

2020-11

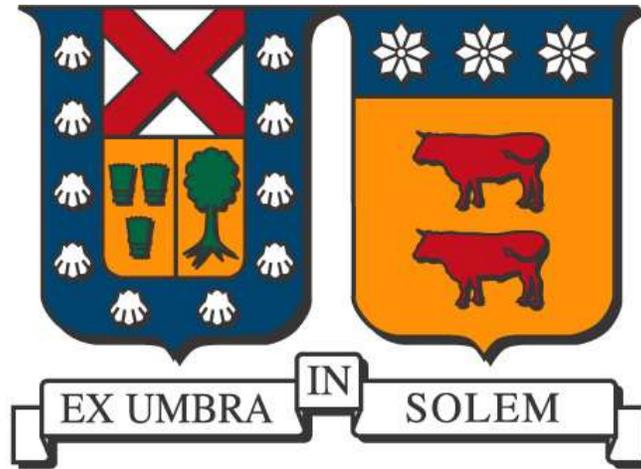
ESTUDIO NUMÉRICO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DEL POTENCIAL ENERGÉTICO UNDIMOTRIZ EN LAS ZONAS COSTERAS

HUERTA QUIAN, MANUEL ANTONIO

<https://hdl.handle.net/11673/52828>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO - CHILE



**“ESTUDIO NUMÉRICO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y
TEMPORAL DEL POTENCIAL ENERGÉTICO UNDIMOTRIZ
EN LAS ZONAS COSTERAS”**

MANUEL ANTONIO HUERTA QUIAN

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL AMBIENTAL**

**PROFESOR GUÍA: LUIS BORZONE
PROFESOR CORREFERENTE: HENRIK HANSEN**

NOVIEMBRE, 2020.



AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está dedicado a todo aquel que se cruzó en mi camino para guiarme, acompañarme, retarme e impulsarme a seguir dando lo mejor de mí. En especial, me gustaría agradecer a DFM Consultores Ambientales por introducirme e impulsarme al mundo de la modelación ambiental, al profesor Luis Borzone y al profesor Henrik Hansen por apoyarme en este proceso y permitirme realizar este trabajo de una manera autónoma, ya que fue un gran desafío. También me gustaría agradecer el apoyo de los profesores Camila Mery y Patricio Reveco quienes en el paso del tiempo y mientras fui ayudante de cada uno de ellos en sus respectivas asignaturas, se convirtieron en amigos que me guiaron y apoyaron.

Por otro lado, me gustaría agradecer a mis amistades con quienes forjamos profundos lazos que se perpetuaran en un futuro, pues en estos años fueron personas muy especiales que me enseñaron a aceptarme y mejorar como persona. En especial, me gustaría agradecer el apañe del Ale, la Nati, la Mako, la Cona y la Pabli, quienes son parte de mi grupo más cercano de amigos, los famosos party hard/fake/viejos (ya no se en que vamos), añoro las fiestas, las oncesitas, la salida a bullileo con lo mínimo que se podía esperar, cumpleaños, sushi, handrolls, su melvin, ver partidos de futbol que terminaron en carretes, entre tantas cosas más que realizamos y que nos quedan por realizar. También agradezco el apañe de la Danica, la Fofi, la Pame, la Conita, la Soa Claudia, la Soa Cata Vegan, la mami Clau, la Vale, la Rosa, el Leo Moreno, la Dani Salinas, el Pancho, el Diego Pavez y su familia, la Dani Jerez, la Javi Cisternas, el Bruno, el Nacho y el Nico de la pensión, la Cata Viajera, el Nico Aguayo, la Georgia, la Valeska, entre tantos más que llegaron en el monto justo y les guardo un especial lugar en mi corazón. De esta misma manera, me gustaría agradecer a mis flatmates, mis marujas y amigos del intercambio que hice en Coimbra y en los viajes que hice por ahí, gracias por iluminarme y sacarme de ese camino del solo estudiar, y no resguardar lo valioso que es la salud mental de uno. Añoro los botellones, sus salidas al what's up, el hiking donde conocí a las marujas, las cenas internacionales y los carretes que se armaban (o que armaba hahaha) en el departamento, y que me hicieron sentir en casa a tantos kilómetros de mi país.

Finalmente, me gustaría agradecer a mi familia, tías, tíos, abuelos y en especial a mi mamá, quienes me apoyaron desde el día 1 que decidí estudiar en la universidad y en cada una de las decisiones que tome a lo largo de esta travesía y en lo que me espera después de culminada la universidad, todas las veces que fueron a buscarme y a dejarme a Valparaíso, apoyarme en mi sueño de irme de intercambio y darme el soporte para sobrellevar las diferentes emociones que significa vivir a tantos kilómetros, ya sea viviendo fuera de Chile o en el mismo Valparaíso.

Todo esto se puede reducir a una simple frase que aprendí en mi travesía portuguesa: “*Aprende-se a dizer saudade*”, porque la saudade es esta mágica nostalgia por situaciones, por personas, por vivencias, por lugares, por recuerdos, que solo se aprende a vivir entre aquellos que te rodean y apoyan a seguir adelante.



RESUMEN EJECUTIVO

Frente a las necesidades energéticas por una producción más limpia y así mitigar problemas medioambientales y hacer frente al cambio climático, se hace necesario desarrollar y validar una herramienta numérica para la evaluación del potencial undimotriz, y su aplicación al estudio de la variabilidad espacial y temporal de este recurso en las costas de la región de Valparaíso, esto a través del modelo de Tercera Generación SWAN (Simulating WAVes Nearshore), desarrollado por la Universidad Técnica de Delft para uso en aguas someras, consideran un intervalo de 10 años desde el año 2009 a 2018, para generar información climatológica del oleaje para todos los estados de mar.

Primeramente, se presenta todo lo necesario para comprender la mecánica del oleaje, partiendo por la explicación de la propagación oceánica y costera, características del oleaje en Chile, revisión de teorías de propagación, seleccionándose la teoría lineal por su sencillez y fácil uso, además de cumplirse los supuestos. También se incluye métodos de representación estadísticos y espectrales, formas de transmisión del oleaje y en especial como es SWAN. En segundo lugar, se presenta la metodología a seguir, definiendo un área de interés entre las latitudes $32,5^{\circ}S$ a $33,5^{\circ}S$ y las longitudes $71,40^{\circ}W$ a $72,50^{\circ}W$ para una primera propagación del oleaje, y una subgrilla definida entre las latitudes $32,75^{\circ}S$ a $33,25^{\circ}S$ y las longitudes $71,40^{\circ}W$ a $72,00^{\circ}W$, además de incluir proceso de recopilación de datos, batimetría usada, establecer la posición de las 4 bahías de la zona (Quintero, Concón, Valparaíso y Laguna Verde), definir las variables a ingresar en el modelo, formas de ejecución y tratamiento de los parámetros obtenidos del modelo, para obtener el potencial energético undimotriz. En tercer lugar, se presentan los resultados obtenidos estructurados en tres secciones: validación de datos, caracterización climatológica y variabilidad del potencial energético undimotriz.

La primera etapa de validación de los datos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) se usó el nodo de Valparaíso del “Atlas del oleaje” desarrollado por la Universidad de Valparaíso (UV). Tiene una correlación de Pearson de 92,3% y 90,6%, un coeficiente de determinación de 85,1% y 82,0% para la altura significativa y la energía de las olas, respectivamente, con un índice de dispersión de menos del 50% del promedio para cada parámetro. En una segunda etapa de validación para los datos del modelo SWAN se usó los datos de la boya TRIAXYS en Curaumilla del proyecto “Catastro del Recurso Energético Asociado a Oleaje para el Apoyo a la Evaluación de Proyectos de Generación de Energía Undimotriz” disponibles en el Instituto Nacional de Hidráulica (INH), con una correlación de Pearson de 92,3% y 90,6%, un coeficiente de determinación de 85,1% y 82,0% para la altura significativa y la energía de las olas, respectivamente, con un índice de dispersión de menos del 50% del promedio de cada parámetro.

La caracterización climatológica del oleaje presenta una altura significativa de $2,37 \pm 0,77$ [m], un periodo peak de $13,26 \pm 2,21$ [s] y una dirección $240,22 \pm 19,52$ [°], mientras que el potencial energético undimotriz presenta valores de $35,56 \pm 25,89$ [kW/m]. Las variaciones en estos parámetros son debido al acercamiento del oleaje cuando este se acerca al borde costero, dado que la geomorfología costera de la región de Valparaíso presenta una composición mixta entre playas arenosas y acantilados, donde la incidencia del oleaje en los límites que conforma una bahías, presencia un cese lateral de la energía del oleaje (conocido como difracción), produciendo una menor altura significativa, un periodo peak mayor, una redirección en la dirección del oleaje, produciendo que este varíe de una dirección predominante SW a W y en consecuencia, un potencial energético undimotriz menor. Además, el efecto de refracción contribuye al cambio de dirección, debido a la batimetría misma de la zona.

Por otro lado, temporalmente las bahías presentan una alta variabilidad respecto a otros sitios, con valores superiores a 40% para los índices de variabilidad anual, mensual y estacional, donde otros sectores del borde costero presentan valores cercanos a 10%, a su vez, el coeficiente de variación para las bahías presenta valores superiores a 100%, determinando que estos sectores no son idóneos para la incorporación de un proyecto de energía undimotriz. Para finalizar, se determina la producción media anual de energía (MAEP) de un convertidor de energía del oleaje, mostrando valores entre $311,71 \pm 226,97$ [MWh/m/año], siendo más alto en sitios más estables, es decir, presentan una menor variabilidad y más atractivos para proyectos de energía undimotriz.

Finalmente, se sugiere el uso de esta herramienta numérica para otras zonas del país, como las Norte Grande, Norte Chico, Zona Central Zona Sur y Zona Austral, a través de un sistema que incluya modelos de propagación oceánica y costera, dado que parámetros como el periodo peak y la dirección del oleaje presentan ciertos errores desde las variables del NOAA, reflejado en el coeficiente de correlación de pearson y el coeficiente de determinación de las variables. También se sugiere incluir el uso de información satelital de la serie Sentinel y GOES-R a este tipo de estudios.

Palabras claves: — Modelación Costera, Energía del oleaje, Propagación del oleaje, Modelamiento Numérico, SWAN, ERNC, Valparaíso.



ABSTRACT

For cleaner energy production to mitigate environmental problems and tackle climate change, it's necessary to develop and validate a numerical tool for the evaluation of wave potential and the applications in the spatial and temporal variability on the coasts of the Valparaíso region. The model to be used is the Third Generation SWAN model, developed by TU Delft for use in shallow waters for use in shallow waters for a 10-year time window corresponding to the years 2009 to 2018.

Firstly, this study includes everything necessary is presented to understand the mechanics of the wave, from oceanic to coastal propagation, characteristics of the wave climate in Chile, a review of theories of wave propagation, selecting the linear one for its simplicity and easy use, as well as fulfilling the assumptions of this one. It also includes statistical and spectral representation methods, wave transmission forms and especially how SWAN is.

Secondly, the interest grid is defined between latitudes $32,5^{\circ}S$ to $33,5^{\circ}S$ and longitudes $71,40^{\circ}W$ to $72,50^{\circ}W$ for a first generation and a second generation with a subgrid defined between $32,75^{\circ}S$ to $33,25^{\circ}S$ and the longitudes $71,40^{\circ}W$ to $72,00^{\circ}W$. In addition to including the process of data collection, bathymetry used, establishing the position of the 4 bays in the area (Quintero, Concón, Valparaíso and Laguna Verde), defining the variables to be entered into the model, forms of execution and treatment of the parameters obtained from the model, in order to obtain the wave energy potential.

Thirdly, the results obtained are presented, structured in three sections: data validation, climatological characterization and variability of the wave energy potential.

The first stage of validation for the data of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) was used the Valparaíso node of the "Atlas del oleaje" developed by the University of Valparaíso (UV). This relationship between NOAA-UV has a pearson correlation coefficient of 92,3% and 90,6%, a determination coefficient of 85,1% and 82,0% for significant height and wave energy, respectively with a scatter index of less than 50% of the average for each parameter. In a second stage of validation for the data from SWAN model was used data from the TRIAXYS buoy in Curaumilla from the project "Catastro del Recurso Energético Asociado a Oleaje para el Apoyo a la Evaluación de Proyectos de Generación de Energía Undimotriz" available at the National Institute of Hydraulics of Chile (INH). This relationship has a pearson correlation coefficient of 92,3% and 90,6%, a determination coefficient of 85,1% and 82,0% for significant height and wave energy, respectively with a scatter index of less than 50% of the average of each parameter.

The ocean waves presents a climate characterized by a significant height of $2,37 \pm 0,77$ [m], a peak period of $13,26 \pm 2,21$ [s], a mean direction of $240,22 \pm 19,52$ [°] and wave energy of $35,56 \pm 25,89$ [kW/m]. The variations in these parameters are due to the approach of the waves when they approach the shoreline, given that the coastal geomorphology of the region of Valparaiso presents a mixed composition between sandy beaches and cliffs, where the incidence of the waves in the limits that form a bay produce a lateral cessation of wave energy (known as diffraction), generating a lower significant height, a longer peak period, a redirection in the mean direction of the wave, with variations from a SW to W direction and consequently, a lower wave energy. Also the effect of refraction contributes to the change of direction, due to the very bathymetry of the area.

Temporarily, the bays present a high variability with respect to other sites with values above 40% for the annual, monthly and seasonal variability indexes, where other sectors of the coastal area register values close to 10%-20%, in turn, the coefficient of variation for the bays presents values above 100%, determining that these sectors are not suitable for the incorporation of a wave energy project. Finally, the mean annual energy production (MAEP) of a wave energy converter is determined, registering values between $311,71 \pm 226,97$ [MWh/m/year], being higher in more stable sites, that is to say, they present a lower variability and are more attractive for wave energy projects.

Finally, the use of this numerical tool is suggested for other areas of the country, such as macroclimate zones, through a system that includes ocean and coastal propagation models, given that parameters such as the peak period and mean wave direction present certain errors from the NOAA variables, reflected in the pearson correlation and determination coefficient of these variables. It is also suggested to include the use of satellite information from the Sentinel and GOES-R series to this type of studies.

Keywords: - Coastal Modeling, Wave Energy, Wave Propagation, Numerical Modeling, SWAN, ERNC, Valparaiso



LISTADO DE SÍMBOLOS

- **AV**: Índice de variación anual.
- **c**: Celeridad.
- **C_g**: Celeridad de grupo.
- **COV**: Coeficiente de variación.
- **d**: Profundidad.
- **D_m**: Dirección promedio del oleaje en relación al periodo peak (también es puesto como Dir.)
- **D_p**: Dirección peak del oleaje.
- **D_{pk}**: Dirección peak espectral del oleaje.
- **E**: Energía de la onda.
- **f**: Frecuencia del oleaje.
- **f_p**: Frecuencia peak del oleaje.
- **g**: Aceleración de gravedad.
- **G(f|θ)**: Espectro de la dirección.
- **H**: Altura del oleaje.
- **H_{m0}**: Altura significativa espectral.
- **H_{rms}**: Altura de la ola media cuadrática.
- **H_s**: Altura significativa del oleaje.
- **k**: número de onda.
- **L**: Largo de la onda.
- **n**: Factor de ajuste para celeridad de grupo.
- **m_m**: Momento de orden n.
- **MAEP**: Promedio anual de producción de energía total.
- **MV**: Índice de variación mensual.
- **P**: Potencial energético undimotriz.
- **r**: Coeficiente de correlación lineal.
- **R²**: Coeficiente de determinación.
- **RMSE**: Raíz de la suma de los errores al cuadrado.
- **s_{xy}**: Covarianza de x e y.
- **S(f)**: Espectro de la frecuencia.
- **S(f, θ)**: Espectro bidimensional frecuencia-dirección.
- **SI**: Scatter index o índice de dispersión.
- **SV**: Índice de variación estacional.
- **T**: Periodo del oleaje.
- **T_{0,1}**: Periodo medio espectral a partir de los momentos de orden 0 y 1.
- **T̄**: Periodo medio del oleaje. Equivalente a T_{0,1}.
- **T_p**: Periodo peak del oleaje.
- **ξ**: Peralte o steepness ratio.
- **μ**: Profundidad relativa del oleaje.
- **φ**: Función de velocidad potencial
- **ω**: frecuencia angular.



GLOSARIO

- **Aguas profundas:** Los que los efectos del fondo marino son despreciables en la propagación del oleaje. Convencionalmente se acepta que esto ocurre cuando la profundidad es mayor a la mitad de la longitud de la ola.
- **Aguas intermedias:** Entre aguas profundas y someras, la forma del fondo marino influye en la propagación del oleaje.
- **Aguas someras:** La forma del fondo marino es determinante en la propagación del oleaje, pues las velocidades orbitales de las olas son prácticamente horizontales y la velocidad de propagación de la ola se independiza de la frecuencia y solo varía con la profundidad, alcanzando menores valores que en aguas profundas.
- **Altura (H):** Diferencia entre una cresta y un valle, se define como $H=2a$.
- **Amplitud:** Magnitud del desplazamiento máximo desde el nivel medio del mar.
- **Clima extremo:** Comportamiento estadístico de largo plazo para valores más altos.
- **Clima medio:** Comportamiento estadístico de largo plazo para valores medios.
- **Espectro del oleaje:** Representación matemática de la energía del oleaje, de manera unidimensional (frecuencia o dirección) o bidimensional.
- **Estado de mar:** Condición de oleaje en el mar que se considera estadísticamente estacionaria, aceptándose convencionalmente un intervalo de 3 [h]. Considera como supuesto que presentan una baja variación a esa hora.
- **Fetch:** Distancia horizontal donde el viento actúa sobre la superficie del agua generando el oleaje.
- **Frecuencia (f):** Número de crestas que pasa por un punto en un segundo, usualmente se define a esta como $f=1/T$.
- **GEBCO:** General Bathymetric Chart of the Oceans.
- **JONSWAP:** Joint North Sea Wave Project.
- **Largo de la onda (L):** Distancia horizontal entre dos crestas sucesivas.
- **NCEP:** National Centers for Environmental Prediction.
- **NOAA:** National Oceanic and Atmospheric Administration.
- **Nodo:** Punto geográfico usado como forzante del modelo, donde se obtiene los parámetros espectrales, y que coincide con la malla computacional del modelo NWW3.
- **NWW3:** NOAA WAVEWATCH III.
- **SEA:** Mar de viento.
- **SHOA:** Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.
- **Surazo:** Viento sur provocado por un chorro atmosférico costero de baja altura de carácter sinóptico que ocurre entre las latitudes $40^{\circ}S$ y $26^{\circ}S$ de mayor frecuencia e intensidad durante la primavera y el verano.
- **SWAN:** Simulating WAVes Nearshore.
- **SWASH:** Simulating WAVes till SHore.
- **SWELL:** Mar de fondo.
- **Periodo (T):** Intervalo de tiempo por el que dos crestas pasan por el mismo punto.
- **UNESCO:** United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- **USACE:** U.S. Army Corps of Engineers.
- **Veril:** Representa la línea a una misma profundidad en el océano.
- **WAM:** Wind wave model.



TABLA DE CONTENIDOS

1. Introducción	14
1.1. Descripción del problema	14
1.2. Objetivos	15
1.2.1. Objetivo General.	15
1.2.2. Objetivo Específico.	15
2. Marco Teórico	16
2.1. Introducción a la mecánica del oleaje.	16
2.1.1. Propagación Oceánica.	16
2.1.2. Propagación Costera.	19
2.1.3. Caracterización del clima del oleaje en Chile.	21
2.2. Teorías de propagación del oleaje.	22
2.2.1. Teoría lineal.	22
2.3. Metodologías de representación del oleaje.	25
2.3.1. Análisis estadístico.	25
2.3.2. Análisis espectral.	28
2.4. Transferencia del oleaje	30
2.4.1. Modelos de propagación.	31
2.4.2. SWAN	33
3. Metodología	36
3.1. Área de interés y base de datos disponible.	36
3.2. Transferencia del oleaje.	39
3.2.1. Primera propagación.	39
3.2.2. Segunda propagación.	41
3.2.3. Programación Asociada	42
3.3. Procesamiento y visualización.	43
3.3.1. Simbología de caracterización del oleaje.	44
4. Resultados	45
4.1. Validación de los datos.	45
4.1.1. NOAA.	45
4.1.2. SWAN.	48
4.2. Caracterización climatológica del oleaje	50
4.2.1. Área de interés.	50
4.2.2. Latitudinal y longitudinal.	52
4.2.3. Puntual.	55
4.3. Variabilidad del potencial energético undimotriz.	61



4.3.1. Área de interés.	61
4.3.2. Latitudinal y longitudinal.	63
4.3.3. Puntos a evaluar.	65
4.3.4. Variación temporal para la potencia energética.	66
4.3.5. Energía total disponible.	70
5. Conclusiones.	73
5.1. Recomendaciones.	78
6. Anexos	83
6.1. Anexos Metodología	83
6.1.1. Paquete pygrib.	83
6.1.2. Escritura archivos swn	83
6.2. Anexos Resultados	86
6.2.1. Validación de los datos: NOAA vs UV.	86
6.2.2. Validación de los datos: INH vs SWAN.	87
6.2.3. Caracterización climatológica del oleaje.	88
6.2.4. Variabilidad del potencial energético undimotriz.	108

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Resumen clasificación de ondas según su periodo.	19
3.1. Localización forzante de entrada.	38
3.2. Tiempos de modelación.	43
3.3. Siglas para cada veril.	44
3.4. Siglas para cada veril.	44
4.1. Resumen estadístico validación datos NOAA con Atlas del oleaje.	46
4.2. Resumen estadístico validación datos SWAN.	49
4.3. Resumen estadístico para la grilla.	51
4.4. Resumen estadístico de la variabilidad longitudinal en la latitud 33°S.	52
4.5. Resumen estadístico para la variación latitudinal.	53
4.6. Resumen estadístico de cada punto.	56
4.7. Resumen estadístico de la variación espacial del potencial en [kW/m] para la grilla.	61
4.8. Resumen estadístico de la variación longitudinal del potencial en [kW/m].	64
4.9. Resumen estadístico de la variación latitudinal del potencial en [kW/m].	64
4.10. Resumen estadístico de la variación en cada punto del potencial en [kW/m].	65
4.11. Índices de variabilidad para el potencial energético undimotriz en cada punto.	66
4.12. Resumen estadístico energía anual disponible en [MWh/m/año] para la grilla.	70



6.1. Tabla de rosa del oleaje para la altura significativa para punto P050.	88
6.2. Tabla de rosa del oleaje para la altura significativa para punto P100.	88
6.3. Tabla de rosa del oleaje para la altura significativa para punto P150.	88
6.4. Tabla de rosa del oleaje para la altura significativa para punto P200.	89
6.5. Tabla de rosa para el periodo peak del oleaje para punto P050.	89
6.6. Tabla de rosa para el periodo peak del oleaje para punto P100.	89
6.7. Tabla de rosa para el periodo peak del oleaje para punto P150.	89
6.8. Tabla de rosa para el periodo peak del oleaje para punto P200.	90
6.9. Resumen estadístico para la longitud de onda.	96
6.10. Resumen estadístico para la profundidad relativa.	100
6.11. Resumen estadístico para el peralte a nivel latitudinal y puntual.	104
6.12. Variabilidad anual para el potencial energético undimotriz para el veril 50.	108
6.13. Variabilidad anual para el potencial energético undimotriz para el veril 100.	108
6.14. Variabilidad anual para el potencial energético undimotriz para el veril 150.	108
6.15. Variabilidad anual para el potencial energético undimotriz para el veril 200.	108
6.16. Variabilidad mensual para el potencial energético undimotriz para el punto P050.	109
6.17. Variabilidad mensual para el potencial energético undimotriz para el punto P100.	109
6.18. Variabilidad mensual para el potencial energético undimotriz para el punto P150.	109
6.19. Variabilidad mensual para el potencial energético undimotriz para el punto P200.	109
6.20. Variabilidad estacional para el potencial energético undimotriz para el punto P050.	110
6.21. Variabilidad estacional para el potencial energético undimotriz para el punto P100.	110
6.22. Variabilidad estacional para el potencial energético undimotriz para el punto P150.	110
6.23. Variabilidad estacional para el potencial energético undimotriz para el punto P200.	110
6.24. Tabla de rosa del oleaje para el potencial energético undimotriz para punto P050.	111
6.25. Tabla de rosa del oleaje para el potencial energético undimotriz para punto P100.	111
6.26. Tabla de rosa del oleaje para el potencial energético undimotriz para punto P150.	111
6.27. Tabla de rosa del oleaje para el potencial energético undimotriz para punto P200.	111
6.28. Tabla de MAEP para P050.	112
6.29. Tabla de MAEP para P100.	112
6.30. Tabla de MAEP para P150.	113
6.31. Tabla de MAEP para P200.	113
6.32. Tabla de frecuencia relativa para gráficos dispersión-energía en P050.	114
6.33. Tabla de frecuencia relativa para gráficos dispersión-energía en P100.	114
6.34. Tabla de frecuencia relativa para gráficos dispersión-energía en P150.	115
6.35. Tabla de frecuencia relativa para gráficos dispersión-energía en P200.	115

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Dispersión de frecuencia-dirección en el océano.	16
2.2. Generación y propagación del oleaje.	17
2.3. Clasificación de las ondas.	18
2.4. Movimiento orbital en aguas profundas, aguas intermedias y aguas someras.	19
2.5. Procesos de transformación de oleaje: A) Asomeramiento; B) Refracción y C) Difracción y Reflexión.	20
2.6. Zonas de generación del oleaje que alcanza las costas chilenas.	21
2.7. Perfil de la onda de acuerdo a las diferentes teorías.	22
2.8. Esquema del oleaje para la Teoría Lineal de onda.	23
2.9. Estructura del oleaje aleatorio.	25
2.10. Serie de tiempo para altura del oleaje y el potencial energético.	26
2.11. Esquema para un espectro de onda bidimensional.	28
2.12. Comparación de espectros.	29
2.13. Ejemplo de modelo SWAN para la Isla Robinson Crusoe, Chile.	31
2.14. Ejemplo de modelo que resuelve la fase.	32
2.15. Grilla estructurada rectilínea.	33
2.16. Grilla estructurada curvilínea (izquierda) y grilla no estructurada (derecha).	33
2.17. Triple anidación de un modelo SWAN en el mar Báltico.	34
3.1. Área de interés.	36
3.2. Batimetría del área de interés.	37
3.3. Potencial sin efecto (izquierda) y con efecto de sombreado (derecha).	38
3.4. Ejemplo de un modelo SWAN, primera propagación.	40
3.5. Ejemplo de un modelo SWAN, segunda propagación.	41
3.6. Esquema de programación asociada.	42
3.7. Esquema para obtención del potencial undimotriz.	44
4.1. Series de tiempo para los parámetros evaluados, Atlas del Oleaje.	45
4.2. Series de tiempo para los parámetros evaluados, Atlas del Oleaje.	46
4.3. Gráficos de dispersión para los parámetros principales.	47
4.4. Series de tiempo para los parámetros espectrales.	48
4.5. Series de tiempo para el potencial undimotriz.	49
4.6. Gráficos de dispersión para la Hs (izq.) y el potencial undimotriz (der.).	50
4.7. Distribución espacial para el P50 de la altura significativa.	51
4.8. Distribución espacial para el P50 del periodo peak.	52



4.9. Serie longitudinal para los parámetros principales.	53
4.10. Series latitudinales para los parámetros principales.	54
4.11. Series de tiempo para los parámetros principales, parte 1.	55
4.12. Series de tiempo para los parámetros principales, parte 2.	56
4.13. Rosas para la altura significativa y el periodo peak del oleaje.	57
4.14. Distribución espacial de la mediana del potencial energético undimotriz.	61
4.15. Distribución espacial de la mediana en cada bahía para potencial undimotriz.	62
4.16. Distribución espacial del coeficiente de variación (COV).	63
4.17. Serie longitudinal para el potencial energético undimotriz.	64
4.18. Series latitudinales para el potencial energético undimotriz.	64
4.19. Serie de tiempo para el potencial energético undimotriz.	65
4.20. Rosas para el potencial energético undimotriz.	66
4.21. Resumen de índices de variabilidad para cada punto.	66
4.22. Variación anual del potencial para los puntos de estudios.	67
4.23. Variación anual del potencial para la grilla.	67
4.24. Variación mensual del potencial para los puntos de estudios.	68
4.25. Variación mensual del potencial para la grilla.	68
4.26. Variación estacional del potencial para los puntos de estudios.	69
4.27. Variación estacional del potencial para la grilla.	69
4.28. Energía anual disponible en la grilla.	70
4.29. Diagramas de dispersión y energía para cada punto.	72
6.1. Función para ejecución de escritura.	83
6.2. Función para escritura, parte 1.	84
6.3. Función para escritura, parte 2.	85
6.4. Espectro de la frecuencia para modelo NWW3 del NOAA y Atlas de oleaje.	86
6.5. Espectro de la dirección para modelo NWW3 del NOAA y Atlas de oleaje.	86
6.6. Espectro Bidimensional para modelo NWW3 del NOAA y Atlas de oleaje.	87
6.7. Espectros para la boya y modelo SWAN.	87
6.8. Espectro Bidimensional para la boya y modelo SWAN.	88
6.9. Histograma para cada parámetro.	90
6.10. Variación temporal para la altura significativa del oleaje.	91
6.11. Variación temporal para el periodo peak del oleaje.	92
6.12. Variación temporal para el dirección peak del oleaje.	93
6.13. Distribución espacial de la mediana en cada bahía para la altura significativa.	94
6.14. Distribución espacial de la mediana en cada bahía para el periodo peak.	95
6.15. Distribución espacial de la mediana para la longitud de onda.	96
6.16. Distribución espacial de la mediana en cada bahía para la longitud de onda.	97
6.17. Serie longitudinal para la longitud de la onda.	98
6.18. Series latitudinales para la longitud de onda.	98



6.19. Series de tiempo para la profundidad relativa.	99
6.20. Histograma de la profundidad relativa.	99
6.21. Distribución espacial de la mediana para la profundidad relativa.	100
6.22. Distribución espacial de la mediana en cada bahía para la profundidad relativa.	101
6.23. Serie longitudinal para la profundidad relativa.	102
6.24. Series latitudinales para la profundidad relativa.	102
6.25. Series de tiempo para la profundidad relativa.	103
6.26. Histograma de la profundidad relativa.	103
6.27. Distribución espacial de la mediana para el peralte.	104
6.28. Distribución espacial de la mediana en cada bahía para el peralte.	105
6.29. Serie longitudinal para el peralte.	106
6.30. Series latitudinales para el peralte.	106
6.31. Series de tiempo para el peralte.	107
6.32. Histograma del peralte.	107
6.33. Histograma del potencial energético undimotriz.	116



1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presenta la descripción del problema, partiendo con un listado de todas las energías renovables junto con el principal impacto de estas. Luego se muestran las ventajas de Chile frente a la energía undimotriz y las cualidades que hacen mejor este tipo de energía frente a otras. Posteriormente, y para finalizar la descripción del problema se detalla el trabajo a realizar. Finalmente, en los objetivos se muestra el eje central y las acciones en específico que se esperan lograr en este trabajo.

1.1 Descripción del problema

Al igual que muchas otras tecnologías de energías renovables como la energía eólica, energía solar, biomasa, otras de origen del océano como la mareomotriz, gradiente térmico, gradiente salino, entre muchas otras, pues la clave del impulso de estas energías los últimos años ha sido el mitigar los actuales problemas medioambientales, como el uso prolongado de recursos no renovables como combustibles fósiles, llevarán a una incertidumbre de:

¿Cómo suplir la actual y futura demanda energética a nivel mundial?

Entonces, frente a este problema Chile es uno de los países con un enorme potencial energético asociado al oleaje. Pues, Chile posee 6.400 [km] de costa (Gobierno de Chile, 2019), en donde la potencia media undimotriz alcanza los 120 kW/m en la zona austral del país, que junto con Australia y Nueva Zelanda, es uno de los niveles más altos del mundo. En otras zonas del país, supera los 40 kW/m, un nivel que hace que este recurso sea muy competitivo dentro del mundo de las ERNC (Mørk et al., 2010). Este tipo de energía, presenta una independencia de los factores que dominan los otros tipos de energías renovables, lo cual lo hace atractivo y un buen complemento para la parrilla energética: existe oleaje día y noche (a diferencia de la energía solar), o en ausencia de viento (a diferencia de la energía eólica). Sin embargo, la tecnología undimotriz debe ser desplegada en zonas cercanas a la costa, donde la componente variacional es muy importante, producto de la batimetría local (fricción y refracción de olas), de la costa misma (reflexión, difracción, interferencia), y de la meteorología local (vientos térmicos, brisas de mar).

No obstante, a pesar de que los espectros de olas son simulados, pronosticados y validados continuamente en aguas profundas oceánicas a través del modelo WAVEWATCH III del NOAA, esta información no es aplicable en zonas costeras. Por lo tanto, los parámetros locales del oleaje deben ser evaluados utilizando modelos costeros. En este trabajo se ha considerado el modelo de Tercera Generación SWAN, desarrollado por TU Delft para uso en aguas someras.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General.

El eje central de este trabajo es el desarrollo y validación de una herramienta numérica para la evaluación del potencial undimotriz, y su aplicación al estudio de la variabilidad espacial y temporal de este recurso en las costas comprendidas entre las latitudes $32,75^{\circ}S$ a $33,25^{\circ}S$ y las longitudes $71,40^{\circ}W$ a $72,00^{\circ}W$. El modelo será utilizado además para generar información climatológica del oleaje, en una ventana de 10 años, para todos los estados de mar.

1.2.2 Objetivo Especifico.

- Recopilar y validar los parámetros de oleaje simulados por el modelo WAVEWATCH III, para ser utilizados como datos de entrada al modelo SWAN.
- Implementar y validar el modelo SWAN para la obtención de la climatología del oleaje en aguas someras de la región de Valparaíso.
- Determinar la variabilidad en el potencial energético undimotriz para la zona de estudio.

MARCO TEÓRICO

El presente capítulo está constituido por la introducción a la mecánica del oleaje (origen, formas de propagación y caracterización del oleaje en Chile), teorías de propagación (en especial la teoría lineal) y metodologías de análisis del oleaje (desde un punto de vista estadístico y espectral). Finalmente se explican las formas de transferir el oleaje, detallándose el funcionamiento del modelo SWAN.

2.1 Introducción a la mecánica del oleaje.

La combinación de diferentes fuerzas presentes en la naturaleza, dan como origen a la formación de ondas en la superficie del océano, ejemplos de estos son: la formación de mareas (las cuales presentan periodos muy altos), tsunamis (causados por movimientos tectónicos de gran envergadura, como los terremotos), entre otros. Las ondas se propagan miles de kilómetros hasta alguna costa, donde son afectas por diversos fenómenos que afectan la transferencia del oleaje, identificándose la propagación oceánica y la propagación costera (Munk, 1950).

2.1.1 Propagación Oceánica.

Esta nace en el océano, debido a la interacción entre la superficie de este y una componente externa, un ejemplo es la figura 2.1, donde una tormenta genere el oleaje en el océano Atlántico.

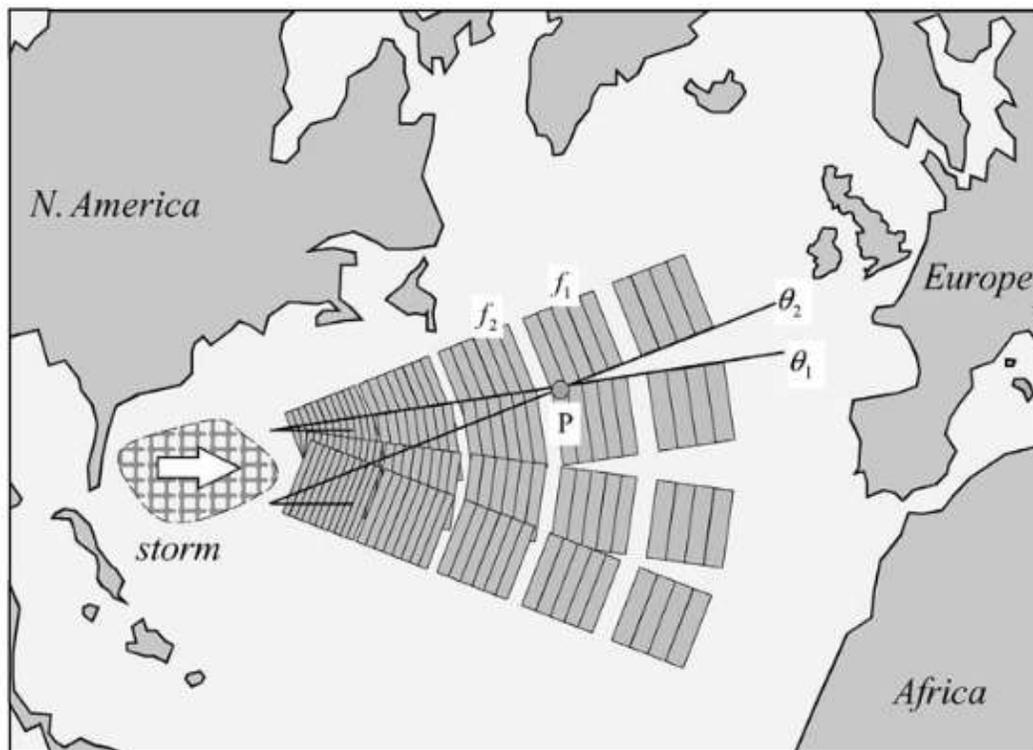


Figura 2.1: Dispersión de frecuencia-dirección en el océano.

(Fuente: Waves in oceanic and coastal waters (Holthuijsen, 2007).)

Dentro de estas componentes externas se pueden considerar el viento, una tormenta, movimientos tectónicos, entre otros. En este punto, el océano comienza a adquirir energía, el cual se propaga a una velocidad que depende de la frecuencias de las componentes que dan por origen al oleaje, como se observa en la figura 2.1, donde la dispersión del oleaje en este ejemplo es sin grandes pérdidas de energía, pero si descomponiéndose en campos de ondas más regulares, donde el oleaje de baja frecuencia avanzará primero y posteriormente el de alta frecuencia por atrás, conocido como el proceso de dispersión de frecuencias (Holthuijsen, 2007).

Mientras ocurre ese efecto, también se produce una dispersión en la dirección, es decir, cambios en la forma del oleaje, como pasar de cresta corta a cresta larga debido a que la tormenta viaja en un rango de direcciones, pero en relación al campo inicial del oleaje, esta se desintegra, como se observa en la figura 2.1. Entonces, de acuerdo con la figura 2.2, se determina que la interacción del viento con la superficie del mar genera lo que es conocido como: mar de viento y mar de fondo.

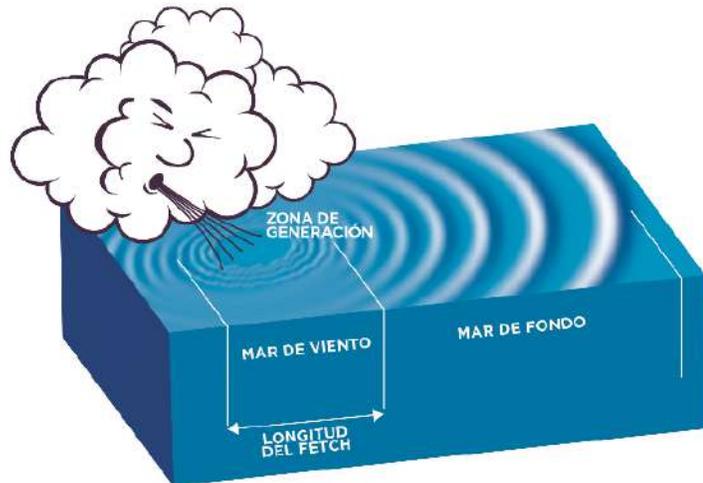


Figura 2.2: Generación y propagación del oleaje.
(Fuente: Atlas de Oleaje de Chile (Universidad de Valparaíso, 2016).)

El mar de viento es producido en un sector del océano donde el oleaje presenta frecuencia baja, ondas con una longitud definida y una gran dificultad para observar el periodo característico, traslucido en una gran irregularidad, carecer de periodicidad, presentar asimetrías en las formas de los valles, donde la amplitud es mayor a la longitud de onda (Silva, 2005).

El mar de fondo es aquel que sale del fetch, como se observa en la figura 2.2, donde este se dispersa a lo largo del océano. Este experimenta el fenómeno observado en la figura 2.1, conocido como dispersión de frecuencia-dirección, afectando en que las ondas salientes del fetch fusionan su amplitud, generando un oleaje más constante, por lo tanto, se observa una mayor regularidad, amplitudes de ondas más grandes, menor diferencia entre un oleaje y otro, periodicidad, y direcciones del oleaje más regulares (Silva, 2005).

Frente a esto, las ondas generadas tendrán diferente frecuencia y densidad de energía, por lo que el trabajo de Walter H. Munk (Munk, 1950) ha sido un gran aporte para un sinnúmero de bibliografía asociada a la oceanografía, pues como se observa en la figura 2.3, clasificó las ondas generadas en función de su periodo, además de mostrarse el cómo varía la densidad de energía disponible.

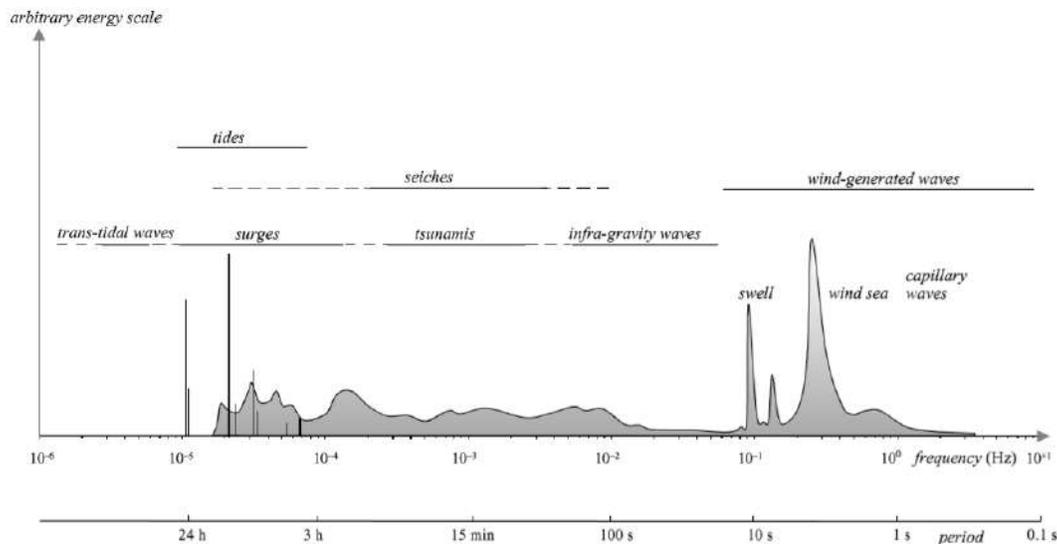


Figura 2.3: Clasificación de las ondas.

(Fuente: Waves in oceanic and coastal waters (Holthuijsen, 2007).)

Pues, como se observa en la figura 2.2 la generación parte con fluctuaciones en la presión inducen olas de alturas menores a 0,1 [m] y periodos inferiores a 0,1 [s], estas olas se llaman ondas capilares, presentando como característica ser inestables y posteriormente atenuadas cuando el viento deja de soplar, por efecto de la tensión superficial (Munk, 1950). Cuando crece la velocidad del viento, las olas adquieren energía y comienzan a crecer de tamaño, para llegar a ser ondas de ultragravedad en un principio, y posteriormente a onda de gravedad (Holthuijsen, 2007).

Las ondas de ultragravedad se caracterizan por periodos de 0,1 [s] a 1 [s], por su parte las ondas de gravedad se caracterizan por periodos de 1 [s] a 30 [s], pues a una onda capilar se le transmite energía y esta crece, hasta que la propagación de esta onda se hace sostenida y si el viento deja de soplar, las ondas siguen viajando por el océano con un mínimo de pérdidas de energía en el recorrido (Munk, 1950), esto debido a que durante un cierto lapso de tiempo y cierta distancia conocida como fetch, la acción del viento sobre la superficie del mar logra lo anterior, y aquí se considera a una onda totalmente desarrollada. Por otro lado, cuando la ola aún se encuentra en fase de crecimiento, esta se considera como una onda parcialmente desarrollada (G.I.O.C. UC, 2000).

Posteriormente, las ondas de infragravedad presentan periodos de 30 [s] a 5 [min], generadas por acción del viento y las ondas de gravedad. Luego, las ondas de periodo largo presentan periodos de 5 [min] a 12 [h], originadas por tormentas y movimientos tectónicos. Por último, las ondas de mareas ordinarias y trans presentan periodos de 12 [h] a 24 [h] (las primeras), originadas por acción del sol y la luna, mientras que las trans presentan periodos por sobre 24 [h], originadas por la acción del sol y la luna, pero se escapan de un comportamiento normal (Munk, 1950). En la tabla 2.1 se muestra un resumen de las características de las ondas según su periodo.

Tabla 2.1: Resumen clasificación de ondas según su periodo.

Nombre	Periodo (T)	Largo (L)	Altura (H)	Fuerza Generada	Fuerza Restauración
Capilares	0 a 0,1 [s]	2 a 7 [cm]	1 a 2 [mm]	Viento	Tensión superficial
Ultragravedad	0,1 a 1 [s]	Centímetros	Centímetros	Viento	Tensión superficial y gravedad
Gravedad	1 a 30 [s]	De metros a cientos de metros	De centímetros a 15 [m]	Viento	Gravedad
Infragravedad	30 [s] a 30 [min]	100 a 200 [m]	Pequeña	Viento	Gravedad, fuerza de Coriolis
Periodo Largo	5 [min] a 24 [h]	Pueden llegar a ser de escala planetaria	1 a 5 [m]	Sismos, derrumbes, atracción de cuerpos celestes	Gravedad, fuerza de Coriolis
Transmarea	>24 [h]		0 a 12 [m]	Oscilaciones climáticas	Gravedad, fuerza de Coriolis

(Fuente: Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile (Campos, 2016).)

2.1.2 Propagación Costera.

El oleaje, a medida que se acerca hacia la costa, comienza a interactuar con el fondo marino, lo que conlleva a que este experimente cambios en diversos procesos, como las variaciones en la altura de la ola y la dirección de propagación, principalmente (G.I.O.C. UC, 2000). Frente a esto, existen tres tipos de oleaje identificable, que son las aguas profundas, aguas intermedias y las aguas someras, pues en la figura 2.4 se observa como para aguas profundas (deep water) el movimiento orbital de ola es circular, mientras que a medida se avanza en dirección hacia la costa, este círculo se va transformando en una elipse, lo que al final se trasluce en cálculos más simples para aguas profundas, en relación a las aguas intermedias (intermediate depth) y aguas someras (very shallow water).

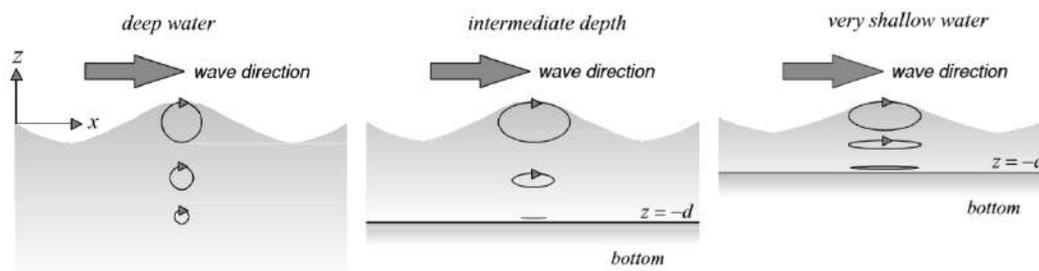


Figura 2.4: Movimiento orbital en aguas profundas, aguas intermedias y aguas someras.

(Fuente: Waves in oceanic and coastal waters (Holthuijsen, 2007).)

La profundidad relativa ($\mu = d/L$) es la relación entre la profundidad (d) y la longitud de la onda, en donde las aguas profundas presentan un valor de $\mu > 1/4$, caracterizándose por una muy baja variabilidad en el comportamiento del oleaje generado. Mientras que las aguas someras se encuentran para valores de $\mu < 1/25$, es decir, el oleaje se encuentra tan próximo a la costa hasta el punto en que esta se rompe e impacta con el borde costero. Para finalizar, las aguas intermedias se encuentran entre los valores de $1/25 < \mu < 1/4$, caracterizándose por ser el comienzo en las variaciones del comportamiento del oleaje (Holthuijsen, 2007). Gracias a estas variaciones, se pueden observar algunos de los siguientes efectos:

- **Asomeramiento:** De acuerdo con la figura 2.5, este es el efecto producido en un conjunto de ondas que se aproxima hacia la costa, donde se observa un aumento en su altura y una reducción en su longitud (G.I.O.C. UC, 2000). Este fenómeno está relacionado con la figura 2.4.
- **Refracción:** Como se observa en la figura 2.5, un conjunto de ondas va incidiendo oblicuamente sobre la costa, encuentra un cambio de profundidad, donde la onda de al frente por tener una menor celeridad, presenta un cambio de dirección.
- **Difracción:** Como se observa en la figura 2.5, este fenómeno se caracteriza por la cesión lateral de la energía a lo largo de una cresta, en consecuencia, en la dirección predominante de la propagación cuando la amplitud presenta una discontinuidad o grandes variaciones (G.I.O.C. UC, 2000). Es decir, frente a obstáculos como islas, pequeños rompeolas, barcos, entre otros obstáculos en que la energía transportada cambia su dirección, suavizando la discontinuidad entre la zona expuesta y la zona protegida.
- **Reflexión:** Como se observa en la figura 2.5, la onda a medida que se aproxima a la costa es susceptible a verse transformada por el reflejo de esta frente a estructuras naturales y artificiales. Este cambio de dirección depende de su ángulo de incidencia, aunque esta mantiene en casi su totalidad la energía (G.I.O.C. UC, 2000).

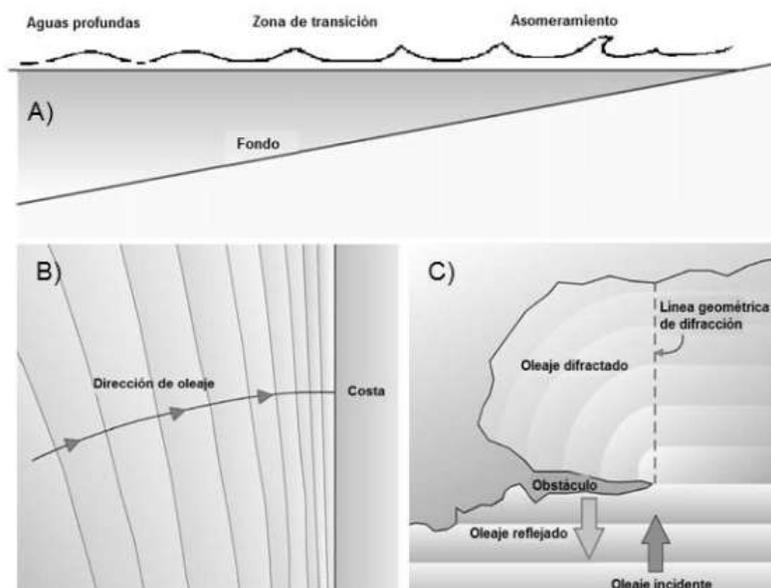


Figura 2.5: Procesos de transformación de oleaje:

A) Asomeramiento; B) Refracción y C) Difracción y Reflexión.

