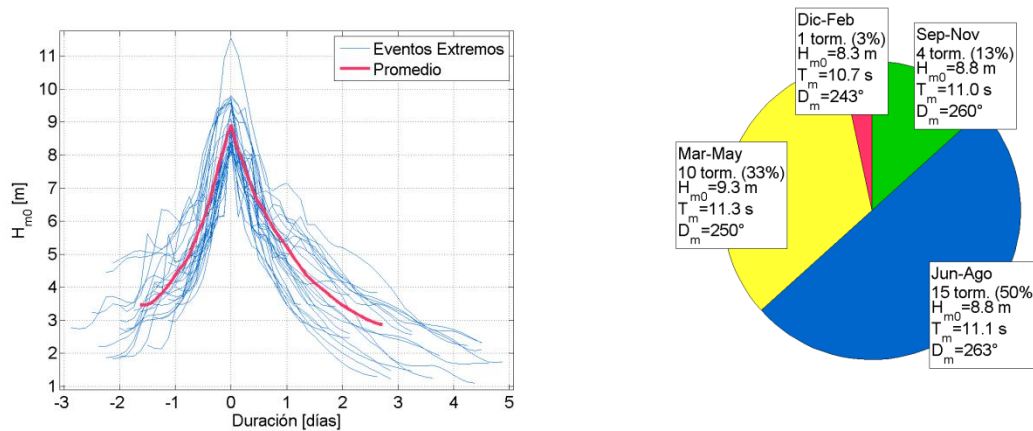


Figura C.14: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Archipiélago de Los Chonos