(Fuente: Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile (Campos, 2016).)

2.1.3 Caracterización del clima del oleaje en Chile.

De acuerdo con las instrucciones oceanografías del SHOA (SHOA, 2015) para el estudio de las olas el clima de las costas de Chile están formadas por origen local y/o remoto, como se explicó en la propagación oceánica, pues por un lado el oleaje originado por vientos locales en la zona del mar de viento, con periodos de 4 [s] a 8 [s], mientras que por otro en el mar de fondo con periodos de 10 [s] a 25 [s], los cuales son generados en diversos puntos de la cuenca del océano Pacífico. De acuerdo con el instructivo del SHOA, se reconocen tres formas de como llega el oleaje:

- Swell del Hemisferio Sur (I): Olas de gran tamaño producidas por ciclones extratropicales se propagan a la costa, con una constante disminución de su altura y aumento en su periodo, llegando a nuestras costas con mayores intensidades durante la temporada de invierno.
- Swell del Hemisferio Norte (II): Olas generadas cerca de las islas Aleutianas, pertenecientes al estado de Alaska, de EE.UU. Estas se propagan hacia el sur, llegando desde la dirección NW de las aguas profundas de nuestro país, las cuales son camufladas por las olas que se generan bajo el Swell del Hemisferio Sur.
- Ciclones Tropicales (V): Se generan en las aguas de América Central y se propagan hacia el sur, llegando a las costas del país. Se caracterizan por una baja frecuencia de ocurrencia, pero relevantes para el oleaje extremo o de diseño.

Por otro lado, el atlas de oleaje de Chile generado por la Universidad de Valparaíso junto a otras instituciones, muestra 2 formas más de generación del oleaje producido por ciclones (III) y anticiclones (IV) locales, es decir, que se forman en las cercanías de las costas chilenas. Finalmente, en la figura 2.6 se muestran las 5 zonas de generación del oleaje que alcanza las costas chilenas.

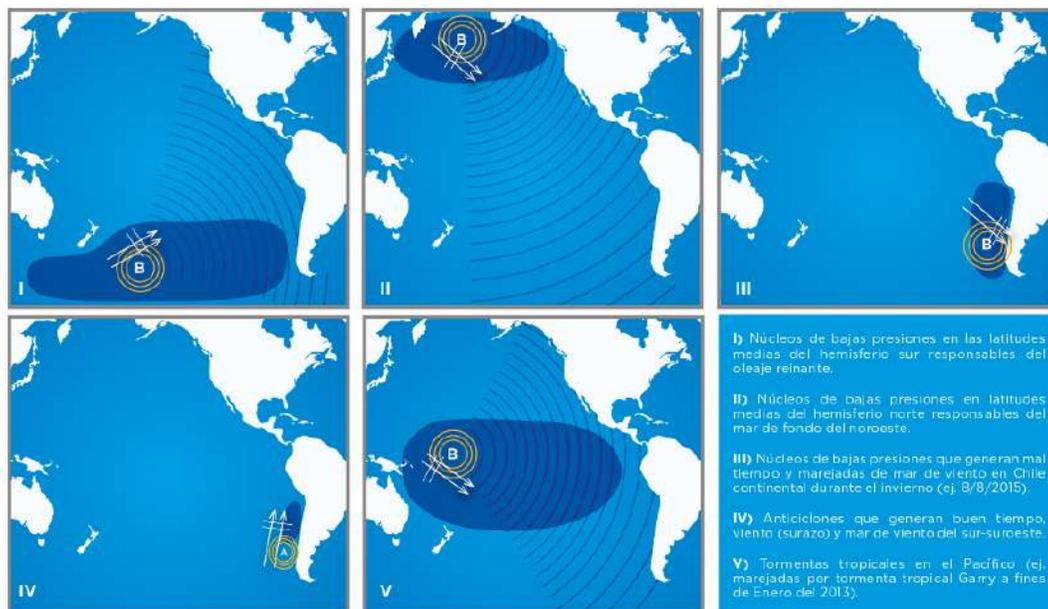


Figura 2.6: Zonas de generación del oleaje que alcanza las costas chilenas.

(Fuente: Atlas de oleaje de Chile (Universidad de Valparaíso, 2016).)

2.2 Teorías de propagación del oleaje.

Respecto a la literatura, existen varias teorías para describir la propagación de las ondas producidas en el océano, adecuándose de manera de satisfacer las suposiciones que cada teoría posee. Por ello, es esencial que la teoría adoptada sea un claro ejemplo de la realidad del estudio del oleaje, es decir, que describa lo más cercano posible el comportamiento de los factores involucrados (López and Tinoco, 2015).

Estas teorías se clasifican en teoría lineal y no-lineal, de esta última se han desarrollado tres: teoría de Stokes, Cnoidal y de onda solitaria, donde en la figura 2.7 se muestra el perfil de la onda para cada teoría. Frente a esto, para este estudio se considerará solo el uso de la teoría lineal, puesto que las otras teorías están definidas principalmente para superficies de baja profundidad (López and Tinoco, 2015), por lo que estas no serán descritas en este trabajo.

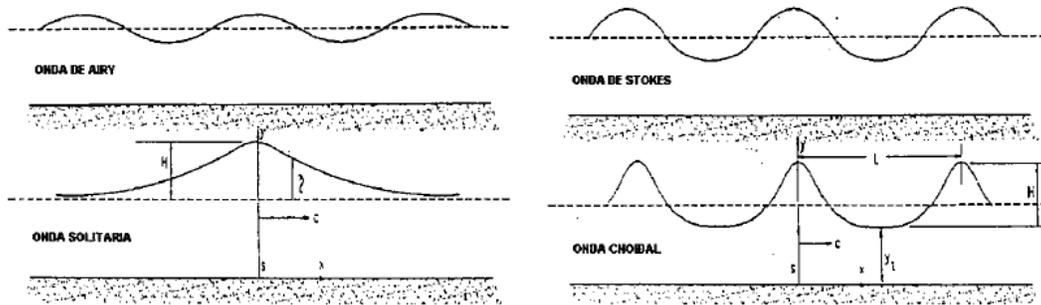


Figura 2.7: Perfil de la onda de acuerdo a las diferentes teorías.
(Fuente: Documento de referencia I: Dinámicas (G.I.O.C. UC, 2000).)

2.2.1 Teoría lineal.

Conocida como teoría de Airy, es la más simple, pues define las características de las olas en dos dimensiones, basándose en ecuaciones de balance de masa (ecuación de Laplace, ecuación 2.1) y balance de momentum (ecuación de Bernoulli, ecuación 2.2), expresadas como una función auxiliar $\phi = \phi(x, y, z, t)$ (función de velocidad potencial), donde “x e y” son el plano ortogonal de la coordenadas horizontal, y “z” es la coordenada vertical, respectivamente (Holthuijsen, 2007; Valenzuela, 2013; CEM, 2002).

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz = 0 \quad (2.2)$$

No obstante, como hipótesis del modelo se tiene que la componente “y” se desprecia debido a la suposición de que la onda es periódica con crestas largas en esa dirección, también se considera que la densidad del agua es constante, se desprecia la tensión superficial, además de poder ser despreciado el efecto de Coriolis ¹. De igual manera, se considera que la presión en la superficie del mar es uniforme y constante, el flujo es irrotacional, es decir, no existe interacción del oleaje con ningún otro movimiento marino, además que el agua del mar carece de viscosidad.

¹Efecto de Coriolis: Curvatura que se produce en la circulación del aire, producto de la rotación de la tierra. En el hemisferio norte este se desvía a la derecha, mientras que en el hemisferio sur es a la izquierda (National Atmospheric and Oceanic Administration, 2020).

Se añade a estas suposiciones que el fondo marino constituye un límite horizontal, fijo e impermeable, lo que implica que la velocidad vertical es anulada. Por otro lado, la amplitud de la onda es pequeña y su forma es invariable en el tiempo y en el espacio, y que estas son planas (dos dimensiones).

De acuerdo con la información del documento “Ondas Superficiales en el Mar” (López and Tinoco, 2015), las tres primeras hipótesis (densidad, tensión superficial y efecto de Coriolis) son asumidas generalmente, mientras que las tres últimas (párrafo anterior) deben asumirse para los trabajos relacionados a la Ingeniería Costera (López and Tinoco, 2015). A partir de las hipótesis y condiciones de borde, se puede representar el movimiento de la ola mediante una onda sinusoidal, como se muestra en la ecuación 2.3 y la figura 2.8, la cual es progresiva, periódica en tiempo (posee un periodo T) y espacio (posee una longitud de onda L).

$$\eta(x, t) = a \sin(kx - \omega t) \quad (2.3)$$

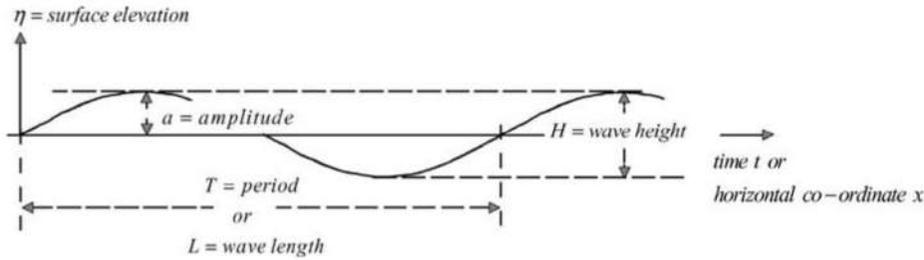


Figura 2.8: Esquema del oleaje para la Teoría Lineal de onda.

(Fuente: Waves in oceanic and coastal waters (Holthuijsen, 2007).)

Respecto a la ecuación 2.3, “ ω ” representa la frecuencia angular de la onda, donde $\omega = 2\pi/T$ y por último, “ k ” es el número de onda, donde este valor es $k = 2\pi/L$. Ahora, al considerar la cinemática detrás de una onda, el derivar en el tiempo la expresión correspondiente a la fase, es decir, $kx - \omega t$, se obtiene la ecuación 2.4, la cual corresponde a la celeridad (Holthuijsen, 2007). Luego, para describir la dinámica del oleaje es preferible partir por la relación de dispersión para ondas lineales, en la cual existe una relación entre ω , k y d (profundidad) (ver ecuación 2.5).

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (2.5)$$

$$c = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)} \quad (2.4)$$

Entre la ecuación 2.4 y 2.5 dan como origen una expresión para determinar la longitud de la onda (ecuación 2.6). Pero esta ecuación queda en función de la misma longitud de la onda, por esto Eckart en 1952 encontró la expresión de las ecuaciones 2.7 y 2.8, pero estas se caracterizan para aguas someras y aguas profundas, por lo que Fenton en 1988 estableció como arreglos las ecuaciones 2.9 y 2.10, donde el error asociado al cálculo del número de onda disminuyó de un 5 % a 0,05 % (Holthuijsen, 2007).

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kd) \quad (2.6)$$

$$kd \approx \alpha (\tanh \alpha)^{-1/2} \quad (2.7)$$

$$kd \approx \frac{\alpha + \beta^2 (\cosh \beta)^{-2}}{\tanh \beta + \beta (\cosh \beta)^{-2}} \quad (2.9)$$

$$\beta = \alpha (\tanh \alpha)^{-1/2} \quad (2.10)$$

También las ondas presentan una cierta velocidad, denominada celeridad, la cual posee diferente frecuencia angular (ω) y número de ondas (k), para una misma dirección y tiempo, lo que hace considerar una expresión que agrupe las diferentes fases del oleaje, la cual se llama celeridad de grupo (C_g), definida como $C_g = nc$, donde la ecuación 2.11 se define el parámetro que lo acompaña. Cuando se trata de aguas someras tiende a 1, mientras que para aguas profundas tiende a 1/2.

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \quad (2.11)$$

Posteriormente, la energía de la onda nace porque las partículas de agua se encuentran siempre en movimiento, el cual se expresa en dos sentidos, respecto su posición en contra de la gravedad ($E_{potencial}$), y respecto un cambio de posición en relación al movimiento ($E_{cinética}$). Entonces, en la ecuación 2.12 se muestra el balance de energía, donde “a” es la amplitud y “H” la altura, donde $H=2a$.

$$E = E_{potencial} + E_{cinética} = \frac{\rho g a^2}{2} = \frac{\rho g H^2}{8} \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad (2.12)$$

No obstante, esta expresión muestra la energía disponible por unidad de área, por lo que para determinar el potencial energético del oleaje solo falta multiplicar la celeridad de grupo, dado que junta los fenómenos de superposición de ondas cuando viajan por la misma dirección y tiempo, con los parámetros característicos en relación al movimiento de la onda. Entonces, la expresión que refleja el potencial energético del oleaje es la ecuación 2.13.

$$P = EC_g = \left(\frac{\rho g H^2}{8} \right) \left(\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \right) \left(\frac{L}{T} \right) \left[\frac{W}{m} \right] \quad (2.13)$$

Pero esta expresión se puede ver de manera más compleja y para eventos irregulares en el oleaje, como una tormenta, pues como se observa en la ecuación 2.14, la energía disponible por la celeridad de grupo dependen de la frecuencia y dirección del oleaje (Schlütter et al., 2015).

$$P = \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \int_{f_{min}}^{f_{max}} C_g(f, \theta) E(f, \theta) df d\theta \quad (2.14)$$

Por otro lado, más adelante para los diagramas de energía y dispersión conocidos como “Sea Scatter Plot”, el cual indica la ocurrencia de distintos estados de mar, clasificados a partir de la altura significativa y el periodo peak, y su contribución a la energía anual total, es decir, el producción media anual de energía (MAEP), lo cual es reflejado en la ecuación 2.15.

$$MAEP = T \sum_{i=1}^N P_i \cdot f_i \quad (2.15)$$

N corresponde al total de datos, T al tiempo promedio para un año, el cual es de 8766 h (Folley, 2016), P_i el potencial energético característico y f_i es la frecuencia relativa (Schlütter et al., 2015; Akpınar et al., 2017; Holmes, 2015).

Finalmente, otro parámetro importante para comprender mejor como otros parámetros influyen en el potencial energético undimotriz es el peralte, o más bien conocido como steepness ratio, el cual corresponde a la tasa entre la altura y el largo de onda ($\xi=H/L$), además de poder ser representado en función de la altura significativa y el periodo peak, como se muestra en la ecuación 2.16 (Arena et al., 2010).

$$\xi(H_s, T_p) = \frac{2\pi H_s}{gT_p^2} \quad (2.16)$$

Este parámetro generalmente posee valores entre 0,06 [-] hasta 1/7 [-], no en tanto, rara vez alcanza valores superiores a 0,1 [-], pues cuando la velocidad de propagación es igual a la velocidad que sigue la cresta de la ola, esta se rompe y se forma una espuma, llegando está a la costa (World Meteorological Organization, 1998).

2.3 Metodologías de representación del oleaje.

De acuerdo con la definición de celeridad de grupo, el oleaje presenta una celeridad con diferente frecuencia angular y número de ondas, esto quiere decir que el oleaje se presenta como una superposición de ondas, como se observa en la figura 2.9. Esta superposición de ondas puede ser descrita desde dos formas diferentes:

- Análisis Estadístico: Centrado en la compresión de los parámetros estocásticos y la distribución de cada uno.
- Análisis Espectral: Centrado en el estudio del espectro de energía, desde el punto de vista de la frecuencia o la relación frecuencia-dirección.



Figura 2.9: Estructura del oleaje aleatorio.
(Fuente: Análisis y Descripción Estadística Del Oleaje (Silva, 2005).)

2.3.1 Análisis estadístico.

Proceso estocástico para comprender el proceso irregular de un punto, pues al observar la costa se observan cambios respecto a la altura de ola, periodos y direcciones en función del tiempo, y estos cambios son conocidos como variabilidad. Para observar esta variabilidad se debe disponer de una muestra continua de los parámetros que representan el clima del oleaje, los cuales pueden ser tomados a partir de satélites, registros locales (boyas de oleaje) o modelos validados (Universitat Politècnica de Catalunya, 2014).

Un ejemplo, es la serie de tiempo en la figura 2.10, donde se observa la altura del oleaje y el potencial energético undimotriz, considerando los datos medidos y la modelación de estos parámetros.

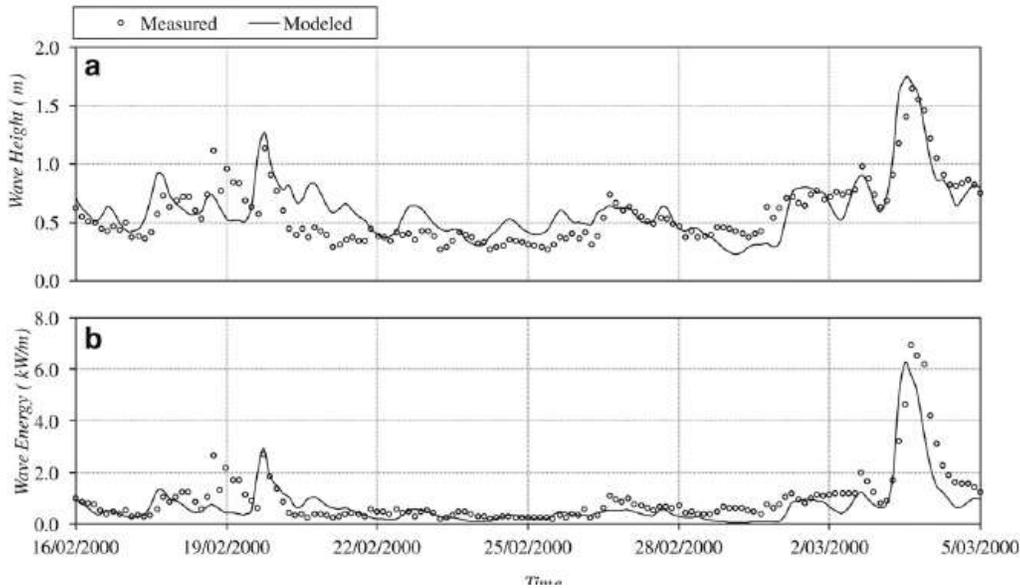


Figura 2.10: Serie de tiempo para altura del oleaje y el potencial energético.

(Fuente: Wave energy potential along the northern coasts of the Gulf of Oman, Iran (Saket and Etemad-Shahidi, 2012).)

Para describir estadísticamente cada uno de los parámetros a estudiar, se usará el promedio, la mediana, los percentil 25 y 75, mínimo, máximo y la desviación estándar. Adicionalmente, para describir la manera estadística en la que se validará el modelo se cuenta con los siguientes estadígrafos:

- Coeficiente de correlación lineal (r): Más conocido como “correlación de Pearson”, es una forma de determinar si dos variables se encuentran linealmente relacionadas. La ecuación 2.17 es aquella para obtener este valor, donde N es el total de datos, x_i e y_i son los valores observados y modelados, respectivamente. Mientras que \bar{x} y \bar{y} son el promedio, s_x con s_y son la desviación estándar de cada variable y s_{xy} es la covarianza, definida en la ecuación 2.18 (Thomson and Emery, 2014). El dominio de este parámetro va desde $-1 \leq r \leq 1$, donde 1 representa valores directamente proporcionales (valor deseado), -1 valores inversamente proporcionales, mientras que los valores cercano a 0 representan una nula relación lineal entre las variables.

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{s_x s_y} = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} \quad (2.17) \quad s_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (2.18)$$

- Error cuadrático medio (RMSE): Ejemplifica la raíz de la suma de los errores al cuadrado, como se observa en la ecuación 2.19. Este índice sirve para medir la dispersión de los datos. El NRMSE o scatter index (SI) permite mostrar esta variación en relación a un porcentaje, lo que permite una comparación con otros parámetros.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (2.19)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{x}} \quad (2.20)$$

- Coeficiente de determinación (R^2): Según la ecuación 2.21, este ejemplifica en la mayoría de los casos el ajuste de una curva sobre un grupo de datos, no obstante, también se puede considerar que tan parecida es una variable modelada sobre la variable observada (Wilks, 2007; Riquelme and Eduardo, 2015).

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (2.21)$$

- Sesgo normalizado (BIAS): Es la diferencia entre el promedio de los datos observados x_i y los datos modelados y_i según la ecuación 2.22 (Thomson and Emery, 2014; US EPA, 2015). Este puede ser normalizado a través de la división de este valor por la media de los datos observados “ \bar{x} ”.

$$BIAS = \bar{y} - \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i) \quad (2.22) \quad NBIAS = \frac{BIAS}{\bar{x}} \quad (2.23)$$

- Pendiente (o Slope): Como se muestra en la ecuación 2.24, este representa la velocidad con la que cambia una variable, en relación a otra. No obstante, para este caso es determinar la similitud entre los datos observados y modelados (Thomson and Emery, 2014).

$$slope = \frac{s_{xy}}{s_x^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^2} \quad (2.24)$$

Por otro lado, se puede establecer la variabilidad de la energía de las olas de manera anual, mensual y estacional, pues es un factor muy importante que afectará la viabilidad de cualquier proyecto prospectivo de extracción de energía. Ya que los sitios con un flujo de energía de las olas moderado y constante pueden resultar más atractivos que los sitios donde el recurso es más energético, en comparación a sitios más inestables y por lo tanto, menos fiables (Cornett, 2009). Frente a esto, se muestra en las ecuaciones 2.25, 2.26 y 2.27 los índices de variabilidad anual, mensual y estacional, en todas se determina el índice de variabilidad como la diferencia entre el potencial promedio o la mediana más energética (P_{x1}) menos el potencial promedio o la mediana menos energética (P_{x2}), todo esto dividido por la potencia promedio o mediana anual (P_{year}) (Cornett, 2009; Atan et al., 2016; Reguero et al., 2015).

$$AV = \frac{P_{a1} - P_{a2}}{P_{year}} \quad (2.25) \quad MV = \frac{P_{m1} - P_{m2}}{P_{year}} \quad (2.26) \quad SV = \frac{P_{s1} - P_{s2}}{P_{year}} \quad (2.27)$$

No obstante, también se puede obtener la variabilidad de una manera sencilla y directa, conocida como coeficiente de variación (COV), que se obtiene dividiendo la desviación estándar de la serie temporal de la potencia por la potencia media, como se observa en la ecuación 2.28 (Cornett, 2009; Atan et al., 2016; Reguero et al., 2015).

$$COV = \frac{\sigma(t)}{\mu(t)} \quad (2.28)$$

2.3.2 Análisis espectral.

Proceso centrado en entender la variabilidad del espectro de energía en función de la frecuencia (Espectro energético unidimensional) o el efecto frecuencia-dirección (Efecto energético bidimensional), pues este considera las condiciones externas como velocidad del viento, fetch, tiempo de generación y batimetría, presencia de SWELL, entre otros, y por otro lado, las condiciones internas como la interacción no lineal entre componentes, disipación de energía por rotura o fricción con el fondo, etc (G.I.O.C. UC, 2000; Silva, 2005). Este es esencial para el diseño de estructuras, pues así se evita que el efecto de resonancia y amplificación dinámica de la fuerza resultante puedan afectar a las estructuras marinas, como una petrolera (Campos, 2016).

Además, el espectro energético unidimensional es ventajoso en el sentido que a partir de la frecuencia se pueda saber el contenido energético presente en el oleaje, frente a esto existen varias formas de representarse, pero se presentarán el espectro de Pierson-Moskowitz (PM) y JONSWAP. Aun así, el espectro energético unidimensional carece de comprender la individualidad de la ola, pues considera que todas actúan con la misma dirección. No obstante, esta se puede reconstruir a través del espectro energético bidimensional, pues este es una representación tridimensional considerando la frecuencia y la dirección, como se observa en la figura 2.11, es calculado usando FFT (Transformada rápida de Fourier), y así, explicar este en relación a sumas infinita de ondas sinusoidales de amplitud (A_n), frecuencia (ω_n) y fase relativa (ϵ_n). Para esto se describen los principales parámetros espectrales para el oleaje.

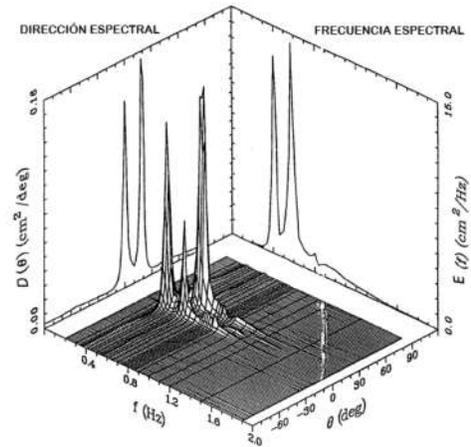


Figura 2.11: Esquema para un espectro de onda bidimensional.

(Fuente: Coastal Engineering Manual (CEM, 2002).)

- Altura significativa espectral (H_{m0}): Asumiendo que la distribución de las olas es Rayleigh, se cumple que la altura significativa (H_s) es igual a la altura significativa espectral (H_{m0}), como se muestra en la ecuación 2.29.

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} = \sqrt{2}\sqrt{8m_0} = \sqrt{2}H_{rms} \approx H_s \quad (2.29)$$

- Ancho espectral (ϵ) y Ancho de banda espectral (ν): Ambos parámetros fluctúan entre 0 y 1, pues sirven como índice de la anchura o estrechez del espectro. Se dice que para el caso de un espectro es estrecho cuando los valores de estos parámetros son muy pequeños. Sus respectivas ecuaciones son las siguientes:

$$\epsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (2.30) \quad \nu = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1} \quad (2.31)$$

- Momento de orden: momento de orden n de la densidad espectral de energía en función de la dirección y la frecuencia, como se observa en la ecuación 2.32.

$$m_n = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty f^n S(f, \theta) df d\theta \quad (2.32)$$

- Periodo (T_p) y Dirección peak espectral (D_{pk}): Son aquellas en que para cierta frecuencia y ángulo se alcanza el máximo.
- Periodo energético (T_e): Periodo cuando esta posee toda la energía para un estado de mar, se considera como aproximación $T_e = 0,859T_p$ (Aiken et al., 2008).

Espectro Pierson-Moskowitz (PM).

Originado en 1964, se determinó a partir de datos tomados en el mar atlántico norte por buques oceanográficos. Este modelo depende únicamente de la velocidad $U_{19,5}$, como se observa en la ecuación 2.33. Cabe destacar que este es válido para oleaje SWELL.

$$S(f) = \frac{0,0081g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp \left[-0,74 \left(\frac{2\pi U_{19,5} f}{g} \right)^{-4} \right] \quad (2.33)$$

Espectro JONSWAP.

Nace en 1973 como una extensión del espectro anterior, solo que representa el oleaje tipo SEA y SWELL, pues como se observa en la figura 2.12, para una frecuencia peak, este presenta un mayor espectro energético. Aun así, este tipo de espectro sufrió una modificación de su versión original, pues como se observa en la ecuación 2.34, dejó a este tipo de espectro en función de la altura significativa (H_s), el periodo peak (T_p), y el factor de intensidad del punto más alto γ (generalmente se usa un valor de 3.3) (Universitat Politècnica de Catalunya, 1999). Además, en la ecuación 2.35 se presenta la expresión de β_j con σ igual a 0.07, si f/f_p es menor o igual 1 e igual a 0.09 en caso de que f/f_p es mayor a 1.

$$S(f) = \beta_j H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp \left[-1,25(T_p f)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[\frac{-(T_p f - 1)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (2.34)$$

$$\beta_j = \frac{0,06238(1,094 - 0,01915 \ln(\gamma))}{0,23 + 0,0336\gamma - 0,185(1,9 + \gamma)^{-1}} \quad (2.35)$$

Espectro Bidimensional.

Este se introdujo para describir el estado de mar resultante de una superposición de diferentes componentes, pero con diferente direcciones (Silva, 2005). Este valor generalmente se expresa como se observa en la ecuación 2.36, donde $S(f)$ corresponde al espectro en función de la frecuencia, mientras que $G(f|\theta)$ corresponde a espectro en relación a la dirección, donde este es un valor adimensional.

$$S(f, \theta) = S(f)G(f|\theta) \quad (2.36)$$

De acuerdo al trabajo “Computation of refraction and diffraction of sea waves with Mitsuyasu’s directional spectrum” (GODA and SUZUKI, 1975), se establece que $G(f|\theta)$ es:

$$G(f|\theta) = G_0 \cos^{2s} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (2.37)$$

$$G_0 = \left[\int_0^{2\pi} \cos^{2s} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta \right]^{-1} \quad (2.38)$$

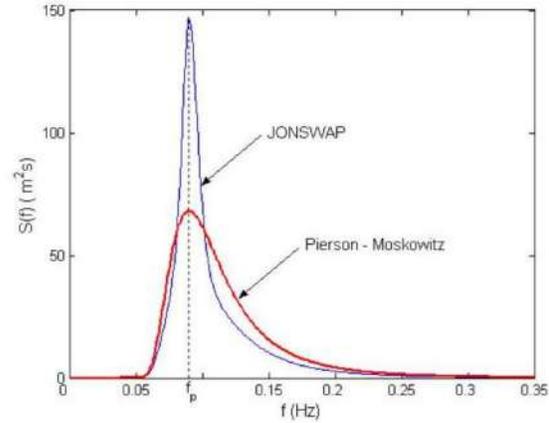


Figura 2.12: Comparación de espectros.

(Fuente: Ondas Superficiales en el Mar (López and Tinoco, 2015).)

De acuerdo al documento “Análisis y Descripción Estadística Del Oleaje” (Silva, 2005), este parámetro “s” de la ecuación 2.37 está relacionado con el espectro energético de la frecuencia, de la siguiente manera:

$$s = \begin{cases} s_{max} (f/f_p)^5 & ; f \leq f_p \\ s_{max} (f/f_p)^{-2,5} & ; f > f_p \end{cases} \quad (2.39)$$

No obstante, de la nota 6D “The bimodal directional distribution of wave energy” del libro Waves in oceanic and coastal waters (Holthuijsen, 2007) se considera un valor de $G(f|\theta)$ igual a la ecuación 2.40, donde θ va desde el menos infinito hasta el más infinito. Por otro lado, las ecuaciones 2.41 y 2.42 representan los valores de las variables de la ecuación 2.40.

$$G(f|\theta) = \frac{1}{\sqrt{8\pi}\sigma_\theta^*} \left[\exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\theta - \theta_{peak}^*}{\sigma_\theta^*} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\theta + \theta_{peak}^*}{\sigma_\theta^*} \right)^2 \right] \right] \quad (2.40)$$

$$\theta_{peak}^* = \begin{cases} 7,5 & ; f < f_p \\ 0,5 \exp \left(5,45 - 2,75 \left(\frac{f}{f_p} \right)^2 \right) & ; f \geq f_p \end{cases} \quad (2.41)$$

$$\sigma_\theta^* = \begin{cases} 11,4 + 5,4 \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-7,9} & ; f < f_p \\ 32,1 - 15,4 \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-2} & ; f \geq f_p \end{cases} \quad (2.42)$$

2.4 Transferencia del oleaje

La compresión en la forma de como transferir el oleaje difiere de varias formas, como usar la climatología local como forzante o usar los parámetros espectrales (CEM, 2002). Las formas más comunes son las siguientes:

- Transferencia a través de los parámetros del oleaje: Conociendo los parámetros característicos del clima del oleaje, como la altura significativa de la ola (H_s), el periodo peak (T_p) y la dirección peak (D_p), se usan como forzantes del modelo, para establecer la propagación de aguas profundas a aguas someras.
- Transferencia a través del espectro unidimensional: A partir del espectro de energía, se conoce la altura significativa y el periodo peak, como se mostró en la ecuación 2.34 para el espectro de JONSWAP, y así usar estos para realizar una transferencia a través de los parámetros del oleaje. No obstante, este carece de comprender la individualidad de la ola.
- Transferencia a través del espectro bidimensional: Igual que el anterior, pero considerando la interacción ola-ola en la transferencia, pero bajo un costo computacional elevado.

De acuerdo con el informe N°1 del SHOA, el oleaje en las costas chilenas es de gran complejidad, por lo que es importante describir su comportamiento e identificar las modalidades que puede poseer el sitio de estudio, desde aguas profundas a aguas someras. Frente a esto, se estipula que es necesario optar por la “Transferencia a través del espectro bidimensional”, debido a que este aísla cada uno de los componentes de las olas, evitando la sobre o subestimación de los parámetros que componen el clima del oleaje, y que pueden afectar a diversos proyectos costeros (SHOA, 2015). También se hará necesario considerar un periodo de 20 años con la respectiva validación a través de mediciones in-situ en el lugar, no obstante, para este trabajo se consideró un periodo de 10 años.

2.4.1 Modelos de propagación.

Los modelos de propagación de ondas son aquellos que ayudan a comprender el estudio de las ondas generadas en cuerpos de agua abiertos, y dependiendo del objetivo y la complejidad que este requiere. Dentro de estos modelos se encuentran los modelos que promedian la fase (Phase-averaged models), los modelos que resuelven la fase (Phase-resolving models) y los de dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics) (Winckler Grez, 2018).

Modelos que promedian la fase.

Modelos que se basan en la ecuación de balance de energía espectral, el que permite calcular la evolución de esta en el tiempo y espacio a medida que este va evolucionando en el espacio. También son conocidos como modelos espectrales, pues permite caracterizar los fenómenos de asomeramiento, refracción, entre otros. No obstante, estos no resuelven de forma adecuada la difracción y omite el efecto de reflexión. Además, a partir del espectro de energía pueden calcular los parámetros espectrales ya descritos, como la altura significativa, periodo y dirección media, entre otros. Finalmente, las desventajas de este modelo son el no poder permitir calcular el perfil de las ondas, y por ende se debe usar una resolución espacial y temporal mayor, abarcando extensiones desde aguas profundas a aguas someras (Winckler Grez, 2018).

Un ejemplo para este tipo de modelos es lo que se observa en la figura 2.13, modelo SWAN para la Isla Robinson Crusoe, en el Archipiélago Juan Fernández, Chile. A la izquierda se observa la Altura significativa y dirección peak, a la derecha la Altura significativa que es superada un 5% del tiempo.

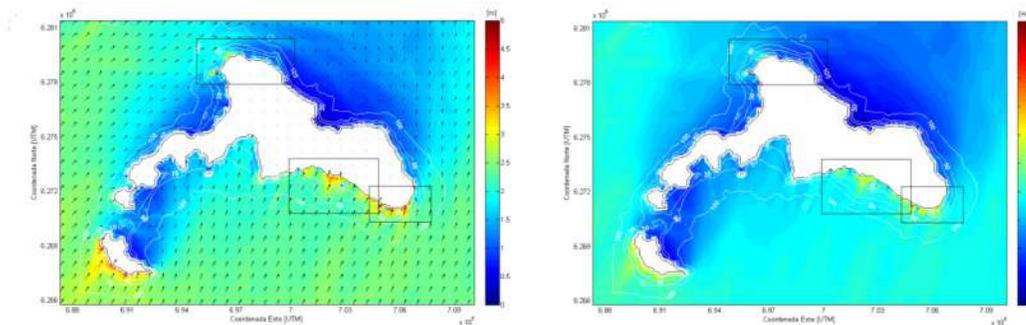


Figura 2.13: Ejemplo de modelo SWAN para la Isla Robinson Crusoe, Chile.

(Fuente: Introducción al modelado de procesos costeros (Winckler Grez, 2018).)

Modelos que resuelven la fase.

Modelos basados en ecuaciones de conservación de la masa y momentum que permiten caracterizar la evolución en el tiempo y espacio de las olas individuales, mediante la resolución de la desnivelación instantánea y velocidad mutuamente ortogonales. La principal ventaja de estos modelos es el considerar los fenómenos de asomeramiento, refracción, difracción, reflexión y disipación.

No obstante, la desventaja generada es la alta resolución temporal y espacial requerida. Estos modelos se basan en teorías no lineales, como la teoría de Stokes y teoría de onda larga, por lo tanto son más complejos de desarrollar (Winckler Grez, 2018). En la figura 2.14 se muestra un modelo que resuelve la fase, ilustrándose como el oleaje varía desde aguas profundas hasta aguas someras en los siguientes pasos:

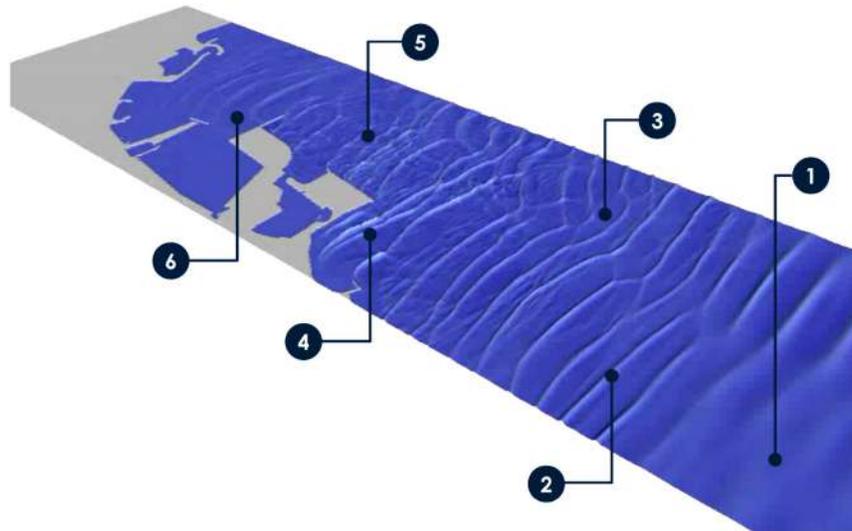


Figura 2.14: Ejemplo de modelo que resuelve la fase.
(Fuente: Introducción al modelado de procesos costeros (Winckler Grez, 2018).)

1. Comienza a ser afectado por el fondo.
2. Visibilidad del asomeramiento en el oleaje, producto de la profundidad.
3. La onda se desacelera producto de la irregularidad de la batimetría, apreciándose el fenómeno de refracción.
4. Apreciación de la refracción y un patrón cuasi-estacionario, con amplitudes mayores a el incidente y una posible rotura.
5. Se observan patrones de oleaje complejos con oscilaciones de mayor frecuencia, producto del fenómeno de reflexión y la transferencia no-lineal de las frecuencias.
6. El frente del oleaje se curva significativamente, la amplitud disminuye y se logra una dársena abrigada, por efecto de la difracción.

CFD.

Modelos que se basan en las ecuaciones 3D de Navier-Stokes, sin efectuar supuestos respecto de la estructura vertical del flujo. Estos permiten calcular la velocidad y presión en tres dimensiones, destacándose las ecuaciones de RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations), las técnicas LES (Large Eddy Simulation) y las DNS (Direct Numerical Simulation) (Winckler Grez, 2018).

Primero, las ecuaciones RANS permiten calcular valores medios, pero no da información sobre las fluctuaciones turbulentas, a excepción de aquellos modelos cuya escala es bastante mayor que el tamaño de la discretización. Segundo, LES ignora las escalas más pequeñas del flujo, incrementando los costos computacionales, utilizando filtro pasa-bajo, pero tiene la ventaja de resolver escalas mayores. No obstante, por el costo computacional, se reserva solo para la investigación. Finalmente, mediante DNS permite calcular la turbulencia hasta escalas donde actúa la viscosidad molecular, pero no es adecuado para problemas de ingeniería de costas debido a su alto costo computacional.

2.4.2 SWAN

Modelo de tercera generación, basado en modelo que promedian la fase. Describe la evolución del espectro de energía desarrollado por la Universidad Técnica de Delft en Holanda. Posee como ventaja ser un modelo de código libre, es decir, cualquiera puede descargarlo, usarlo y modificar los códigos internos del modelo, aun así, este carece de una interfaz gráfica.

Este modelo, considera varios procesos que influyen la propagación como el viento, disipación por whitecapping, fricción de fondo, rompimiento y transferencia de energía debido a interacciones ola-ola (cuadrupletas y triadas) (Holthuijsen, 2007). Además, este se ha actualizado ampliamente a lo largo de los años y goza de una amplia adopción, pues algunas organizaciones lo usan como herramienta principal para el pronóstico del oleaje, además algunos investigadores utilizan SWAN para el estudio de los procesos oceánicos. También se acopla a otros modelos para realizar un modelado completo de las zonas costeras.

Este modelo, frente a otros difiere en varios aspectos, pues este se crea para un uso especializado en aguas someras, posibilidad de ser ejecutado para altas resoluciones, utilizar una técnica parametrizada más estable, pero con mayores costos computacionales, además de permitir la ejecución en modo estacionario, en vez de un modo “time-step” (University Corporation for Atmospheric Research, 2009).

Pues, para ejecutar el modelo SWAN es necesario entender que existen diversas aplicaciones, y por lo tanto, se debe tener una buena comprensión del cómo actúa y permite tener un retorno en caso de que algún parámetro no esté ajustado como corresponde. Este proceso se resume en los siguientes aspectos como selección del tipo de grilla, área de interés y las condiciones de borde, como puntos usados como forzantes del modelo, batimetría, etc.

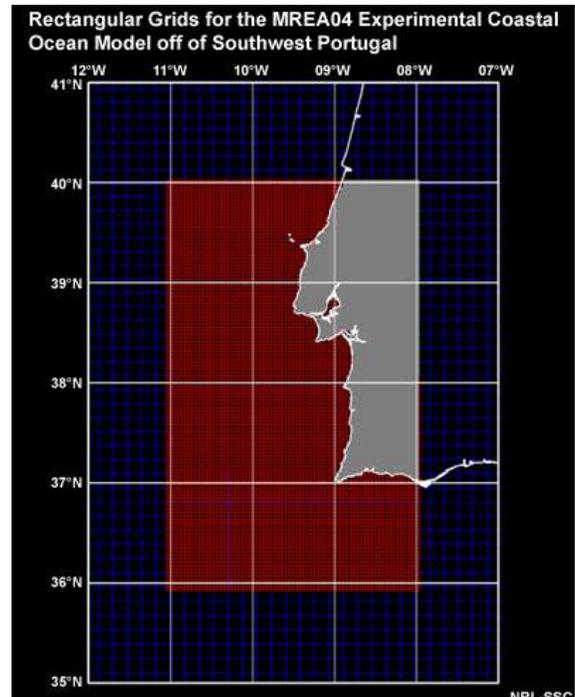


Figura 2.15: Grilla estructurada rectilínea.

(Fuente: Nearshore wave modeling (University Corporation for Atmospheric Research, 2009).)

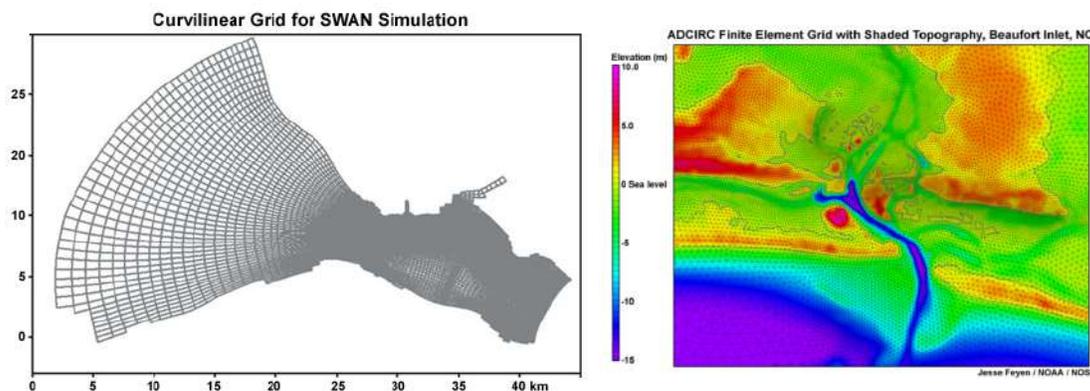


Figura 2.16: Grilla estructurada curvilínea (izquierda) y grilla no estructurada (derecha).

(Fuente: Nearshore wave modeling (University Corporation for Atmospheric Research, 2009).)

En primer lugar, se consideran dos tipos de grillas: estructuradas y no estructuradas. Las grillas estructuradas pueden ser rectilíneas o curvilíneas (figura 2.16), por otro lado, las grillas no estructuradas (figura 2.15) son mucho mejores para describir la transferencia del oleaje, pues son una combinación de triángulos o una combinación de triángulos y cuadriláteros (grillas híbridas, pero en la actualidad sólo se usan grillas triangulares pues este involucra un mayor costo computacional).

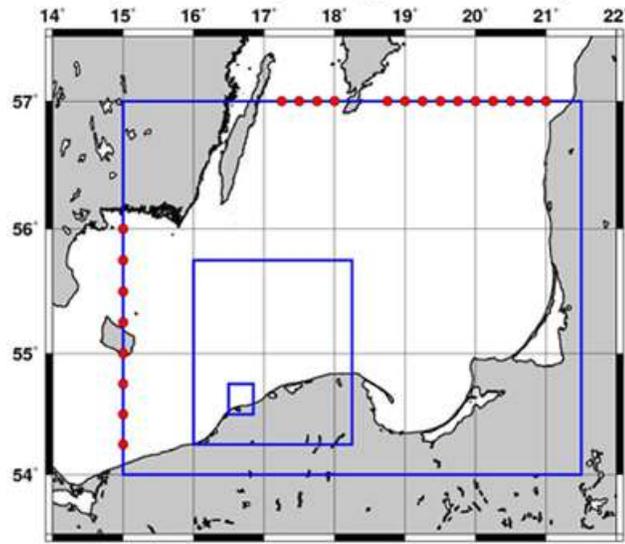
En segundo lugar, las escalas espaciales características de las olas de viento, desde una propagación de aguas profundas a poco profundas son muy diversas, por lo tanto, se requiere de una anidación más cercana para no recurrir a gastos computacionales mayores. Donde “anidar” es calcular la propagación de la onda en una malla más grande, para luego hacer una nueva propagación en una malla más fina, la cual utiliza condiciones generadas por la grilla más grande, esa se puede repetir varias veces para cálculos más y más finos, como se observa en la figura 2.17. Esta está sujeta a datos externos, como a la resolución de la batimetría y a la misma grilla (The SWAN Team, 2019).

En tercer lugar, se deben considerar las condiciones de borde delimitadas por las formas de transferencia del oleaje o datos in situ, pues, por lo general se utilizan como forzante de entrada los datos provenientes de modelos de propagación oceánica como WAM o WAVEWATCH III (de estos, el NOAA posee grillas de datos en archivos GRB y GRB2 desde 1997 en adelante), o se anidan estos juntos al modelo SWAN, pues son los únicos que se pueden anidar directamente en el modelo. No obstante, realizar eso eleva los costos computacionales.

Considerando la información anterior, la elección del área de interés, es decir, el área donde se realizarán los cálculos y serán puestas las condiciones de borde debe ser delimitada de una manera óptima, sin sobrepasar los límites del modelo, pues el modelo frente a grillas muy grandes no funciona de manera correcta, o simplemente no funciona (Willis, 2010; Ruiz, 2014).

Además, SWAN puede ser usado de dos maneras de resolución diferentes: modo estacionario y no estacionario. En modo estacionario comienza con las condiciones iniciales y un número de iteraciones suficientes para conseguir un estado en equilibrio. Por otro lado, en modo no estacionario el modelo presenta variaciones en el tiempo, por lo tanto, el término dependiente del tiempo es considerado. El principal problema de ser ejecutado en modo estacionario es generar olas con un crecimiento y decaimiento acelerado, lo cual es corregido al usar un método no estacionario, pero se corre el riesgo de un mayor consumo de recursos, es decir, gasto computacional (Willis, 2010). Finalmente, con relación a todo lo anterior se resume que el modelo SWAN necesita un mínimo de dos datos: batimetría y forzantes del oleaje (espectro energético o correspondiente al viento). Además, se deben incluir otras condiciones que dependen del área de interés, y los datos de salida necesarios para los cálculos posteriores.

Triple-nested SWAN Domains in the Baltic Sea
Red Circles Represent WAM Spectra Applied as Boundary Condition



Allard et al. 2005

Figura 2.17: Triple anidación de un modelo SWAN en el mar Báltico.
(Fuente: Nearshore wave modeling (University Corporation for Atmospheric Research, 2009).)

Problemas comunes con el modelo SWAN.

Este modelo, al igual que muchos otros para el área de este trabajo y en otras más, presenta limitantes por las condiciones de borde y el cómo este es ejecutado, pues entre los problemas más comunes con la ejecución del modelo SWAN son:

1. Posición de los puntos de forzante, los puntos claves para la lectura de la grilla o la lectura de la batimetría, pues los primeros son las fuente de entrada para propagar el oleaje dentro de la grilla definida, mientras que una mala lectura de la batimetría desencadena en errores en la propagación del oleaje. Un ejemplo de estos, puede ser la confusión en la posición de los datos de las costas chilenas con el océano Índico, error cometido en el cambio de coordenadas de origen de los datos que posee la información.
2. La información de los puntos debe ser la correcta, dado que son el punto de partida para la generación y propagación del oleaje, por lo que los datos de entrada deben ser correctamente estudiados y validados, esto con alguna boya y/o proyecto local usando NWW3 o WAM.
3. La dimensión máxima de la grilla de batimetría, para un computador de 8G de ram y un procesador intel de 4 nucleos es una matriz de 750 a 1000 pixeles para ambos ejes. No obstante, en servidores este puede presentar una mejor ejecución. De igual manera, para grillas sobre 500 en un computador de 8G de ram y 4 procesadores la ejecución del modelo se vuelve más lento.
4. Para grillas con una gran resolución, escalar desde grillas mayores con una menor resolución para mejorar los tiempos de modelación, es decir, el costo computacional. No obstante esto debe ser suave y progresivo, sino el modelo no es capaz de ejecutar el modelo.
5. En caso de considerar el viento en el modelo, se debe tener un especial cuidado en la forma que es ingresado, dado que puede ser ingresado de manera constante o una grilla que contenga datos de cada punto. Sin embargo, se debe tener especial cuidado en la forma de entrada, pues pueden ser las coordenadas “u” y “v” características del viento (en el caso de la grilla) o la magnitud de la velocidad y dirección en el caso que se considere un viento uniforme en la grilla.
6. En el caso que se considere el uso de carpetas para el almacenaje y/o lectura de diferentes componentes de entradas o salida del modelo, es crucial que esta dirección sea correctamente estipulada y escrita, teniendo en cuenta que la estructura en la navegación de carpetas en WINDOWS y LINUX es diferente.
7. La forma de lectura y la dimensión de la batimetría es crucial para no llegar a resultados erróneos al momento de modelar y para definir el tamaño de la grilla, dado que este es crucial para la ejecución del modelo.
8. La velocidad del modelo está condicionada con la cantidad de resultados que se deseen obtener. Si bien se pueden obtener diferentes resultados de este modelo, el aumentar estos aumentan las iteraciones que este debe realizar para obtener todos los resultados.

3

METODOLOGÍA

Este capítulo parte definiendo el área de interés y describiendo la base de datos disponible. Posteriormente, se establecen los puntos de generación, para pasar a describir cómo se realizará la transferencia del oleaje, explicando cómo es la propagación y la programación asociada.

3.1 Área de interés y base de datos disponible.

Según lo observado en la figura 3.1 se ha seleccionado para la primera propagación un área comprendida entre las latitudes $32,5^{\circ}\text{S}$ a $33,5^{\circ}\text{S}$ y las longitudes $71,4^{\circ}\text{W}$ a $72,5^{\circ}\text{W}$ (Rectángulo en negro). Por otro lado, la segunda propagación presenta un área de interés comprendida entre las latitudes $32,75^{\circ}\text{S}$ a $33,25^{\circ}\text{S}$ y las longitudes $71,4^{\circ}\text{W}$ a $72,0^{\circ}\text{W}$ (Rectángulo en azul).

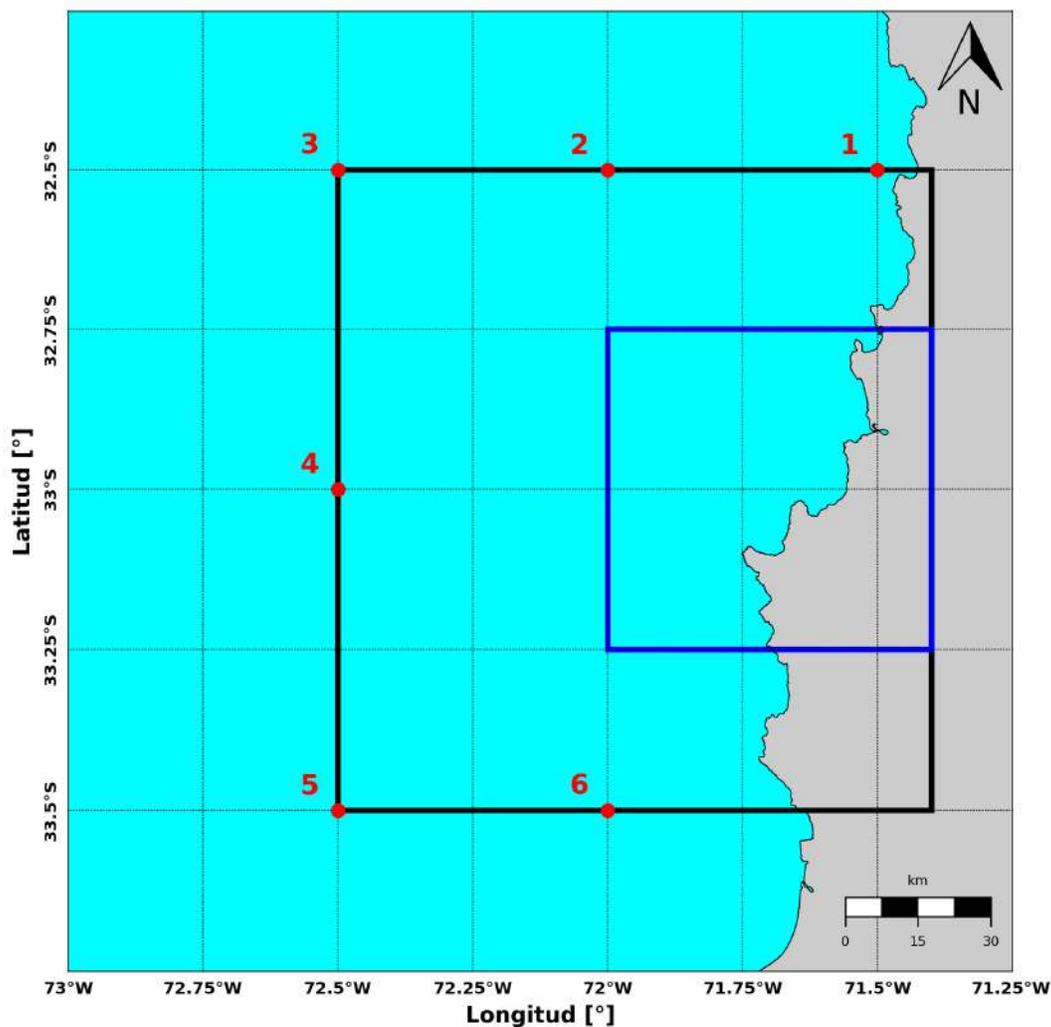


Figura 3.1: Área de interés.
(Fuente: Elaboración Propia.)

La zona de estudio presenta una geomorfología costera con variados aspectos latitudinales, considerándose mixta, pues se va alternando extensas playas de acumulación arenosa, acantilados y la formación de bahías (Morales et al., 2020). Por otro lado, la geomorfología submarina presenta una zona de subducción entre los 18°S y 45°S al penetrar la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana con una convergencia de 10 [cm/año]. Ahora, considerando la batimetría de la zona entre los 28°S y 34°S el margen se caracteriza por un plateau intermedio, con taludes superior y medio de 2,8° y la inexistencia de cañones submarinos. (Morales et al., 2020).

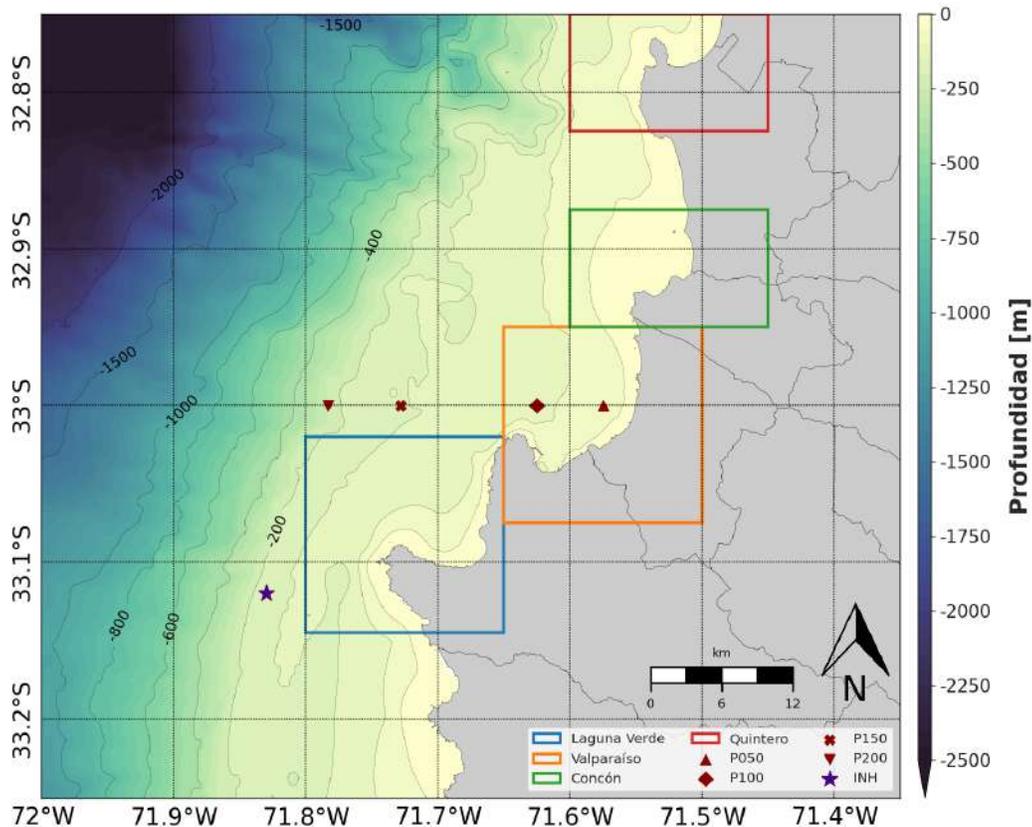


Figura 3.2: Batimetría del área de interés.

(Fuente: Elaboración Propia, en base a información obtenida de GEBCO (GEBCO, 2019).)

Por su lado, la batimetría proviene del proyecto GEBCO, el cual se enmarca por proporcionar de manera gratuita batimetría de todo el mundo, con una resolución de 15 arcos de segundos, lo que significa un recorrido aproximado 450 [m] y de 0,004167 [°] si se desea recorrer en relación a los grados entre cada medición. Además, la zona de interés se enmarca por poseer la batimetría observada en la figura 3.2, donde además se muestra las bahías de la zona (Laguna Verde en el rectángulo azul, Valparaíso en naranja, Concón en Verde y Quintero en Rojo), los puntos de interés a estudiar y la ubicación de la boya TRIAXYS con datos provenientes del proyecto “Catastro del Recurso Energético Asociado a Oleaje para el Apoyo a la Evaluación de Proyectos de Generación de Energía Undimotriz” (Innova Chile et al., 2017). Donde la información de cada medición es una mezcla de una red de sondeos e interpolación con los sondeos del satélite SRTM15+ (GEBCO, 2019). Aun así, existe una mejor batimetría por parte del SHOA, pero este solo se enfoca en evaluar los puertos del país (SHOA, 2019), por lo tanto, para este trabajo esta no se usará, dado la incerteza que produce no conocer la batimetría en zonas que no son consideradas puertos para el país.

En cuanto a la base de datos disponible, esta proviene del modelo de onda espectral NWW3 donde se extraerán los parámetros espectrales usados como forzante del modelo, los cuales son recopilados cada fin de mes para la ejecución del modelo, generando una base disponible con información desde el año 1997 en adelante en formato GRIB, pero a contar de febrero del año 2005 la información disponible del modelo cambio a un formato GRIB2 (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2019). Esta diferencia en formato es principalmente la resolución de la grilla, pues para el formato GRIB la resolución era de $1,25^\circ \times 1^\circ$, en términos de longitud y latitud, mientras que los archivos GRIB2 la resolución es de $0,50^\circ \times 0,50^\circ$, en términos de longitud y latitud respectivamente. No obstante, por el rango temporal usado solo se usarán datos con formato GRIB2.

Además, estos archivos contienen la información para todos los estados de mar y para toda la ventana temporal a evaluar (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2019), donde se consideraron como parámetros espectrales la altura significativa del oleaje en [m] (H_s), periodo peak en [s] (T_p) y dirección peak en [$^\circ$] (D_p). A partir de los archivos y parámetros, se seleccionarán seis puntos de generación para extraer la información y usar estos como forzante de entrada en el modelo SWAN a través del comando “BOUNDspec” (The SWAN Team, 2019). Frente a esto, en la figura 3.1 y en la tabla 3.1 se presentan los puntos de generación del oleaje y su ubicación, respectivamente. Por otro lado, en la figura 3.3 se aprecia el efecto de sombreado que puede generarse al no considerar toda la información disponible como forzante del modelo.

Tabla 3.1: Localización forzante de entrada.

N°	Latitud	Longitud
1	$32,50^\circ S$	$71,50^\circ W$
2	$32,50^\circ S$	$72,00^\circ W$
3	$32,50^\circ S$	$72,50^\circ W$
4	$33,00^\circ S$	$72,50^\circ W$
5	$33,50^\circ S$	$72,50^\circ W$
6	$33,50^\circ S$	$72,00^\circ W$

(Fuente: Elaboración Propia.)

Este efecto de sombreado desvirtúa el actual estado del clima del oleaje, pues dependiendo de las condiciones geográficas de la zona, junto a las condiciones de la relación atmósfera-océano, y que generan el oleaje, este en ciertos puntos no es transmitido como es debido, y por ende, y como es observable en la figura 3.3 se producen zonas con un potencial eléctrico undimotriz más bajo de lo que debería ser.

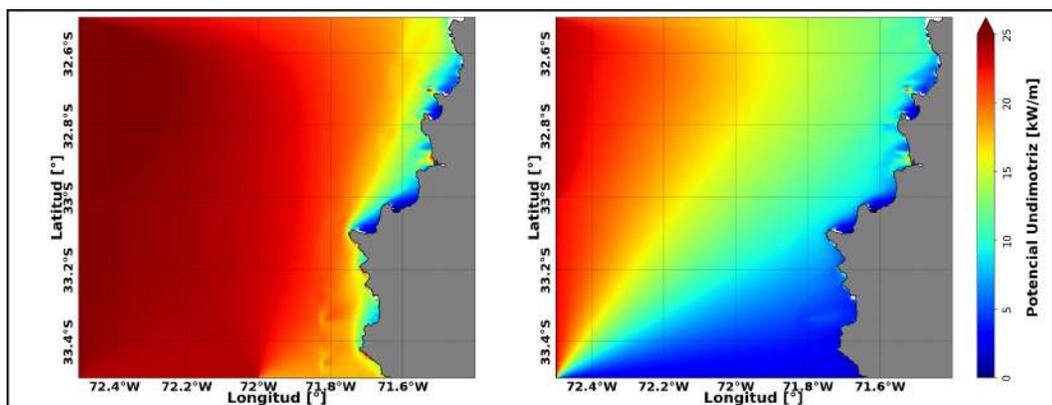


Figura 3.3: Potencial sin efecto (izquierda) y con efecto de sombreado (derecha).

(Fuente: Elaboración Propia.)

3.2 Transferencia del oleaje.

Frente a la sección anterior, la cual explica la manera en que se definieron los límites para cada grilla, la batimetría usada, la información de la climatología disponible para todo el mundo, efectuando una diferencia en el tipo de formato, para finalizar en la selección de ciertos puntos que corresponden a los contornos de la grilla más grande, se procede a explicar la manera en que se desarrollará la lectura de los archivos GRIB2 y la escritura de los modelos, la que a diferencia de la memoria de “Selección en Chile de los sitios más adecuados para la extracción de energía a partir del oleaje utilizando SWAN” (Escobar, 2012), se realizó con el paquete pygrib de Python (ver anexos 6.1.1), el cual permite la lectura de ambos formatos (GRIB y GRIB2), escritura y obtención de los archivos “.swn”, posteriormente se ejecutan los archivos con la ayuda de un script en lenguaje bat (Windows) o bash (Linux) para simulaciones continuas. Además, para este trabajo en un principio se procede a explicar cada una de las propagaciones y su construcción, luego se explica la programación asociada para la escritura de cada modelo, y una posterior ejecución de cada uno.

3.2.1 Primera propagación.

Tiene por objetivo la caracterización del oleaje, es decir, hacer la primera propagación de las ondas para establecer los parámetros del oleaje en toda la grilla de modelación, caracterizándose por abarcar un área de interés desde las latitudes $32,5^{\circ}\text{S}$ a $33,5^{\circ}\text{S}$ y las longitudes $71,4^{\circ}\text{W}$ a $72,5^{\circ}\text{W}$. En particular, y como se muestra en la figura 3.4, se ilustra lo siguiente para la construcción de los modelos.

1. Definir el nombre del proyecto y sigla representativa de este.
2. Establecer el tipo de convención, que en este caso se usa la convención náutica, pues define la dirección del viento y el oleaje desde donde viene, asumiendo un movimiento a reloj desde el norte geográfico. Además, se debe establecer el tipo de coordenadas, que para este trabajo se considero trabajar con coordenadas esféricas, para evitar cambios de unidades, pues todo se trabajará en grados. Además se define un máximo de 50 iteraciones (mxtst) y una precisión mínima de un 98% (npnts), en función del estudio “SWAN productieberekening IJsselmeer en Zwarte Meer voor WTI-2011” (Klein, 2011).
3. Establecer condiciones de borde, tamaño y resolución de la grilla (60 arcos de segundo), modo de lectura junto al intervalo de frecuencias que presenta el espectro del área de interés, esto último extraído del trabajo de final de grado realizado por Diego Escobar (Escobar, 2012). Además, la lectura de la grilla con un $idla=3$, donde este se lee desde el punto de partida de la grilla de modelación, es decir, el punto suroeste y así se evitan problemas en la transferencia del oleaje.
4. Establecer puntos de generación del oleaje a través del comando BOUNDSPEC SEGMENT, definiendo el origen y el segmento de este, es decir, el espacio que estará definido por ese punto de generación. Además, para cada punto de generación se escribe la altura significativa del oleaje, periodo peak y la dirección media del oleaje, y finalmente se definen una ruptura de la ola constante (Breaking constant) de 0,42 [-], además de apagar el efecto de cuádrupletas y white-capping.
5. Finalmente se define los archivos de salida, en esto se puede obtener información puntual, isocrona en relación a la profundidad, una grilla, entre otras posibilidades. Cada tipo de archivo de salida depende del tipo de grilla, pues en este caso se obtendrá información puntual, isocronas y grilla. También se obtiene un archivo “.dat” por cada modelo, los cuales son usados para una segunda propagación configurada con una grilla de 30 arcos de segundo y un menor tamaño de la grilla, para evitar un excesivo costo computacional a la hora de obtener resultados.



```

$*****HEADING*****
PROJ 'Memoria' 'M'
$ PURPOSE OF TEST: OBTENCION ESPECTROS ANIDACION SEGUN :0_20110101
$
$*****MODEL STARTUP*****
SET NAUTical
COORDinates SPHERical CCM
NUM STOPC dabs=0.005 drel=0.01 curvat=0.005 npnts=98.00 STAT mxitst=50 alfa=0.01
$
$*****MODEL INPUT*****
CGRID REGular -72.50 -33.50 0.00 1.10 1.00 66 60 CIRCLE 180 0.02 0.4 32
$
INPgrid BOTtom REGular -72.50625 -33.50625 0.0 291 241 0.0041667 0.0041667
READInp BOTtom -1. 'bat_final3.bot' 3 0 FREE
$
$*****INPUT BOUNDARY SPECTRAL CONDITIONS*****
BOUNDspec SEGMENT XY -71.50 -32.50 -72.00 -32.50 CONStant PAR 1.5 12.6 239.03
BOUNDspec SEGMENT XY -72.00 -32.50 -72.50 -32.50 CONStant PAR 2.17 13.57 225.58
BOUNDspec SEGMENT XY -72.50 -32.50 -72.50 -33.00 CONStant PAR 2.27 13.59 223.85
BOUNDspec SEGMENT XY -72.50 -33.00 -72.50 -33.50 CONStant PAR 2.280 13.45 224.64
BOUNDspec SEGMENT XY -72.50 -33.50 -72.00 -33.50 CONStant PAR 2.280 13.35 225.38
BOUNDspec SEGMENT XY -72.00 -33.50 -71.40 -33.50 CONStant PAR 2.280 13.22 229.5
BREAKing CONStANT 1.0 0.42
OFF QUADRUPL
OFF WCAPPING
$
$***** OUTPUT REQUESTS*****
NGRid 'A' -72.00 -33.25 0.0 0.60 0.50 72 60
NEStout 'A' 'data0/2011/data0_020110101.dat'
$
GROUP 'OUTPUT' SUBGRID 0 66 0 60
RAY 'RAY01' -72.50 -33.50 -71.40 -33.50 61 -72.50 -32.50 -71.40 -32.50
POINTs 'P050' -71.575 -33.00
ISOLine 'Veril050' 'RAY01' DEPTth 50
POINTs 'P100' -71.625 -33.00
ISOLine 'Veril100' 'RAY01' DEPTth 100
POINTs 'P150' -71.728 -33.00
ISOLine 'Veril150' 'RAY01' DEPTth 150
POINTs 'P200' -71.783 -33.00
ISOLine 'Veril200' 'RAY01' DEPTth 200
POINTs 'SHOA' -71.83 -33.12
$
OUTPut OPTIons BLOCK 9 66
BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'R0/2011/020110101.mat' LAY-OUT 1 XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'P050' NOHEADER 'R0/2011/P050_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'Veril050' NOHEADER 'R0/2011/050_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'P100' NOHEADER 'R0/2011/P100_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'Veril100' NOHEADER 'R0/2011/100_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'P150' NOHEADER 'R0/2011/P150_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'Veril150' NOHEADER 'R0/2011/150_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'P200' NOHEADER 'R0/2011/P200_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'Veril200' NOHEADER 'R0/2011/200_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'SHOA' NOHEADER 'R0/2011/SHOA_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNES
$
TEST 1,0
COMPUTE
STOP
$

```

Figura 3.4: Ejemplo de un modelo SWAN, primera propagación.

(Fuente: Elaboración propia.)

3.2.2 Segunda propagación.

Tiene por objetivo determinar cómo es el clima del oleaje para el área de interés a partir de la caracterización previa, hecha con una grilla de una resolución menor. Entonces, este proceso parte por la definición de una subgrilla¹, la cual está comprendida entre las longitudes 71,4°W a 72,0°W y las latitudes 32,75°S a 33,25°S. Respecto a la primera propagación, las principales diferencias apreciadas en la figura 3.5, son la lectura del archivo “.dat” como entrada y la salida de matrices a otra carpeta diferente.

```
*****HEADING*****
PROJ 'Memoria' 'M'
$ PURPOSE OF TEST: OBTENCION ESPECTROS ANIDACION SEGUN :0_20110101
$
*****MODEL STARTUP*****
SET NAUTICAL
COORDINATES SPHERICAL CCM
NUM STOPC dabs=0.005 drel=0.01 curvat=0.005 npnts=98.00 STAT mxitst=50 alfa=0.01
$
*****MODEL INPUT*****
CGRID REGULAR -72.00 -33.25 0.0 0.60 0.50 72 60 CIRCLE 180 0.02 0.4 32
$
INPGRID BOTTOM REGULAR -72.00625 -33.25625 0.0 145 121 0.0041667 0.0041667
READINP BOTTOM -1. 'bat_final4.bot' 3 0 FREE
$
*****INPUT BOUNDARY SPECTRAL CONDITIONS*****
BOUNDNEST1 NEST 'data0/2011/data0_020110101.dat'
BREAKING CONSTANT 1.0 0.42
OFF QUADRUPL
OFF WCAPPING
$
*****OUTPUT REQUESTS*****
$
GROUP 'OUTPUT' SUBGRID 0 72 0 60
RAY 'RAY01' -72.00 -33.25 -71.40 -33.25 61 -72.00 -32.75 -71.40 -32.75
POINTS 'P050' -71.575 -33.00
ISOLINE 'Veril050' 'RAY01' DEPTH 50
POINTS 'P100' -71.625 -33.00
ISOLINE 'Veril100' 'RAY01' DEPTH 100
POINTS 'P150' -71.728 -33.00
ISOLINE 'Veril150' 'RAY01' DEPTH 150
POINTS 'P200' -71.783 -33.00
ISOLINE 'Veril200' 'RAY01' DEPTH 200
POINTS 'SHOA' -71.83 -33.12
$
OUTPUT OPTIONS BLOCK 9 72
BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'R1/2011/020110101.mat' LAY-OUT 1 XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'P050' NOHEADER 'R1/2011/P050_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'Veril050' NOHEADER 'R1/2011/050_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'P100' NOHEADER 'R1/2011/P100_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'Veril100' NOHEADER 'R1/2011/100_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'P150' NOHEADER 'R1/2011/P150_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'Veril150' NOHEADER 'R1/2011/150_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'P200' NOHEADER 'R1/2011/P200_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'Veril200' NOHEADER 'R1/2011/200_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
TABLE 'SHOA' NOHEADER 'R1/2011/SHOA_020110101.mat' XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS
$
TEST 1,0
COMPUTE
STOP
$
```

Figura 3.5: Ejemplo de un modelo SWAN, segunda propagación.

(Fuente: Elaboración propia.)

¹Subgrilla: Espacio reducido que comprende a un subconjunto del contenido de una grilla más grande (STANDS4 LLC, 2001).

3.2.3 Programación Asociada

Respecto al tipo de archivo a leer (archivos GRB2), la lectura de estos archivos se realiza con el paquete pygrib en base al lenguaje de programación PYTHON, el cual es de acceso gratuito y de fácil implementación en distribuciones LINUX, WINDOWS, MAC OS, entre otros. Por su lado, un resumen de la programación asociada es lo observado en la figura 3.6, donde se aprecia en primer lugar un estudio previo de la zona, posteriormente un procesamiento de los datos provenientes del NOAA y GEBCO. En segundo lugar, se definen los archivos para la ejecución del modelo SWAN y finalmente se obtienen los resultados para ser procesados.

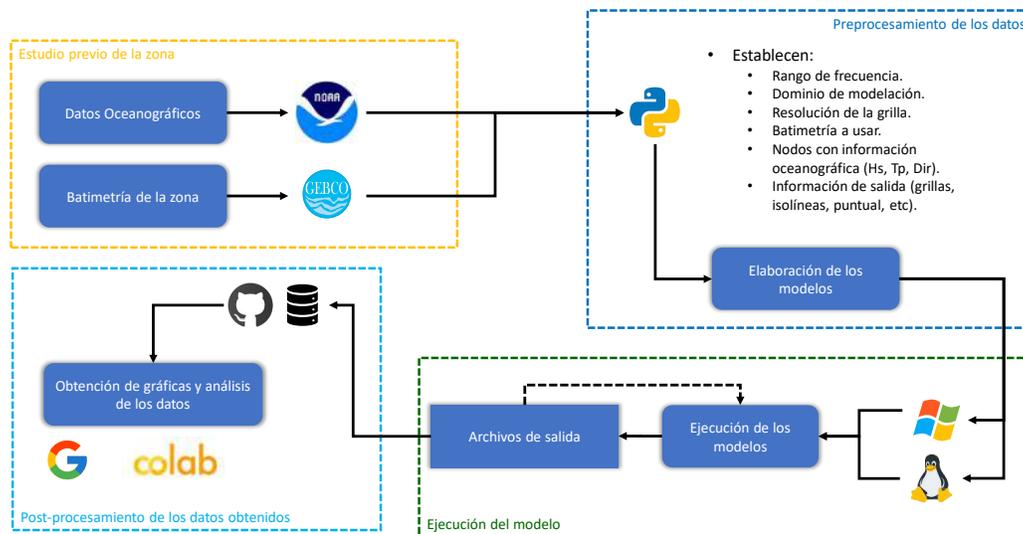


Figura 3.6: Esquema de programación asociada.

(Fuente: Elaboración propia.)

Este estudio previo de la zona consiste en:

- Definir límites de la zona de estudio, lo que es usado en el punto n° 3, cuando se establecen las condiciones de borde, tamaño y resolución de esta.
- Buscar, descargar y obtener información necesaria para la confección y ejecución del modelo en base a la zona delimitada. En este trabajo, la información para la confección de estos modelos proviene de GEBCO (batimetría) y NOAA (parámetros espectrales).
- La información descargada u obtenida por otros medios debe ser estudiada, para conocer todos los posibles puntos de generación del oleaje.
- Por otro lado, la información de la batimetría debe ser estudiada, considerando que es un factor importante a la hora de construir la grilla de modelación, lectura de la grilla, resolución máxima, etc.
- Debe existir un procesamiento de los datos a través de un software como Python, Matlab o cualquier programa que soporte estos archivos, en especial, se recuerda que para este trabajo se usó Python con el paquete pygrib para abrir los archivos que contienen la información espectral proveniente del modelo NWW3.
- Finalmente, se obtienen los archivos a modelar “.swn” y los archivos de batimetría.

Posterior a este estudio, que a su vez involucra los aspectos de descarga, codificación, lectura, análisis y escritura de estos archivos, se procede a la ejecución de estos modelos, que bajo la modalidad de algún código en BAT (WINDOWS) o BASH (LINUX) para una continua ejecución, se obtienen resultados para obtener resultados gráficos y archivos “.dat”, los cuales son necesarios para la segunda propagación que solo presentará archivos para obtener resultados gráficos. Finalmente, se detallan los tiempos de modelación y el total de modelos para cada año en la tabla 3.2, esto para un espectro temporal de 10 años con todos los estados de mar se tiene un total de 29216 modelos por propagación, traducido en la necesidad de 14 a 24 días para completar todas las modelaciones.

Tabla 3.2: Tiempos de modelación.

Año	N°	T° 1 [d]	T° 2 [d]	Total [d]
2009	2920	0,676-1,014	0,676-1,014	1,352-2,028
2010	2920	0,676-1,014	0,676-1,014	1,352-2,028
2011	2920	0,676-1,014	0,676-1,014	1,352-2,028
2012	2928	0,678-1,017	0,678-1,017	1,356-2,034
2013	2920	0,676-1,014	0,676-1,014	1,352-2,028
2014	2920	0,676-1,014	0,676-1,014	1,352-2,028
2015	2920	0,676-1,014	0,676-1,014	1,352-2,028
2016	2928	0,678-1,017	0,678-1,017	1,356-2,034
2017	2920	0,676-1,014	0,676-1,014	1,352-2,028
2018	2920	0,676-1,014	0,676-1,014	1,352-2,028
Total	29216	6,763-11,594	6,763-11,594	13,526-23,188

(Fuente: Elaboración Propia.)

3.3 Procesamiento y visualización.

El procesamiento de los datos estará ligado directamente al cómo se abrirán, leerán y codificará la información para obtener el producto final, que es el potencial energético undimotriz. Por lo mismo, la figura 3.7 muestra el proceso de cálculo del potencial energético undimotriz (P). A partir de la altura significativa (H_s), periodo peak (T_p) y profundidad (d).

Primeramente se parte por la ruta en rojo, siguiendo los siguientes pasos: 1) Se parte conociendo el periodo peak (T_p) y la profundidad (d). 2) Con el periodo peak se calcula el periodo energético (T_e), de acuerdo a la relación $T_e = 0,859T_p$. 3) Con el periodo energético y la profundidad, se determina la relación $k*d$, de acuerdo a las ecuaciones 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10, hay que considerar que la ecuación 2.9 está corregida por Fenton, para disminuir el cálculo asociado. 4) A partir de esta relación se obtiene el largo de la onda (L), la celeridad y el factor n, de acuerdo a las ecuaciones 2.6, 2.4 y 2.11 respectivamente. 5) Finalmente, se determina la celeridad de grupo.

En segundo lugar y siguiendo la línea en negro, se siguen los siguientes pasos: 1) Se parte conociendo la altura significativa del oleaje. 2) Con el parámetro anterior se conoce la altura de la ola media cuadrática a partir de la ecuación 3.1, pues está es la altura característica de los momentos con mayor energía de la onda. 3) A partir de la altura de la ola media cuadrática, se determina la energía del oleaje a partir de la ecuación 2.12. 4) Finalmente, con el valor anterior y la celeridad de grupo se obtiene el potencial energético undimotriz.

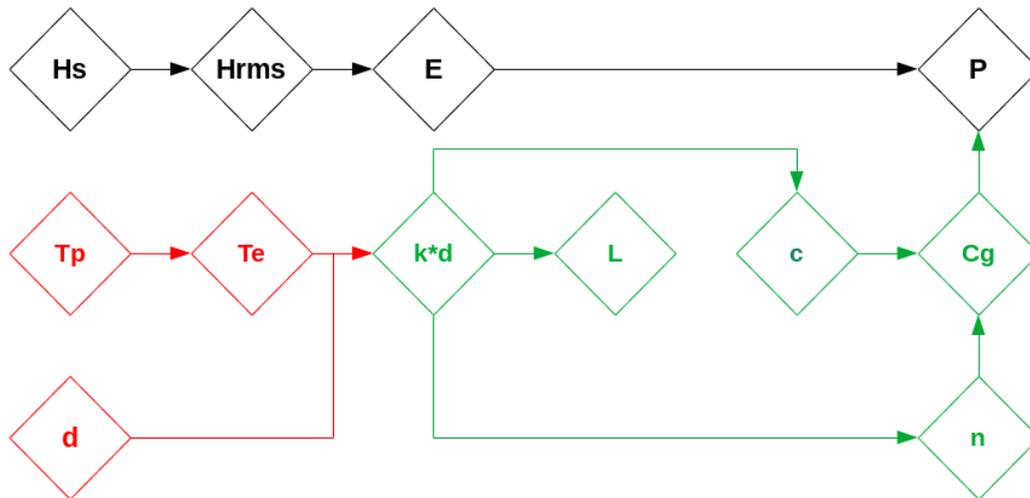


Figura 3.7: Esquema para obtención del potencial undimotriz.

(Fuente: Elaboración propia.)

$$Hrms = \frac{H_s}{\sqrt{2}} \quad (3.1)$$

3.3.1 Simbología de caracterización del oleaje.

De acuerdo con las figuras 3.4 y 3.5, se presentan los códigos para la escritura en cada propagación, se destaca en las tablas 3.3 y 3.4 las siglas para distinguir cada elemento a evaluar, esto sin considerar la grilla de los datos. A su vez, en la figura 3.2, correspondiente a la batimetría de interés, se observan en rojo los punto de evaluación, mientras que en el sector más cercano a la costa se observan las isoclinas de profundidad de 50 [m] en 50 [m], hasta los 200 [m], de aquí en adelante siguen hasta una profundidad de 1000 [m], para luego seguir de 500 [m] en 500 [m]. Hay que señalar que el punto corresponde al INH (Instituto Nacional de Hidráulica), pero se ha puesto el nombre del SHOA, ya que este es el ente encargado de la mayoría de las boyas del país.

Tabla 3.3: Siglas para cada veril.

Sigla	Comando para definir	Comando para obtener resultados	Detalle
V050	RAY - ISOLINE	TABLE	Veril a 50 [m] de profundidad.
V100	RAY - ISOLINE	TABLE	Veril a 100 [m] de profundidad.
V150	RAY - ISOLINE	TABLE	Veril a 150 [m] de profundidad.
V200	RAY - ISOLINE	TABLE	Veril a 200 [m] de profundidad.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 3.4: Siglas para cada veril.

Sigla	Longitud	Latitud	Comando para definir	Comando para obtener resultados	Detalle
P050	71,575°W	33,00°S	RAY - ISOLINE	TABLE	Punto a 50 [m] de profundidad.
P100	71,625°W	33,00°S	RAY - ISOLINE	TABLE	Punto a 100 [m] de profundidad.
P150	71,728°W	33,00°S	RAY - ISOLINE	TABLE	Punto a 150 [m] de profundidad.
P200	71,783°W	33,00°S	RAY - ISOLINE	TABLE	Punto a 200 [m] de profundidad.
SHOA	71,83°W	33,12°S	RAY - ISOLINE	TABLE	Punto de validación de datos.

(Fuente: Elaboración Propia.)

RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados para la validación de los datos provenientes del NOAA y los parámetros espectrales obtenidos del modelo SWAN, luego se exhibe la caracterización climatológica del oleaje, usando los más parámetros importantes como la altura significativa, periodo peak y dirección peak del oleaje. Finalmente, se muestran los resultados de la variabilidad del potencial energético undimotriz de manera espacial y temporal.

4.1 Validación de los datos.

De acuerdo a la información disponible para validar los datos provenientes del NOAA, se ha puesto en consideración usar los datos del proyecto “Atlas del Oleaje” desarrollado principalmente por la Universidad de Valparaíso a través de la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica y al Centro de Investigación y Modelamiento de Fenómenos Aleatorios - Valparaíso (CIMFAV) (Universidad de Valparaíso, 2016). Por otro lado, de acuerdo al proyecto “Catastro del Recurso Energético Asociado a Oleaje para el Apoyo a la Evaluación de Proyectos de Generación de Energía Undimotriz” (Innova Chile et al., 2017), se procederá a validar los datos generados por el modelo SWAN con los datos de la boya TRIAXYS de Curaumilla.

4.1.1 NOAA.

El “Atlas de Oleaje de Chile” fue generado con el modelo Wavewatch III v.4.18, calibrado a partir de mediciones de altimetría satelital y de boyas, y corregido por errores sistemáticos. Presenta información existente entre los años 1980 a 2015, donde se logró caracterizar el clima de oleaje operacional y extremo, incluyendo además, aspectos técnicos avanzados como duración de marejadas, trayectoria de tormentas, forma espectral, multimodalidad e incertidumbre, entre otros (Universidad de Valparaíso, 2016). Para validar, se extrae la información del nodo ubicado en la latitud 33°S y longitud $72,5^{\circ}\text{W}$, el cual corresponde a uno de los nodos usados, presentándose las siguientes series de tiempo, en primer lugar en la figura 4.1 se presenta la serie de tiempo para el potencial energético undimotriz, por otro lado, en la figura 4.2 se presentan las series de tiempo para la altura significativa, periodo peak y dirección media (o promedio).

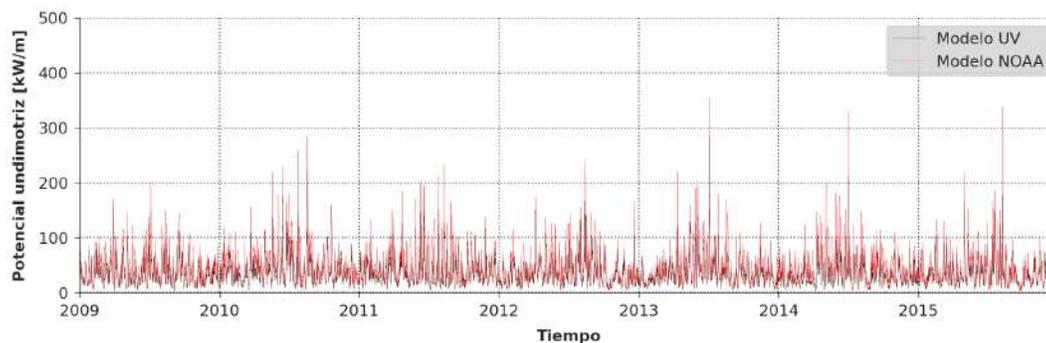


Figura 4.1: Series de tiempo para los parámetros evaluados, Atlas del Oleaje.

(Fuente: Elaboración Propia.)

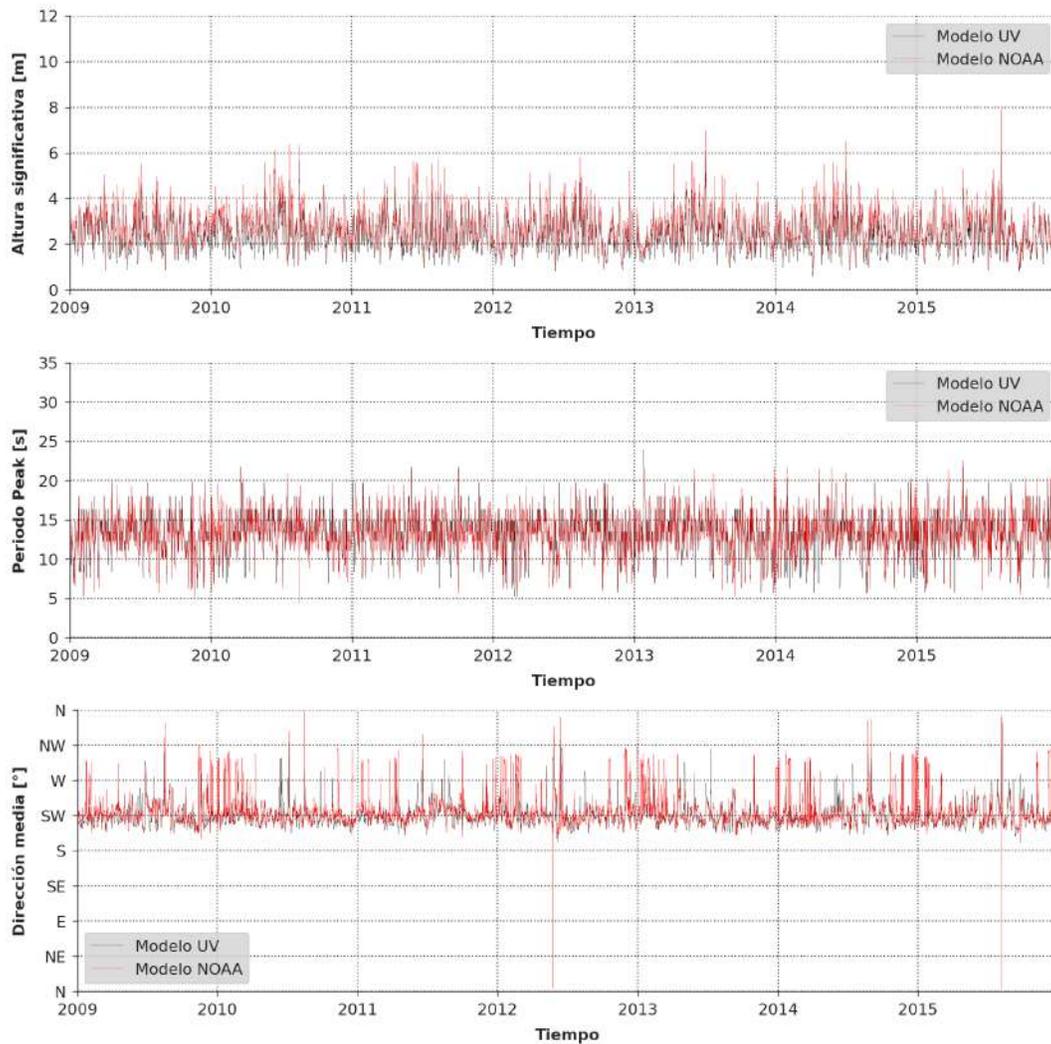


Figura 4.2: Series de tiempo para los parámetros evaluados, Atlas del Oleaje.

(Fuente: Elaboración Propia.)

De estas figuras, se observa una mayor similitud entre la altura del oleaje y el potencial undimotriz, lo cual es corroborado en la tabla 4.1, que muestra el resumen estadístico para la validación de los datos del NOAA con los datos del atlas del oleaje. Primeramente, se considera a “X” los valores correspondientes al “nodo 8” del Atlas del oleaje, mientras que “Y” son los valores correspondientes al modelo NWW3 del NOAA. En esta se presenta el promedio, la desviación estándar, los valores máximos observados de cada variable. Después de mostrar los estadígrafos anteriores, se observan el BIAS, RMSE, SI, slope, el coeficiente de correlación lineal (r) y el coeficiente de determinación (R2).

Tabla 4.1: Resumen estadístico validación datos NOAA con Atlas del oleaje.

Parámetro	\bar{X}	\bar{Y}	$\sigma(X)$	$\sigma(Y)$	max(X)	max(Y)	BIAS	RMSE	SI	slope	r	R2
Hs [m]	2,394	2,760	0,696	0,777	6,127	7,910	0,366	0,473	0,198	1,030	0,923	0,851
Dir [°]	224,832	229,630	14,070	19,795	342,727	359,090	4,798	19,309	0,086	0,606	0,431	0,186
Tp [s]	13,262	13,178	2,232	2,161	23,955	22,620	-0,084	1,805	0,136	0,642	0,663	0,440
P [kW/h]	35,375	46,661	23,250	31,421	284,442	356,020	11,286	18,223	0,515	1,224	0,906	0,820

(Fuente: Elaboración Propia.)

De la tabla anterior, se obtiene:

- El BIAS determina que el periodo peak proveniente del NOAA se encuentra subestimado, es decir, es menor al periodo peak del Atlas del oleaje, al contrario, el resto de los parámetros están sobrestimados, es decir, están por sobre los valores modelados en el Atlas del oleaje. A su vez, el NBIAS es de 15,29% para la altura significativa, 2,13% para la dirección del oleaje, -0,63% para el periodo peak y 31,90% para el potencial energético undimotriz, demostrando que el último parámetro es aquel que se encuentra más sobrestimado.
- Respecto al RMSE y SI, se determina que la dirección del oleaje presenta la menor variabilidad en relación al promedio de los datos con un scatter index de 8,6%, al contrario el potencial energético undimotriz es aquel que presenta una mayor variabilidad en relación al promedio con un scatter index de 51,5%.
- Frente a la correlación lineal, es decir, determinar la existencia de una relación lineal (directamente o inversamente proporcional), la cual existe para todos los parámetros, no obstante, es mayor en la altura significativa y el potencial energético undimotriz con valores de 0,923 [-] y 0,906 [-], respectivamente.
- Finalmente, el coeficiente de determinación (R^2) presenta un valor de 0,851 [-] y 0,820 [-] para la altura significativa y el potencial undimotriz, respectivamente. Por otro lado, la dirección y el periodo peak presentan valores cercanos a 0, es decir, demuestran que estos parámetros pueden presentar algún grado de error desde el modelo NWW3, pero al comparar con la altura y el potencial no presentan una gran influencia en el cálculo del potencial energético undimotriz.

Por lo tanto, se cumple el primer objetivo de “Recopilar y validar los parámetros de oleaje simulados por el modelo WAVEWATCH III, para ser utilizados como datos de entrada al modelo SWAN”, pues el conjunto de estadígrafos aporta al cumplimiento de este objetivo. Además, en la figura 4.3 que representa los gráficos de dispersión entre los datos del NOAA y los datos del Atlas del oleaje, para la altura significativa y el potencial undimotriz.

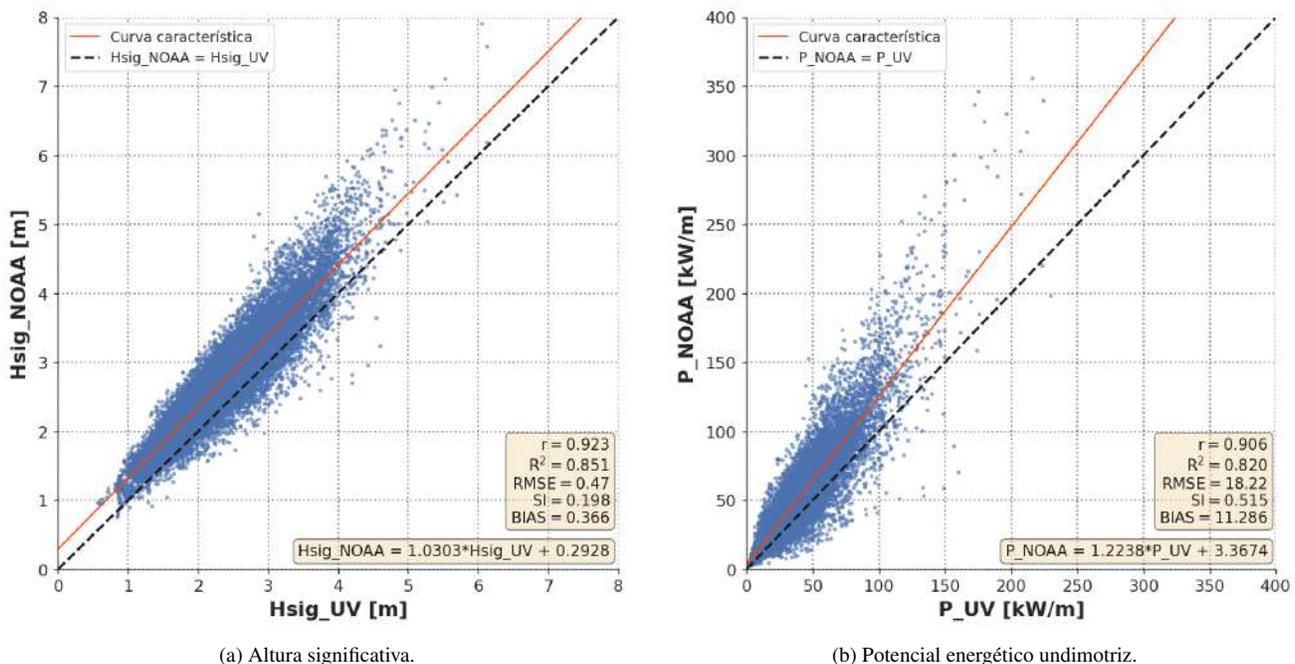


Figura 4.3: Gráficos de dispersión para los parámetros principales.

(Fuente: Elaboración Propia.)

4.1.2 SWAN.

De acuerdo con el proyecto “Catastro del Recurso Energético Asociado a Oleaje para el Apoyo a la Evaluación de Proyectos de Generación de Energía Undimotriz”, el cual tiene por objetivo el fortalecer el proceso de implementación de la ERNC de carácter undimotriz a nivel zonal, a través de la valoración del recurso disponible utilizando campañas de terreno de largo plazo en sitios específicos y modelación numérica calibrada, se obtiene la información de la boya TRIAXYS de la localidad de Curaumilla, la cual se encuentra localizada en la latitud $33,12^{\circ}\text{S}$ y longitud $71,83^{\circ}\text{W}$, de acuerdo con la figura 3.1 (Innova Chile et al., 2017).

Esta información va desde 01/08/2011 hasta 12/12/2013, pero al no ser un registro continuo se procede a usar la información desde Noviembre de 2012 en adelante. Es por esto que las figuras 4.4 y 4.5 presentan las series de tiempo de los datos provenientes de la boya (en rojo) y los modelos (en negro) para el rango temporal continuo, considerando los parámetros principales (Altura significativa, Periodo Peak y Dirección media del oleaje) y el potencial energético undimotriz.

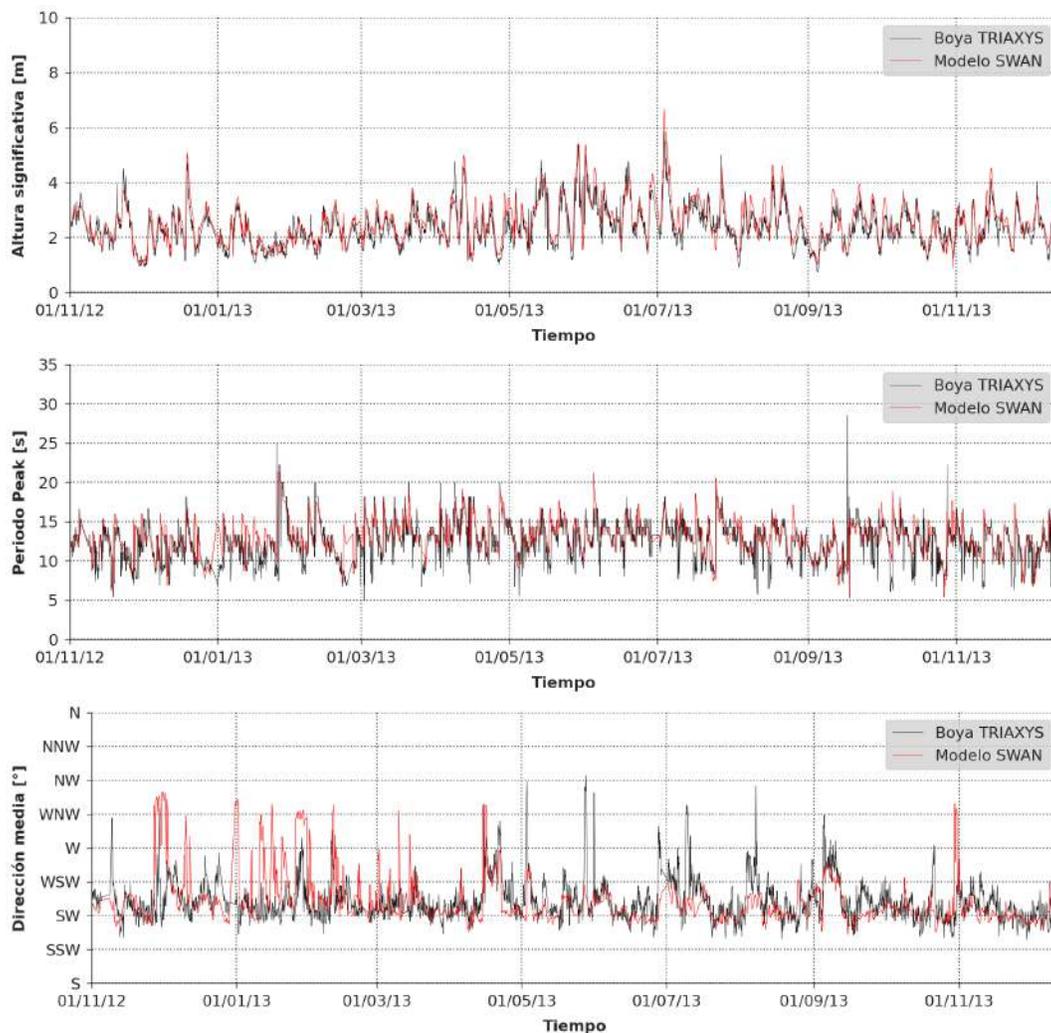


Figura 4.4: Series de tiempo para los parámetros espectrales.