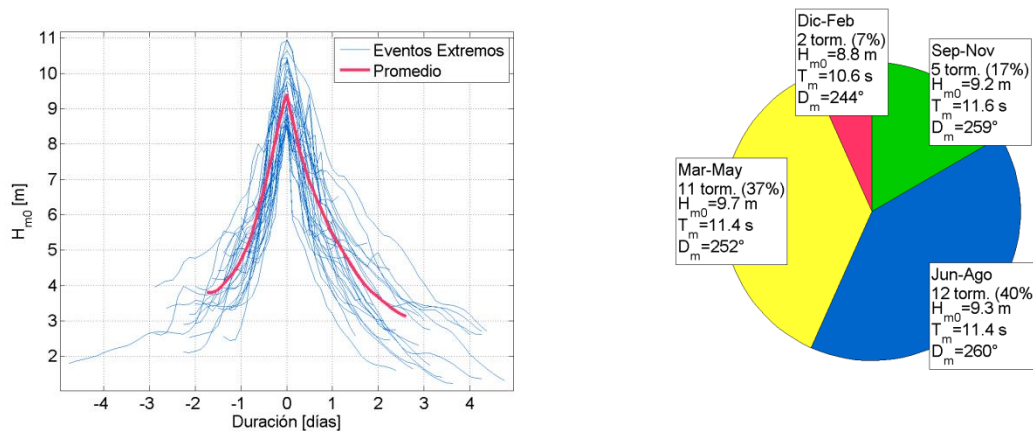


Figura C.15: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Golfo de Penas

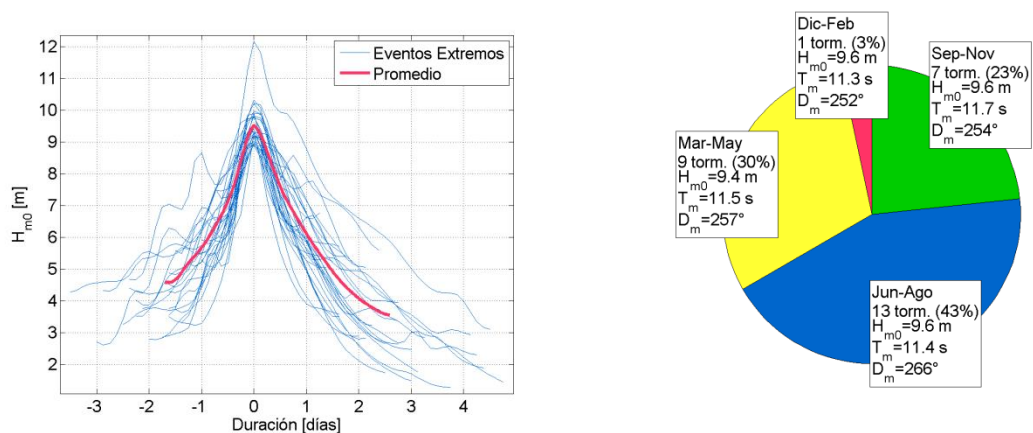


Figura C.16: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Isla Esmeralda

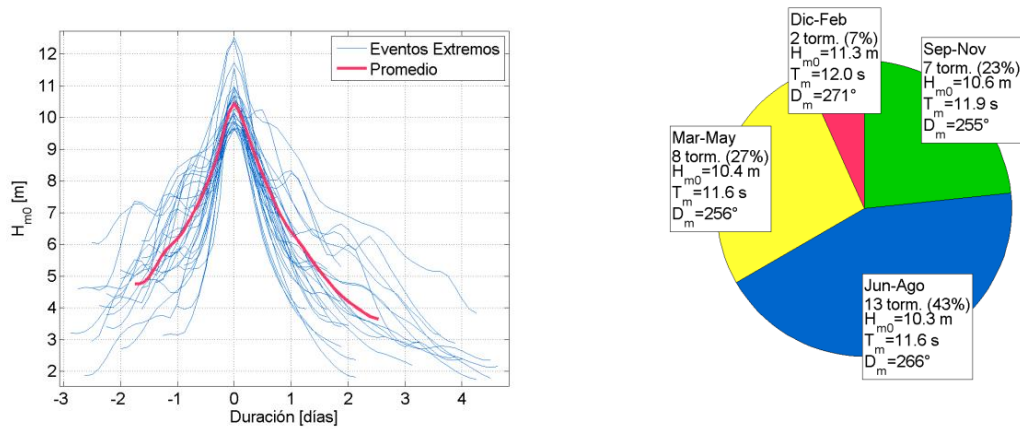


Figura C.17: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de I. Almagro