(Fuente: Elaboración Propia.)

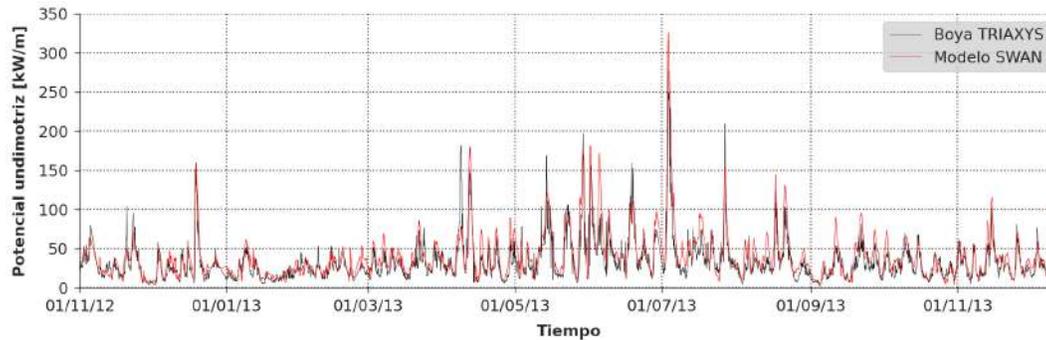


Figura 4.5: Series de tiempo para el potencial undimotriz.

(Fuente: Elaboración Propia.)

De estas figuras, se observa una mayor similitud entre la altura del oleaje y el potencial undimotriz, lo cual es corroborado en la tabla 4.2. Pues, en primer lugar se considera a “X” los valores de la boya de Curaumilla, mientras que “Y” son los valores correspondientes al modelo SWAN. De este se presenta los siguientes estimadores: el promedio, la desviación estándar, los valores máximos observados de cada variable, BIAS, RMSE, SI, slope, el coeficiente de correlación lineal (r) y el coeficiente de determinación (R^2).

Tabla 4.2: Resumen estadístico validación datos SWAN.

Parámetro	\bar{X}	\bar{Y}	$\sigma(X)$	$\sigma(Y)$	max(X)	max(Y)	BIAS	RMSE	SI	slope	r	R2
Hs [m]	2,355	2,516	0,730	0,765	5,846	6,641	0,162	0,377	0,160	0,940	0,897	0,801
Dir [°]	234,482	234,281	13,200	16,572	318,304	307,300	-0,200	17,302	0,074	0,429	0,342	0,098
Tp [s]	12,408	13,002	2,596	2,131	28,571	21,320	0,595	2,378	0,192	0,444	0,541	0,316
P [kW/h]	32,376	38,957	26,015	29,594	277,572	326,256	6,581	15,555	0,480	1,001	0,879	0,772

(Fuente: Elaboración Propia.)

De la tabla anterior, se obtiene:

- El BIAS determina que la dirección del oleaje resultante del modelo SWAN se encuentra subestimada en relación a la dirección del oleaje registrada por la boya TRIAXYS, al contrario, el resto de los parámetros están sobrestimados, es decir, que los valores modelados con SWAN están por sobre los valores registrados en la boya TRIAXYS. A su vez, el NBIAS es de 6,88% para la altura significativa, -0,085% para la dirección del oleaje, 4,80% para el periodo peak y 20,33% para el potencial energético undimotriz, demostrando que el último parámetro es aquel que se encuentra más sobrestimado.
- Respecto al RMSE y SI, se determina que la dirección del oleaje presenta la menor variabilidad en relación al promedio de los datos con un scatter index de 7,4%, al contrario el potencial energético undimotriz es aquel que presenta una mayor variabilidad en relación al promedio con un scatter index de 48,0%.
- Frente a la correlación lineal, es decir, determinar la existencia de una relación lineal (directamente o inversamente proporcional), la cual existe para todos los parámetros, no obstante, es mayor en la altura significativa y el potencial energético undimotriz con valores de 0,897 [-] y 0,879 [-], respectivamente.
- Finalmente, el coeficiente de determinación (R^2) presenta un valor de 0,801 [-] y 0,772 [-] para la altura significativa y el potencial undimotriz, respectivamente. Por otro lado, la dirección y el periodo peak presentan valores cercanos a 0, es decir, demuestran que estos parámetros pueden presentar algún grado de error desde el modelo NWW3, y que se transmite en la propagación del oleaje al ser usado como forzante en el modelo SWAN, pero al comparar con la altura y el potencial no presentan una gran influencia en el cálculo del potencial energético undimotriz.

Por lo tanto, se cumple el segundo objetivo de “Implementar y validar el modelo de SWAN para la obtención de la climatología del oleaje en aguas someras de la región de Valparaíso”, pues el conjunto de estadígrafos aporta al cumplimiento de este objetivo. Además, en la figura 4.6 que representa los gráficos de dispersión entre los datos modelados con SWAN y los datos registrados en la boya TRIAXYS, para la altura significativa y el potencial energético undimotriz, corrobora el cumplimiento de este.

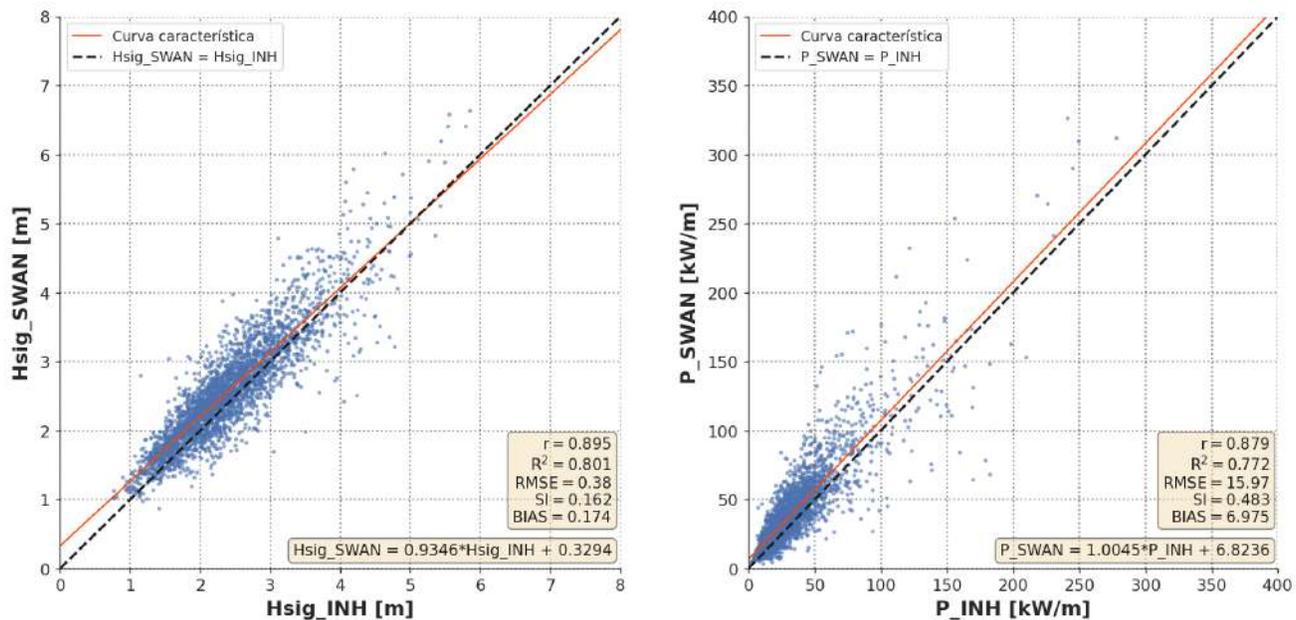


Figura 4.6: Gráficos de dispersión para la Hs (izq.) y el potencial undimotriz (der.).

(Fuente: Elaboración Propia.)

4.2 Caracterización climatológica del oleaje

Para entender la variabilidad del potencial energético undimotriz en la zona de estudio, es indispensable comprender el comportamiento de los parámetros que afectan a la propagación del oleaje dentro de la zona de estudio, para esto se presenta la caracterización climatológica del oleaje considerando a la altura significativa, el periodo peak y la dirección del oleaje como los parámetros principales que afectan en la propagación de este, sin considerar la profundidad que fue mostrada en la figura 3.2. Esta caracterización en primer lugar es para la grilla de los datos, posteriormente se considerará la variabilidad longitudinal y latitudinal (considerando solo datos de la latitud 33°S para la variabilidad longitudinal), para finalizar con los datos provenientes de 4 puntos especificados en la figura 3.2, la cual muestra la posición de estos puntos.

4.2.1 Área de interés.

En primer lugar, se exhiben el resumen estadístico en la tabla 4.3 para cada uno de los parámetros del clima del oleaje en el área de estudio. Posteriormente, se presentan los resultados para el mapa completo, donde la figura 4.7 es la distribución espacial para la mediana (P50) de la altura significativa y en la figura 4.8 el periodo peak del oleaje, incluyendo la dirección media del oleaje. Estas figuras, al igual que otras, está desarrollada según los trabajos “Offshore and inshore wave energy assessment: Asturias (Spain)” (Iglesias and Carballo, 2010a) y “Wave energy potential along the Death Coast (Spain)” (Iglesias and Carballo, 2009).

Se destaca en la figura 4.7 una dirección suroeste predominantemente, con ciertas desviaciones cuando el oleaje se acerca al borde costero, además en este se presenta una menor altura significativa con valores aproximados a 0,5 [m] en las bahías del área de interés, mientras que el periodo peak presenta valores mayores a 13,60 [s]. Además, en el anexo 6.2.3 se presenta la distribución espacial de la mediana de la altura significativa en la figura 6.13 y el periodo peak en la figura 6.14 para cada bahía, esto para apreciar de más cerca el como la energía del oleaje (y las componentes que lo componen) se ve modificada por la geomorfología costera y los procesos que involucrados en esta, como lo son el asomeramiento, reflexión, entre otros.

Tabla 4.3: Resumen estadístico para la grilla.

Variable	Mínimo	P25	P50	P75	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Altura significativa [m]	0	1,838	2,308	2,825	7,236	2,366	0,767	0,324
Dirección media [°]	205,114	227,096	234,695	246,503	355,722	240,216	19,520	0,081
Periodo peak [s]	4,285	12,003	13,248	14,562	25,407	13,263	2,214	0,167

(Fuente: Elaboración Propia.)

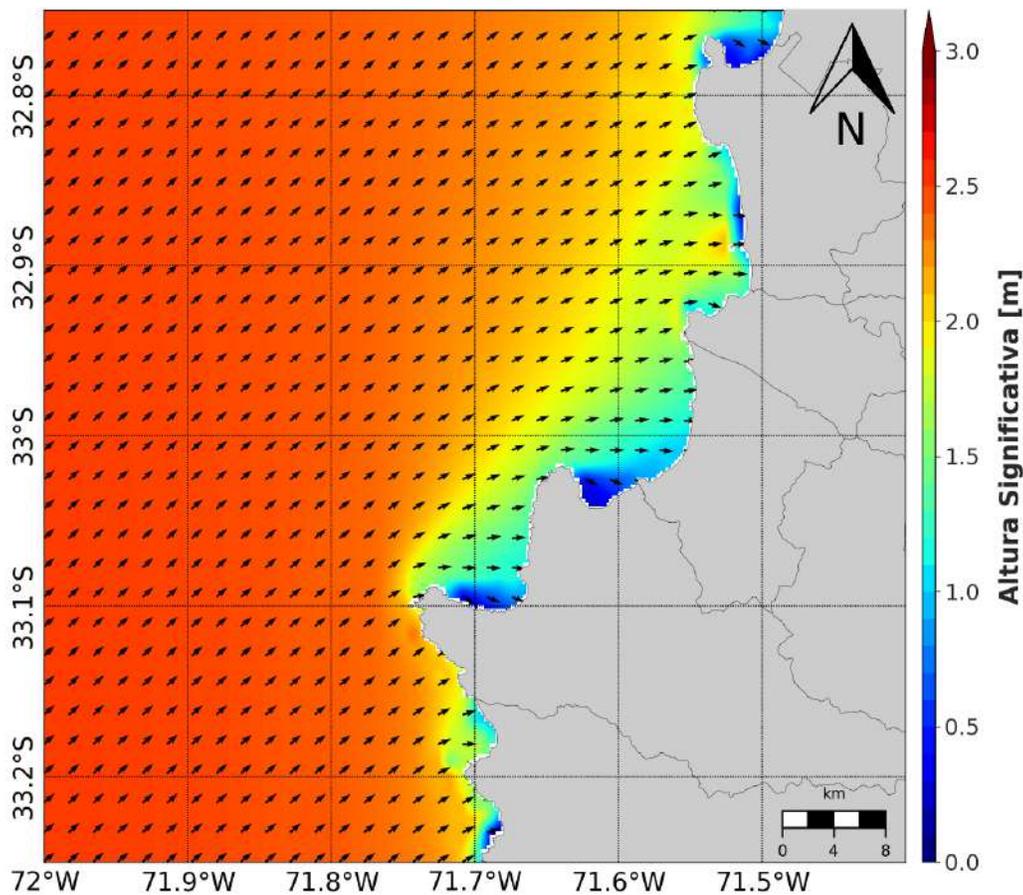


Figura 4.7: Distribución espacial para el P50 de la altura significativa.

(Fuente: Elaboración Propia.)

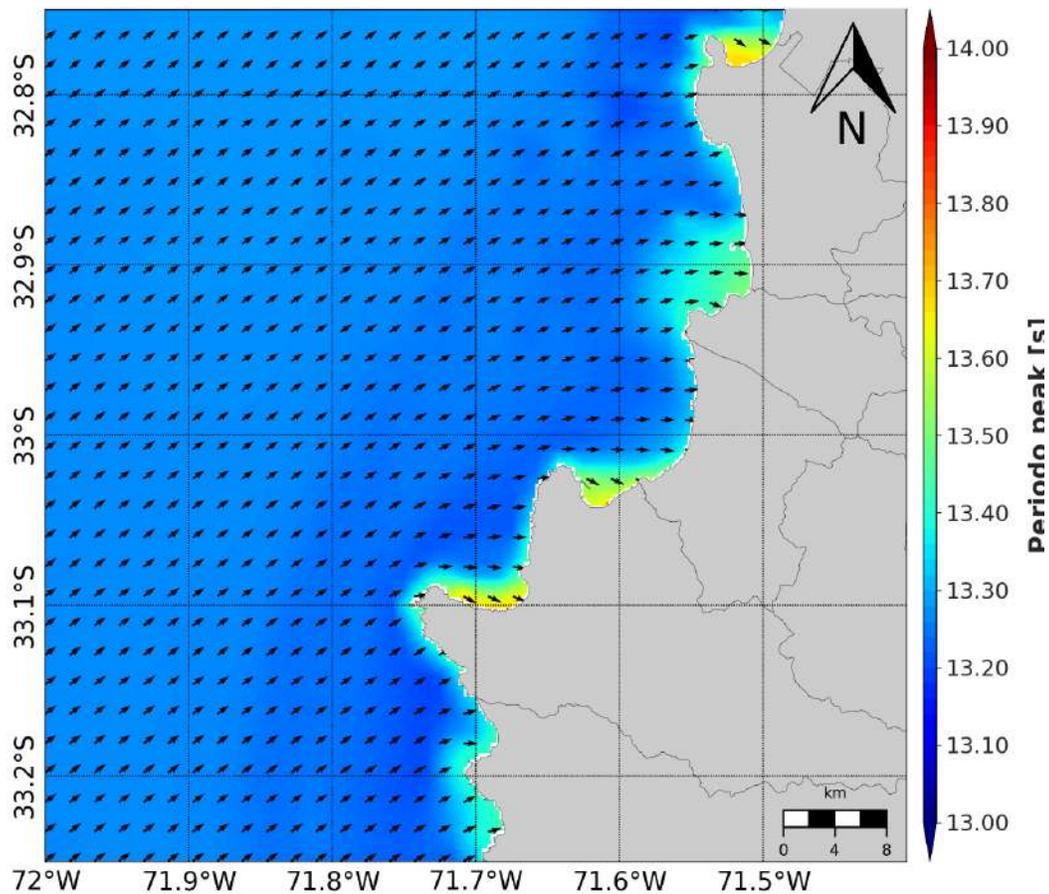


Figura 4.8: Distribución espacial para el P50 del periodo peak.
(Fuente: Elaboración Propia.)

4.2.2 Latitudinal y longitudinal.

A continuación, se caracteriza longitudinalmente el clima del oleaje a través de series longitudinales, es decir, series bajo la escala espacial correspondiente a la longitud, representando el percentil 5, 95 y el promedio de los datos. Los resultados son obtenidos de acuerdo a los datos contenidos en la latitud 33,00°S, ya que así se evita la variabilidad otorgada por la geomorfología costera misma de la zona, dado que el oleaje no está afecto de la misma manera a los procesos de transformación. Para esto se consta de la tabla 4.4 donde se presenta el resumen estadístico y en la figura 4.9 se exponen las series longitudinales para la altura significativa, periodo peak y la dirección del oleaje.

Tabla 4.4: Resumen estadístico de la variabilidad longitudinal en la latitud 33°S.

Variable	Mínimo	P25	P50	P75	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coficiente de variación
Altura significativa [m]	0,276	1,638	2,159	2,719	7,215	2,221	0,803	0,361
Dirección media [°S]	207,827	228,292	238,335	257,463	331,207	244,125	20,367	0,083
Periodo Peak [s]	4,293	11,994	13,240	14,553	25,125	13,252	2,215	0,167

(Fuente: Elaboración Propia.)

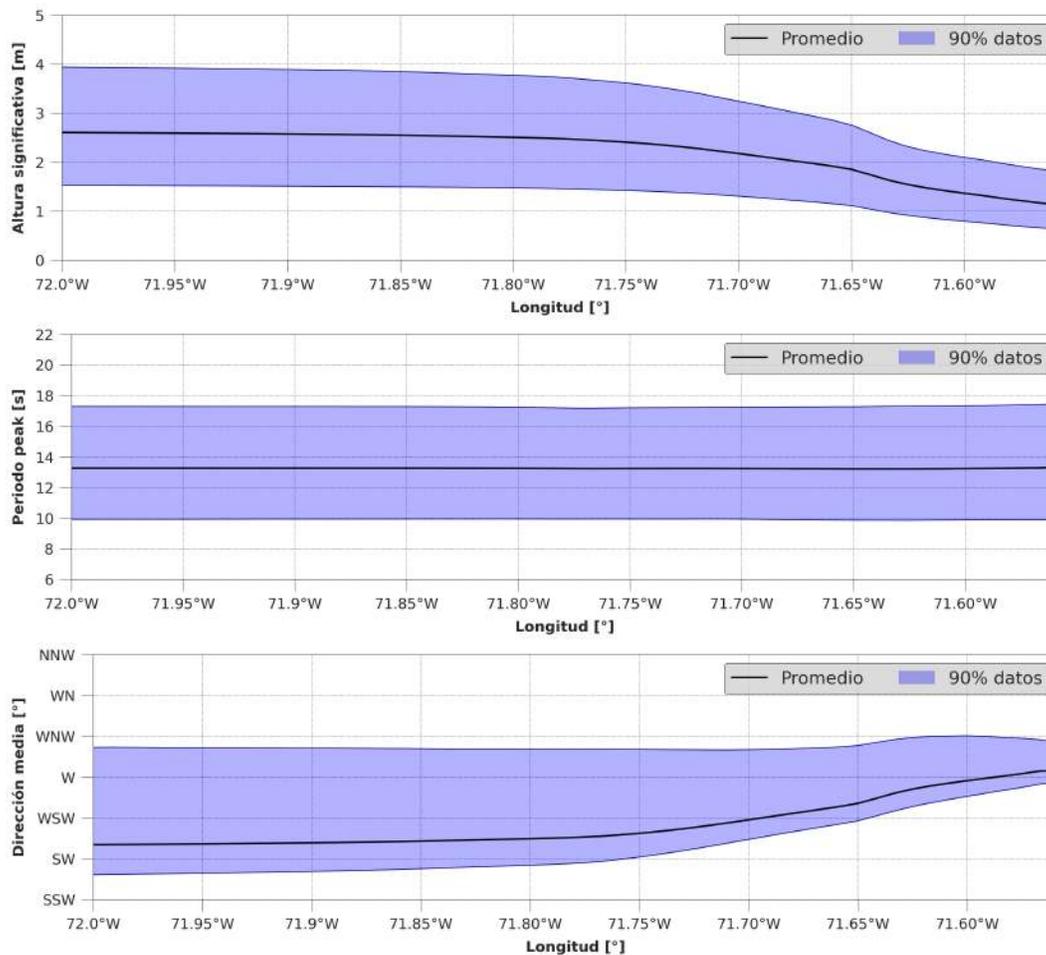


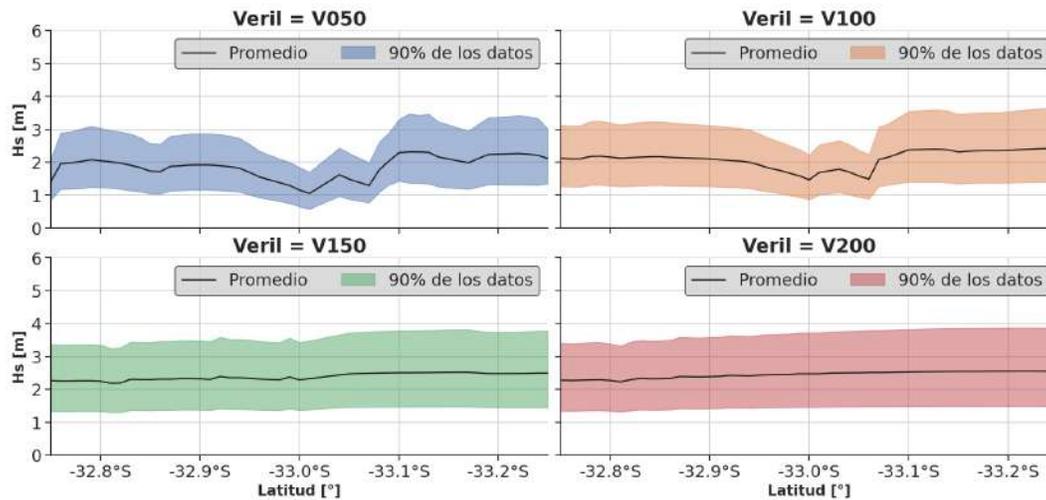
Figura 4.9: Serie longitudinal para los parámetros principales.
(Fuente: Elaboración Propia.)

Por otro lado, en la figura 4.10 se exponen las series latitudinales que poseen información para el 90% de los datos (desde el percentil 5 a 95), y el promedio de los datos a diferentes líneas bajo una profundidad de 50 [m], 100 [m], 150 [m] y 200 [m] para la altura significativa, periodo peak y la dirección media del oleaje. En la tabla 4.5 se presenta el resumen estadístico para la variabilidad latitudinal de cada variable.

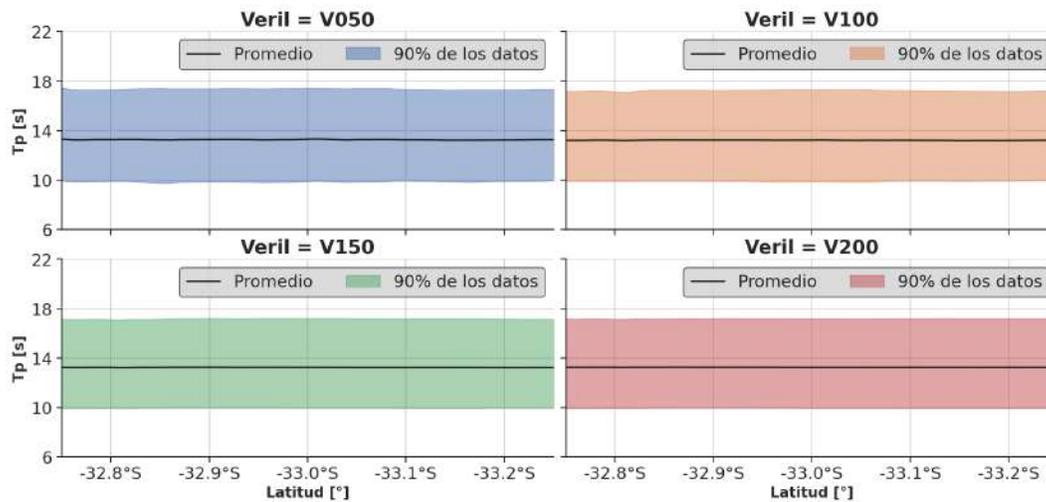
Tabla 4.5: Resumen estadístico para la variación latitudinal.

Variable	Veril	Mínimo	P25	P50	P75	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coficiente de variación
Hs [m]	V050	0,237	1,439	1,819	2,253	6,316	1,884	0,629	0,334
	V100	0,306	1,631	2,030	2,488	6,630	2,102	0,658	0,313
	V150	0,310	1,894	2,314	2,787	6,892	2,383	0,688	0,289
	V200	0,311	1,940	2,374	2,861	6,979	2,444	0,706	0,289
Tp [s]	V050	4,292	11,980	13,240	14,570	25,240	13,261	2,247	0,169
	V100	4,294	11,970	13,210	14,520	25,170	13,222	2,209	0,167
	V150	4,294	12,000	13,240	14,540	24,990	13,240	2,189	0,165
	V200	4,294	12,000	13,240	14,550	24,880	13,247	2,192	0,165
Dir [°]	V050	215,100	243,800	251,600	261,100	324,100	253,491	14,395	0,057
	V100	212,900	237,600	244,300	254,400	323,000	247,449	15,475	0,063
	V150	210,200	230,700	236,200	242,400	326,200	239,599	16,131	0,067
	V200	207,400	228,200	234,200	240,800	327,700	237,864	16,791	0,071

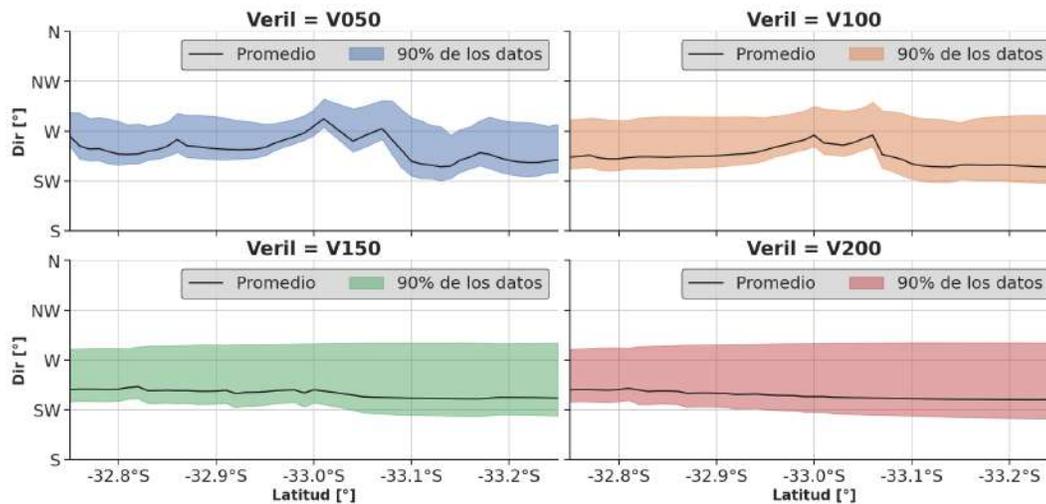
(Fuente: Elaboración Propia.)



(a) Altura significativa.



(b) Periodo peak.



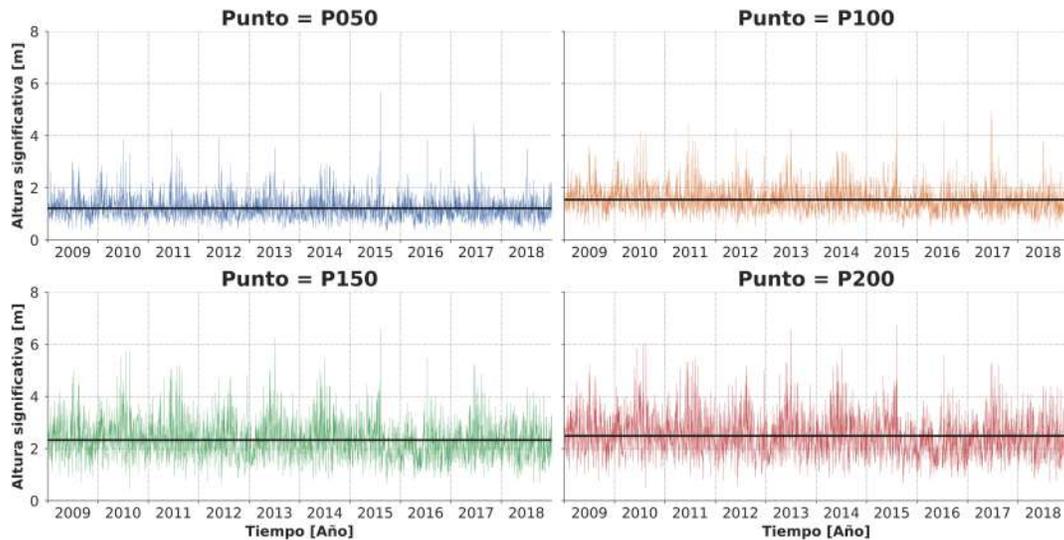
(c) Dirección peak.

Figura 4.10: Series latitudinales para los parámetros principales.

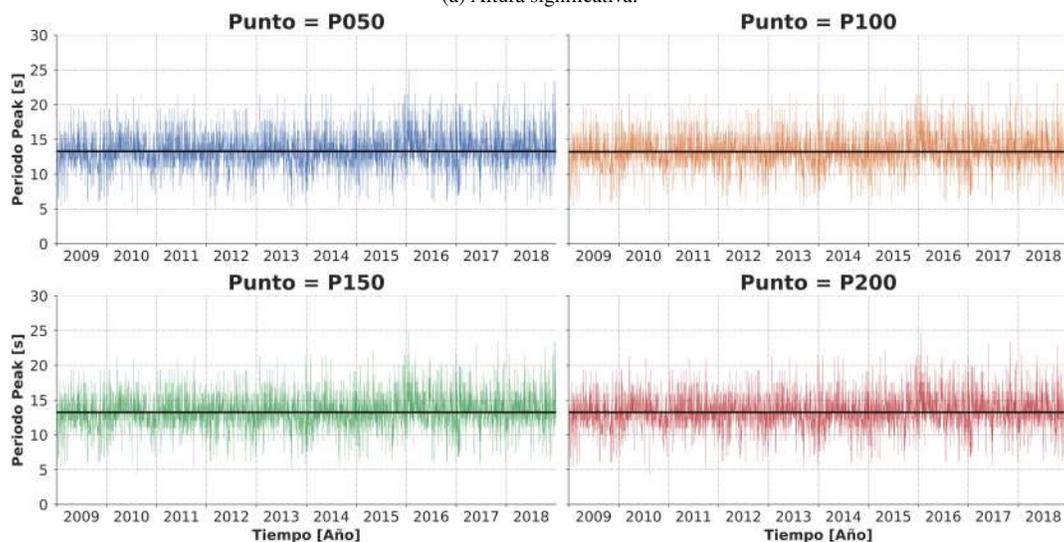
(Fuente: Elaboración Propia.)

4.2.3 Puntual.

Se exhiben los resultados para cada uno de los puntos estipulados en la figura 3.2 y descrita su posición en la sección 3.3.1, donde se incluye los parámetros mostrados con anterioridad, es decir, la altura significativa, periodo peak y la dirección media del oleaje. Para esto, se exponen las series de tiempo en las figuras 4.11 y 4.12, destacándose el promedio de todos estos datos en negro, mientras que, para identificar cada punto se opta por presentar estos con colores diferentes. Finalmente, en la tabla 4.6 se presenta el resumen de cada variable y para cada punto estudiado.



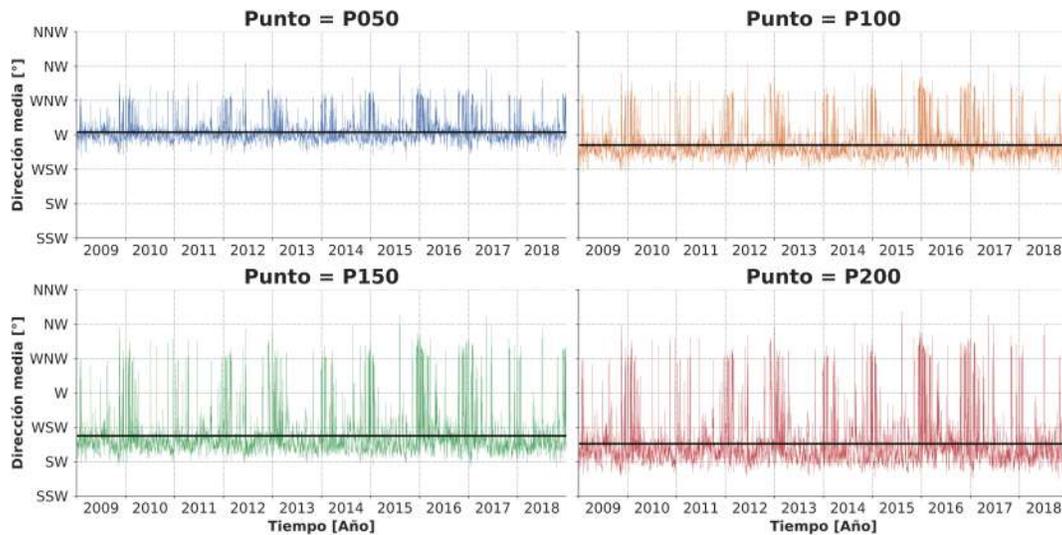
(a) Altura significativa.



(b) Periodo peak

Figura 4.11: Series de tiempo para los parámetros principales, parte 1.

(Fuente: Elaboración Propia.)



(a) Dirección peak.

Figura 4.12: Series de tiempo para los parámetros principales, parte 2.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 4.6: Resumen estadístico de cada punto.

Variable	Punto	Mínimo	P25	P50	P75	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coficiente de variación
Hs [m]	P050	0,312	0,948	1,159	1,410	5,630	1,216	0,397	0,326
	P100	0,383	1,238	1,488	1,780	6,195	1,544	0,455	0,295
	P150	0,423	1,860	2,262	2,710	6,623	2,326	0,658	0,283
	P200	0,450	1,979	2,420	2,908	6,774	2,487	0,709	0,285
Tp [s]	P050	4,294	11,980	13,240	14,570	25,090	13,270	2,253	0,170
	P100	4,294	11,970	13,210	14,530	24,970	13,222	2,233	0,169
	P150	4,294	12,000	13,240	14,543	24,890	13,245	2,196	0,166
	P200	4,294	12,000	13,240	14,550	24,740	13,247	2,194	0,166
Dir [°]	P050	253,200	267,500	270,100	273,400	317,500	271,829	7,263	0,027
	P100	243,000	257,700	260,800	264,800	318,500	263,362	10,164	0,039
	P150	221,100	233,800	237,400	242,800	321,600	241,786	14,959	0,062
	P200	213,500	227,100	231,700	238,500	323,300	236,616	16,980	0,072

(Fuente: Elaboración Propia.)

De las series de tiempo mostradas en las figuras 4.11 y 4.12, junto a la tabla 4.6, se observa que la altura significativa del oleaje a medida que la profundidad aumenta está también experimenta un incremento en su valor. No es así para el caso del periodo peak, que se mantiene constante en los cuatro puntos evaluados. Finalmente, la dirección del oleaje es predominante en aguas profundas es SW, pero al acercase a las costas cambia a una dirección W.

Para finalizar la caracterización climatológica en los puntos seleccionados, en la figura 4.13 se presentan las rosas de la altura significativa y el periodo peak del oleaje, dado que el objetivo de estas es ejemplificar la relación con la dirección del oleaje. Entonces, se observa en ambos gráficos como la dirección desde un punto a mayor profundidad está caracterizada por una dirección suroeste, mientras que al moverse a un punto más cercano a la costa esta se desvía a una dirección oeste. Ahora, en relación a cada variable, se espera a profundidades más bajas, alturas significativas menores, mientras que el periodo es uniforme para todos los puntos evaluados. Además, en las tablas 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 se presentan las tablas de frecuencia para la dirección y la altura significativa, mientras que en las tablas 6.5, 6.6, 6.7 y 6.8 se presentan las tablas de frecuencias para la dirección y el periodo peak.

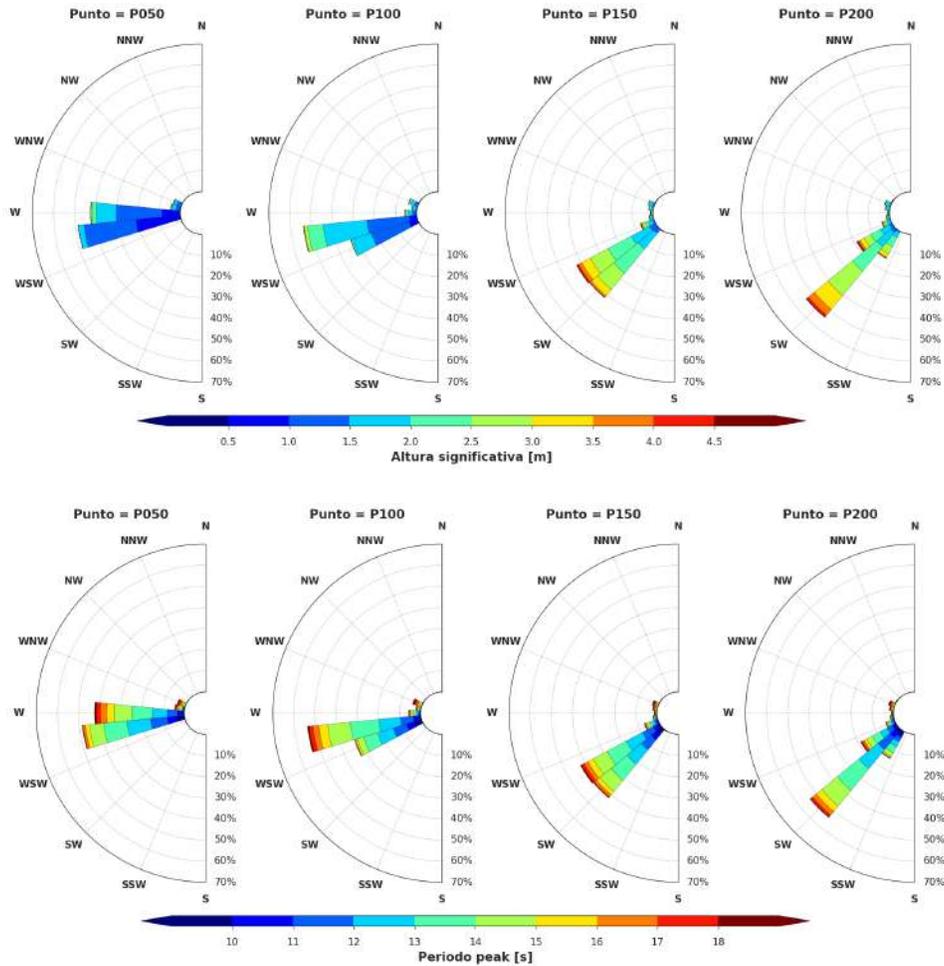


Figura 4.13: Rosas para la altura significativa y el periodo peak del oleaje.
(Fuente: Elaboración Propia.)

Por otro lado, en los anexos en la sección 6.2.3 se presentan los resultados para la longitud de onda, la profundidad relativa y el peralte. La grilla se caracteriza por bajas longitudes de onda y un peralte más alto, no obstante, las bahías se caracterizan por altas longitudes de onda y un peralte más bajo en relación al resto del borde costero. Por su lado, la profundidad relativa presenta algunos trozos del borde costero caracterizados por ser aguas profundas, mientras que otros como la bahía de Concón presentan una mayor área de aguas de transición, pues los sedimentos del río Aconcagua contribuyen a que la profundidad en este sea menor, con valores menores a 50 [m] según se observe en la figura 3.2, donde se representa la batimetría. Mientras que en la figura 6.9 del anexo 6.2.3, se observan los histogramas para la altura significativa y el periodo peak en cada punto, corroborando las aseveraciones acerca del comportamiento de la altura significativa y el periodo peak, pues la altura significativa se va desplazando hacia la derecha, es decir, va aumentando el valor de la altura significativa observada, mientras que el periodo peak, este se mantiene constante para cualquier punto evaluado.

Por otro parte, respecto a la variabilidad temporal en cada punto, donde las figuras 6.10, 6.11 y 6.12 del anexo 6.2.3 se muestra la variabilidad anual, mensual y estacional para la altura significativa, periodo peak y dirección promedio respectivamente, determinando lo siguiente:

1. Altura significativa:

- La variación estacional registra para el invierno una mayor probabilidad de ocurrencia a que sean superiores al resto de las otras estaciones. A su vez, en primavera se presentan las menores alturas significativas. Ahora, comparando el promedio y la mediana de los datos, en los meses de invierno se observa una mayor diferencia.
- La variación mensual registra en Agosto las alturas significativas más altas, en comparación al resto de los meses. Además, al comparar la mediana con el promedio de los datos, los meses de Mayo, Junio, Julio y Agosto presentan una mayor diferencia, confirmando lo visto anteriormente y evidenciando la presencia de condiciones extremas en el oleaje, y por eso mismo, el promedio de los datos tiende a ser superior que en el resto de los meses.
- La variación anual registra un máximo el 2015, para cualquier punto evaluado. Por otro lado, al comparar la mediana con el promedio de los datos, se determina que la altura está positivamente sesgada.

2. Periodo peak:

- La variación estacional no presenta grandes variaciones, no obstante, para los casos menos probables el máximo registrado es en Verano, mientras que los mínimos en Invierno.
- La variación mensual no presenta grandes diferencias al comparar los diferentes puntos. Respecto a las diferencias entre la mediana y el promedio, no se puede aseverar que el promedio esta por sobre la mediana en todo momento. Ahora, considerando los casos menos probables, se observa una dirección peak máxima en el mes de Enero, mientras que en el mes de Agosto se observa una dirección peak mínima para estos casos, lo cual puede deberse al origen del oleaje.
- La variación anual al igual que las otras clasificaciones temporales, no difiere mucho en la tendencia del mayor porcentaje de los datos, como en las tendencias del promedio y la mediana. En relación a los casos con una probabilidad de excedencia por sobre 90% se observa un mínimo para esos registros en los años 2009 y 2012, y un máximo para el año 2016.

3. Dirección media:

- La variación estacional muestra para los puntos seleccionados a profundidades de 50 [m] y 100 [m], la dirección media es preferentemente W, intensificándose en verano, siendo una de las posibles influencias los ciclones de baja presión de las latitudes medias del hemisferio norte, que originan un mar de fondo noroeste. A su vez, profundidades de 150 [m] y 200 [m] presentan predominantemente una dirección media WSW, y al igual que las profundidades a 50 [m] y 100 [m], esta presente una mayor variabilidad en verano. Respecto a la mediana y el promedio de los datos, a profundidades de 50 [m] y 100 [m] estos valores son más cercanos, pero a profundidades mayores la diferencia se hace más notoria entre ambos.
- La variabilidad mensual muestra más dispersión para los meses de verano, es decir, noviembre, diciembre, enero y febrero, siendo valido para cualquier profundidad de los puntos de estudio. De acuerdo a la difracción detalla anteriormente, las profundidades a 50 [m] y 100 [m] son menos variables que a profundidades de 150 [m] y 200 [m], cuando se compara la mediana con el promedio de los datos.
- La variabilidad anual muestra que el promedio esta por sobre la mediana a lo largo de los años. Además, se observa que los primeros 3 años de estudio (2009, 2010 y 2011) la dirección media del oleaje es bastante parecida, pero a contar del 2012 este comienza a ser más variable, siendo una posible causa el oleaje de mar de fondo del hemisferio norte, o un aumento de los frentes que generan mal tiempo, con marejadas de mar de viento durante el invierno.

Resumiendo los resultados anteriores, se debe destacar que el borde costero de la región de Valparaíso muestra una composición mixta, alternando extensas playas de acumulación arenosa y acantilados, identificándose dentro de la zona de estudio 4 bahías: la bahía de Laguna Verde, Valparaíso, Concón y Quintero (Morales et al., 2020). Quedando claro que el oleaje característico en esta área de interés proviene preferentemente de los ciclones extratropicales (Swell del hemisferio sur) según lo ilustrado en la figura 2.6, pues la tendencia es que predomine una dirección SW, sufriendo fluctuaciones hacia una dirección W cuando esta se acerca al borde costero, esto demostrado al observar la variabilidad longitudinal, latitudinal y puntual, donde se muestra el cambio de la dirección promedio del oleaje a lo largo de la latitud 33°S para la variación longitudinal, mientras que la variación latitudinal se demuestra que a mayor profundidad se obtiene un oleaje con una dirección promedio más constante a lo largo de la misma profundidad, y por el contrario, veriles a menor profundidad como V050 y V100 presentan mayor variación en la dirección promedio, pero menor variabilidad respecto al 90% del total de datos, pues se registran direcciones del oleaje desde una dirección suroeste a oeste a lo largo del rango temporal, siendo más claro al observar la variabilidad entre los diferentes puntos, pues P050 y P100 predominantemente muestran una dirección oeste, pero a medida que se aumenta la profundidad, se observa una dirección predominante oeste-suroeste, pero con una mayor variabilidad.

La altura significativa varía entre $2,366 \pm 0,767$ [m], con fluctuaciones cuando se acerca a la costa con alturas inferiores a 0,5 [m] en algunas bahías. Al igual que la dirección del oleaje, esta a lo largo de la latitud 33°S se aprecia una disminución desde izquierda a derecha, es decir, a medida que se acerca a la costa esta disminuye de una altura promedio de 2,75 [m] a un valor de 1,5 [m] aproximadamente, de la misma forma, las rosas del oleaje para la altura muestran una disminución de la altura a medida que se disminuye la profundidad, y así mismo, la variación a lo largo de una misma profundidad se observa mayor variabilidad a profundidades de 50 [m] y 100 [m], mientras que a 150 [m] y 200 [m] esta presenta menos fluctuaciones a lo largo de todo el rango latitudinal evaluado, además la variación latitudinal de la altura significativa en términos del promedio crece a medida que la profundidad de cada veril crece, evidenciándose también en cada uno de los puntos de interés. Frente a la variabilidad temporal de cada punto, en los meses de invierno se presencian los valores más altos, debido a un aumento en los frentes de mal tiempo durante estos meses, los que contribuyen en el crecimiento de la altura del oleaje.

Finalmente, el periodo peak se caracteriza por valores entre $13,263 \pm 2,214$ [s], destacándose principalmente en las bahías valores superiores a 13,60 [s]. A lo largo de las variaciones longitudinales para los datos contenidos en la latitud 33°S y cada uno de los veriles evaluados no se aprecia una variabilidad para el 90% de los datos y el promedio, a su vez, las series de tiempo para cada punto y la rosa del oleaje (comparando los colores mostrados) de periodo peak también corroboran esta aseveración, algo que igualmente corrobora la variabilidad temporal de cada punto.

Todas las fluctuaciones observadas en cada variable, y como fue mencionado anteriormente, son debido a , procesos de transformación que suceden cuando el oleaje se acerca al borde costero, siendo afectado por la geomorfología costera del mismo borde costero, la batimetría y meteorología local, siendo un claro ejemplo el mencionado anteriormente en el marco teórico, el movimiento orbital pasando de aguas profundas a aguas intermedias se ve alterado de una forma circular a una forma de un elipse, además de que la geomorfología costera. En el marco teórico se describen el asomeramiento (shoaling), refracción, reflexión y difracción, pues estos son los procesos más representativos, observándose lo siguiente:

- En primer lugar, recordando que el asomeramiento se define como “el efecto producido en un conjunto de ondas que se aproxima hacia la costa, donde se observa un aumento en su altura y una reducción en su longitud”, el cual depende principalmente de la profundidad relativa, parámetro que relaciona la profundidad con la longitud de onda, siendo la longitud de onda una variable dependiente del periodo. Considerando esto, del resumen anterior se determino que la altura a medida que se acerca a la costa se ve reducida, mientras que para la longitud se observa una reducción a medida que esta se acerca a la costa, como se observa en la figura 6.15 de la sección 6.2.3 de los anexos. Si bien, se espera que la altura aumente (sobretudo cuando el oleaje se acerca al punto de rompiente de la ola), debido al tipo de modelo y escala usada, no se aprecia con gran exactitud este proceso de transformación.
- En segundo lugar, recordando que la refracción es “un conjunto de ondas va incidiendo oblicuamente sobre la costa, encuentra un cambio de profundidad, donde la onda de al frente por tener una menor celeridad, presenta un cambio de dirección”, se observa que la dirección a lo largo de la grilla es predominantemente con dirección SW, pero a medida que se acerca a la costa esta se modifica a una dirección W, apreciándose claramente en cualquier mapa para el área de interés.
- En tercer lugar, la reflexión en los mapas para el área de interés es difícil de observar, debido a que esta sucede cuando el oleaje incide bajo acantilados, alguna isla o algún elemento que se interponga en el camino que sigue el oleaje. Pero al observar la distribución espacial de cada bahía, se observa claramente en la altura significativa para la bahía de Concón el unas rocas de un tamaño considerable (llamado islote La Isla (Morales et al., 2020)) interfieren con el oleaje, generando una zona con alturas significativas superiores a 2 [m], algo que puede ser apreciado en el peralte y posteriormente en el potencial energético undimotriz, variable que depende fuertemente de la altura significativa.
- Finalmente, en cuarto lugar la difracción es predominante cuando la onda incide en el punto izquierdo de cada bahía, y de esa manera el oleaje se ve afectado a una cesión lateral de la energía, y con ello se aprecian olas con una menor altura significativa, con un periodo peak mayor y transformando la dirección del oleaje de SW a W, lo cual repercute en los resultados que van a ser mostrados posteriormente. No obstante, los modelos que promedian la fase como lo es SWAN no resuelven adecuadamente la difracción, por lo que habría que considerar otro modelo para observar una difracción mejor resuelta.

4.3 Variabilidad del potencial energético undimotriz.

4.3.1 Área de interés.

El potencial energético undimotriz se caracteriza por valores entorno a los $35,560 \pm 25,892$ [kW/m] para el área evaluada según la tabla 4.7, sin embargo este valor no tiene un sentido físico, dado lo descrito en la sección anterior, pues el transporte de energía del oleaje está afecto a diferentes condiciones que afectan la magnitud con la que este se propaga. Para esto se presenta en la figura 4.14 la distribución espacial para la mediana del potencial energético undimotriz. A su vez, en la figura 4.15 se presenta la mediana del potencial energético undimotriz para las bahías de Quintero, Concón, Valparaíso y Laguna Verde.

Tabla 4.7: Resumen estadístico de la variación espacial del potencial en [kW/m] para la grilla.

Mínimo	P25	P50	P75	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
0	18,266	29,265	45,689	356,546	35,560	25,892	0,728

(Fuente: Elaboración Propia.)

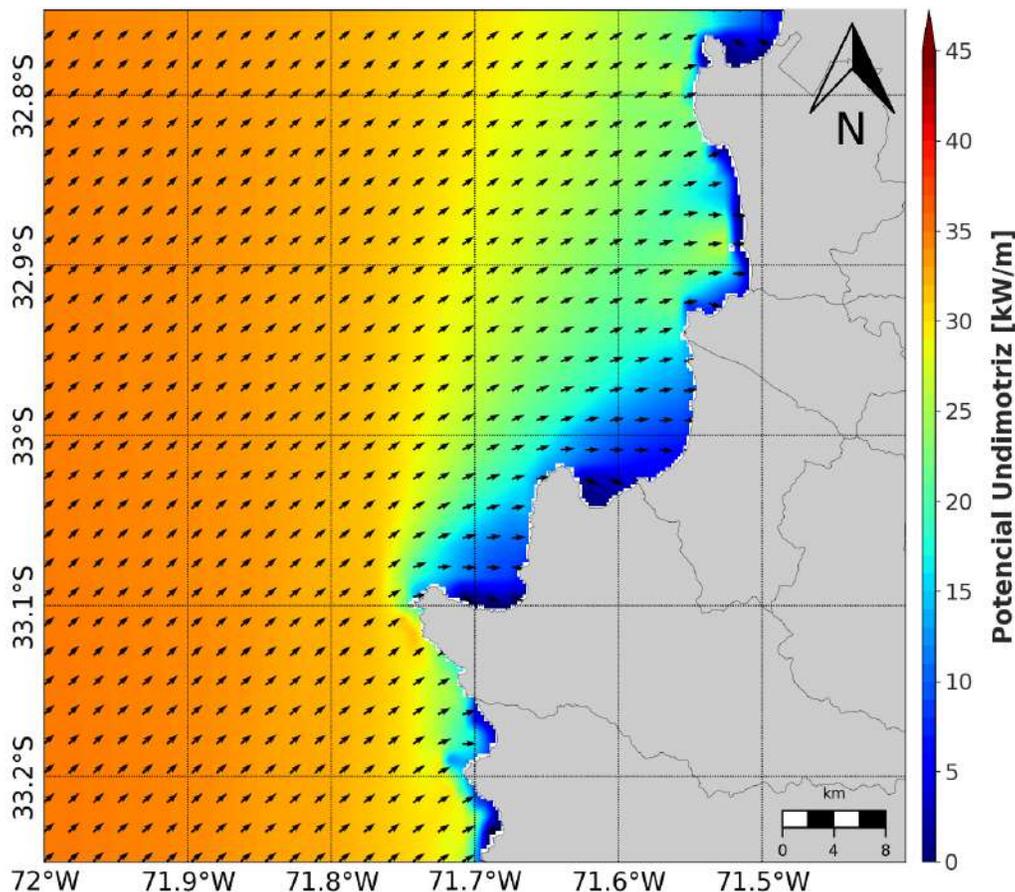


Figura 4.14: Distribución espacial de la mediana del potencial energético undimotriz.

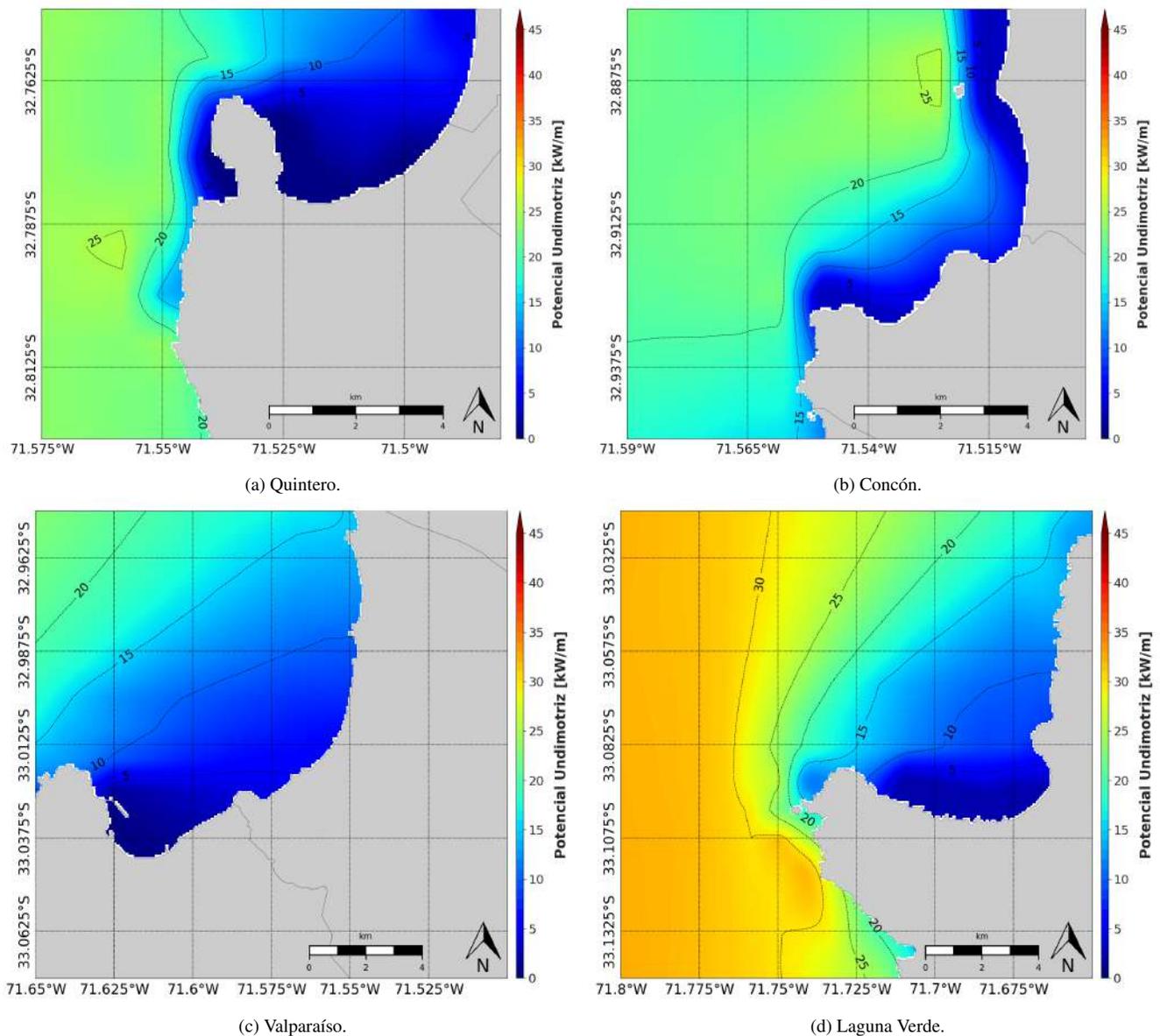


Figura 4.15: Distribución espacial de la mediana en cada bahía para potencial undimotriz.

(Fuente: Elaboración Propia.)

De acuerdo con la figura 4.14, se observa un potencial energético undimotriz menor cerca del borde costero, caracterizado un color azul que representa valores menores o iguales a 10 [kW/m]. Se destaca este color en las bahías de Quintero, Concón, Valparaíso y Laguna Verde como se observa en la figura 4.15, he aquí la bahía de Quintero con valores para el percentil 50 menores a 10 [kW/m], así también la bahía de Concón, Valparaíso y Laguna verde, producto principalmente de la difracción que se produce en el oleaje una vez que este incide con el límite izquierdo de la conformación de cada bahía. Además, al frente de la localidad de Quintero, pero fuera de la bahía se aprecia un sector caracterizado por valores superiores a 25 [kW/m] cerca de la latitud 32,7875°S, evidenciándose el efecto de reflexión y así contribuyendo sobre la magnitud del potencial energético undimotriz, así mismo se repite cerca del islote La Isla con el mismo valor, de igual manera en la bahía de Laguna Verde se observa un sector con amarillo oscuro que representa valores entre 30 [kW/m] a 35 [kW/m], donde también se muestra el efecto de reflexión de la onda que incide en los acantilados de esa zona.

A su vez, en la figura 4.16 se presenta la distribución espacial del coeficiente de variación (COV), valor que relaciona la desviación estándar de cada punto con su promedio. Se destaca para las bahías de Laguna Verde, Valparaíso y Quintero valores superiores a 1 [-], o también reinterpretados como valores por sobre 100% a la media de ese punto en particular. Estos valores por sobre el 100% del promedio indican que las bahías de Laguna Verde, Valparaíso y Quintero no son lugares confiables para la incorporación de un proyecto de energía undimotriz, no obstante, falta evaluar la variabilidad temporal de manera anual, mensual y estacional para verificar esta aseveración.

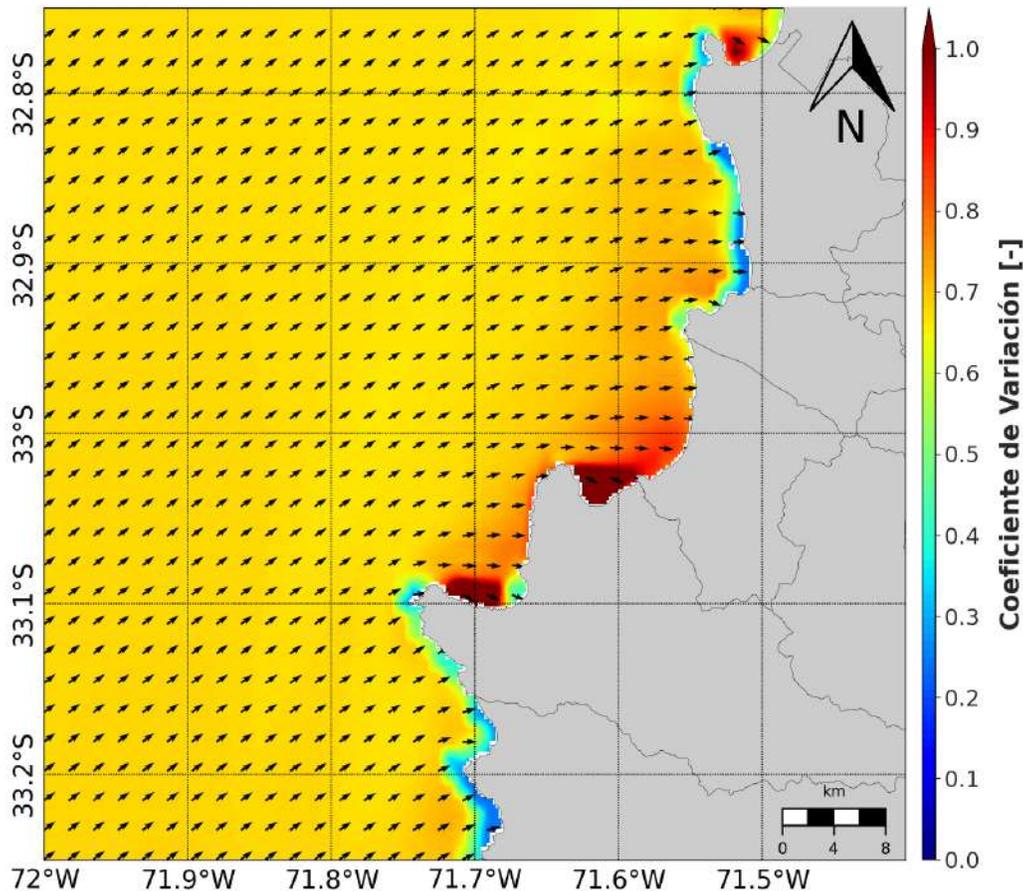


Figura 4.16: Distribución espacial del coeficiente de variación (COV).

(Fuente: Elaboración Propia.)

Estas gráficas fueron confeccionadas de acuerdo con los trabajos desarrollados en España y otros lugares (Winckler et al., 2017; Iglesias and Carballo, 2010a, 2009; Bingölbalı et al., 2016; Iglesias and Carballo, 2010b; Teles, 2008; Rusu, 2010; Aguirre et al., 2017; Contestabile et al., 2015; Rusu, 2015; Vannucchi and Cappietti, 2016).

4.3.2 Latitudinal y longitudinal.

A continuación se exhiben los resultados para la variabilidad longitudinal (de acuerdo a la subsección 4.2.2) del potencial energético undimotriz en la figura 4.17. De la misma manera, en la tabla 4.8 se presenta el resumen estadístico para la variabilidad longitudinal. Este parámetro, se caracteriza por valores de $31,965 \pm 25,374$ [kW/m], presentando una disminución cuando este parámetro se acerca a la costa, al igual que lo observado en la altura significativa en la figura 4.9.

Tabla 4.8: Resumen estadístico de la variación longitudinal del potencial en [kW/m].

Mínimo	P25	P50	P75	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
0,230	14,674	25,535	41,839	348,269	31,965	25,374	0,794

(Fuente: Elaboración Propia.)

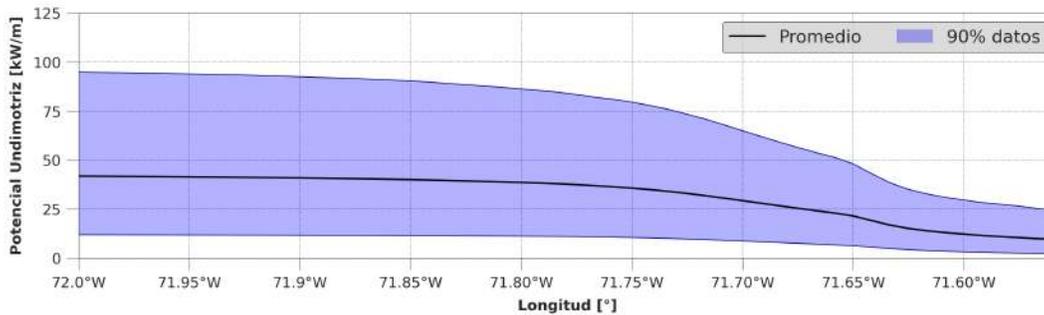


Figura 4.17: Serie longitudinal para el potencial energético undimotriz.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Ahora, respecto a la variabilidad latitudinal para V050 se caracteriza por valores entre $25,843 \pm 20,347$ [kW/m]. A su vez, V100 se caracteriza por valores entre $28,477 \pm 20,962$ [kW/h], por otro lado, V150 se caracteriza por valores entre $35,130 \pm 23,818$ [kW/m] y finalmente V200 este se caracteriza por valores entre $36,791 \pm 24,850$ [kW/h], como se observa en la tabla 4.9 y en la figura 4.18. Además, de estas se determina que a medida que se evalúa el potencial energético undimotriz a una profundidad menor, este presenta más variabilidad respecto al 90% de datos, siendo ampliamente afectada por los procesos de transformación del oleaje.

Tabla 4.9: Resumen estadístico de la variación latitudinal del potencial en [kW/m].

Veril	Mínimo	P25	P50	P75	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
V050	0,130	12,422	20,574	33,173	348,334	25,843	20,347	0,787
V100	0,191	14,562	23,160	36,247	331,178	28,477	20,962	0,736
V150	0,196	19,116	29,302	44,414	335,601	35,130	23,818	0,678
V200	0,193	19,986	30,736	46,593	336,790	36,791	24,850	0,675

(Fuente: Elaboración Propia.)

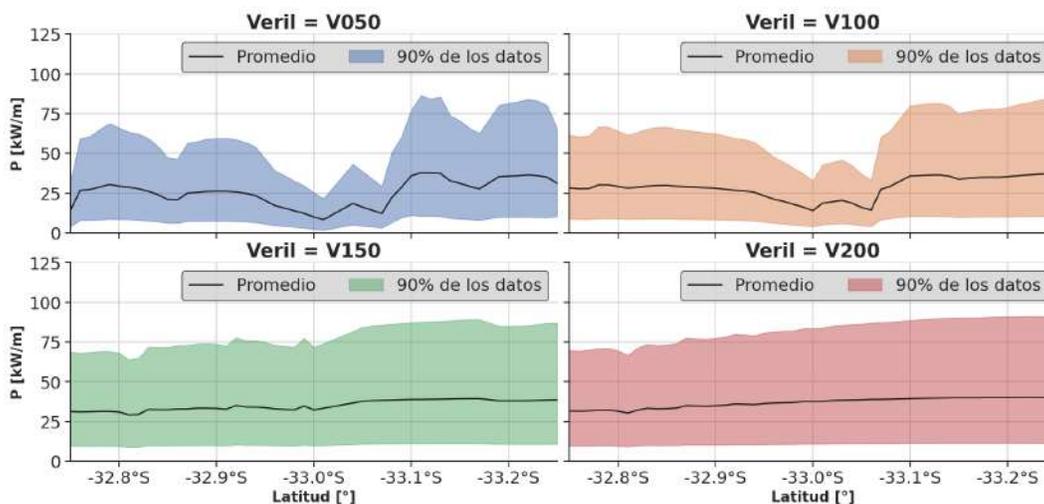


Figura 4.18: Series latitudinales para el potencial energético undimotriz.

(Fuente: Elaboración Propia.)

4.3.3 Puntos a evaluar.

A continuación, para cada uno de estos puntos a evaluar se presenta la serie de tiempo correspondiente al potencial energético undimotriz en la figura 4.19, junto a ello, en la tabla 4.10 se presenta el resumen estadístico, en donde se destaca que a medida que se aumenta la profundidad, la potencia energética undimotriz es mayor y la variación respecto al promedio es menor, cuando se observan los valores del coeficiente de variación.

Tabla 4.10: Resumen estadístico de la variación en cada punto del potencial en [kW/m].

Punto	Mínimo	P25	P50	P75	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
P050	0,242	5,087	8,096	13,037	181,724	10,521	8,767	0,833
P100	0,265	8,078	12,308	18,812	205,538	15,161	11,107	0,733
P150	0,324	18,366	28,001	42,271	290,740	33,402	22,365	0,670
P200	0,366	20,783	31,912	48,263	312,971	37,955	25,227	0,665

(Fuente: Elaboración Propia.)

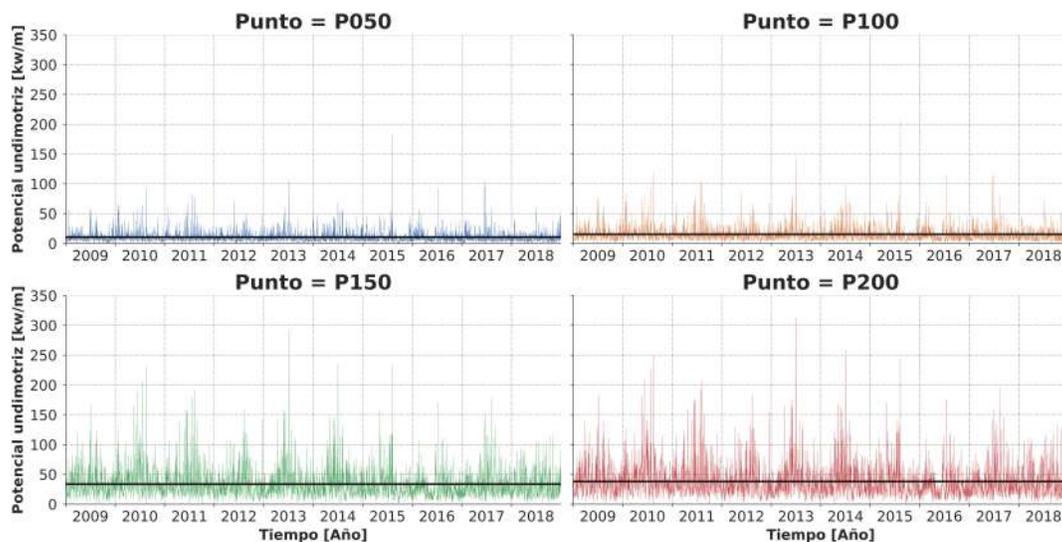


Figura 4.19: Serie de tiempo para el potencial energético undimotriz.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Al igual que la sección anterior, donde se presentó la figura 4.13 correspondiente a las rosas del oleaje para la altura significativa y el periodo peak, se presenta para el potencial energético undimotriz la rosa del oleaje respectiva en la figura 4.20, mientras que en las tablas 6.24, 6.25, 6.26 y 6.27 se presentan las tablas de frecuencia y dirección para la confección de las rosas del oleaje del parámetro estudiado. De estas rosas del oleaje, se determina que a profundidades de 50 [m] y 100 [m], el potencial energético undimotriz se caracteriza por valores inferiores a los 35 [kW/m] y con una dirección peak oeste, en comparación a estas profundidades, a una profundidad de 150 [m] y 200 [m] el potencial energético undimotriz se caracteriza por una dirección suroeste, con valores que pueden superar los 85 [kW/m]. Esto último condicionado por el comportamiento de las rosas del oleaje para la altura significativa, recordando que el periodo peak no presenta gran influencia en la determinación del potencial undimotriz.

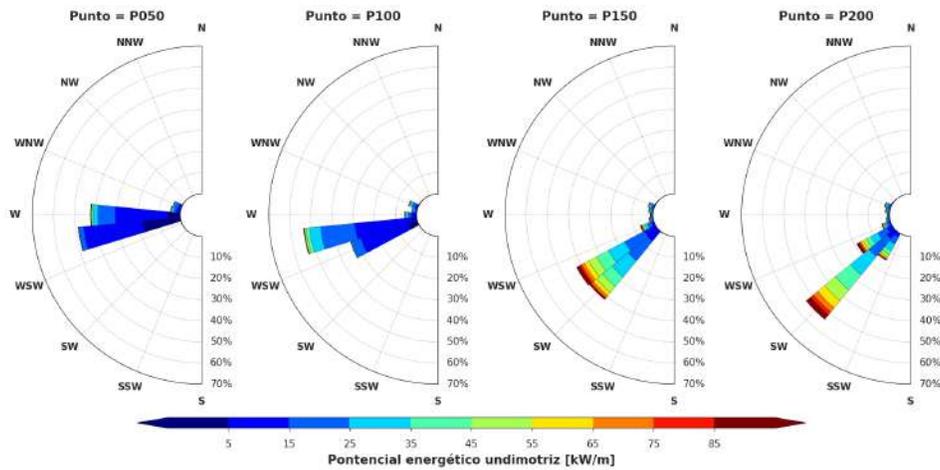


Figura 4.20: Rosas para el potencial energético undimotriz.

(Fuente: Elaboración Propia.)

4.3.4 Variación temporal para la potencia energética.

Primeramente, en la tabla 4.11 y la figura 4.21 se resume cada índice de variabilidad para cada punto se muestra que el índice de variabilidad anual aumenta a medida que la profundidad crece, por otro lado, el índice de variabilidad mensual y el coeficiente de variación tienden a disminuir a medida que crece la profundidad. Por su parte, el índice de variabilidad estacional es parecido en los cuatro puntos de interés.

Tabla 4.11: Índices de variabilidad para el potencial energético undimotriz en cada punto.

Veril	Coefficiente de variación	Índice de variación anual	Índice de variación mensual	Índice de variación estacional
P050	0,83329	0,23307	0,44151	0,37201
P100	0,73261	0,26276	0,41456	0,34740
P150	0,66957	0,35855	0,40823	0,34159
P200	0,66465	0,37622	0,41810	0,35429

(Fuente: Elaboración Propia.)

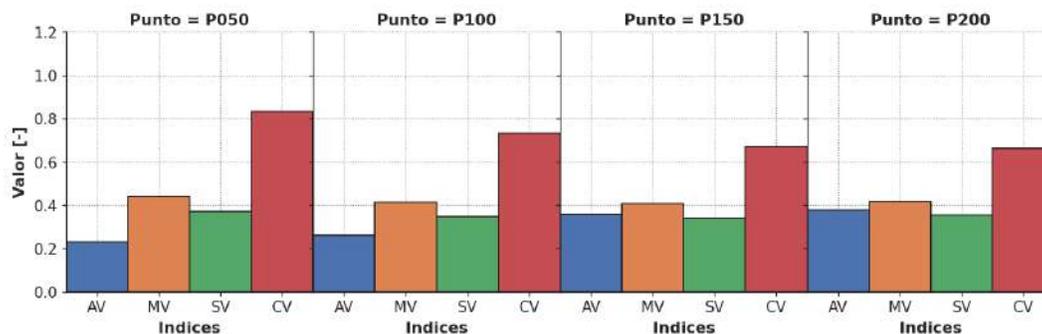


Figura 4.21: Resumen de índices de variabilidad para cada punto.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Posteriormente y considerando la forma del trabajo de Felipe Lucero Riquelme (Riquelme and Eduardo, 2015), se procede a mostrar gráficos relacionado a la variación anual, mensual y estacional del potencia energético undimotriz. Este muestra que para cada punto se pueden construir gráficos con una barra de colores que representa la probabilidad de excedencia del potencial, los colores cálidos representan el potencial que se encuentra bajo la mediana, mientras que los colores más fríos representan aquellos por sobre la mediana. Del mismo modo, se añade el valor máximo en forma de triángulos y la mediana en puntos redondos de un color negro, mientras que el promedio son los cuadros magenta.

Primeramente, en la figuras 4.22 y 4.23 se presenta la variabilidad anual para cada punto y el área de interés, respectivamente. Para cada punto se muestra una distribución positivamente sesgada comparando el promedio con la mediana. Ahora, respecto a los casos menos probables, el año 2015 se observan los valores máximos en los puntos P050 y P100, mientras que el año 2013 se observan los valores máximos para los puntos P150 y P200. Respecto al área, la bahía de Valparaíso presenta valores aproximados a 0,4 [-], mientras que el resto de la costa presenta una valores cercanos a 0,1 [-].

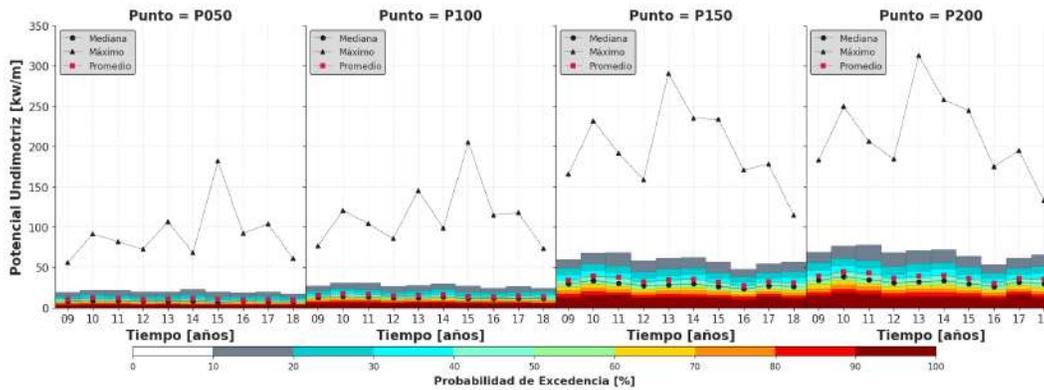


Figura 4.22: Variación anual del potencial para los puntos de estudios.

(Fuente: Elaboración Propia.)

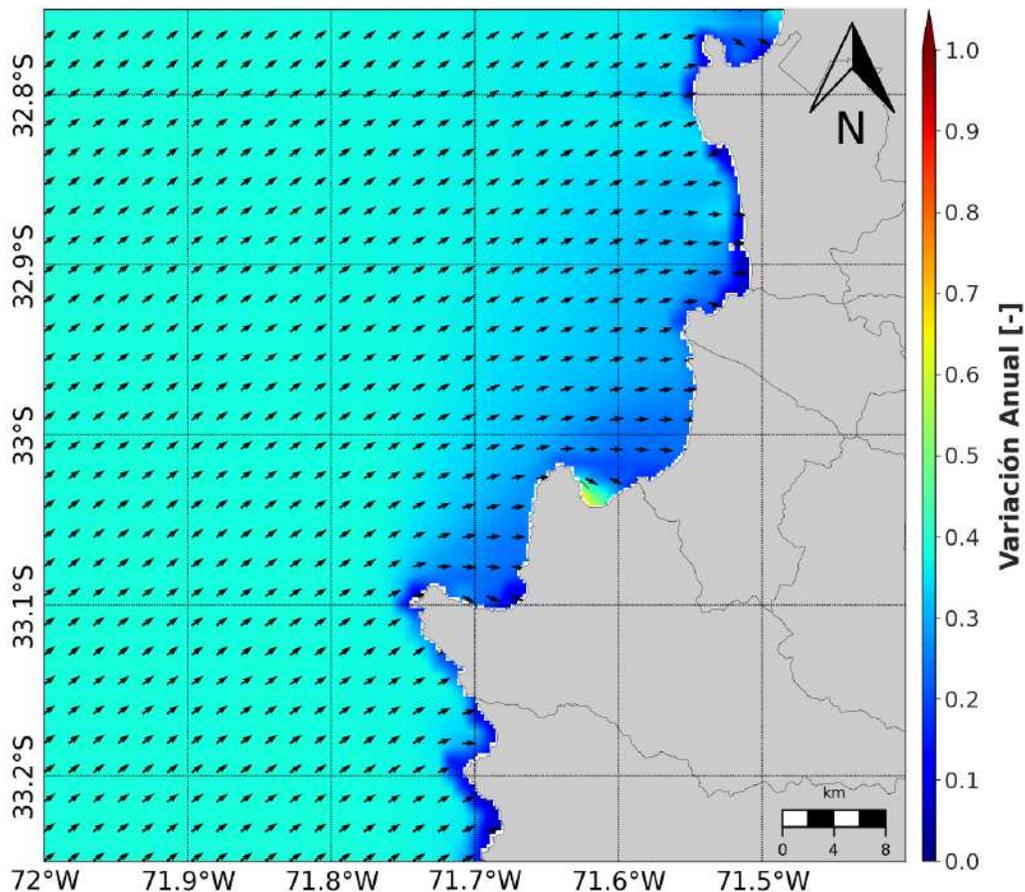


Figura 4.23: Variación anual del potencial para la grilla.

(Fuente: Elaboración Propia.)

En segundo lugar, las figuras 4.24 y 4.25 se presenta la variabilidad mensual para cada punto y el área de interés, respectivamente. Para cada punto el promedio de los datos es superior a la mediana, acentuándose en invierno. Considerando los casos menos probables, se observan los valores máximos en los puntos P050 y P100 en Agosto y en Julio para los puntos P150 y P200. Por otro lado, la bahía de Valparaíso y Laguna Verde presentan valores superiores a 1 [-], mientras que la bahía de Quintero presenta valores cercanos a 0,6 [-] y la bahía de Concón junto a otros zonas presentan valores inferiores a 0,3 [-].

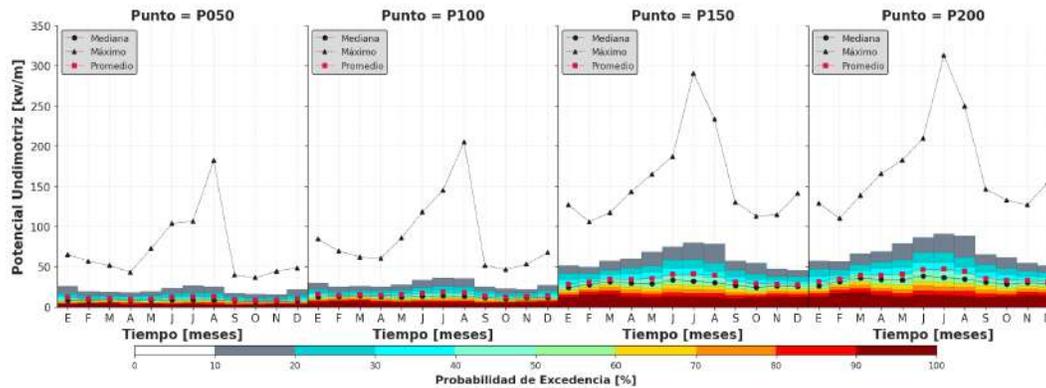


Figura 4.24: Variación mensual del potencial para los puntos de estudios.

(Fuente: Elaboración Propia.)

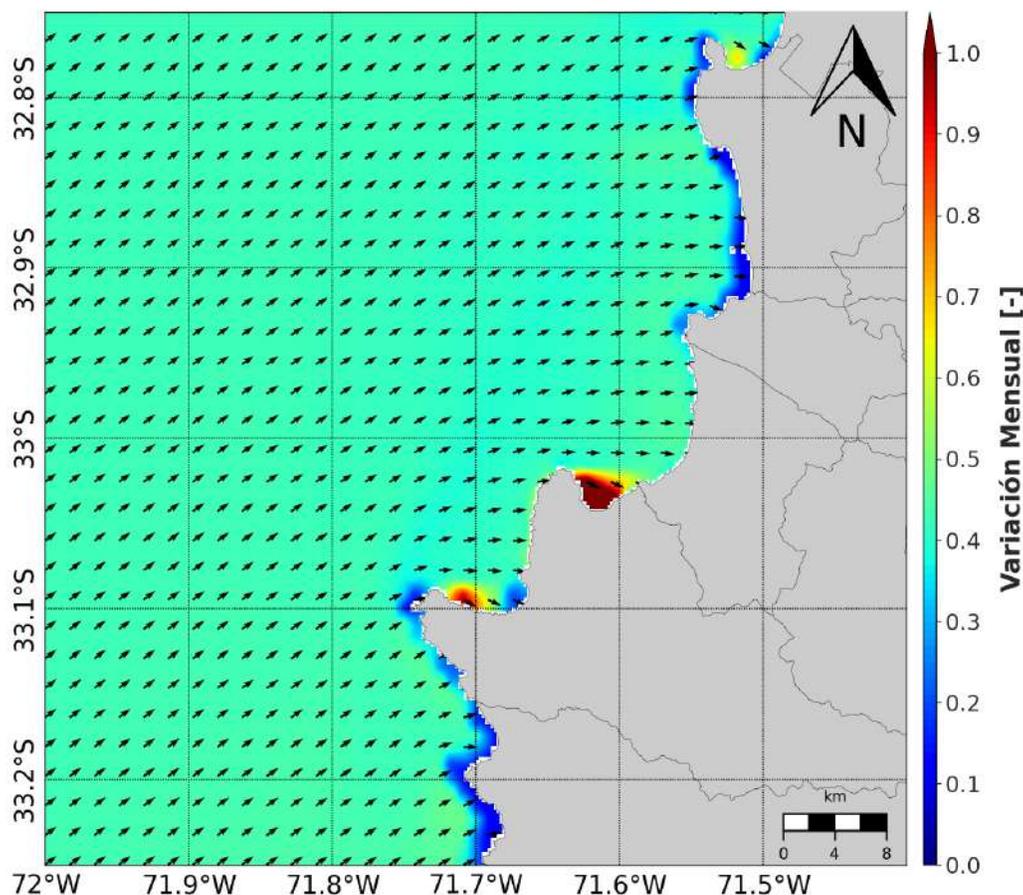


Figura 4.25: Variación mensual del potencial para la grilla.

(Fuente: Elaboración Propia.)

En tercer lugar, en la figuras 4.26 y 4.27 se presenta la variabilidad estacional para cada punto y el área de interés, respectivamente. Para cada punto de interés se muestra que la distribución positivamente sesgada, intensificándose en invierno. Ahora, considerando los casos menos probables, se observa en el invierno el máximo valor para cualquier punto. Por otro lado, en el área la bahía de Valparaíso presenta valores superiores a 1 [-], las otras bahías presentan valores entre 0,3 a 0,5 [-] y otros sectores de la costa presentan valores inferiores a 0,2 [-].

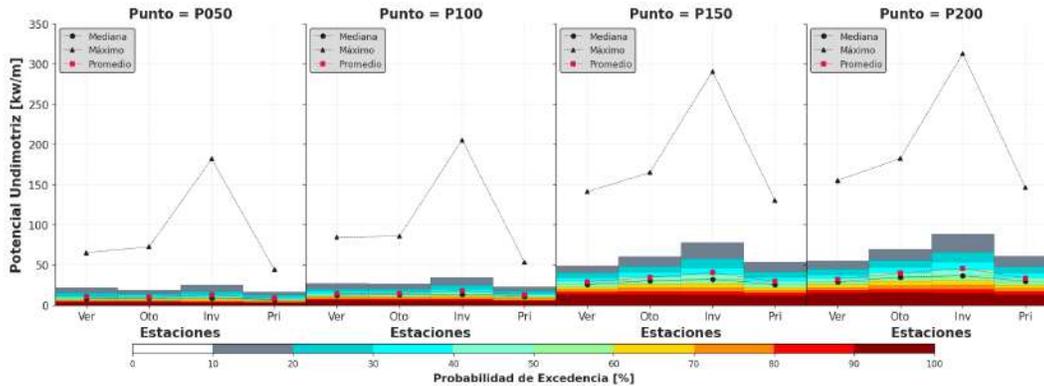


Figura 4.26: Variación estacional del potencial para los puntos de estudios.

(Fuente: Elaboración Propia.)

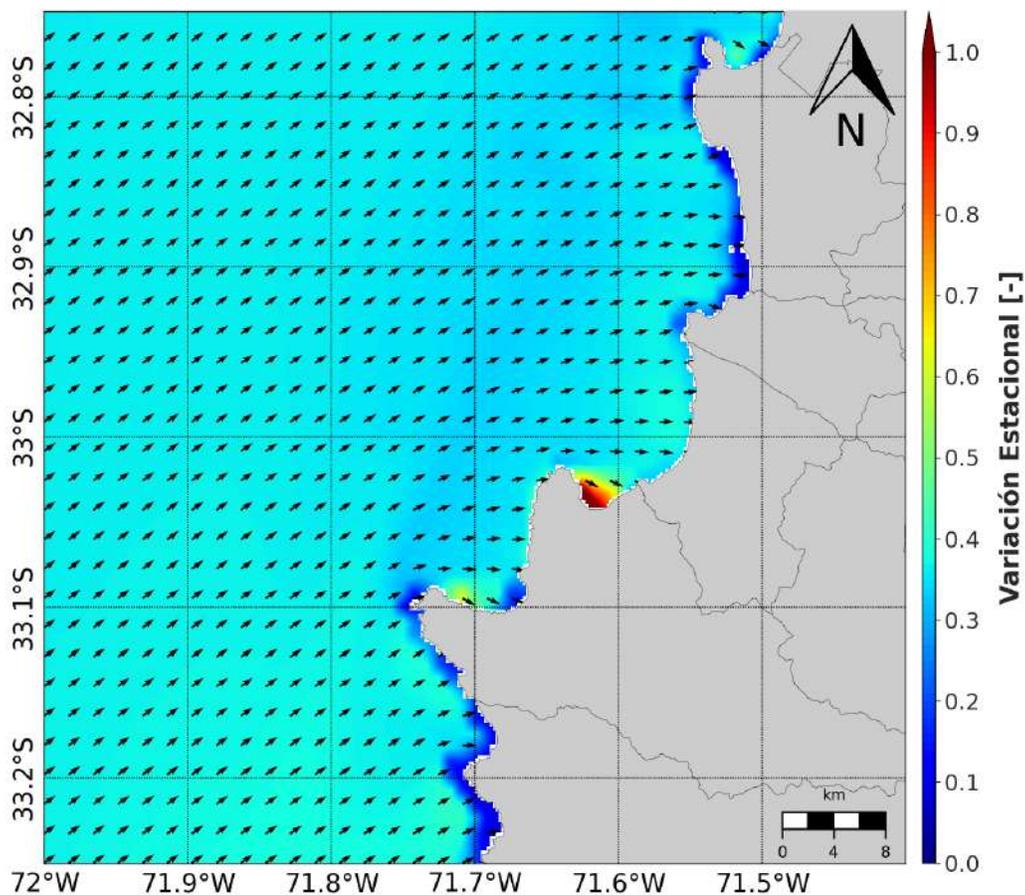


Figura 4.27: Variación estacional del potencial para la grilla.

(Fuente: Elaboración Propia.)

4.3.5 Energía total disponible.

Finalmente, se presenta la estimación de la producción media anual de energía (MAEP) de un convertidor de energía de las olas (WEC o granja de olas), siendo unos de los objetivos fundamentales en la modelación numérica. Este parámetro se obtiene según la ecuación 2.15 de la sección 2.2 en el marco teórico (Folley, 2016).

El área de interés se caracteriza por valores entre $311,715 \pm 226,967$ [MWh/m/año] según el resumen estadístico presentado en la tabla 4.12 y lo que se puede observar en la figura 4.28, donde la energía no incluye el término por año, pero se deduce que este es así debido a la ecuación 2.15. Relacionando con lo anteriormente mostrado, las zonas que presentaban una menor variación temporal (respecto a los índices de variabilidad temporal) y la variabilidad presentada con el coeficiente de variación, se caracterizan por ser zonas con mayor energía disponible, y con ello se convierten en zonas más atractivas para la extracción de energía undimotriz de las costas chilenas.

Tabla 4.12: Resumen estadístico energía anual disponible en [MWh/m/año] para la grilla.

Mínimo	P25	P50	P75	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
0	160,122	256,538	400,505	3125,479	311,715	226,967	0,728

(Fuente: Elaboración Propia.)

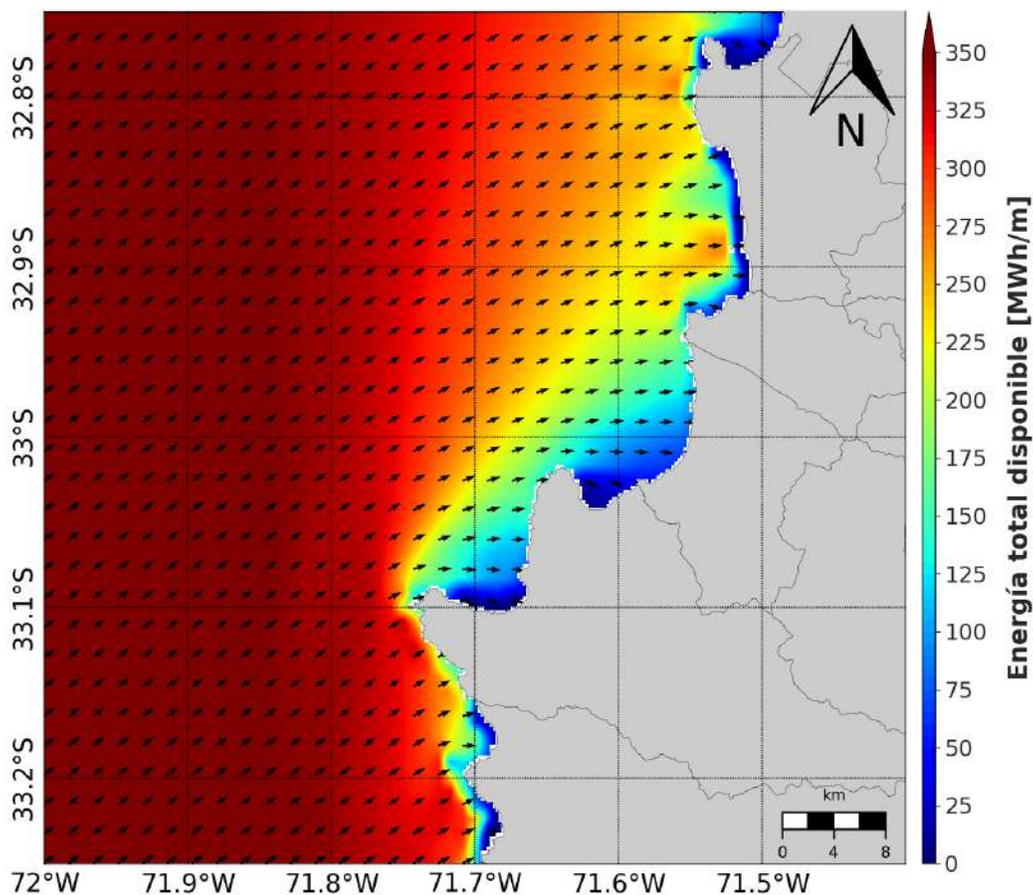


Figura 4.28: Energía anual disponible en la grilla.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Gráficos de dispersión y energía.

Por otro lado, para visualizar de una mejor manera la composición del recurso energético, en términos de los parámetros principales del oleaje, como lo es la altura significativa de ola y del periodo peak obtenida de los modelos, donde estos al igual que los trabajos efectuados en España, otras localidades y proyectos de titulación ya mencionados anteriormente, se resumen los datos en diagramas combinados de energía y dispersión (Escobar, 2012; Mediavilla and Sepúlveda, 2016; Iglesias and Carballo, 2009, 2010a; Akpınar et al., 2017).

Estos indican la ocurrencia de distintos climas del oleaje, clasificados a partir de la altura significativa y el periodo peak, y su contribución a la energía anual total (barra en colores), calculada para un año cualquiera de 365 días. Los colores de este gráfico representan pequeños cuadrados de 0.5 [m] x 1 [s], los que ayudan a comprender para que altura y periodo se tiene más energía, a su vez el número representado ahí es la frecuencia de ese estado de mar. De este es importante recalcar que las zonas con colores más claros son aquellos climas con escasa ocurrencia, y su poco aporte a la energía disponible del oleaje. Además, estos fueron modificados para entregar el potencial energético undimotriz característico a cierta altura significativa y periodo energético, conteniendo isolíneas para un potencial de 2, 25, 100, 250, 500 y 1000 [kW/m].

Por lo tanto, en la figura 4.28 y 4.29 se presenta la distribución espacial de la energía total disponible en un año para la grilla y los gráficos de dispersión y energía para cada punto de interés, respectivamente. Igualmente, se presenta la tabla 4.12 con el resumen estadístico para la energía total disponible, y en los anexos se presenta las tablas 6.28, 6.29, 6.30 y 6.31 con la energía anual disponible por clima del oleaje, mientras que las tablas 6.32, 6.33, 6.34 y 6.35 se presenta la frecuencia relativa de las mediciones.

Considerando la figura 4.29, el oleaje se caracteriza por:

- P050 posee un oleaje característico por alturas significativas entre 1 a 2 [m], un periodo peak de 10 a 14 [s], un potencial energético undimotriz que varía desde los 2 a 25 [kW/m], lo que da como resultado una energía anual disponible de 83,20 [MWh/m/año].
- P100 posee un oleaje característico por alturas significativas entre 1 a 2 [m], un periodo peak de 10 a 14 [s], un potencial energético undimotriz que varía desde los 2 a 25 [kW/m], lo que da como resultado una energía anual disponible de 129,80 [MWh/m/año], con una mayor tendencia a presentar climas del oleaje con mayor energía en relación a P050.
- P150 posee un oleaje característico por alturas significativas entre 2 a 4 [m], un periodo peak de 9 a 14 [s], un potencial energético undimotriz que varía desde los 2 a 25 [kW/m], lo que da como resultado una energía anual disponible de 291,37 [MWh/m/año], con una alta tendencia a presentar climas del oleaje con una energía disponible mayor a 15 [MWh/m/año].
- P200 posee un oleaje característico por alturas significativas entre 2 a 4 [m], un periodo peak de 9 a 14 [s], un potencial energético undimotriz que varía desde los 2 a 25 [kW/m], lo que da como resultado una energía anual disponible de 332,87 [MWh/m/año], con una alta tendencia a presentar climas del oleaje con una energía disponible mayor a 15 [MWh/m/año].

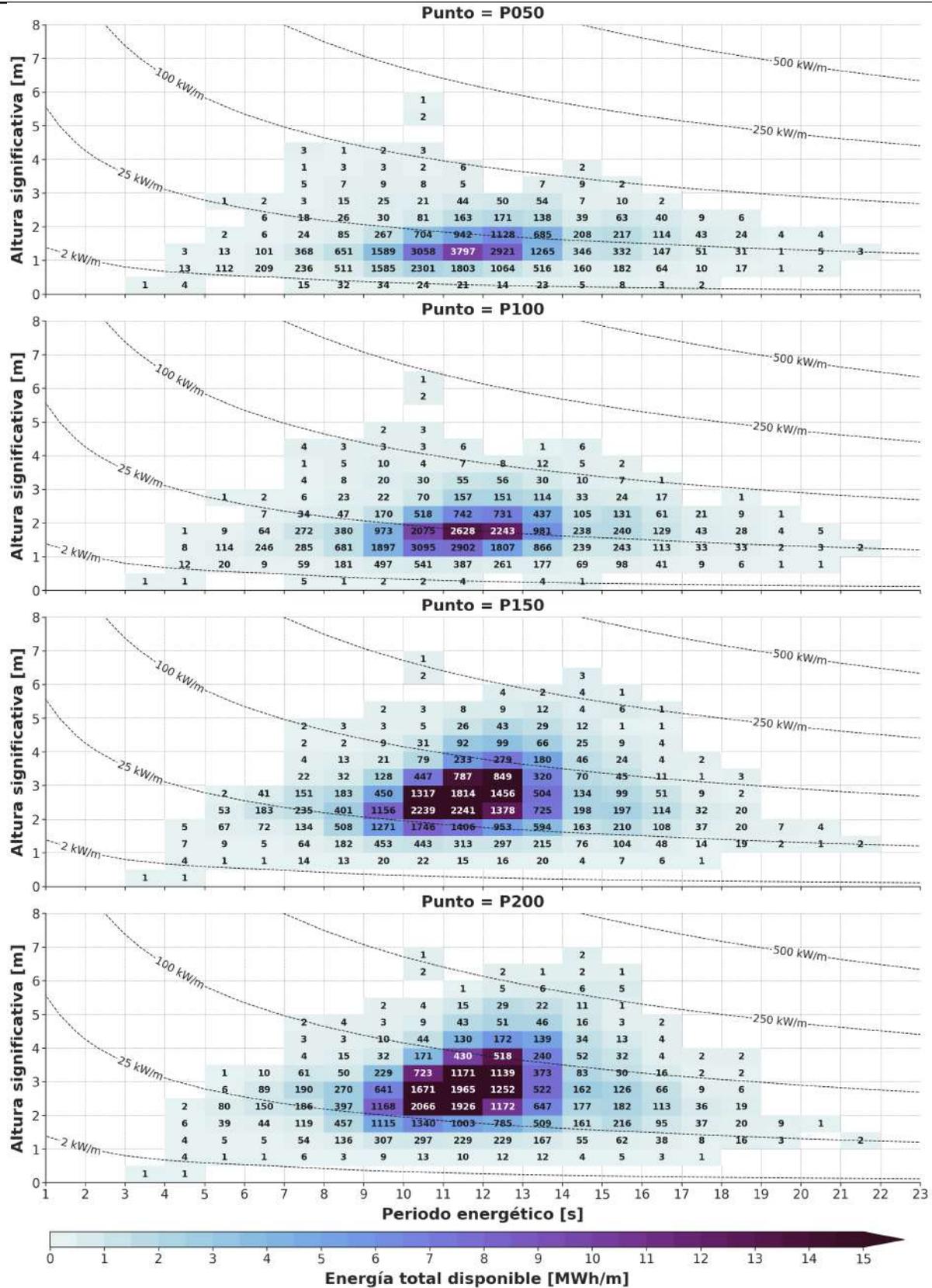


Figura 4.29: Diagramas de dispersión y energía para cada punto.
(Fuente: Elaboración Propia.)



CONCLUSIONES.

Este trabajo tuvo como objetivo principal el desarrollo numérico de una evaluación del potencial undimotriz, y su aplicación al estudio de la variabilidad espacial y temporal de este recurso en las costas chilenas para una ventana temporal de 10 años. Para esto se estableció como zona de estudios lo comprendido entre las latitudes $32,75^{\circ}S$ a $33,25^{\circ}S$ y las longitudes $71,40^{\circ}W$ a $72,00^{\circ}W$.