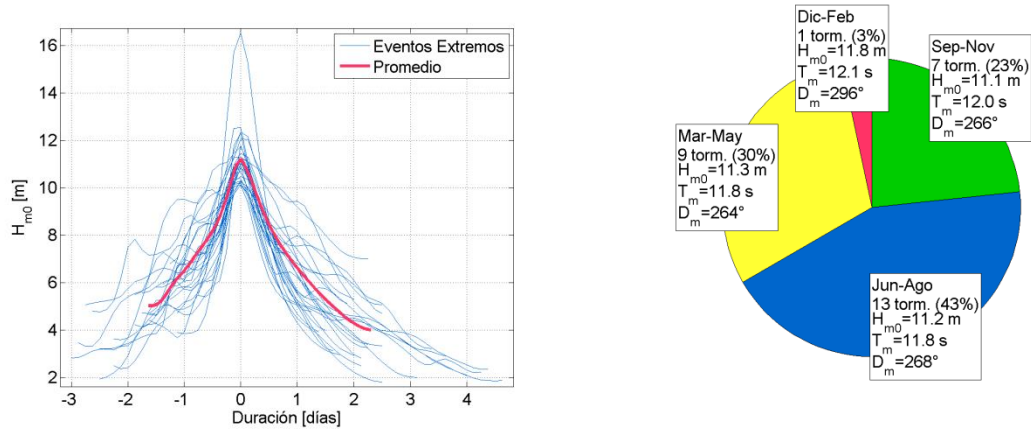


Figura C.18: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Isla Contreras

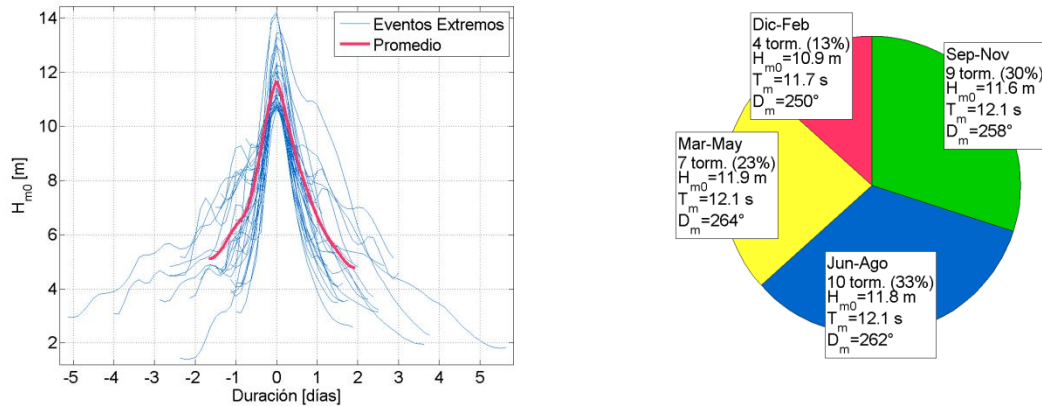


Figura C.19: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Isla London

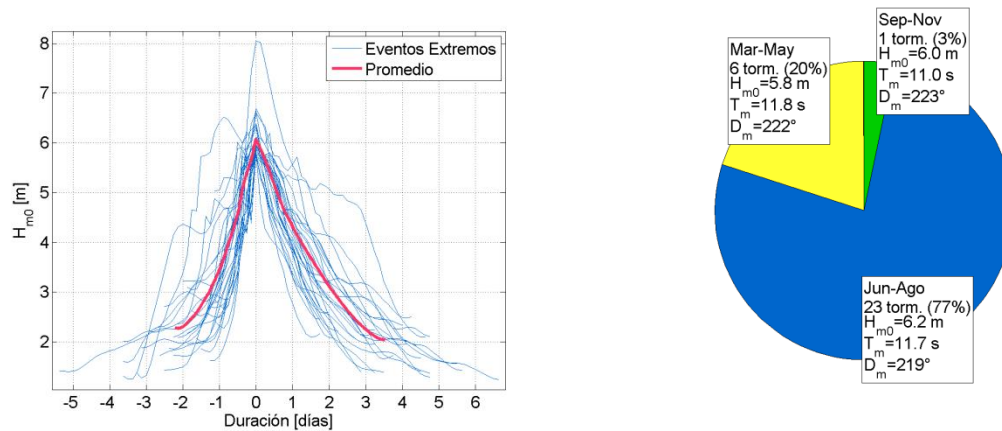


Figura C.20: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Islas Desventuradas