En primer lugar, se indago la teoría necesaria para la comprensión de la mecánica del oleaje, partiendo desde la propagación en el océano a como es la propagación en las zonas costeras, indicando los posibles efectos que pueden suceder cuando el oleaje se acerca a las costas. De igual forma, se prosigue con la caracterización del clima del oleaje en Chile, describiendo el origen y cómo se propagan en el océano, hasta llegar a las costas chilenas. Además, se indaga en la teoría lineal de propagación del oleaje, dado que se respetan las suposiciones para usar esta y que las otras se confunden la una con la otra. Posteriormente, se definen las metodologías para representar el oleaje de manera estadística y espectral, para luego hacer una revisión del cómo es la transferencia del oleaje, los diferentes tipos de modelos y en particular como es SWAN, describiendo pequeños aspectos a considerar, dada la experiencia con el modelo.

En segundo lugar, considerando el área expuesta en el primer párrafo, se estableció una primero entre las latitudes $32,5^{\circ}S$ a $33,5^{\circ}S$ y las longitudes $71,40^{\circ}W$ a $72,50^{\circ}W$, donde se recopilaron los datos provenientes del NOAA, junto a la batimetría disponible en la página del proyecto GEBCO, la cual posee una resolución de 15 arcos de segundo. Los primeros datos fueron usados como puntos de forzantes para un primer modelo, el cual procura obtener y caracterizar el clima del oleaje para una grilla de 60 arcos de segundo, mientras que la batimetría es clave para el funcionamiento del modelo, al igual que la limitante en la resolución de este. Respecto a los puntos de forzante del modelo fueron escogidos para evitar un posible efecto de sombreado en el transporte del oleaje, mientras que se adoptaron otras características de trabajos anteriores para acercarse más a la realidad en la climatología de la zona de estudio. A continuación de este primer modelo, se determina usar un segundo modelo en pos de mejorar la resolución de los datos obtenidos, pasando a una resolución de 30 arcos de segundo.

Frente a esto, se obtiene un total de 2 modelos por cada estado de mar, lo que para una ventana correspondiente a 10 años desde el año 2009 al año 2018, se obtiene un total 58432 modelos, para los cuales fueron necesarios un total de 14 a 24 días de modelación. Además, se ha de considerar que todo este trabajo fue desarrollado bajo el lenguaje de programación Python, debido a la facilidad en el trabajo, ser un lenguaje intuitivo, de rápida ejecución y uno de los pocos que posee un paquete capaz de abrir los archivos GRB2 provenientes del NOAA. Y de esta manera, y junto a una serie de códigos, se abrió, leyó, codificó y extrajo la información necesaria para la obtención del clima de la zona. Así se procede a la escritura de los modelos y la ejecución, en este paso se optó por el uso de algún código para una ejecución continua del código desarrollado por TU Delft. Posteriormente, los resultados a 30 arcos de segundo son usados para el procesamiento de los datos, es decir, la obtención de las variables que definen el clima del oleaje, y con los que se obtendrá el potencial energético undimotriz posteriormente. Cabe destacar que en la confección de los datos se obtuvo resultados para toda el área, para los veriles 50, veril 100, veril 150 y veril 200 (o V050, V100, V150 y V200), además en estas isolíneas se seleccionaron puntos ubicados en la latitud $33^{\circ}S$, además de considerar la ubicación de la boya TRIAXYS en Curaumilla y de esa manera incorporar estos como resultados.

En tercer lugar, respecto se valida los datos del NOAA bajo el proyecto “Atlas del oleaje” desarrollado de la Universidad de Valparaíso. De este se obtienen como resultado para los parámetros más importantes una linealidad de 92,3% y 90,6% para la altura significativa y el potencial energético undimotriz, respectivamente. Además, la dispersión de los datos respecto al promedio (Scatter index) es menor a la media de los datos del atlas del oleaje, pues este va desde un 10% hasta un 50% aproximadamente, considerando todos los parámetros principales (altura significativa, periodo peak, dirección media y potencial undimotriz). También, se entrega el coeficiente de determinación (R2), aseverando que la altura significativa proveniente del NOAA presenta un buen ajuste con la realidad local con un valor de 85,1%, lo que se trasluce con el potencial energético undimotriz dado que este presenta un valor de 82,0%, por otro lado, los otros parámetros presentan valores más cercanos a cero, lo que se ejemplifica que el modelo NWW3 presenta ciertos desajustes entorno a la dirección media y el periodo peak. Finalmente, se muestran las series de tiempo de cada una variable, el espectro de la frecuencia, dirección y bidimensional, y de esta forma, se cumple el objetivo de “Recopilar y validar los parámetros de oleaje simulados por el modelo WAVEWATCH III, para ser utilizados como datos de entrada al modelo SWAN”.

Respecto a la validación de los datos del modelo SWAN, se considera los datos de la boya de Curaumilla, proveniente del proyecto “Catastro del Recurso Energético Asociado a Oleaje para el Apoyo a la Evaluación de Proyectos de Generación de Energía Undimotriz”, la cual está ubicada en la latitud 33,12°S y la longitud 71,83°W. Se obtiene como resultado una linealidad de 89,7% y 87,9% para la altura significativa y el potencial energético undimotriz (los parámetros más importantes), en este caso se usaron los datos de la boya de Curaumilla. Además, la dispersión respecto al promedio según el Scatter Index (SI) es menor a un 50% para todos los parámetros, pues los resultados van desde un 7,4% hasta un 48%. A su vez, el coeficiente de determinación (R2) presenta un buen ajuste debido a valores de 80,1% y 77,2% para la altura significativa y el potencial undimotriz, mientras que para el periodo peak y la dirección media muestran valores cercanos a 0%, demostrando que los errores en la predicción del oleaje global no representa al oleaje local. También, y al igual que las validaciones anteriores, se presentan las series de tiempo para cada una de las variables principales, es decir, la altura significativa, periodo peak, dirección media del oleaje y el potencial energético undimotriz, además de representar el estado de mar con mayor energía en el espectro bidimensional, cumpliéndose el objetivo de “Implementar y validar el modelo de SWAN para la obtención de la climatología del oleaje en aguas someras de la región de Valparaíso.”.

En cuarto lugar y posterior a la validación, se caracterizó el oleaje para los parámetros principales (altura significativa, periodo peak y dirección media), esto para el área de interés, la variación longitudinal y la variación latitudinal se presentó la distribución espacial, series longitudinales y series latitudinales para cada variable junto a la tabla con el resumen estadístico en cada caso. Posteriormente, para cada punto se presentó las series de tiempo correspondientes, las rosas para la altura significativa del oleaje y el periodo peak, además de sus respectivas tablas. También se incluyen los histogramas de cada variable, junto a la variabilidad anual, mensual y estacional de la altura significativa y el periodo peak.

Para la caracterización del oleaje se obtiene los siguientes resultados:

1. El área de interés se caracteriza por una altura significativa entre $2,366 \pm 0,767$ [m], para el periodo peak entre $13,263 \pm 2,214$ [s] y una dirección media suroeste a oeste con valores entre $240,216 \pm 19,520$ [°].
2. La variación longitudinal se caracteriza por una altura significativa de $2,221 \pm 0,803$ [m], un periodo peak de $13,252 \pm 2,215$ [s] y una dirección media con valores de $244,125 \pm 20,367$ [°], es decir, una dirección suroeste a oeste.

3. La variación latitudinal se caracteriza por:

- V050 por una altura significativa $1,884 \pm 0,629$ [m], un periodo peak de $13,261 \pm 2,247$ [s] y una dirección media del oleaje de $253,491 \pm 14,395$ [°].
- V100 por una altura significativa $2,102 \pm 0,658$ [m], un periodo peak de $13,222 \pm 2,209$ [s] y una dirección media del oleaje de $247,449 \pm 15,475$ [°].
- V150 por una altura significativa $2,383 \pm 0,688$ [m], un periodo peak de $13,240 \pm 2,189$ [s] y una dirección media del oleaje de $239,599 \pm 16,131$ [°].
- V200 por una altura significativa $2,444 \pm 0,706$ [m], un periodo peak de $13,247 \pm 2,192$ [s] y una dirección media del oleaje de $237,864 \pm 16,791$ [°], caracterizado por una variación desde una dirección suroeste a oeste a medida que se disminuye la profundidad.

4. La variación puntual se caracteriza por:

- P050 se obtuvo una altura significativa $1,216 \pm 0,397$ [m], un periodo peak de $13,270 \pm 2,253$ [s] y una dirección media de $271,829 \pm 7,263$ [°].
- Punto P100 por una altura significativa $1,544 \pm 0,455$ [m], un periodo peak de $13,222 \pm 2,233$ [s] y una dirección media de $263,362 \pm 10,164$ [°].
- P150 por una altura significativa $2,326 \pm 0,658$ [m], un periodo peak de $13,245 \pm 2,195$ [s] y una dirección media de $241,786 \pm 14,959$ [°].
- P200 por una altura significativa $2,487 \pm 0,709$ [m], un periodo peak de $13,247 \pm 2,194$ [s] y una dirección media de $236,616 \pm 16,980$ [°], caracterizado por una variación desde una dirección suroeste a oeste a medida que se disminuye la profundidad de cada punto.

Se destaca que el borde costero de la región de Valparaíso muestra una composición mixta, alternando extensas playas de acumulación arenosa y acantilados, identificándose dentro de la zona de estudio 4 bahías: la bahía de Laguna Verde, Valparaíso, Concón y Quintero, lugares donde el oleaje presenta fluctuaciones en los diferentes parámetros, donde resalta las variaciones desde una dirección suroeste (producto de los ciclones extratropicales) a oeste cuando el oleaje se acerca al borde costero.

Las fluctuaciones en los diferentes parámetros se debe principalmente a los procesos de transformación debido a la interacción del oleaje con la geomorfología costera, la batimetría y meteorología local. Dentro de los procesos de transformación del oleaje se tienen el asomeramiento (shoaling), refracción, reflexión y difracción resaltan frente a otros efectos en la propagación costera del oleaje. Aquí principalmente el efecto de refracción y difracción son los más visibles, pues en primer lugar en los diferentes mapas se integro la dirección, la cual predominantemente presenta un origen suroeste, pero a medida que se acerca a las costa se va inclinando a una dirección oeste observándose el efecto de la refracción sobre el oleaje, por otro lado, cuando la onda incide en el límite que conforma una bahía, se aprecia una cesión lateral de la energía, lo que conlleva a olas con una menor altura significativa, con un periodo peak mayor y una redirección en la dirección del oleaje. Otro efecto que puede apreciarse, pero cuando se hace un acercamiento para cada bahía es la reflexión, observándose en como algunos lugares la onda incidente rebota, lo que produce alturas significativas más altas, principalmente observado en como el oleaje incide en el islote La Isla, en la bahía de Concón.

Dentro de la variabilidad temporal, sobresale que la altura significativa presenta valores más altos en los meses de invierno, donde el máximo registrado es en el mes de Agosto, para el año 2015. El periodo peak en particular no presenta grandes variaciones estacionalmente, donde se registra en el mes de Enero para el año 2016 los valores máximos. Finalmente, la dirección del oleaje presenta menor variabilidad para los puntos con una menor profundidad, caracterizado por una dirección oeste, mientras que los puntos P150 y P200 presenta mayormente una dirección suroeste.

Además, se consideró presentar los resultados para la longitud de onda, profundidad relativa y el peralte, donde el área de interés se caracteriza por bajas longitudes de onda y un peralte más alto, sin embargo, las bahías se caracterizan por altas longitudes de onda y un peralte más bajo en relación al resto del borde costero. Respecto a la profundidad relativa se muestran claramente como algunos lugares son caracterizados como aguas profundas y otros como aguas de transición, siendo las aguas poco profundas poco visibles para la escala espacial usada.

Posteriormente a la caracterización climatológica, se presentan los resultados para el potencial energético undimotriz, compuestos por la distribución espacial del área de interés, series longitudinales, series latitudinales, series de tiempo, histogramas, rosas del oleaje, gráficos de variabilidad anual, mensual y estacional, al igual que los gráficos de dispersión y energía. Aquí el oleaje presenta los siguientes resultados para el potencial energético undimotriz:

1. Para el área presenta valores entre $35,560 \pm 25,892$ [kW/m].
2. Longitudinalmente presenta valores entre $31,965 \pm 25,374$ [kW/m].
3. Latitudinalmente se caracteriza por:
 - V050 se caracteriza por valores entre $25,843 \pm 20,347$ [kW/m].
 - V100 se caracteriza por valores entre $28,477 \pm 20,962$ [kW/m].
 - V150 se caracteriza por valores entre $35,130 \pm 23,818$ [kW/m].
 - V200 se caracteriza por valores entre $36,791 \pm 24,850$ [kW/m].
4. Puntualmente se caracteriza por:
 - P050 se caracteriza por valores entre $10,521 \pm 8,767$ [kW/m].
 - P100 se caracteriza por valores entre $15,161 \pm 11,107$ [kW/m].
 - P150 se caracteriza por valores entre $33,402 \pm 22,465$ [kW/m].
 - P200 se caracteriza por valores entre $37,955 \pm 25,227$ [kW/m].

Como fue mencionado anteriormente, la composición mixta del borde costero afecta a los parámetros principales y a todos los que dependen de estos, es así, que el potencial energético undimotriz ve disminuida su magnitud, producto de la cesión lateral de la energía, lo que conlleva a una menor altura y periodos más altos. En las figuras se caracteriza a la mediana de los datos con valores menores a 10 [kW/m], y en algunos casos a 15 [kW/m], mientras que otros lugares presentan valores superiores a 20 [kW/m], esto principalmente causado por la difracción del oleaje. Por otro lado, el efecto de reflexión se hace presente a lo largo del borde costero bajo pequeños sectores con más de 25 [kW/m], destacándose el islote La Isla, en la bahía de Concón. A su vez, la variabilidad longitudinal, latitudinal y puntual contribuyen en a aseverar que un aumento en la variabilidad del oleaje a medida que se disminuye la profundidad, a su vez, también disminuye la magnitud de este parámetro.

Respecto a la variabilidad de los datos, se identifica en la grilla que las bahías de Laguna Verde, Valparaíso y Quintero presentan un coeficiente de variación por sobre 1 [-], es decir, por sobre un 100% de variabilidad respecto a la media de los datos, lo cual es corroborado con la variabilidad temporal de los datos, dado que anualmente la bahía de Valparaíso presenta un índice AV por sobre 0,4 [-]; mensual las bahías de Laguna Verde, Valparaíso y Quintero presentan un índice MV por sobre 0,6 [-], y en algunos casos valores mayores a 1 [-]; finalmente, estacionalmente las bahías previamente mencionadas presentan valores de SV por sobre 0,6 [-], y algunos casos con valores de SV sobre 1 [-], donde el coeficiente de variación y el índice de variación mensual son los parámetros que presentan los valores más altos para la variabilidad respecto a la media y la variabilidad temporal. Por otro lado, la variabilidad puntual se caracteriza por presentar los valores máximos en invierno, registrándose para P050 y P100 en el mes de Agosto del año 2015, al contrario en Julio de 2013 se registran los valores máximos para P150 y P200.

Para finalizar la variabilidad del potencial energético undimotriz, se presenta la distribución espacial de la energía total disponible o más conocido como producción media anual de energía (MAEP), el cual indica una estimación de la energía producida por un sistema de captación de energía undimotriz, y así mismo, para cada punto se presenta los gráficos de dispersión y energía, los cuales indican la ocurrencia de ciertos climas del oleaje, junto al potencial energético undimotriz y el MAEP para cada clima del oleaje. Por lo tanto, el área de interés se caracteriza por una energía total disponible de $311,715 \pm 226,967$ [MWh/m/año], siendo estos más altos en los sitios que presentan una menor variabilidad temporal y entorno al promedio de datos. Por otro lado, el P50 presenta un clima del oleaje caracterizado por una altura significativa que va desde 1 a 2 [m], con periodos de 10 a 14 [s], un potencial undimotriz entre 2 [kW/m] a 25 [kW/m] y una energía total disponible de 83,20 [MWh/m/año]. Respecto a P100, su clima del oleaje se caracteriza por una altura significativa que va desde 1 a 2 [m], con periodos de 10 a 14 [s], un potencial undimotriz entre 2 [kW/m] a 25 [kW/m] y una energía total disponible de 129,80 [MWh/m/año]. Ahora, respecto a P150, el clima del oleaje se caracteriza por una altura significativa que va desde 2 a 4 [m], con periodos de 10 a 14 [s], un potencial undimotriz entre 25 [kW/m] a 100 [kW/m] y una energía total disponible de 291,37 [MWh/m/año]. De la misma forma, P200 se caracteriza por presentar una altura significativa que va desde 2 a 4 [m], con periodos de 10 a 14 [s], un potencial undimotriz entre 25 [kW/m] a 100 [kW/m] y una energía total disponible de 332,87 [MWh/m/año]. De esta manera, se cumple el objetivo de “Determinar la variabilidad en el potencial energético undimotriz para la zona de estudio”.

Finalmente, se logró recopilar y validar los parámetros de oleaje simulados por el modelo WAVEWATCH III, para ser utilizados como datos de entrada al modelo SWAN, así se implementó y validó el modelo SWAN, caracterizándose la climatología del oleaje en aguas someras de la región de Valparaíso, y de ese modo se determinó la variabilidad en el potencial energético undimotriz para la zona de estudio, lográndose desarrollar y validar una herramienta numérica para la evaluación del potencial undimotriz en un rango temporal de 10 años, y su aplicación al estudio de la variabilidad espacial y temporal.

5.1 Recomendaciones.

Considerando estos aspectos, se recomienda lo siguiente para mejorar este tipo de estudios:

- Para el estudiado, incorporar más puntos, evaluando el como la composición mixta del borde costero afecta en los resultados, principalmente en como afectaría a los gráficos de dispersión y energía, pues estos demuestran un resume del clima del oleaje de cada punto.
- Considerar el cambio a una grilla estructurada curvilínea, o la mezcla de grillas rectilíneas y curvilíneas, de manera de comparar y establecer cual arreglo genera los mejores resultados con los datos registrados por la boya de Curaumilla, u otra boya del SHOA, particular, etc.
- Realizar un estudio que incorpore un modelo WAVEWATCH II o WAM para las costas de Chile, para un levantamiento de la información del clima del oleaje y que bajo el modelo SWAN se simule el oleaje cerca de la costa, y para zonas que el oleaje es más complicado, debido a la geomorfología costera que pueda presentar, se recomienda incorporar el modelo SWASH, que a diferencia de SWAN resuelve la fase de la onda y no el promedio, siendo mejor para estudiar los efectos de los procesos de transformación del oleaje cerca de las costas chilenas.
- En relación a la anterior recomendación, se puede usar información satelital para el estudio del clima del oleaje e incorporar directamente esta en SWAN. Aquí se sugiere la información satelital proveniente de la serie de satélites Sentinel y GOES-R, los cuales miden varios parámetros que rigen el clima del oleaje.
- Mejorar la batimetría actual disponible del mar territorial chileno, para mejorar la resolución máxima que puede alcanzar el modelo.

Por otro lado, dadas las aplicaciones que tiene el modelo en diferentes trabajos futuros, se recomienda realizar lo siguiente:

- Modelar el clima del oleaje bajo las macrozonas naturales del País, es decir, para el Norte Grande, Norte Chico, Zona Central Zona Sur y Zona Austral, usando el modelo WAVEWATCH III o WAM, integrado con SWAN y posteriormente SWASH.
- Implementar de un sistema integrado para la observación del mar chileno a largo plazo, bajo los lineamientos de la mesa océanos del comité científico de la COP25, en donde se recomienda un sistema conformado por diferentes instrumentos insitu automatizado, un laboratorio chileno a cargo de la calibración y validación de los sensores, y profesionales capacitados para el trabajo de grandes volúmenes de datos con capacidades descriptivas, quienes además usen herramientas numéricas (como WAVEWATCH III, SWAN, MIKE 21, SWASH, entre otros) para el estudio y predicción del oleaje.
- Estudiar de la relación entre el cambio climático y las costas chilenas para diferentes proyecciones a un futuro cercano, por ejemplo, establecer proyecciones de aquí al 2030.
- Estudiar la influencia meteorológica de los ciclones extratropicales y los ciclones tropicales en el clima del oleaje, determinando como afectan de manera local en diferentes variables que describen el clima del oleaje.



BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, C., Rutllant, J. A., and Falvey, M. (2017). Wind waves climatology of the Southeast Pacific Ocean. *International Journal of Climatology*, 37(12):4288–4301.
- Aiken, C. M., Castillo, M. I., and Navarrete, S. A. (2008). A simulation of the Chilean Coastal Current and associated topographic upwelling near Valparaíso, Chile. *Continental Shelf Research*, 28(17):2371–2381.
- Akpınar, A., Bingölbalı, B., and Van Vledder, G. P. (2017). Long-term analysis of wave power potential in the Black Sea, based on 31-year SWAN simulations. *Ocean Engineering*, 130(December 2016):482–497.
- Arena, F., Guedes Soares, C., and Petrova, P. (2010). Theoretical Analysis of Average Wave Steepness Related to Peak Period or to Mean Period. In *29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering: Volume 2*, volume 2, pages 595–603. ASME/EDC.
- Atan, R., Goggins, J., and Nash, S. (2016). A detailed assessment of the wave energy resource at the Atlantic Marine Energy Test Site. *Energies*, 9(11):1–29.
- Bingölbalı, B., Akpınar, A., and Van Vledder, G. P. (2016). Determination of wave energy potential of black sea. In *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, volume 35, Delft, Nether.
- Campos, R. (2016). *Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile*. PhD thesis, Universidad de Valparaíso.
- CEM (2002). *Coastal Engineering Manual*. U.S. Army Corps of Engineers.
- Contestabile, P., Ferrante, V., and Vicinanza, D. (2015). Wave energy resource along the coast of Santa Catarina (Brazil). *Energies*, 8(12):14219–14243.
- Cornett, A. (2009). A global wave energy resource assessment. *Sea Technology*, 50(4):59–64.
- Escobar, D. (2012). *Selección en Chile de los sitios más adecuados para la extracción de energía a partir del oleaje utilizando SWAN*. PhD thesis, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Folley, M. (2016). *Numerical Modelling of Wave Energy Converters. State-of-the-Art Techniques for Single Devices and Arrays*. Academic Press, 1 edition.
- Forecasts, E. C. f. M.-R. W. (2020). ecCodes.
- GEBCO (2019). General Bathymetric Chart of the Oceans.
- G.I.O.C. UC (2000). Documento de referencia I: Dinámicas. *Sección 2*, Vol. 1:580.
- Gobierno de Chile (2019). Nuestro País.
- GODA, Y. and SUZUKI, Y. (1975). Computation of refraction and diffraction of sea waves with Mitsuyasu directional spectrum. Technical report, Marine hydrodynamics Division Wave Laboratory.

- Holmes, B. (2015). D2.8 Best Practice Manual for Wave Simulation. *MARINET Report*.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*, volume 9780521860. Cambridge University Press, Delft, Nether, 1 edition.
- Iglesias, G. and Carballo, R. (2009). Wave energy potential along the Death Coast (Spain). *Energy*, 34(11):1963–1975.
- Iglesias, G. and Carballo, R. (2010a). Offshore and inshore wave energy assessment: Asturias (N Spain). *Energy*, 35(5):1964–1972.
- Iglesias, G. and Carballo, R. (2010b). Wave energy resource in the Estaca de Bares area (Spain). *Renewable Energy*, 35(7):1574–1584.
- Innova Chile, HydroChile, Instituto Nacional de Hidráulica (INH), Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), Universidad de Valparaíso (UV), Vásquez, A., and Dirección de Proyectos de la Armada de Chile (DIPRIDA) (2017). Catastro del Recurso Energético Asociado a Oleaje para el Apoyo a la Evaluación de Proyectos de Generación de Energía Undimotriz. pages 1–125.
- Klein, M. D. (2011). SWAN productieberekeningen IJsselmeer en Zwarte Meer voor WTI-2011: rapportage fase 1.
- López, I. and Tinoco, H. (2015). Ondas Superficiales en el Mar. (JUNE 2014):28.
- Mediavilla, D. G. and Sepúlveda, H. H. (2016). Nearshore assessment of wave energy resources in central Chile (2009-2010). *Renewable Energy*, 90:136–144.
- Morales, E., Winckler, P., and Herrera, M. (2020). *COSTAS DE CHILE*. Valparaíso.
- Mørk, G., Barstow, S., Kabuth, A., and Pontes, M. T. (2010). Assessing the global wave energy potential. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 3(2008):447–454.
- Munk, W. H. (1950). ORIGIN AND GENERATION OF WAVES. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(1):4.
- National Atmospheric and Oceanic Administration (2020). Coriolis Effect.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (2019). WAVEWATCH III® Production Hindcast, Multigrid: Feb 2005 to Mar 2019.
- Reguero, B. G., Losada, I. J., and Méndez, F. J. (2015). A global wave power resource and its seasonal, interannual and long-term variability. *Applied Energy*, 148:366–380.
- Riquelme, L. and Eduardo, F. (2015). *Caracterización de energía del oleaje utilizando selección de climas de oleaje y métodos de propagación calibrados*. Postgrado, UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA.
- Ruiz, A. L. (2014). Propagación de oleaje con SWAN.
- Rusu, E. (2010). Modelling of wave-current interactions at the mouths of the Danube. *Journal of Marine Science and Technology*, 15(2):143–159.

- Rusu, L. (2015). Assessment of the wave energy in the black sea based on a 15-year hindcast with data assimilation. *Energies*, 8(9):10370–10388.
- Saket, A. and Etemad-Shahidi, A. (2012). Wave energy potential along the northern coasts of the Gulf of Oman, Iran. *Renewable Energy*, 40(1):90–97.
- Schlütter, F., Petersen, O. S., and Nyborg, L. (2015). Resource Mapping of Wave Energy Production in Europe. *Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference 6-11th Sept 2015, Nantes, France*, pages 1–9.
- SHOA (2015). Instrucciones Oceanográficas N1.
- SHOA (2019). B O L E T Í N No8.
- Silva, R. (2005). *Análisis y Descripción Estadística Del Oleaje*. Ciudad de México, primera edición.
- STANDS4 LLC (2001). Subgrid.
- Teles, M. J. R. (2008). *Aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima na zona adjacente a Pinheiro da Cruz Sampaio*. PhD thesis, Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- The SWAN Team (2019). USER MANUAL SWAN Cycle III version 40.51. page 129.
- Thomson, R. E. and Emery, W. J. (2014). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography: Third Edition*. Elsevier, 3 edition.
- Universidad de Valparaíso (2016). *Atlas de Oleaje de Chile*. Valparaíso.
- Universitat Politècnica de Catalunya (1999). Análisis de la aproximación de los modelos espectrales.
- Universitat Politècnica de Catalunya (2014). Teoría Lineal del Oleaje.
- University Corporation for Atmospheric Research (2009). Nearshore wave modeling.
- US EPA (2015). Air Quality Model Performance Metric Definitions.
- Valenzuela, N. J. A. (2013). Potencial undimotriz de alta y baja frecuencia en el Golfo de Arauco a partir de datos de radar HF. (May):1–76.
- Vannucchi, V. and Cappietti, L. (2016). Wave energy assessment and performance estimation of state of the art wave energy converters in Italian hotspots. *Sustainability (Switzerland)*, 8(12).
- Wilks, D. (2007). *Statistical methods in the atmospheric sciences*, volume 14. Academic Press, 2 edition.
- Willis, M. (2010). Implementing the SWAN wave model at three east coast National Weather Service offices. *14th Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface*.
- Winckler, P., Contreras-López, M., Campos-Caba, R., Beyá, J. F., and Molina, M. (2017). El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile central. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 45(4):622–648.
- Winckler Grez, P. (2018). Introducción al modelado de procesos costeros. page 128.



World Meteorological Organization (1998). *Guide to wave Analysis and Forescanting*. Number 702. Second edi
edition.

6.1 Anexos Metodología

6.1.1 Paquete pygrib.

Paquete de python para la escritura y lectura de archivos GRIB (edición 1 y 2). Los archivos GRIB son un estándar para la distribución de datos grillados de “World Meteorological Organization”. Este paquete es desarrollado por “European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)” (Forecasts, 2020) y requiere lo siguiente para su instalación:

- Python 3 o superior.
- Paquete numpy 1.2.1 o superior (versión 1.5.1 o superior requerido para Python 3).
- Paquete pyproj. Requiere librería PROJ.4 instalada o el paquete matplotlib con basemap toolkit. Pyproj 1.8.9 is requerido para Python 3.
- Librería ECCODES para la codificación y decodificación de los archivos GRIB.
- Computador con una distribución de linux instalada, dado que la librería ECCODES solo funciona en este tipo de distribuciones.

Para la instalación, seguir lo disponible en el sitio <https://jswhit.github.io/pygrib/docs/>.

6.1.2 Escritura archivos swn

```
import numpy as np
import pygrib as pygrib
from escritura_swan_final import E1, E2
import multiprocessing
rute='carpeta_donde_están_los_archivos_grb2'
def lectura_escritura(k):
    coordenadas=np.array([[[-32.5,-71.50+360],[-32.5,-72.00+360],[-32.5,-72.50+360],
[-33.0,-72.50+360],[-33.5,-72.50+360],[-33.5,-72.00+360]])
    h=[0000,300,600,900,1200,1500,1800,2100] #ESTADOS DE MAR
    #APERTURA ARCHIVOS Y ESCRITURA
    grbs_dp=pygrib.open(rute+'multi_1.glo_30m.dp.'+k+'.grb2'); #direction
    grbs_hs=pygrib.open(rute+'multi_1.glo_30m.hs.'+k+'.grb2'); #Hs
    grbs_tp=pygrib.open(rute+'multi_1.glo_30m.tp.'+k+'.grb2'); #TP
    #writing
    for hora in h:
        print(k,hora)
        largo=len(grbs_dp.select(validityTime=hora))
        if hora==0:
            largo=largo-1
        for l in range(0,largo):
            g_dp=grbs_dp.select(validityTime=hora)[l]
            g_hs=grbs_hs.select(validityTime=hora)[l]
            g_tp=grbs_tp.select(validityTime=hora)[l]
            E1(g_dp,g_hs,g_tp,coordenadas)#primera
            E2(g_dp)#segunda
    print('Termino: '+k)
    return
mes=['01','02','03','04','05','06','07','08','09','10','11','12']
for y in np.linspace(2009,2018,10,num=10,dtype=int).astype(str):
    mes_y=[y+m for m in mes]
    pool = multiprocessing.Pool(processes=4) #max: 4
    r = pool.map(lectura_escritura,mes_y)
    pool.close()
    print('finish '+y)
```

Figura 6.1: Función para ejecución de escritura.

(Fuente: Elaboración propia.)

```
import os
import pygrib
from xd import read_g_data

ruta_f='/home/maniconaji/Desktop/Analisis/Archivos_modelar/'
parameters='XP YP DEPTH DIR HSIGN TPS TM02 TMM10 HSWELL WLEN STEEPNESS' # BFI QP TRANSP FORCE TDIR
def El(g_dp,g_hs,g_tp,xc):
    Date=str(g_dp.validityDate)
    Time=str(g_dp.validityTime)
    year=str(g_dp.year)
    data0,data1,data2,data3,data4,data5=read_g_data(g_dp,g_hs,g_tp,xc)
    rutal=ruta_f+'L/'+year+'/memo0_'+Time+'_'+Date+'.swn'
    filel = open(rutal, "w")
    filel.write('$*****HEADING*****\n')
    filel.write('PROJ \'Memoria\' \'M\' \'M\' \n')
    filel.write('$ PURPOSE OF TEST: OBTENCION ESPECTROS ANIDACION SEGUN :'+Time+'_'+Date+'\n')
    filel.write('$\n')
    filel.write('$*****MODEL STARTUP*****\n')
    filel.write('SET NAUTical\n')
    filel.write('COORDinates SPHERical CCM\n')
    filel.write('NUM STOPC dabs=0.005 drel=0.01 curvat=0.005 npnts=98.00 STAT mxitst=50 alfa=0.01\n')
    filel.write('$\n')
    filel.write('$*****MODEL INPUT*****\n')
    filel.write('CGRID REGular -72.50 -33.50 0.00 1.10 1.00 66 60 CIRCLE 180 0.02 0.4 32 \n')
    filel.write('$\n')
    filel.write('INPgrid BOTtom REGular -72.50625 -33.50625 0.0 291 241 0.0041667 0.0041667 \n')
    filel.write('READinp BOTtom -1. \'bat_final3.bot\' 3 0 FREE\n')
    filel.write('$\n')
    filel.write('$*****INPUT BOUNDARY SPECTRAL CONDITIONS*****\n')
    filel.write('BOUNDspec SEGment XY -71.50 -32.50 -72.00 -32.50 CONstant PAR '+data0+'\n')
    filel.write('BOUNDspec SEGment XY -72.00 -32.50 -72.50 -32.50 CONstant PAR '+data1+'\n')
    filel.write('BOUNDspec SEGment XY -72.50 -32.50 -72.50 -33.00 CONstant PAR '+data2+'\n')
    filel.write('BOUNDspec SEGment XY -72.50 -33.00 -72.50 -33.50 CONstant PAR '+data3+'\n')
    filel.write('BOUNDspec SEGment XY -72.50 -33.50 -72.00 -33.50 CONstant PAR '+data4+'\n')
    filel.write('BOUNDspec SEGment XY -72.00 -33.50 -71.40 -33.50 CONstant PAR '+data5+'\n')
    filel.write('BREAKing CONSTANT 1.0 0.42\n')
    filel.write('OFF QUADRUPL\n')
    filel.write('OFF WCAPPING\n')
    filel.write('$\n')
    filel.write('$***** OUTPUT REQUESTS*****\n')
    filel.write('NGRID \'A\' -72.00 -33.25 0.0 0.60 0.50 72 60\n')
    filel.write('NESTout \'A\' \'data0/'+year+'/data0_'+Time+Date+'.dat\' \n')
    filel.write('$\n')
    filel.write('GROUP \'OUTPUT\' SUBGRID 0 66 0 60 \n')
    filel.write('RAY \'RAY01\' -72.50 -33.50 -71.40 -33.50 61 -72.50 -32.50 -71.40 -32.50 \n')
    filel.write('POINTs \'P050\' -71.575 -33.00\n')
    filel.write('ISOLine \'Veril050\' \'RAY01\' DEPth 50\n')
    filel.write('POINTs \'P100\' -71.625 -33.00\n')
    filel.write('ISOLine \'Veril100\' \'RAY01\' DEPth 100\n')
    filel.write('POINTs \'P150\' -71.728 -33.00\n')
    filel.write('ISOLine \'Veril150\' \'RAY01\' DEPth 150\n')
    filel.write('POINTs \'P200\' -71.783 -33.00\n')
    filel.write('ISOLine \'Veril200\' \'RAY01\' DEPth 200\n')
    filel.write('POINTs \'SHOA\' -71.83 -33.12\n')
    filel.write('$\n')
    filel.write('OUTPUT OPTIons BLOCK 9 66\n')
    filel.write('BLOCK \'OUTPUT\' NOHEADER \'R0/'+year+'_'+Time+Date+'.mat\' LAY-OUT 1 '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'P050\' NOHEADER \'R0/'+year+'/P050_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'Veril050\' NOHEADER \'R0/'+year+'/050_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'P100\' NOHEADER \'R0/'+year+'/P100_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'Veril100\' NOHEADER \'R0/'+year+'/100_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'P150\' NOHEADER \'R0/'+year+'/P150_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'Veril150\' NOHEADER \'R0/'+year+'/150_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'P200\' NOHEADER \'R0/'+year+'/P200_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'Veril200\' NOHEADER \'R0/'+year+'/200_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'SHOA\' NOHEADER \'R0/'+year+'/'+'SHOA_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('$\n')
    filel.write('TEST 1,0\n')
    filel.write('COMPUTE\n')
    filel.write('STOP\n')
    filel.write('$\n')
    filel.close()
    return
```

Figura 6.2: Función para escritura, parte 1.

(Fuente: Elaboración propia.)

```
def E2(g_dp):
    Date=str(g_dp.validityDate)
    Time=str(g_dp.validityTime)
    year=str(g_dp.year)
    ruta=ruta_f+'Ldata/'+year+' /memo1_'+Time+'_'+Date+'.sw'n'
    filel = open(ruta, "w")
    filel.write('$*****HEADING*****\n')
    filel.write('PROJ \'Memoria\' \'M\' \'n')
    filel.write('$ PURPOSE OF TEST: OBTENCION ESPECTROS ANIDACION SEGUN :'+Time+'_'+Date+'\n')
    filel.write('$\n')
    filel.write('$*****MODEL STARTUP*****\n')
    filel.write('SET NAUTICAL\n')
    filel.write('COORDINATES SPHERICAL CCM\n')
    filel.write('NUM STOPC dabs=0.005 drel=0.01 curvat=0.005 npts=98.00 STAT mxistst=50 alfa=0.01\n')
    filel.write('$\n')
    filel.write('$*****MODEL INPUT*****\n')
    filel.write('CGRID REGULAR -72.00 -33.25 0.0 0.60 0.50 72 60 CIRCLE 180 0.02 0.4 32 \n')
    filel.write('$\n')
    filel.write('INPgrid BOTtom REGULAR -72.00625 -33.25625 0.0 145 121 0.0041667 0.0041667 \n')
    filel.write('READinp BOTtom -1. \'bat_final4.bot\' 3 0 FREE\n')
    filel.write('$\n')
    filel.write('$*****INPUT BOUNDARY SPECTRAL CONDITIONS*****\n')
    filel.write('BOUNDnest1 Nest \'data0/'+year+' /data0_'+Time+Date+'.dat\' \n')
    filel.write('BREAKing CONSTANT 1.0 0.42\n')
    filel.write('OFF QUADRUPL\n')
    filel.write('OFF WCAPPING\n')
    filel.write('$\n')
    filel.write('$***** OUTPUT REQUESTS*****\n')
    filel.write('GROUP \'OUTPUT\' SUBGRID 0 72 0 60 \n')
    filel.write('RAY \'RAYO1\' -72.00 -33.25 -71.40 -33.25 61 -72.00 -32.75 -71.40 -32.75 \n')
    filel.write('POINTS \'P050\' -71.575 -33.00\n')
    filel.write('ISOLine \'Veril050\' \'RAYO1\' DEPTH 50\n')
    filel.write('POINTS \'P050\' -71.625 -33.00\n')
    filel.write('ISOLine \'Veril100\' \'RAYO1\' DEPTH 100\n')
    filel.write('POINTS \'P050\' -71.728 -33.00\n')
    filel.write('ISOLine \'Veril150\' \'RAYO1\' DEPTH 150\n')
    filel.write('POINTS \'P050\' -71.783 -33.00\n')
    filel.write('ISOLine \'Veril200\' \'RAYO1\' DEPTH 200\n')
    filel.write('POINTS \'SHOA\' -71.83 -33.12\n')
    filel.write('$\n')
    filel.write('OUTPut OPTIons BLOCK 9 72\n')
    filel.write('BLOCK \'OUTPUT\' NOHEADER \'R1/'+year+' /'+Time+Date+'.mat\' LAY-OUT 1 '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'P050\' NOHEADER \'R1/'+year+' /P050_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'Veril050\' NOHEADER \'R1/'+year+' /'+050_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'P100\' NOHEADER \'R1/'+year+' /P100_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'Veril100\' NOHEADER \'R1/'+year+' /'+100_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'P150\' NOHEADER \'R1/'+year+' /P150_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'Veril150\' NOHEADER \'R1/'+year+' /'+150_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'P200\' NOHEADER \'R1/'+year+' /P200_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'Veril200\' NOHEADER \'R1/'+year+' /'+200_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('TABLE \'SHOA\' NOHEADER \'R1/'+year+' /'+SHOA_'+Time+Date+'.mat\' '+parameters+' \n')
    filel.write('$\n')
    filel.write('TEST 1,0\n')
    filel.write('COMPUTE\n')
    filel.write('STOP\n')
    filel.write('$\n')
    filel.close()
    return

def read_g_data(g_dp,g_hs,g_tp,xc):
    gdp0,lats, lons = g_dp.data(lat1=xc[0,0],lat2=xc[0,0],lon1=xc[0,1],lon2=xc[0,1])
    gdp1,lats, lons = g_dp.data(lat1=xc[1,0],lat2=xc[1,0],lon1=xc[1,1],lon2=xc[1,1])
    gdp2,lats, lons = g_dp.data(lat1=xc[2,0],lat2=xc[2,0],lon1=xc[2,1],lon2=xc[2,1])
    gdp3,lats, lons = g_dp.data(lat1=xc[3,0],lat2=xc[3,0],lon1=xc[3,1],lon2=xc[3,1])
    gdp4,lats, lons = g_dp.data(lat1=xc[4,0],lat2=xc[4,0],lon1=xc[4,1],lon2=xc[4,1])
    gdp5,lats, lons = g_dp.data(lat1=xc[5,0],lat2=xc[5,0],lon1=xc[5,1],lon2=xc[5,1])
    ghs0,lats, lons = g_hs.data(lat1=xc[0,0],lat2=xc[0,0],lon1=xc[0,1],lon2=xc[0,1])
    ghs1,lats, lons = g_hs.data(lat1=xc[1,0],lat2=xc[1,0],lon1=xc[1,1],lon2=xc[1,1])
    ghs2,lats, lons = g_hs.data(lat1=xc[2,0],lat2=xc[2,0],lon1=xc[2,1],lon2=xc[2,1])
    ghs3,lats, lons = g_hs.data(lat1=xc[3,0],lat2=xc[3,0],lon1=xc[3,1],lon2=xc[3,1])
    ghs4,lats, lons = g_hs.data(lat1=xc[4,0],lat2=xc[4,0],lon1=xc[4,1],lon2=xc[4,1])
    ghs5,lats, lons = g_hs.data(lat1=xc[5,0],lat2=xc[5,0],lon1=xc[4,1],lon2=xc[5,1])
    gtp0,lats, lons = g_tp.data(lat1=xc[0,0],lat2=xc[0,0],lon1=xc[0,1],lon2=xc[0,1])
    gtp1,lats, lons = g_tp.data(lat1=xc[1,0],lat2=xc[1,0],lon1=xc[1,1],lon2=xc[1,1])
    gtp2,lats, lons = g_tp.data(lat1=xc[2,0],lat2=xc[2,0],lon1=xc[2,1],lon2=xc[2,1])
    gtp3,lats, lons = g_tp.data(lat1=xc[3,0],lat2=xc[3,0],lon1=xc[3,1],lon2=xc[3,1])
    gtp4,lats, lons = g_tp.data(lat1=xc[4,0],lat2=xc[4,0],lon1=xc[4,1],lon2=xc[4,1])
    gtp5,lats, lons = g_tp.data(lat1=xc[5,0],lat2=xc[5,0],lon1=xc[5,1],lon2=xc[5,1])
    data0=str(ghs0[0][0])[0:5]+' '+str(gtp0[0][0])[0:5]+' '+str(gdp0[0][0])[0:6]
    data1=str(ghs1[0][0])[0:5]+' '+str(gtp1[0][0])[0:5]+' '+str(gdp1[0][0])[0:6]
    data2=str(ghs2[0][0])[0:5]+' '+str(gtp2[0][0])[0:5]+' '+str(gdp2[0][0])[0:6]
    data3=str(ghs3[0][0])[0:5]+' '+str(gtp3[0][0])[0:5]+' '+str(gdp3[0][0])[0:6]
    data4=str(ghs4[0][0])[0:5]+' '+str(gtp4[0][0])[0:5]+' '+str(gdp4[0][0])[0:6]
    data5=str(ghs5[0][0])[0:5]+' '+str(gtp5[0][0])[0:5]+' '+str(gdp5[0][0])[0:6]
    return data0,data1,data2,data3,data4,data5
```

Figura 6.3: Función para escritura, parte 2.

(Fuente: Elaboración propia.)

6.2 Anexos Resultados

6.2.1 Validación de los datos: NOAA vs UV.

Para el rango temporal de comparación, el día 03 de Julio de 2013 a las 12:00:00 es el momento donde el potencial energético undimotriz presenta su máximo valor, por lo tanto se presentan el espectro para la frecuencia, para la dirección y el espectro bidimensional para los datos provenientes del Atlas del oleaje (UV) y los del modelo NWW3 del NOAA, como se muestra en las figuras 6.4, 6.5 y 6.6 respectivamente. Se determina que el máximo alcanzado en términos de la frecuencia es de 0,0575 [Hz] para el NOAA y 0,055 [Hz] para el Atlas del oleaje, a su vez, los datos del NOAA muestran un peak más cercano a la dirección suroeste, como se observa en el espectro de la dirección y el espectro bidimensional, en comparación a los datos del Atlas del oleaje.

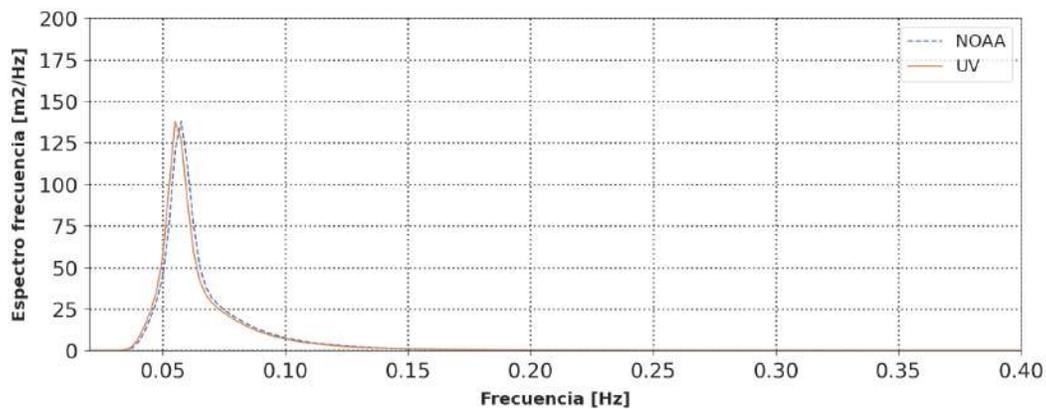


Figura 6.4: Espectro de la frecuencia para modelo NWW3 del NOAA y Atlas de oleaje.
(Fuente: Elaboración Propia.)

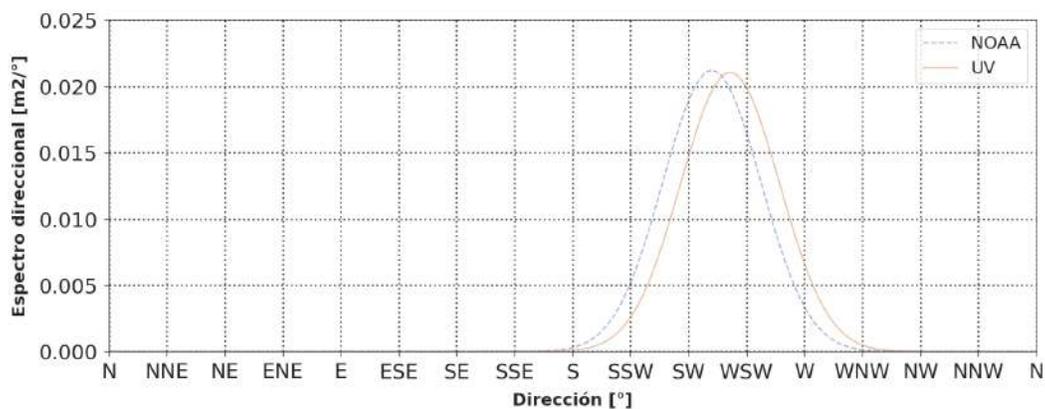


Figura 6.5: Espectro de la dirección para modelo NWW3 del NOAA y Atlas de oleaje.
(Fuente: Elaboración Propia.)

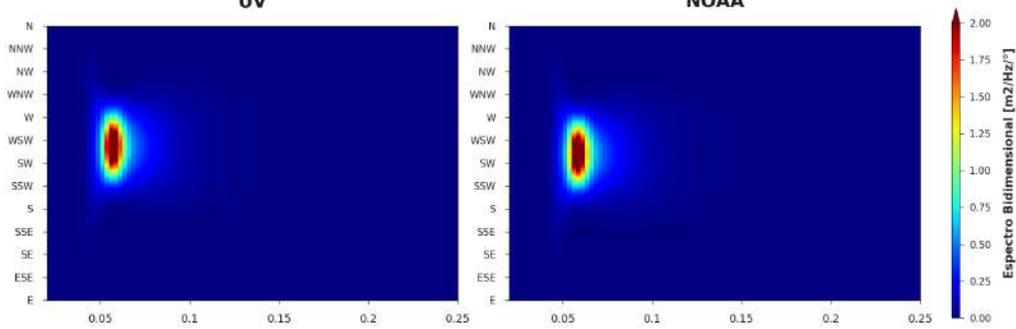


Figura 6.6: Espectro Bidimensional para modelo NWW3 del NOAA y Atlas de oleaje.

(Fuente: Elaboración Propia.)

6.2.2 Validación de los datos: INH vs SWAN.

Para el rango temporal de comparación, el día 03 de Julio de 2013 a las 15:00:00 es el momento donde el potencial energético undimotriz presenta su máximo valor, por lo tanto se presentan el espectro para la frecuencia y para la dirección en la figura 6.7, mientras que en la figura 6.8 se presenta el espectro bidimensional para los datos provenientes de la boya TRIAXYS y los datos del modelo SWAN. Se determina que el máximo alcanzado en términos de la frecuencia es de 0,0575 [Hz] para el modelo SWAN y 0,060 [Hz] para la boya TRIAXYS, a su vez, los datos de SWAN muestran un peak más cercano a la dirección suroeste, como se observa en el espectro de la dirección y el espectro bidimensional, en comparación a la boya TRIAXYS.

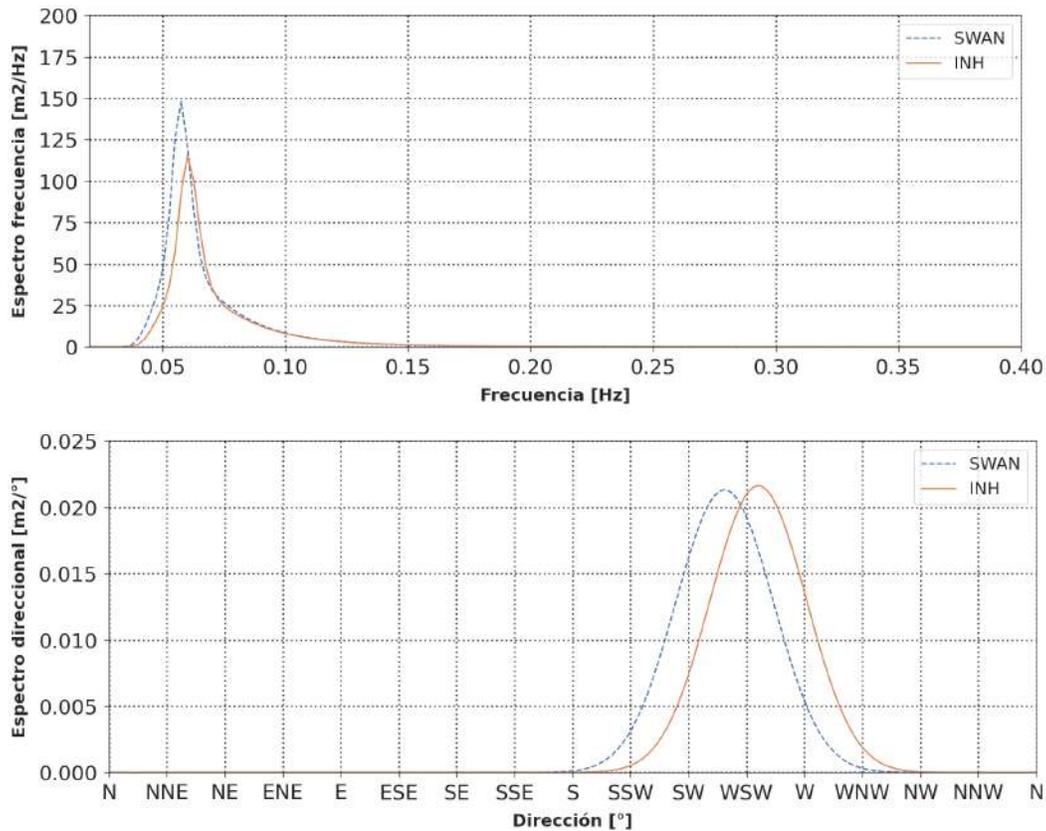


Figura 6.7: Espectros para la boya y modelo SWAN.

(Fuente: Elaboración Propia.)

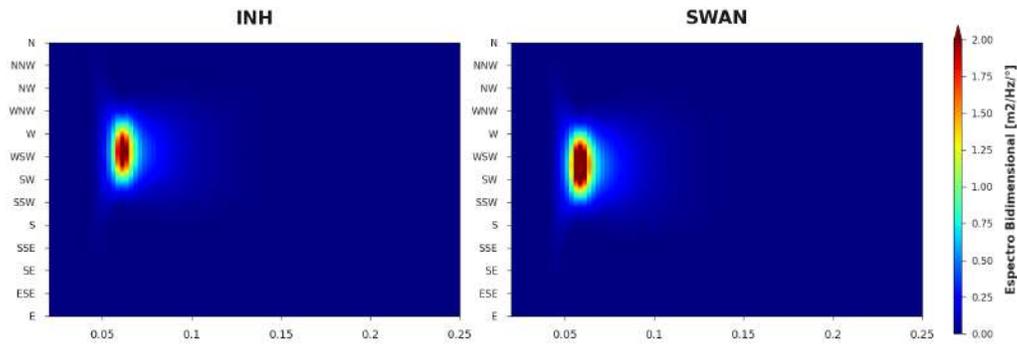


Figura 6.8: Espectro Bidimensional para la boya y modelo SWAN.

(Fuente: Elaboración Propia.)

6.2.3 Caracterización climatológica del oleaje.

Tablas de rosas del oleaje.

Tabla 6.1: Tabla de rosa del oleaje para la altura significativa para punto P050.

Hs [m]	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
<0,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49	0,14	0,01	0,00	0,00
0,5-1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	20,78	8,98	0,25	0,00	0,00
1,0-1,5	0,00	0,00	0,00	0,00	24,79	23,40	2,06	0,00	0,00
1,5-2,0	0,00	0,00	0,00	0,00	2,61	11,24	1,44	0,00	0,00
2,0-2,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	2,43	0,27	0,00	0,00
2,5-3,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,05	0,00	0,00
3,0-3,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,03	0,00	0,00
3,5-4,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,01	0,00	0,00
4,0-4,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00
>4,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.2: Tabla de rosa del oleaje para la altura significativa para punto P100.

Hs [m]	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
<0,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,01	0,00	0,00
0,5-1,0	0,00	0,00	0,00	0,02	7,69	0,30	0,07	0,00	0,00
1,0-1,5	0,00	0,00	0,00	0,11	38,83	2,39	1,65	0,00	0,00
1,5-2,0	0,00	0,00	0,00	0,00	30,40	2,96	1,96	0,00	0,00
2,0-2,5	0,00	0,00	0,00	0,00	7,96	1,52	0,86	0,01	0,00
2,5-3,0	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	0,54	0,09	0,00	0,00
3,0-3,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41	0,30	0,04	0,00	0,00
3,5-4,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,11	0,02	0,00	0,00
4,0-4,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,06	0,02	0,00	0,00
>4,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.3: Tabla de rosa del oleaje para la altura significativa para punto P150.

Hs [m]	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
<0,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
0,5-1,0	0,00	0,00	0,00	0,39	0,07	0,02	0,01	0,00	0,00
1,0-1,5	0,00	0,00	0,02	5,45	0,90	0,48	0,83	0,00	0,00
1,5-2,0	0,00	0,00	0,08	19,60	2,86	1,08	1,37	0,01	0,00
2,0-2,5	0,00	0,00	0,07	27,11	2,18	1,27	0,75	0,02	0,00
2,5-3,0	0,00	0,00	0,00	19,36	1,36	0,43	0,12	0,00	0,00
3,0-3,5	0,00	0,00	0,00	8,45	0,71	0,13	0,03	0,00	0,00
3,5-4,0	0,00	0,00	0,00	2,62	0,36	0,02	0,03	0,00	0,00
4,0-4,5	0,00	0,00	0,00	0,88	0,25	0,02	0,01	0,00	0,00
>4,5	0,00	0,00	0,00	0,44	0,12	0,05	0,02	0,00	0,00

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.4: Tabla de rosa del oleaje para la altura significativa para punto P200.

Hs [m]	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
<0,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
0,5-1,0	0,00	0,00	0,01	0,20	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00
1,0-1,5	0,00	0,00	0,60	3,27	0,55	0,37	0,72	0,00	0,00
1,5-2,0	0,00	0,00	2,66	13,47	1,84	0,97	1,42	0,01	0,00
2,0-2,5	0,00	0,00	4,84	20,10	1,58	1,13	0,80	0,03	0,00
2,5-3,0	0,00	0,00	3,80	18,38	0,96	0,53	0,22	0,01	0,00
3,0-3,5	0,00	0,00	1,87	10,75	0,56	0,15	0,04	0,00	0,00
3,5-4,0	0,00	0,00	0,49	4,35	0,26	0,03	0,02	0,01	0,00
4,0-4,5	0,00	0,00	0,10	1,55	0,21	0,03	0,01	0,00	0,00
>4,5	0,00	0,00	0,01	0,85	0,08	0,05	0,02	0,00	0,00

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.5: Tabla de rosa para el periodo peak del oleaje para punto P050.

Tp [s]	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
<10	0,00	0,00	0,00	0,00	4,11	1,25	0,20	0,00	0,00
10-11	0,00	0,00	0,00	0,00	4,16	2,59	0,01	0,00	0,00
11-12	0,00	0,00	0,00	0,00	8,08	4,89	0,01	0,00	0,00
12-13	0,00	0,00	0,00	0,00	11,15	7,34	0,02	0,00	0,00
13-14	0,00	0,00	0,00	0,00	11,07	10,32	0,11	0,00	0,00
14-15	0,00	0,00	0,00	0,00	6,72	9,32	0,71	0,00	0,00
15-16	0,00	0,00	0,00	0,00	1,90	4,17	0,75	0,00	0,00
16-17	0,00	0,00	0,00	0,00	1,10	3,57	0,84	0,00	0,00
17-18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36	2,25	0,71	0,00	0,00
>18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	1,45	0,79	0,00	0,00

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.6: Tabla de rosa para el periodo peak del oleaje para punto P100.

Tp [s]	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
<10	0,00	0,00	0,00	0,13	4,92	0,37	0,16	0,02	0,00
10-11	0,00	0,00	0,00	0,00	6,26	0,48	0,01	0,00	0,00
11-12	0,00	0,00	0,00	0,00	12,69	0,62	0,00	0,00	0,00
12-13	0,00	0,00	0,00	0,00	17,99	0,90	0,02	0,00	0,00
13-14	0,00	0,00	0,00	0,00	20,37	1,36	0,09	0,00	0,00
14-15	0,00	0,00	0,00	0,00	13,92	1,76	0,77	0,00	0,00
15-16	0,00	0,00	0,00	0,00	4,89	0,97	0,86	0,00	0,00
16-17	0,00	0,00	0,00	0,00	3,20	0,85	0,92	0,00	0,00
17-18	0,00	0,00	0,00	0,00	1,83	0,52	0,86	0,00	0,00
>18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,85	0,35	1,04	0,00	0,00

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.7: Tabla de rosa para el periodo peak del oleaje para punto P150.

Tp [s]	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
<10	0,00	0,00	0,12	4,37	0,50	0,17	0,14	0,03	0,00
10-11	0,00	0,00	0,01	5,61	0,76	0,10	0,01	0,00	0,00
11-12	0,00	0,00	0,02	11,96	1,10	0,05	0,00	0,00	0,00
12-13	0,00	0,00	0,02	17,43	1,44	0,08	0,02	0,00	0,00
13-14	0,00	0,00	0,01	20,03	1,73	0,17	0,05	0,00	0,00
14-15	0,00	0,00	0,00	14,08	1,57	0,84	0,46	0,00	0,00
15-16	0,00	0,00	0,00	5,00	0,67	0,58	0,55	0,00	0,00
16-17	0,00	0,00	0,00	3,22	0,56	0,60	0,64	0,00	0,00
17-18	0,00	0,00	0,00	1,78	0,30	0,47	0,57	0,00	0,00
>18	0,00	0,00	0,00	0,82	0,16	0,43	0,74	0,00	0,00

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.8: Tabla de rosa para el periodo peak del oleaje para punto P200.

Tp [s]	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
<10	0,00	0,00	2,12	2,46	0,38	0,15	0,13	0,05	0,00
10-11	0,00	0,00	1,15	4,66	0,56	0,09	0,01	0,00	0,00
11-12	0,00	0,00	2,21	10,09	0,75	0,05	0,00	0,00	0,00
12-13	0,00	0,00	2,68	15,32	0,90	0,08	0,02	0,00	0,00
13-14	0,00	0,00	3,16	17,57	1,13	0,17	0,05	0,00	0,00
14-15	0,00	0,00	1,98	12,58	1,12	0,74	0,46	0,00	0,00
15-16	0,00	0,00	0,64	4,59	0,48	0,53	0,55	0,00	0,00
16-17	0,00	0,00	0,33	3,03	0,45	0,59	0,72	0,00	0,00
17-18	0,00	0,00	0,13	1,75	0,24	0,43	0,58	0,00	0,00
>18	0,00	0,00	0,00	0,86	0,09	0,42	0,76	0,00	0,00

(Fuente: Elaboración Propia.)

Histogramas altura significativa y periodo peak.

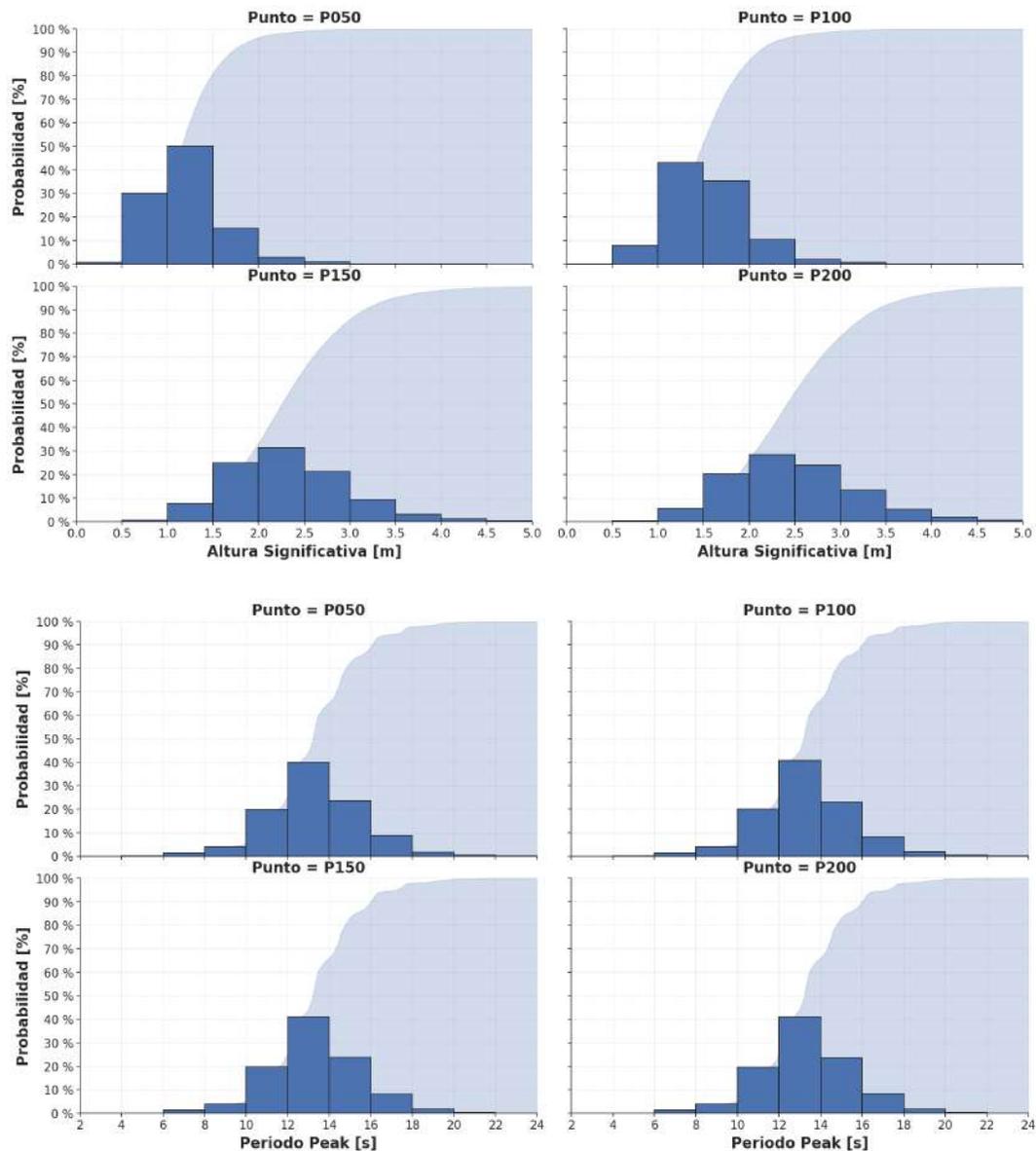
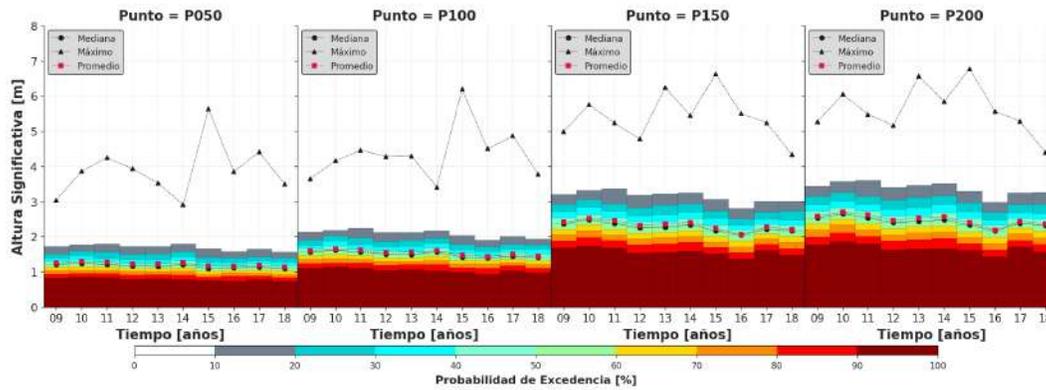


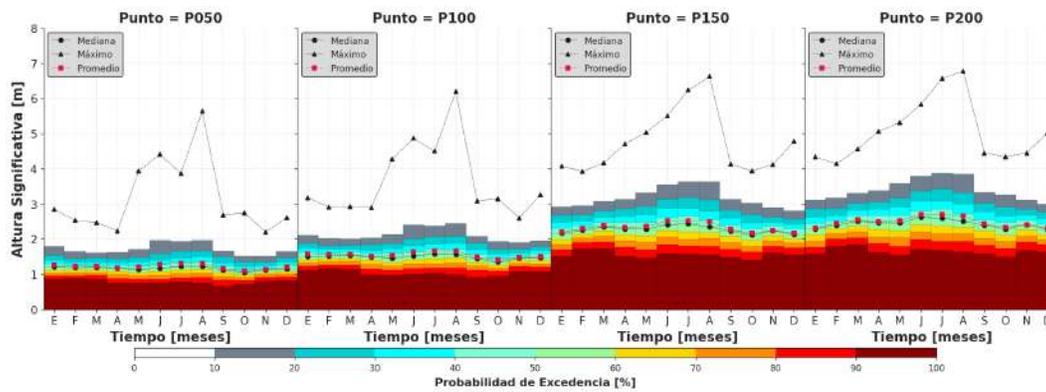
Figura 6.9: Histograma para cada parámetro.

(Fuente: Elaboración Propia.)

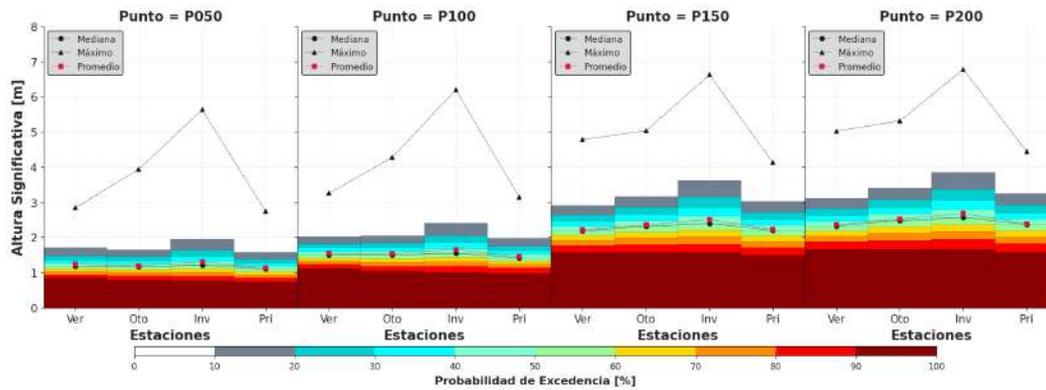
Variabilidad temporal para la altura significativa.



(a) Variación anual.



(b) Variación mensual.

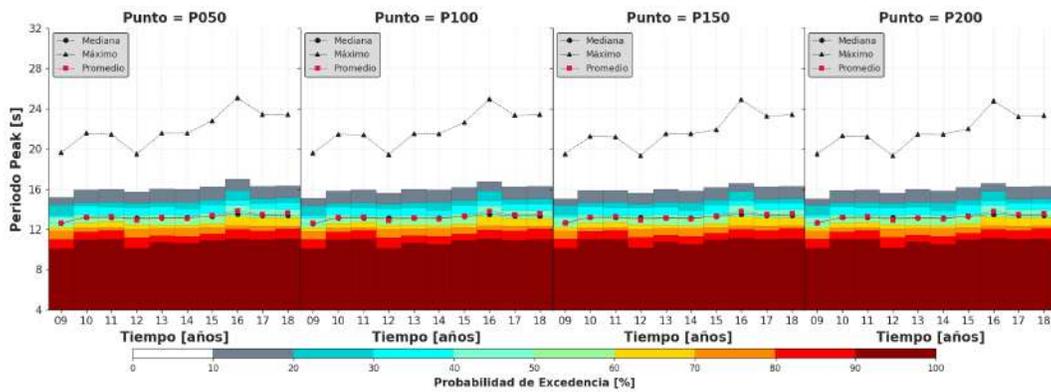


(c) Variación estacional.

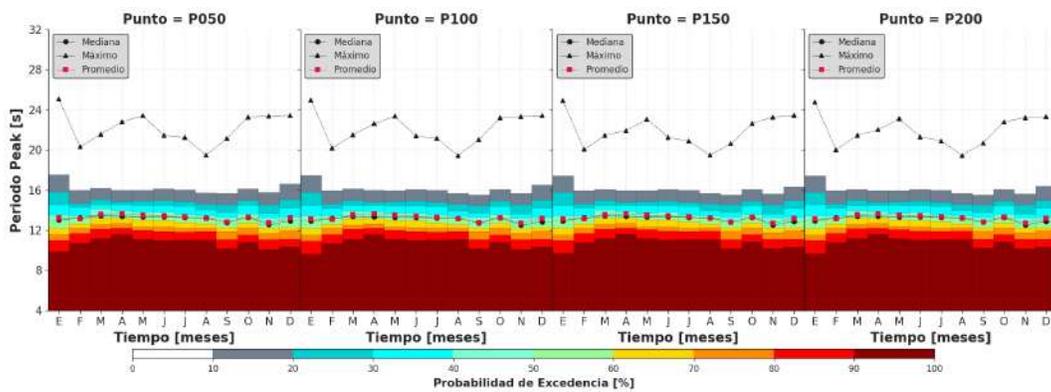
Figura 6.10: Variación temporal para la altura significativa del oleaje.

(Fuente: Elaboración Propia.)

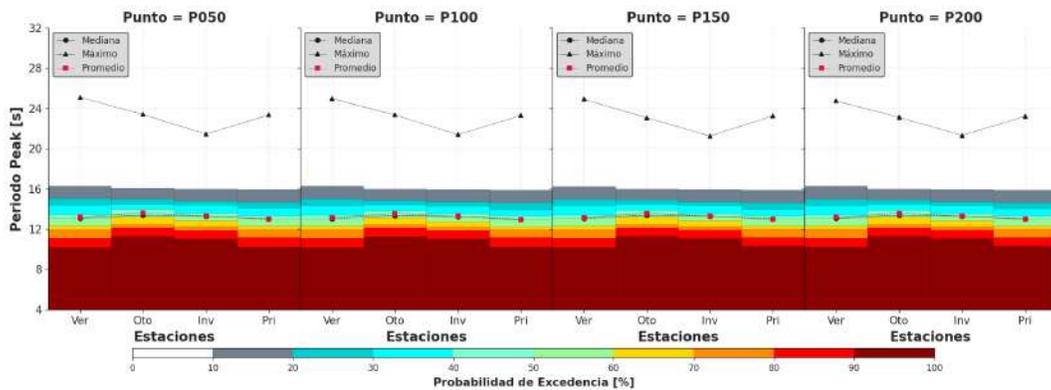
Variabilidad temporal para el periodo peak.



(a) Variación anual.



(b) Variación mensual.

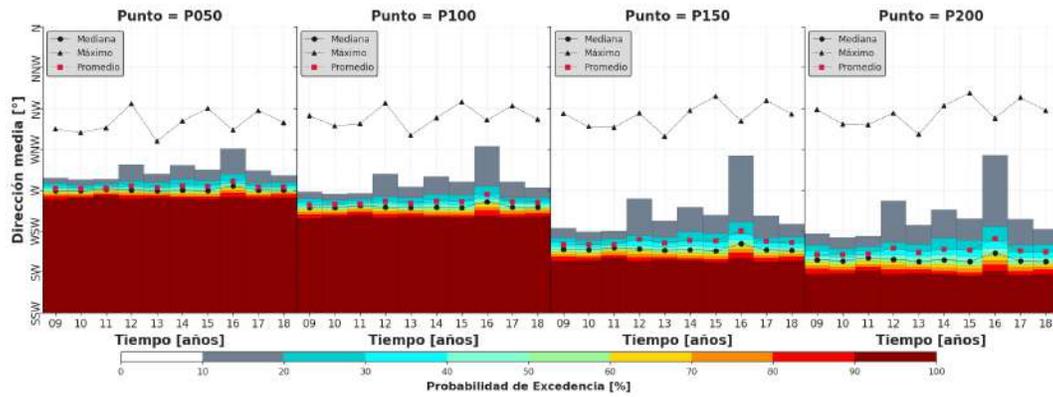


(c) Variación estacional.

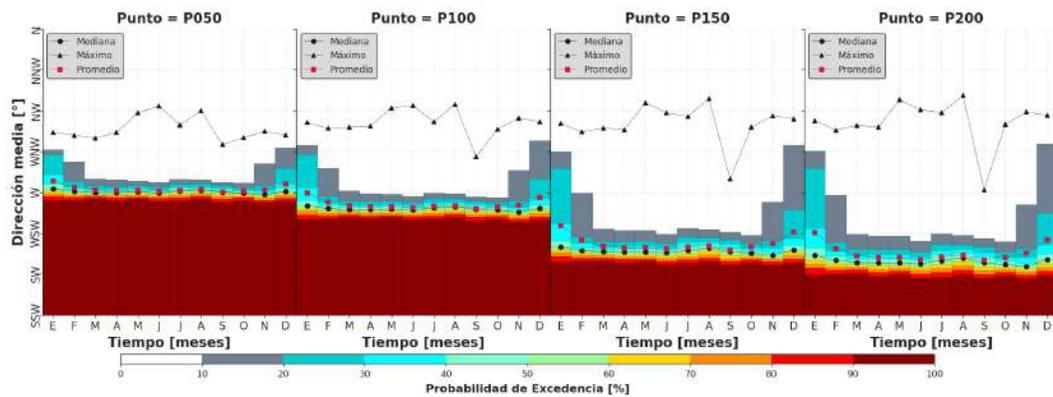
Figura 6.11: Variación temporal para el periodo peak del oleaje.

(Fuente: Elaboración Propia.)

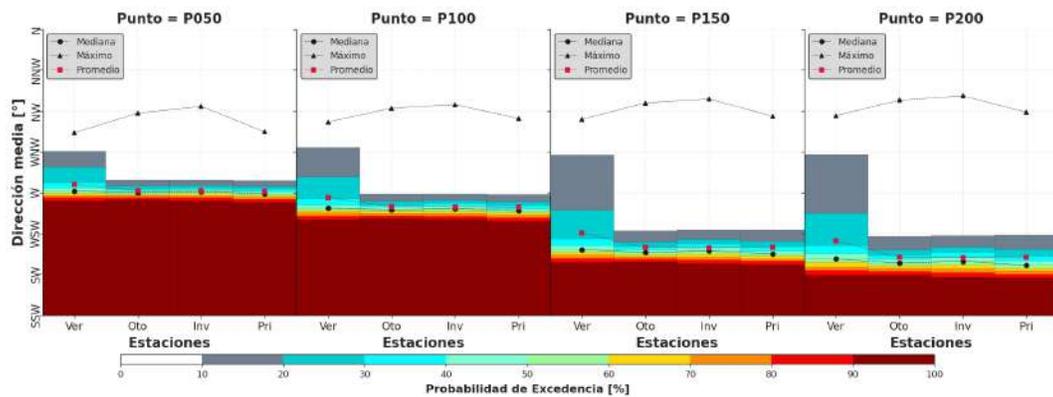
Variabilidad temporal para el dirección peak.



(a) Variación anual.



(b) Variación mensual.

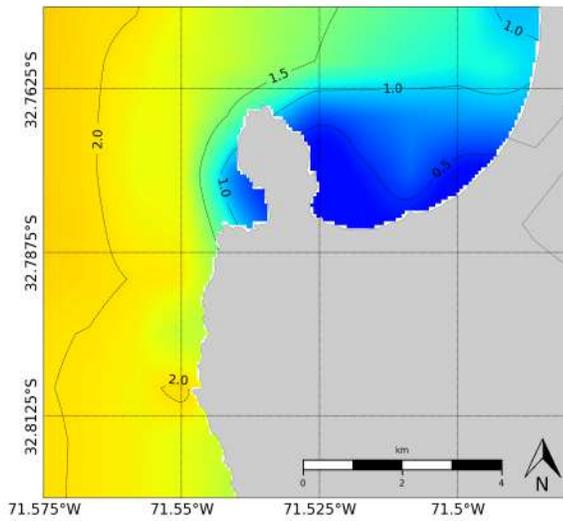


(c) Variación estacional.

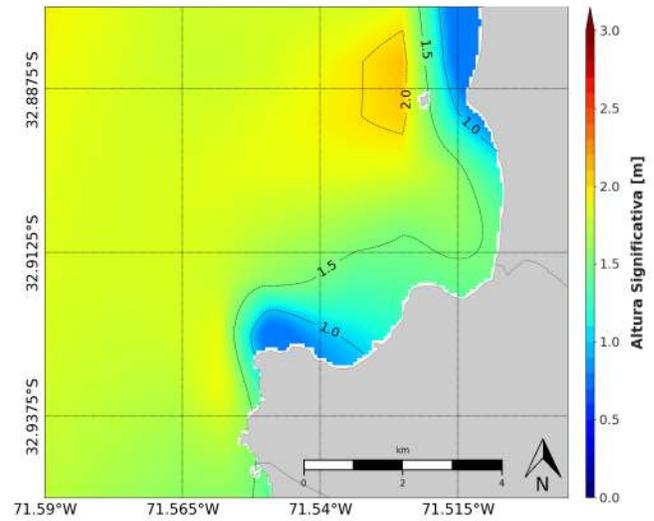
Figura 6.12: Variación temporal para el dirección peak del oleaje.

(Fuente: Elaboración Propia.)

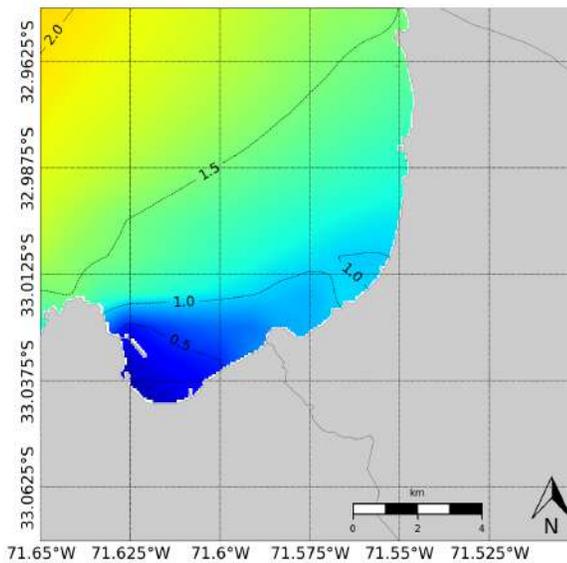
Resultados altura significativa en cada bahía.



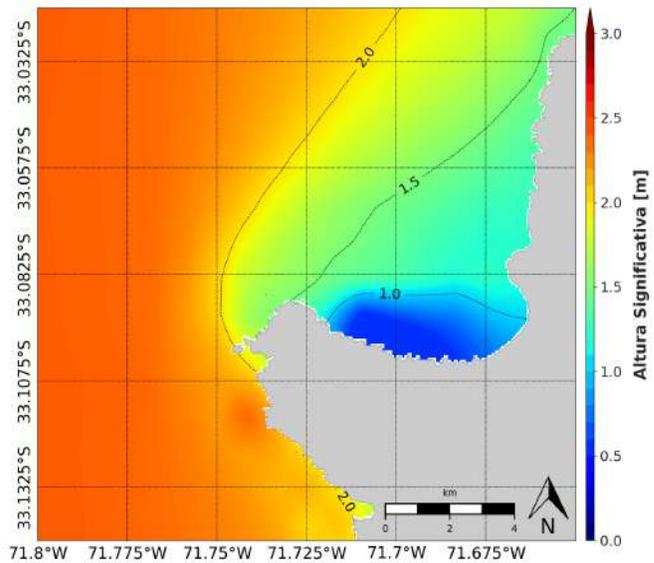
(a) Quintero.



(b) Concón.



(c) Valparaíso.



(d) Laguna Verde.

Figura 6.13: Distribución espacial de la mediana en cada bahía para la altura significativa.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Resultados periodo peak en cada bahía.

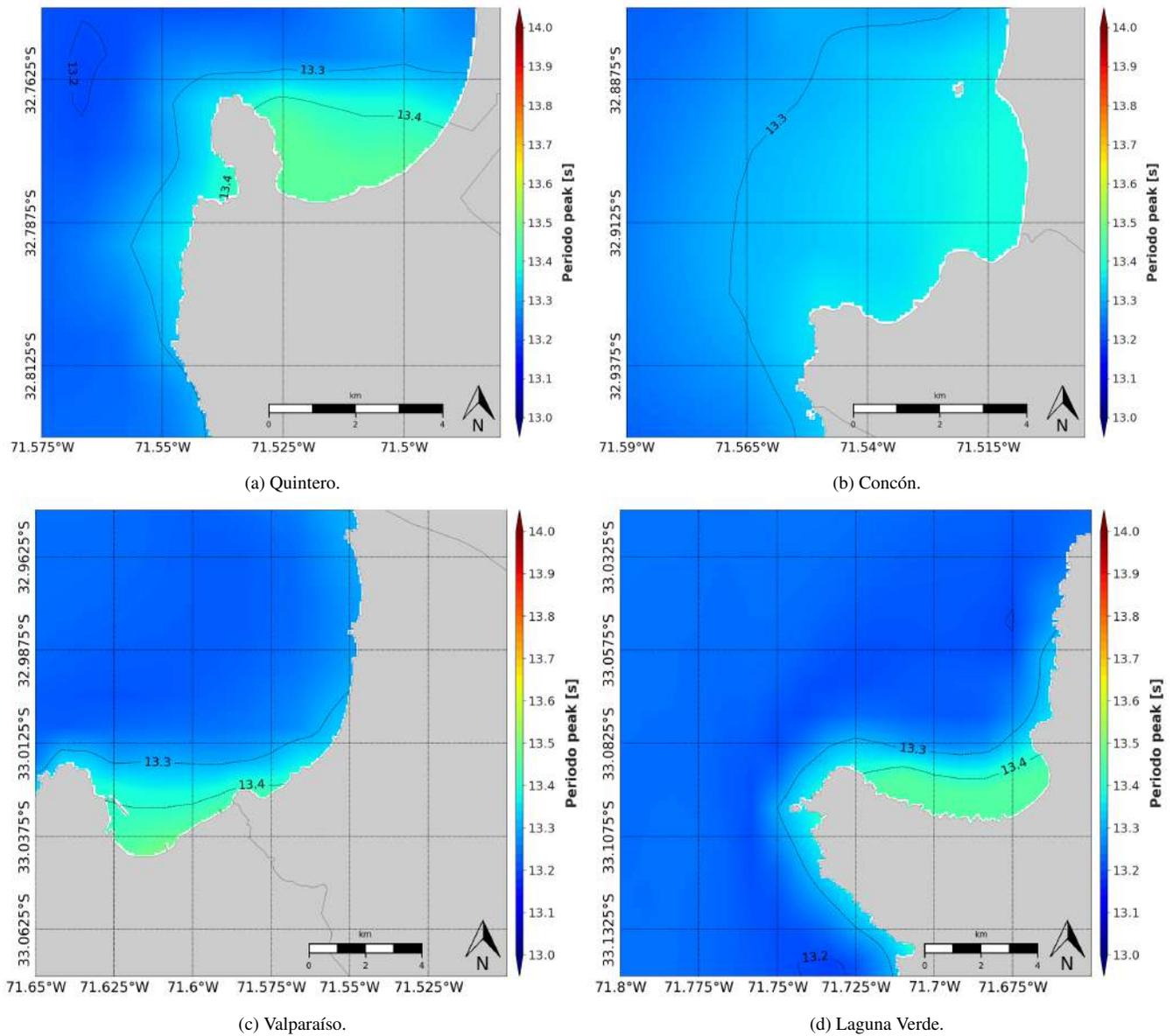


Figura 6.14: Distribución espacial de la mediana en cada bahía para el periodo peak.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Resultados longitud de onda.

Para la longitud de onda, en primer lugar se presenta en la tabla 6.9 el resumen estadístico, en la figura 6.15 la variación espacial en la zona de interés y en la figura 6.16 la variación espacial para cada bahía del área de interés. Se caracteriza por valores entre $159,67 \pm 54,92$ [m] a lo largo de la grilla.

Tabla 6.9: Resumen estadístico para la longitud de onda.

Sigla	Mínimo	P25	P50	P75	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Grilla	10,26	124,91	154,14	187,78	599,35	159,67	54,92	0,344
Longitudinal	13,94	125,80	153,91	187,08	597,86	159,90	53,50	0,335
V050	13,89	115,20	138,10	164,50	441,60	142,25	42,52	0,299
V100	13,97	123,90	149,90	179,00	496,80	154,39	48,00	0,311
V150	13,96	127,40	155,90	187,40	538,70	160,76	51,81	0,322
V200	13,96	127,90	157,00	189,40	555,50	162,34	53,43	0,329
P050	15,00	118,00	141,90	168,50	426,10	146,06	44,12	0,302
P100	14,76	120,38	145,10	173,20	488,20	150,25	47,51	0,316
P150	14,28	126,70	155,30	187,00	521,30	160,40	52,14	0,325
P200	14,13	127,80	156,90	189,40	550,70	162,46	53,89	0,332

(Fuente: Elaboración Propia.)

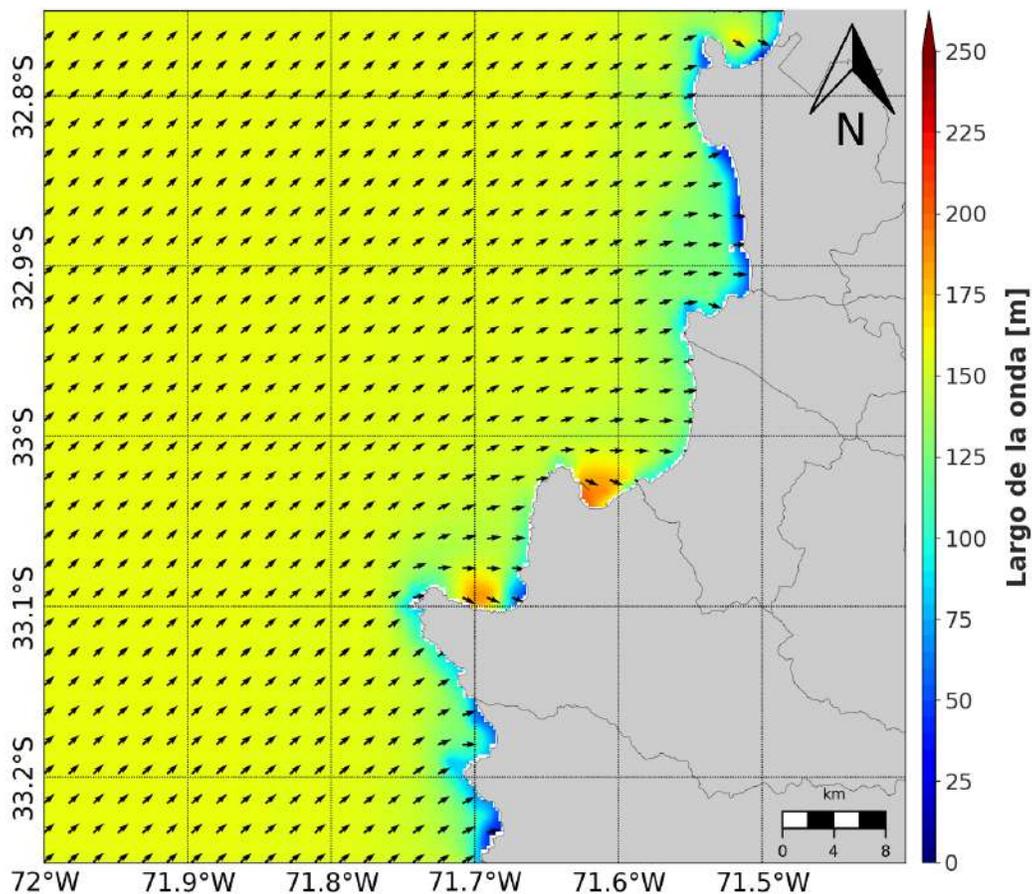
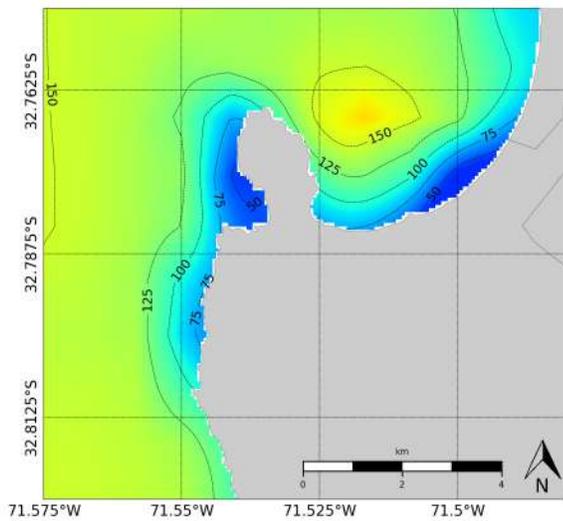
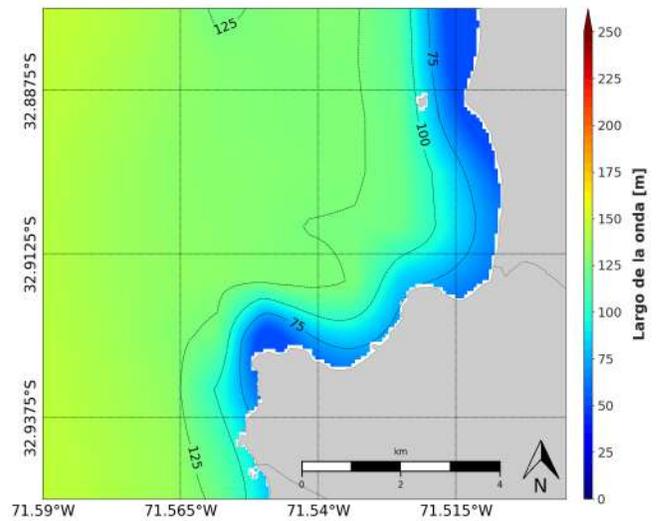


Figura 6.15: Distribución espacial de la mediana para la longitud de onda.

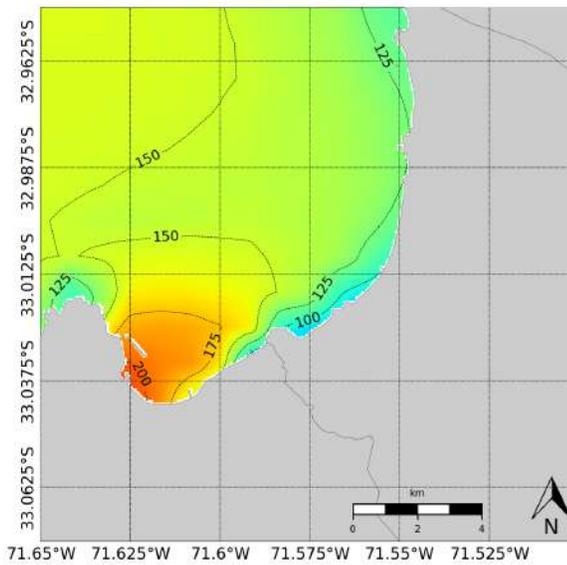
(Fuente: Elaboración Propia.)



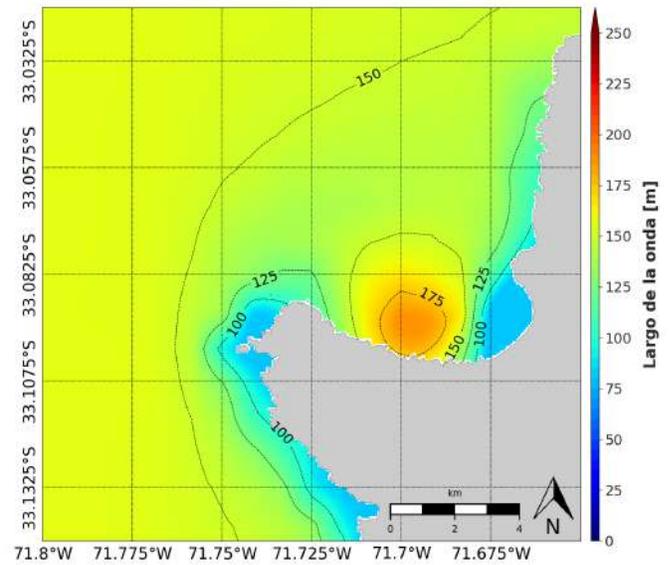
(a) Quintero.



(b) Concón.



(c) Valparaíso.



(d) Laguna Verde.

Figura 6.16: Distribución espacial de la mediana en cada bahía para la longitud de onda.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Respecto a las figuras anteriores, se observan que en las bahías de Quintero, Valparaíso y Laguna Verde presentan longitudes de onda superiores a 175 [m], lo cual es condicionado a los procesos de transformación del oleaje como la difracción. Por su lado, la bahía de Concón no presenta longitudes de onda superiores a 175 [m], esto porque los periodos alcanzados son mucho menores a las otras bahías. Posteriormente, en la figura 6.17 se observa la variación longitudinal de este parámetro, caracterizado por valores entre $159,90 \pm 53,50$ [m].

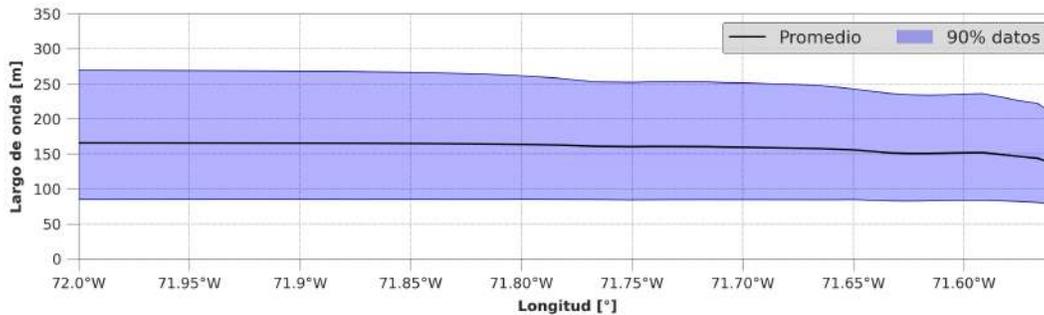


Figura 6.17: Serie longitudinal para la longitud de la onda.

(Fuente: Elaboración Propia.)

De la misma manera, a medida que la profundidad aumenta, las variaciones en la longitud de onda son menores y levemente el promedio de este parámetro es mayor, según lo observado en la figura 6.18.

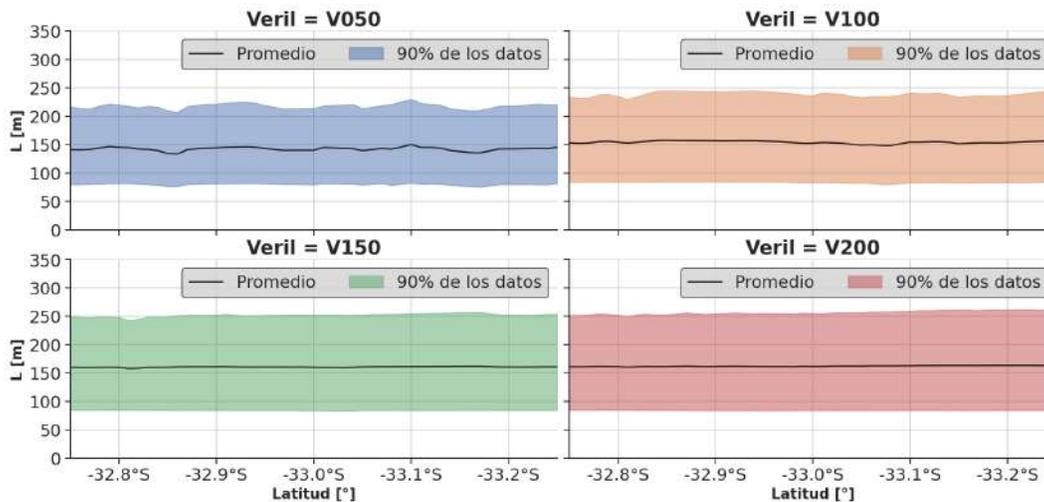


Figura 6.18: Series latitudinales para la longitud de la onda.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Por su lado, en el caso de los punto a punto la variabilidad se corrobora la variabilidad observada en la figura anterior, lo cual es presentado en la figura 6.19.

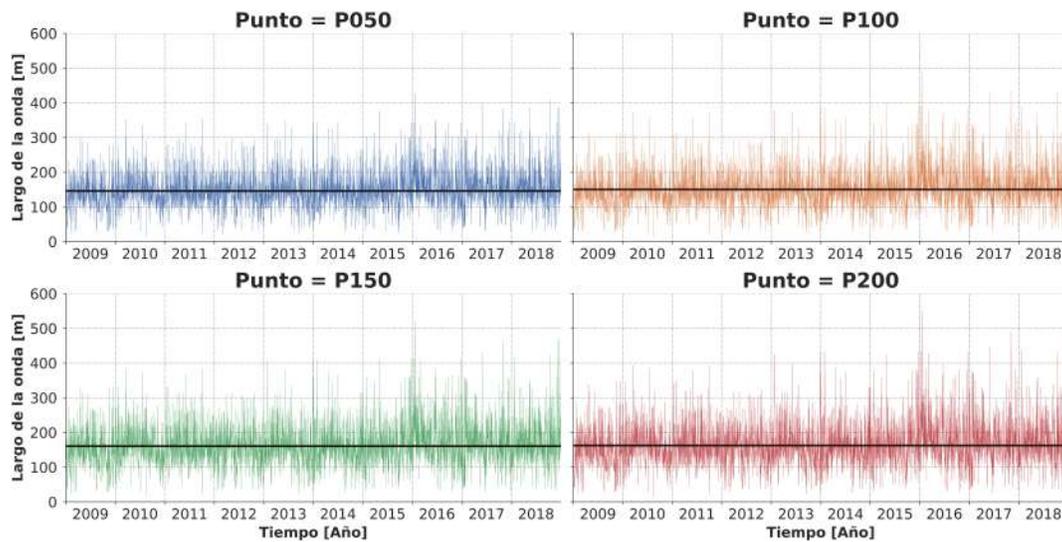


Figura 6.19: Series de tiempo para la profundidad relativa.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Finalmente, en la figura 6.20 se presentan los histogramas a diferentes puntos, observándose que la tendencia de la longitud de onda es a ser mayor a medida que se aumenta la profundidad.

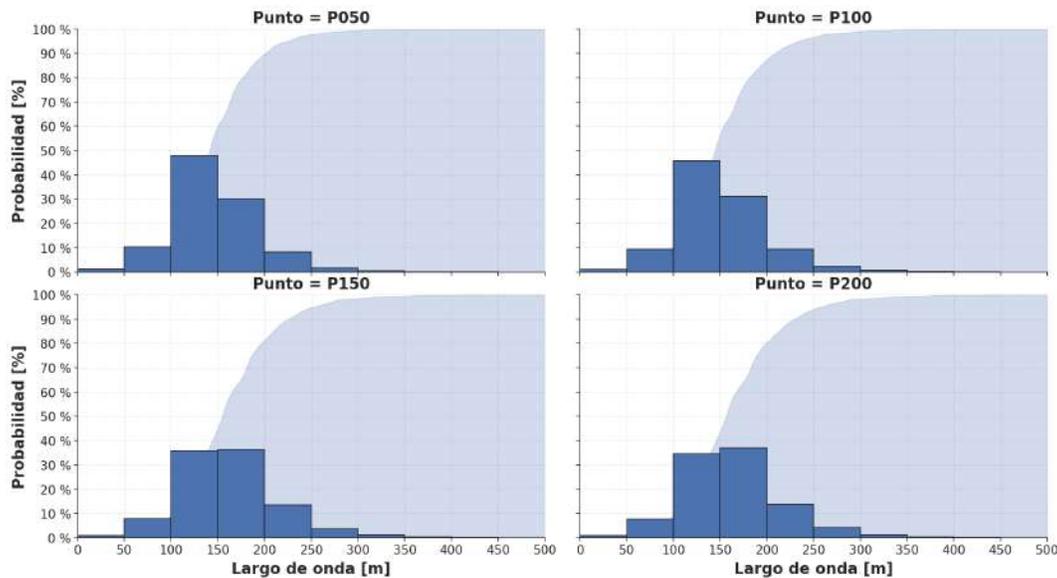


Figura 6.20: Histograma de la profundidad relativa.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Resultados profundidad relativa.