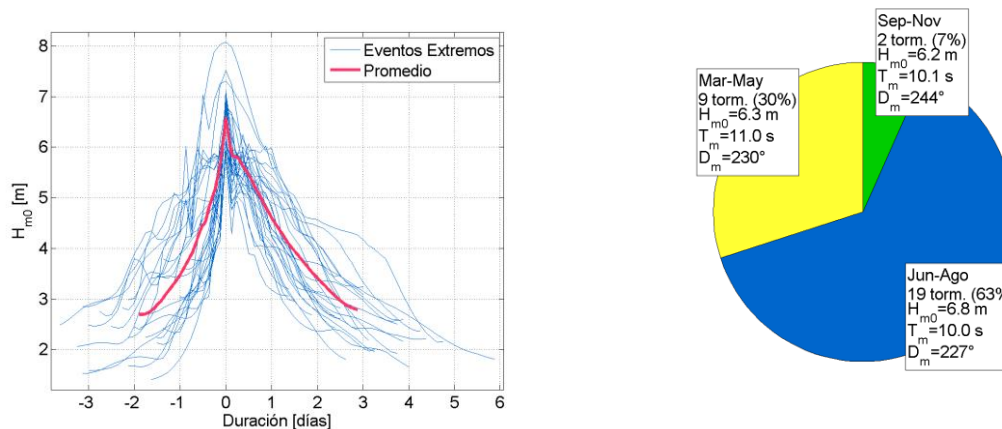


Figura C.21: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de I. Pascua

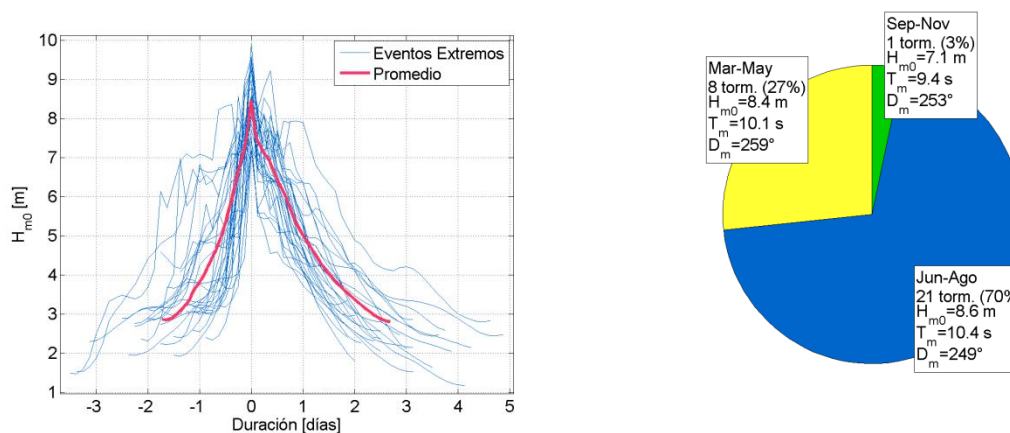


Figura C.22: Series de tiempo de las tormentas; incluye la serie promedio (izq.) y gráfico de distribución de tormentas por estación; incluye parámetros promedio (der.) para el nodo de Archipiélago Juan Fernández

Las series de tiempo muestran gran variabilidad para un mismo nodo, aunque las series promedio son relativamente similares entre los distintos nodos. Estas presentan una cola inferior (antes del valor pico) cercana a los 2 días de duración y una cola superior (después del valor pico) cercana a los 3 días.

La mayor incidencia de los eventos extremos más significativos es durante los meses de invierno, con valores que varían entre 73% para el nodo del extremo norte y 43% para el nodo austral, donde también existe un porcentaje importante de marejadas en otoño (27%) y primavera (23%).

A continuación, y a modo de comparación, se presenta un gráfico con los valores promedio, mínimos y máximos de duración de las tormentas seleccionadas para cada nodo.

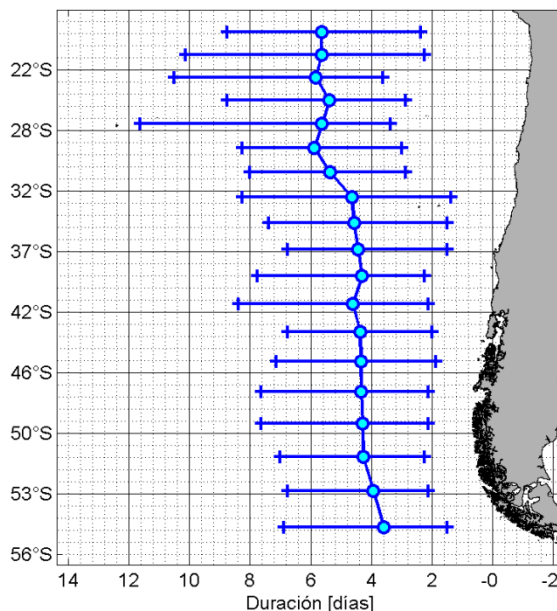


Figura C.23: Valores promedio, mínimos y máximos de duración de las tormentas

La caracterización de estos eventos muestra que las duraciones promedio van de los 5.9 días (zona norte) a los 3.6 días (zona austral). En Chile central la duración media es de 4.5 días.