Para la profundidad relativa, en primer lugar se presenta en la tabla 6.10 el resumen estadístico, en la figura 6.21 la variación espacial en la zona de interés y en la figura 6.22 la variación espacial para cada bahía del área de interés. Se caracteriza por valores entre $3,961 \pm 4,607$ [-] a lo largo de la grilla, con una alta variabilidad debido a que en aguas profundas este valor puede llegar a ser mayor a 100 [-].

Tabla 6.10: Resumen estadístico para la profundidad relativa.

Sigla	Mínimo	P25	P50	P75	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Grilla	0,015	0,664	2,243	5,868	119,626	3,961	4,607	1,163
Longitudinal	0,092	0,610	1,263	4,593	76,605	2,886	3,246	1,125
V050	0,103	0,226	0,264	0,313	2,658	0,286	0,108	0,378
V100	0,161	0,414	0,498	0,605	4,825	0,546	0,226	0,415
V150	0,230	0,620	0,750	0,915	7,673	0,823	0,346	0,420
V200	0,283	0,830	1,006	1,228	10,300	1,099	0,464	0,422
P050	0,128	0,269	0,316	0,379	2,897	0,347	0,138	0,397
P100	0,183	0,446	0,537	0,653	5,075	0,592	0,252	0,426
P150	0,236	0,625	0,753	0,917	7,160	0,826	0,348	0,421
P200	0,346	0,975	1,178	1,434	11,199	1,291	0,544	0,421

(Fuente: Elaboración Propia.)

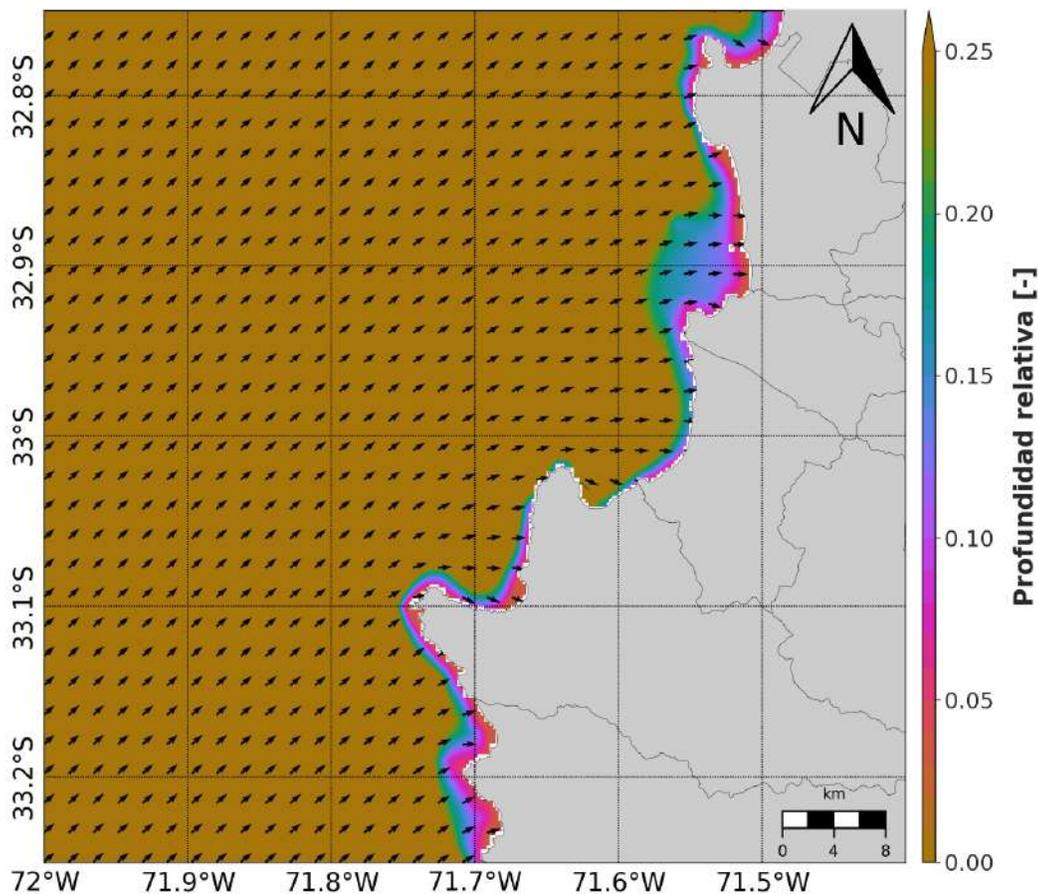


Figura 6.21: Distribución espacial de la mediana para la profundidad relativa.

(Fuente: Elaboración Propia.)

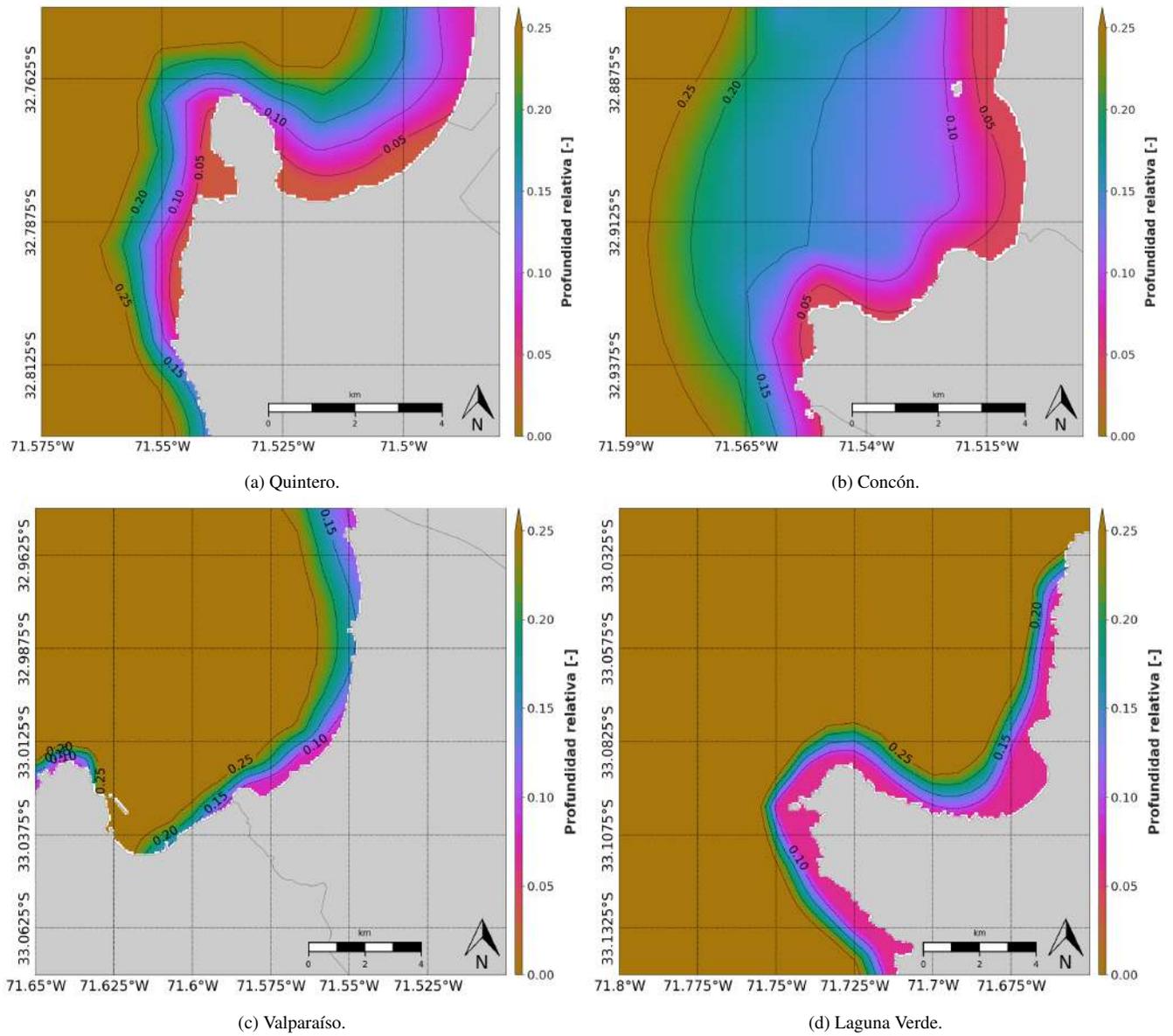


Figura 6.22: Distribución espacial de la mediana en cada bahía para la profundidad relativa.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Respecto a las figuras anteriores, se observan que en las bahías de Quintero, Valparaíso y Laguna Verde, presentan una costa una zona de transición de menor dimensión respecto a la bahía de Concón, esto debido principalmente a los sedimentos del río Aconcagua, el cual aporta a que la profundidad de de esta bahía sea menor en relación a las otras bahías. Posteriormente, en la figura 6.23 se observa la variación longitudinal de este parámetro, caracterizado por valores entre $2,866 \pm 3,246$ [-].

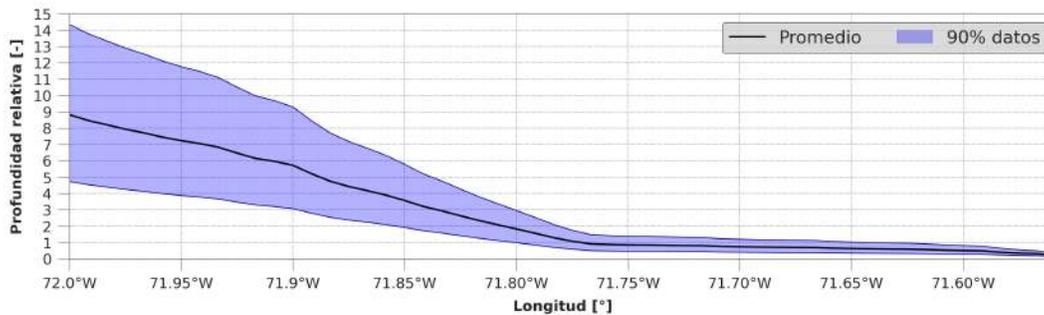


Figura 6.23: Serie longitudinal para la profundidad relativa.

(Fuente: Elaboración Propia.)

De la misma manera, a medida que la profundidad aumenta, la profundidad relativa a lo largo de cada veril es mayor y con una mayor variabilidad, comparando el coeficiente de variación de los veriles, corroborando con la figura 6.24.

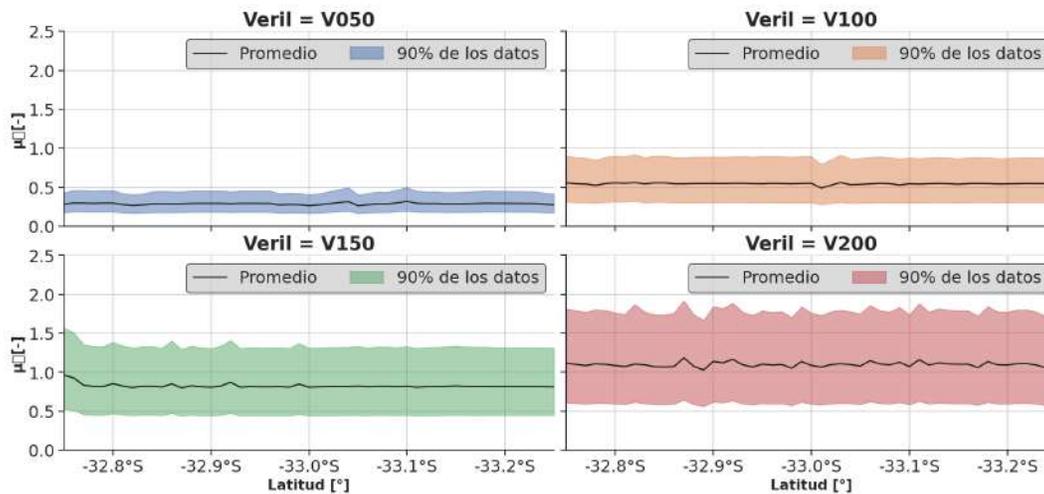


Figura 6.24: Series latitudinales para la profundidad relativa.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Por su lado, en el caso de los punto a punto la variabilidad se corrobora la variabilidad observada en la figura anterior, lo cual es presentado en la figura 6.25.

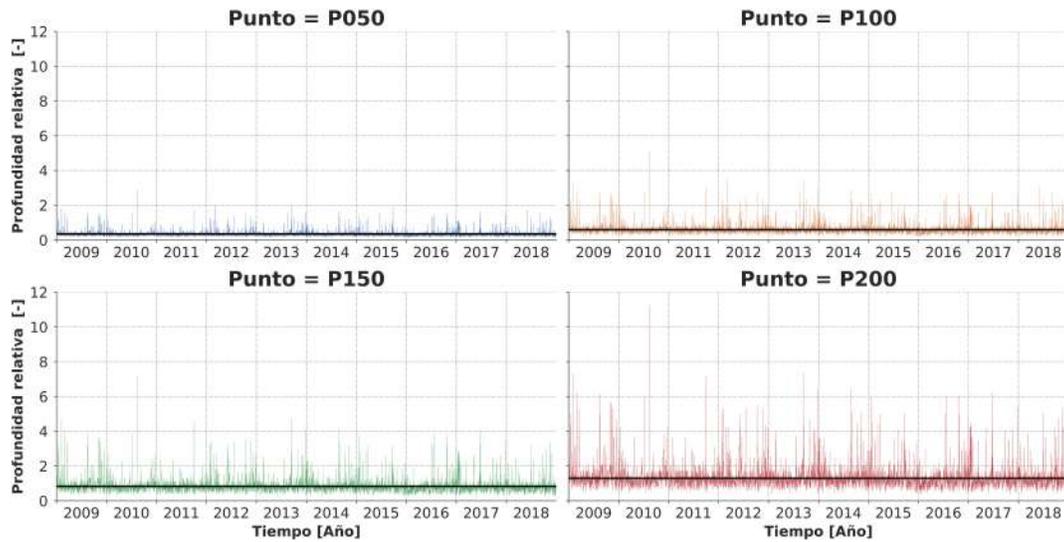


Figura 6.25: Series de tiempo para la profundidad relativa.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Finalmente, en la figura 6.26 se presentan los histogramas a diferentes puntos, observándose que la tendencia de la profundidad relativa es a ser mayor a medida que se aumenta la profundidad.

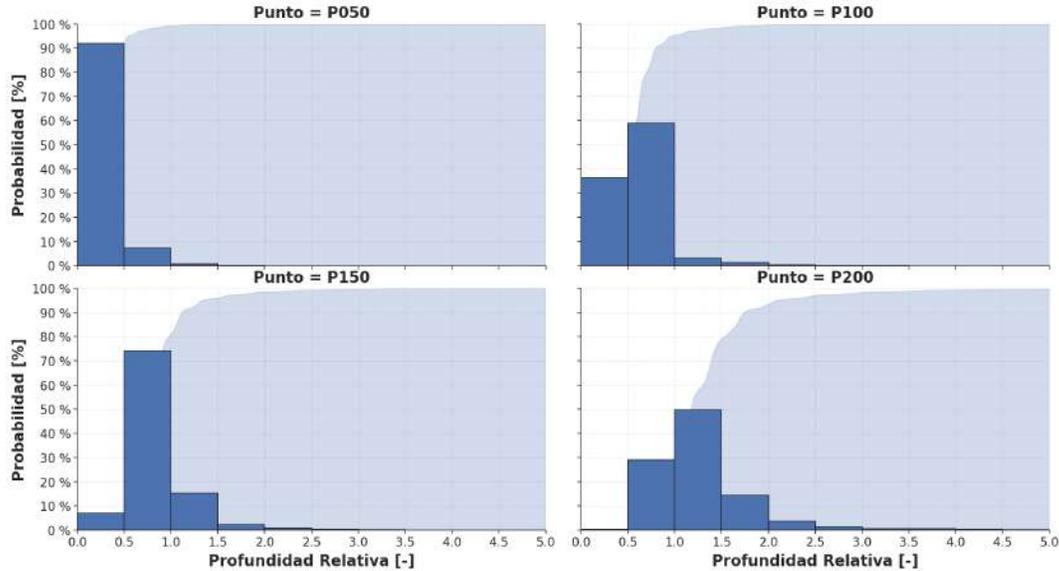


Figura 6.26: Histograma de la profundidad relativa.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Resultados para el peralte.

En la tabla 6.11 se muestra los resultados de la variación espacial del peralte, caracterizándose por valores entre $0,016 \pm 0,008$ [-] a lo largo de la grilla, como se observa en la figura 6.27. Por su lado, en la figura 6.28 se presenta la distribución espacial para cada bahía de la zona estudio.

Tabla 6.11: Resumen estadístico para el peralte a nivel latitudinal y puntual.

Sigla	Mínimo	P25	P50	P75	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Grilla	0	0,012	0,015	0,019	0,097	0,016	0,008	0,462
Longitudinal	0,002	0,010	0,014	0,018	0,095	0,015	0,008	0,494
V050	0,001	0,010	0,013	0,017	0,092	0,014	0,007	0,459
V100	0,002	0,011	0,014	0,018	0,094	0,015	0,007	0,458
V150	0,002	0,012	0,015	0,019	0,095	0,016	0,007	0,444
V200	0,002	0,012	0,016	0,019	0,096	0,017	0,007	0,447
P050	0,002	0,007	0,008	0,010	0,072	0,009	0,004	0,447
P100	0,002	0,008	0,010	0,013	0,074	0,011	0,005	0,441
P150	0,002	0,012	0,015	0,019	0,082	0,016	0,007	0,441
P200	0,002	0,012	0,016	0,020	0,090	0,017	0,008	0,446

(Fuente: Elaboración Propia.)

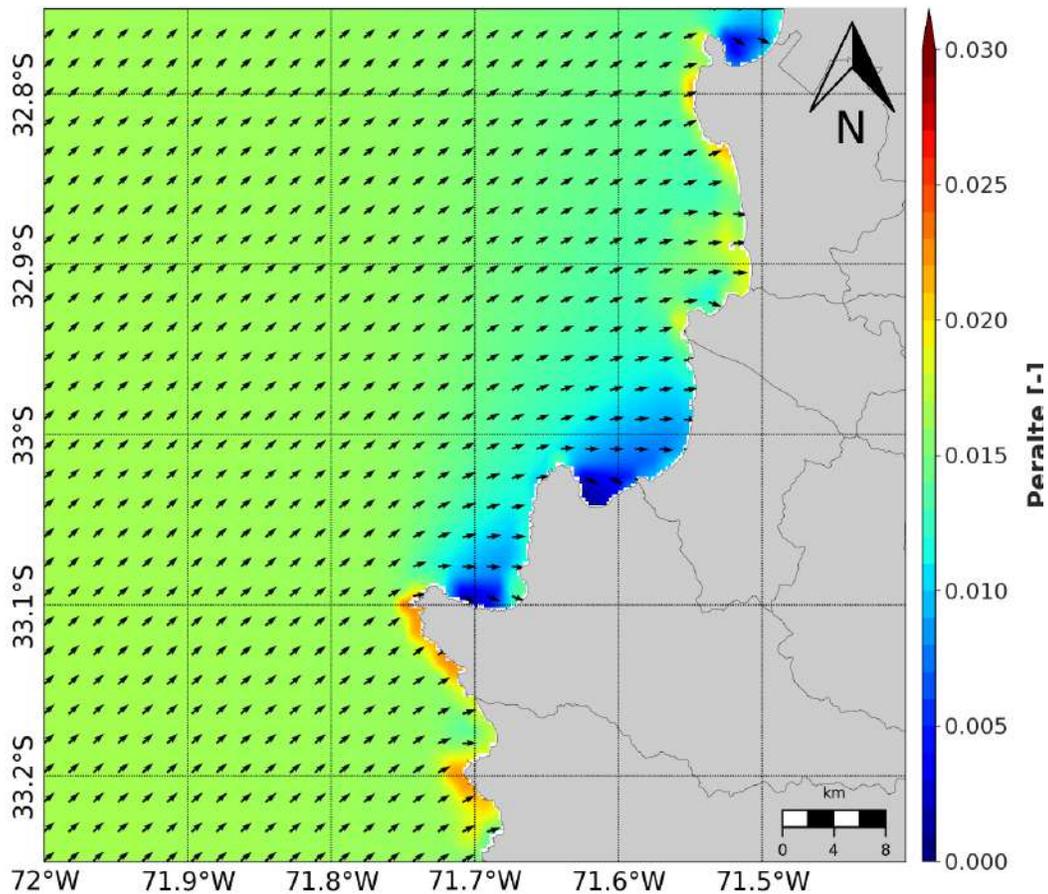


Figura 6.27: Distribución espacial de la mediana para el peralte.

(Fuente: Elaboración Propia.)

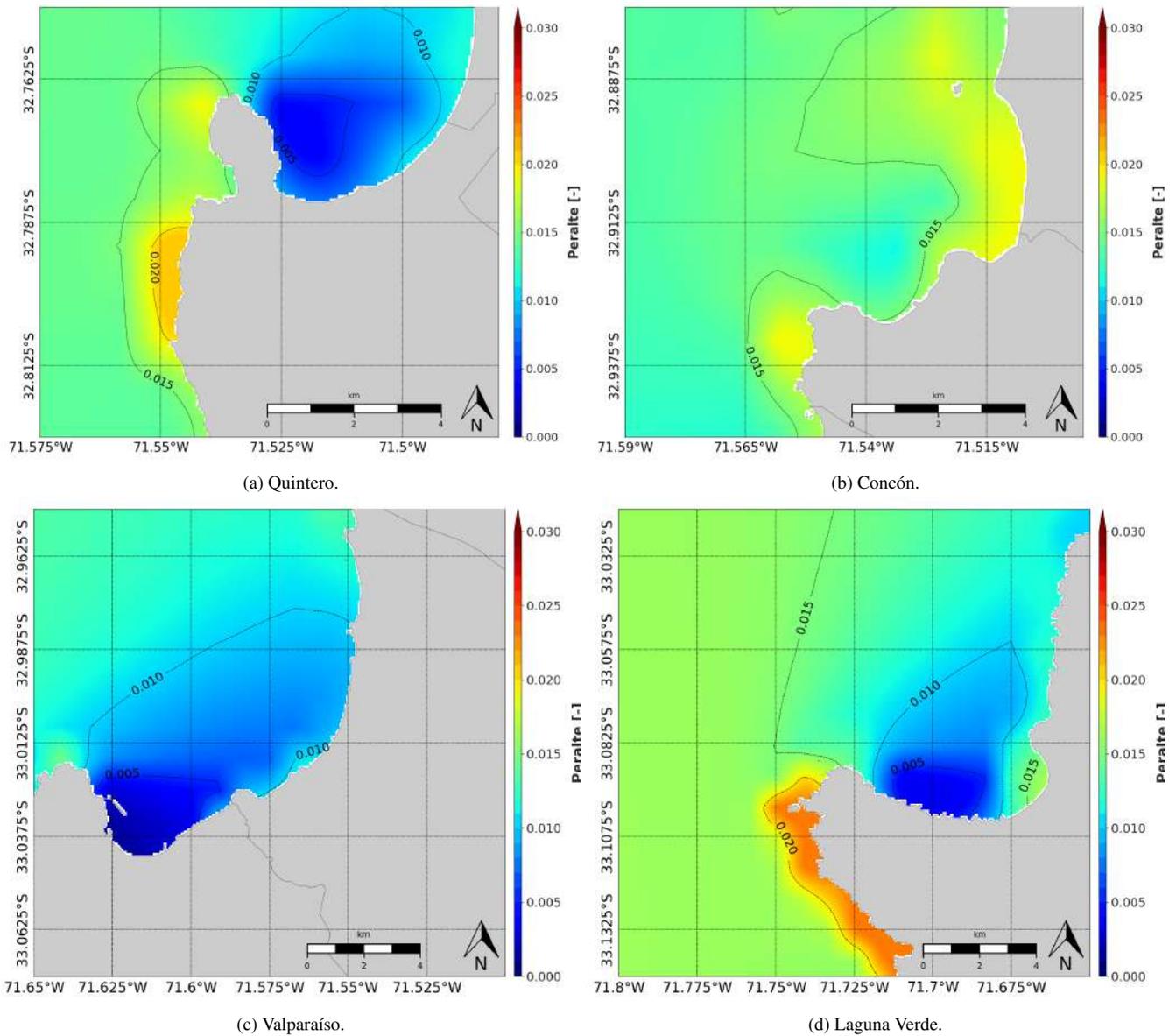


Figura 6.28: Distribución espacial de la mediana en cada bahía para el peralte.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Respecto a las figuras anteriores, se observan que las bahías de Quintero, Concón, Valparaíso y Laguna Verde, las cuales están presentes en el área de estudio, poseen valores menores definidos por una pérdida en la altura significativa del oleaje y un alargamiento de los periodos peak, es decir, son más extensos que en otras zonas del área de estudio. Esto principalmente es debido al proceso de difracción que sucede cuando la onda incide en los límites de unidad sedimentológica de cada bahía. Posteriormente, en la figura 6.29 se observa la variación longitudinal de este parámetro, caracterizado por valores entre $0,016 \pm 0,008$ [-] destacándose la influencia de la altura, pues a medida que la altura disminuye (ver figura 4.9), el peralte disminuye.

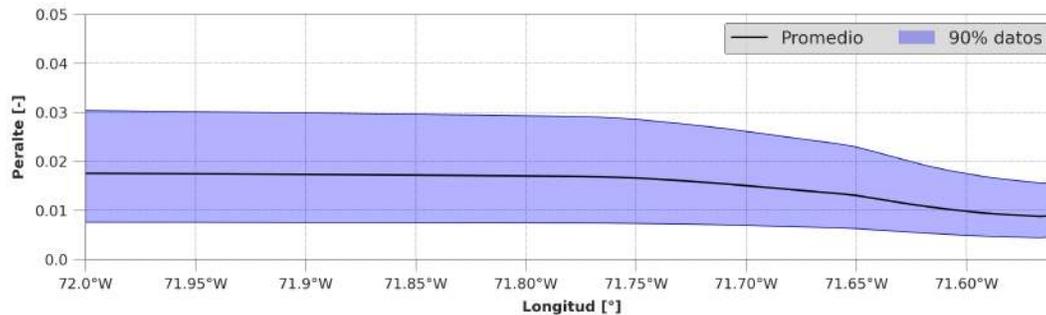


Figura 6.29: Serie longitudinal para el peralte.
(Fuente: Elaboración Propia.)

De la misma manera, a profundidades menores el peralte es más variable que a profundidades mayores, comparando el coeficiente de variación de los veriles, corroborando con la figura 6.30.

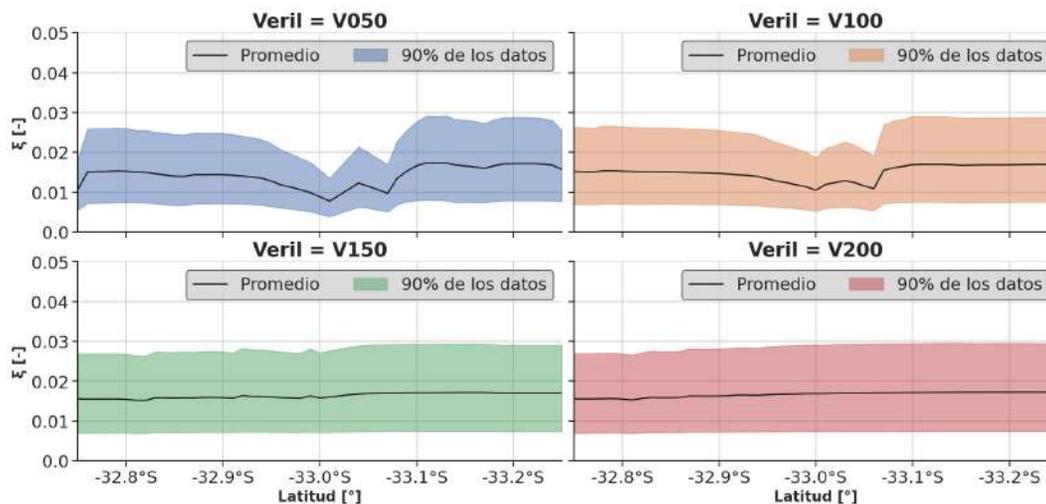


Figura 6.30: Series latitudinales para el peralte.
(Fuente: Elaboración Propia.)

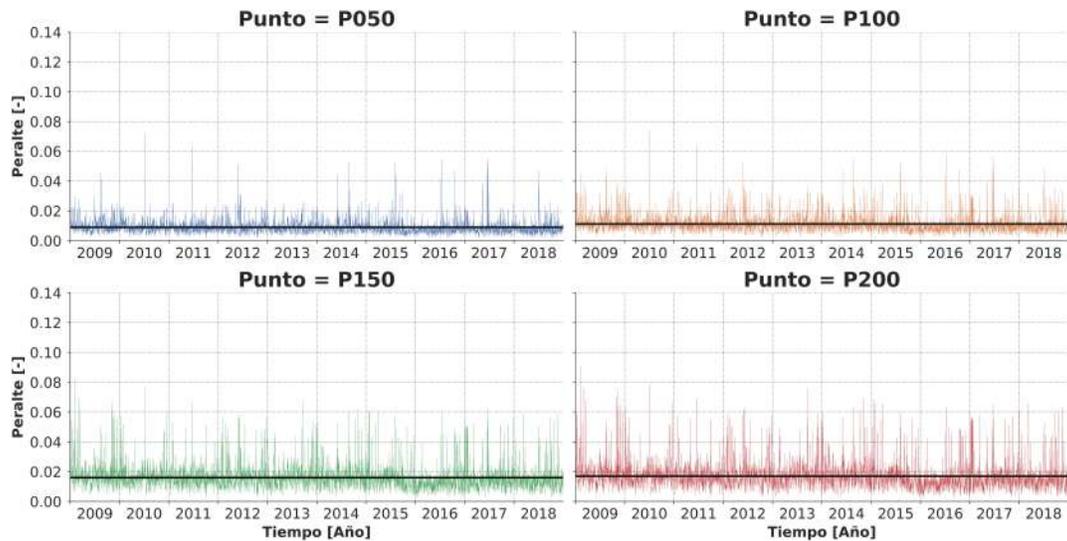


Figura 6.31: Series de tiempo para el peralte.

(Fuente: Elaboración Propia.)

Por su lado, en el caso de los punto a punto la variabilidad es diferente, pues no están afectos a los mismos procesos de transformación del oleaje, además de presentarse las series de tiempo con su debido promedio en la figura 6.31.

Finalmente, en la figura 6.32 se presentan los histogramas a diferentes puntos, observándose un peralte mayor a profundidades mayores.

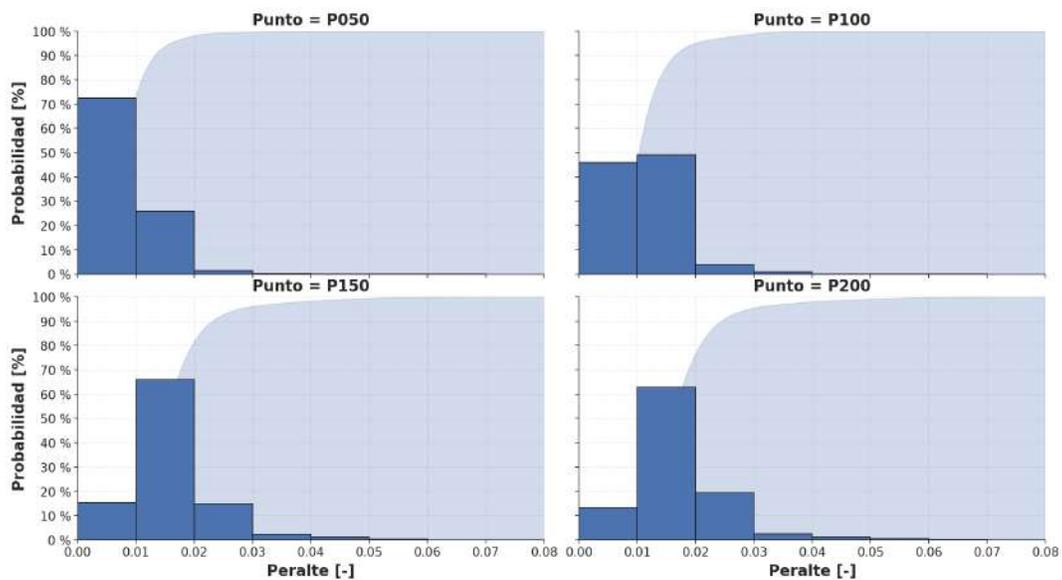


Figura 6.32: Histograma del peralte.

(Fuente: Elaboración Propia.)

6.2.4 Variabilidad del potencial energético undimotriz.

Tablas de variación anual del potencial.

Tabla 6.12: Variabilidad anual para el potencial energético undimotriz para el veril 50.

%	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
0,0%	0,554	0,242	0,530	0,545	0,622	0,770	0,326	0,645	0,813	0,627
10,0%	3,286	4,005	3,980	3,325	3,523	3,247	3,130	2,952	3,263	2,962
20,0%	4,751	5,120	5,218	4,556	4,748	4,378	4,149	4,368	4,375	4,062
30,0%	5,853	6,193	6,373	5,675	5,797	5,668	4,973	5,511	5,276	5,138
40,0%	7,069	7,519	7,487	6,884	6,908	6,984	6,100	6,726	6,391	6,211
50,0%	8,251	9,026	8,799	8,172	7,986	8,417	7,250	8,017	7,706	7,465
60,0%	9,960	11,220	10,568	9,546	9,499	10,367	8,734	9,409	9,335	9,083
70,0%	11,714	13,449	12,607	11,334	11,559	12,678	10,355	11,331	11,257	10,706
80,0%	14,323	16,535	15,623	14,279	14,630	16,166	13,115	13,843	14,424	13,678
90,0%	19,264	21,602	21,946	19,574	19,819	22,892	19,797	18,628	19,937	17,437
100%	56,143	91,456	82,155	72,497	106,615	68,176	181,724	92,283	103,754	60,954
Promedio	10,332	11,932	11,664	10,027	10,569	11,298	9,882	9,763	10,268	9,480

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.13: Variabilidad anual para el potencial energético undimotriz para el veril 100.

%	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
0,0%	0,965	0,265	1,025	1,255	1,324	1,324	0,744	1,120	1,562	1,064
10,0%	5,701	6,599	6,495	5,632	5,661	5,417	5,320	4,802	5,698	4,995
20,0%	7,646	8,419	8,125	7,144	7,713	7,323	6,726	6,811	7,098	6,472
30,0%	9,383	10,138	9,951	8,807	9,189	9,185	8,023	8,375	8,424	7,957
40,0%	11,183	11,823	11,569	10,481	10,683	11,152	9,513	9,975	10,065	9,438
50,0%	12,773	14,095	13,412	12,352	12,182	13,209	11,292	11,300	11,733	11,162
60,0%	14,959	17,096	15,774	14,407	14,369	15,622	13,181	12,991	13,922	13,486
70,0%	17,488	20,224	18,244	16,623	17,082	18,848	15,313	15,463	16,218	16,083
80,0%	20,814	23,888	22,449	19,876	20,899	22,755	18,965	18,680	19,845	19,569
90,0%	26,862	30,559	31,038	26,578	27,837	29,687	27,029	24,218	26,566	24,424
100%	76,993	120,825	104,242	85,756	145,489	98,591	205,538	115,081	117,938	73,411
Promedio	15,268	17,375	16,914	14,533	15,422	16,293	14,208	13,391	14,586	13,623

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.14: Variabilidad anual para el potencial energético undimotriz para el veril 150.

%	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
0,0%	2,269	0,324	1,493	2,198	3,558	2,982	1,847	1,926	4,338	2,557
10,0%	12,946	15,519	15,061	11,914	12,742	12,609	12,026	10,183	14,048	11,525
20,0%	17,185	20,365	18,660	15,921	17,393	16,733	15,567	13,733	17,144	14,772
30,0%	21,171	24,658	22,381	19,105	20,914	21,197	18,948	16,826	20,241	18,145
40,0%	25,407	28,887	26,178	23,281	24,374	25,112	21,904	20,206	23,183	22,046
50,0%	29,829	33,539	30,358	27,414	28,067	29,456	26,061	23,562	27,120	26,099
60,0%	34,253	38,867	36,180	31,584	32,629	34,780	30,674	27,239	31,174	30,913
70,0%	40,295	45,551	42,925	36,626	38,915	41,222	35,767	31,485	36,258	37,284
80,0%	48,934	54,005	51,483	44,188	47,651	49,018	42,990	38,315	43,118	44,520
90,0%	60,030	67,442	68,269	58,666	61,543	62,751	56,311	47,855	54,840	56,581
100%	165,762	231,804	191,987	158,696	290,740	235,276	233,607	170,782	178,250	114,826
Promedio	34,220	38,947	37,807	32,072	34,702	35,377	31,300	26,970	31,913	30,736

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.15: Variabilidad anual para el potencial energético undimotriz para el veril 200.

%	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
0,0%	2,568	0,366	1,612	1,890	4,070	3,344	2,068	2,078	5,049	2,862
10,0%	14,589	17,658	17,035	13,108	14,349	14,291	13,479	11,263	15,768	13,017
20,0%	19,357	23,349	21,248	17,927	19,382	19,031	17,759	14,941	19,673	16,773
30,0%	23,938	28,239	25,450	21,631	23,704	23,958	21,415	18,699	22,963	20,678
40,0%	28,960	33,123	29,544	26,189	27,424	28,526	25,013	22,400	26,678	25,335
50,0%	33,894	38,488	34,944	30,997	32,242	33,104	29,732	26,306	31,288	29,834
60,0%	39,148	43,755	41,374	35,746	37,237	39,445	35,112	30,630	35,666	35,274
70,0%	46,039	52,068	48,815	41,352	44,758	47,307	41,328	35,738	41,283	42,619
80,0%	56,177	61,408	58,652	51,152	54,667	56,213	50,051	42,861	48,953	50,548
90,0%	68,935	76,995	77,672	68,116	70,697	72,174	64,042	53,478	61,535	65,899
100%	183,170	249,538	206,527	184,423	312,971	257,947	244,435	175,079	195,108	132,986
Promedio	38,909	44,395	42,815	36,491	39,533	40,135	35,743	30,115	36,310	35,125

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tablas de variación mensual del potencial.

Tabla 6.16: Variabilidad mensual para el potencial energético undimotriz para el punto P050.

%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
0,0%	0,987	1,058	0,545	0,645	1,150	0,627	0,760	0,242	0,326	0,530	0,784	1,024
10,0%	3,394	4,096	4,216	3,325	3,398	3,299	3,494	3,357	2,452	2,844	3,101	3,294
20,0%	4,589	5,228	5,441	4,718	4,500	4,546	4,713	4,768	3,788	3,986	4,175	4,481
30,0%	5,722	6,271	6,550	5,891	5,425	5,664	6,086	6,140	4,923	4,860	5,179	5,465
40,0%	6,943	7,274	7,860	7,114	6,580	7,048	7,598	7,523	6,105	5,780	6,194	6,489
50,0%	8,387	8,291	9,117	8,447	7,932	8,787	9,146	8,906	7,583	6,848	7,060	7,604
60,0%	10,484	9,706	10,298	9,885	9,697	10,840	11,177	10,809	9,083	8,020	8,148	9,157
70,0%	13,250	11,195	11,805	11,843	11,774	13,134	13,737	13,509	11,058	9,508	9,748	11,197
80,0%	16,690	13,743	14,344	14,334	14,728	16,691	17,621	17,679	13,490	11,534	12,001	14,875
90,0%	25,351	19,451	18,499	17,665	19,496	23,832	26,110	25,191	17,513	15,885	15,626	21,990
100%	65,233	56,936	51,441	43,129	72,497	103,754	106,615	181,724	39,589	36,360	44,208	48,553
Promedio	11,861	10,252	10,404	9,816	10,309	12,058	12,804	12,599	9,048	8,159	8,540	10,293

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.17: Variabilidad mensual para el potencial energético undimotriz para el punto P100.

%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
0,0%	2,204	2,603	1,255	1,120	2,052	1,302	1,324	0,265	0,744	1,025	1,644	1,937
10,0%	5,925	6,868	6,877	5,455	5,448	5,471	5,650	5,381	4,247	4,902	5,469	5,644
20,0%	7,362	8,311	8,704	7,459	6,974	7,260	7,487	7,641	6,222	6,383	7,113	7,397
30,0%	8,755	9,873	10,347	9,308	8,408	9,009	9,367	9,455	7,879	7,572	8,612	8,779
40,0%	10,430	11,334	12,075	11,056	10,023	11,097	11,599	11,415	9,483	8,922	9,994	10,296
50,0%	12,406	12,604	13,783	12,696	11,905	13,592	13,938	13,352	11,320	10,393	11,359	11,569
60,0%	15,076	14,314	15,341	14,619	14,858	16,162	16,633	15,700	13,486	11,965	12,745	13,513
70,0%	17,875	16,554	17,140	17,329	17,681	19,636	20,269	19,532	16,431	14,058	14,469	16,369
80,0%	21,539	19,131	20,474	20,594	21,058	24,508	25,609	24,818	19,927	17,170	17,023	20,281
90,0%	29,568	25,059	25,733	25,143	27,816	33,115	35,806	35,620	25,045	23,102	21,758	26,696
100%	84,140	69,395	62,154	60,608	85,756	117,938	145,489	205,538	51,652	46,080	53,172	67,401
Promedio	15,882	14,599	15,139	14,448	15,152	17,550	18,446	18,030	13,417	12,161	12,683	14,287

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.18: Variabilidad mensual para el potencial energético undimotriz para el punto P150.

%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
0,0%	4,704	5,930	3,561	3,321	3,975	2,198	2,982	0,324	1,847	1,493	4,310	4,044
10,0%	11,812	15,393	15,831	12,968	11,567	13,217	13,057	12,418	10,737	11,203	12,996	12,278
20,0%	15,302	19,219	20,333	17,520	15,695	17,809	17,123	17,343	14,605	14,532	16,487	15,923
30,0%	18,187	21,868	24,313	21,252	19,354	22,520	21,746	21,379	18,075	17,329	19,767	19,019
40,0%	20,821	24,850	27,668	24,953	23,430	27,429	26,606	25,463	22,717	20,593	22,761	22,252
50,0%	24,103	27,740	31,603	29,500	28,756	33,328	32,190	30,236	26,804	24,425	26,081	25,430
60,0%	27,566	31,314	35,293	34,281	35,593	39,273	38,945	36,523	31,201	28,812	29,313	28,816
70,0%	33,897	35,249	39,742	41,137	42,959	47,666	47,978	43,595	37,553	34,023	32,926	32,395
80,0%	41,900	41,797	45,947	48,125	50,931	58,586	59,093	54,592	45,825	41,143	37,906	38,128
90,0%	51,417	49,392	57,357	59,595	68,087	74,950	80,236	78,354	57,233	54,703	46,951	45,817
100%	126,959	106,035	117,438	143,227	164,944	187,306	290,740	233,607	130,491	113,152	114,826	141,136
Promedio	28,520	30,758	34,561	34,005	35,604	40,309	41,438	39,399	31,024	28,679	28,498	27,802

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.19: Variabilidad mensual para el potencial energético undimotriz para el punto P200.

%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
0,0%	5,013	6,056	3,709	3,441	4,202	1,890	3,344	0,366	2,068	1,612	4,695	4,366
10,0%	12,917	17,336	17,667	14,612	12,936	14,834	14,430	13,864	12,243	12,582	14,855	13,829
20,0%	16,998	21,307	23,081	19,925	17,566	20,423	19,550	19,566	16,533	16,248	18,779	17,724
30,0%	19,955	24,728	27,186	23,906	21,817	26,024	24,864	24,285	20,880	19,703	22,190	21,335
40,0%	23,046	27,918	31,448	28,183	26,918	31,804	30,326	29,206	26,361	23,881	25,852	25,010
50,0%	26,435	31,431	35,724	34,111	33,528	38,649	36,703	34,443	30,844	28,089	29,962	28,611
60,0%	30,831	35,424	40,213	39,839	40,679	45,436	45,278	41,308	35,827	33,000	33,712	32,517
70,0%	37,739	39,269	45,304	47,327	49,217	55,058	55,301	49,864	42,820	39,612	37,941	36,598
80,0%	46,745	46,604	52,915	55,763	58,900	67,319	67,468	62,025	52,678	47,824	44,202	43,046
90,0%	57,622	56,504	66,291	68,817	78,989	86,051	91,012	88,016	65,365	61,674	54,413	51,706
100%	129,198	110,253	138,818	166,002	182,337	209,656	312,971	249,538	146,143	132,986	126,900	155,179
Promedio	31,481	34,681	39,361	39,000	40,791	46,062	47,056	44,373	35,462	33,001	32,752	31,187

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tablas de variación estacional del potencial.

Tabla 6.20: Variabilidad estacional para el potencial energético undimotriz para el punto P050.

%	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
0,0%	0,987	0,545	0,242	0,326
10,0%	3,552	3,662	3,352	2,821
20,0%	4,728	4,860	4,665	4,001
30,0%	5,800	5,939	5,941	4,975
40,0%	6,890	7,172	7,452	6,023
50,0%	8,037	8,558	8,932	7,099
60,0%	9,735	9,988	10,955	8,377
70,0%	11,715	11,835	13,448	10,036
80,0%	15,110	14,495	17,354	12,453
90,0%	21,741	18,500	25,129	16,310
100%	65,233	72,497	181,724	44,208
Promedio	10,819	10,180	12,492	8,578

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.21: Variabilidad estacional para el potencial energético undimotriz para el punto P100.

%	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
0,0%	1,937	1,120	0,265	0,744
10,0%	6,061	5,916	5,495	4,986
20,0%	7,662	7,656	7,422	6,591
30,0%	9,193	9,304	9,275	8,022
40,0%	10,669	11,059	11,324	9,483
50,0%	12,178	12,925	13,623	11,005
60,0%	14,272	14,976	16,268	12,716
70,0%	17,023	17,358	19,752	14,850
80,0%	20,293	20,678	24,957	18,072
90,0%	27,125	26,127	34,902	23,102
100%	84,140	85,756	205,538	53,172
Promedio	14,933	14,918	18,014	12,747

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.22: Variabilidad estacional para el potencial energético undimotriz para el punto P150.

%	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
0,0%	4,044	3,321	0,324	1,493
10,0%	13,094	13,568	12,937	11,567
20,0%	16,615	17,587	17,444	15,217
30,0%	19,607	21,670	21,838	18,309
40,0%	22,569	25,588	26,565	21,997
50,0%	25,774	30,147	31,890	25,769
60,0%	29,521	35,200	38,371	29,730
70,0%	33,918	40,933	46,401	34,451
80,0%	40,699	48,339	57,807	41,698
90,0%	49,088	60,466	77,859	53,297
100%	141,136	164,944	290,740	130,491
Promedio	28,973	34,731	40,383	29,392

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.23: Variabilidad estacional para el potencial energético undimotriz para el punto P200.

%	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
0,0%	4,366	3,441	0,366	1,612
10,0%	14,504	15,079	14,405	12,857
20,0%	18,568	19,920	19,817	17,173
30,0%	21,781	24,500	25,060	21,056
40,0%	25,378	29,235	30,258	25,234
50,0%	28,850	34,608	36,506	29,814
60,0%	33,173	40,227	44,065	34,147
70,0%	37,895	47,078	53,489	39,805
80,0%	45,119	55,848	66,004	47,889
90,0%	55,464	69,901	88,381	61,095
100%	155,179	182,337	312,971	146,143
Promedio	32,381	39,725	45,828	33,730

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tablas de rosas del oleaje.

Tabla 6.24: Tabla de rosa del oleaje para el potencial energético undimotriz para punto P050.

P [kW/m]	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
<5	0.000	0.000	0.000	0.000	18.151	5.986	0.048	0.003	0.000
5-15	0.000	0.000	0.000	0.000	28.125	26.835	1.616	0.000	0.000
15-25	0.000	0.000	0.000	0.000	2.310	9.450	1.554	0.000	0.000
25-35	0.000	0.000	0.000	0.000	0.110	2.961	0.623	0.000	0.000
35-45	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	1.071	0.188	0.000	0.000
45-55	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.483	0.068	0.000	0.000
55-65	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.192	0.027	0.000	0.000
65-75	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.065	0.010	0.000	0.000
75-85	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.034	0.000	0.000	0.000
>85	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.068	0.014	0.000	0.000

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.25: Tabla de rosa del oleaje para el potencial energético undimotriz para punto P100.

P [kW/m]	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
<5	0.000	0.000	0.000	0.127	7.006	0.195	0.024	0.003	0.000
5-15	0.000	0.000	0.000	0.007	50.534	3.063	1.290	0.007	0.000
15-25	0.000	0.000	0.000	0.000	20.869	2.252	1.759	0.010	0.000
25-35	0.000	0.000	0.000	0.000	5.648	1.297	0.849	0.000	0.000
35-45	0.000	0.000	0.000	0.000	1.605	0.616	0.496	0.000	0.000
45-55	0.000	0.000	0.000	0.000	0.746	0.270	0.178	0.003	0.000
55-65	0.000	0.000	0.000	0.000	0.229	0.212	0.075	0.000	0.000
65-75	0.000	0.000	0.000	0.000	0.157	0.133	0.041	0.000	0.000
75-85	0.000	0.000	0.000	0.000	0.065	0.031	0.007	0.000	0.000
>85	0.000	0.000	0.000	0.000	0.065	0.113	0.014	0.000	0.000

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.26: Tabla de rosa del oleaje para el potencial energético undimotriz para punto P150.

P [kW/m]	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
<5	0.000	0.000	0.000	0.370	0.065	0.010	0.021	0.000	0.000
5-15	0.000	0.000	0.133	11.846	1.797	0.537	0.760	0.007	0.000
15-25	0.000	0.000	0.038	22.614	2.478	0.989	1.020	0.024	0.000
25-35	0.000	0.000	0.003	18.617	1.523	0.712	0.750	0.000	0.000
35-45	0.000	0.000	0.000	12.024	1.006	0.602	0.373	0.000	0.000
45-55	0.000	0.000	0.000	7.913	0.623	0.291	0.120	0.000	0.000
55-65	0.000	0.000	0.000	4.354	0.479	0.151	0.072	0.003	0.000
65-75	0.000	0.000	0.000	2.564	0.181	0.092	0.027	0.000	0.000
75-85	0.000	0.000	0.000	1.451	0.127	0.055	0.021	0.000	0.000
>85	0.000	0.000	0.000	2.560	0.520	0.058	0.014	0.003	0.000

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.27: Tabla de rosa del oleaje para el potencial energético undimotriz para punto P200.

P [kW/m]	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
<5	0.000	0.000	0.041	0.195	0.044	0.007	0.024	0.000	0.000
5-15	0.000	0.000	1.910	7.119	1.184	0.455	0.712	0.010	0.000
15-25	0.000	0.000	3.693	15.882	1.616	0.917	0.979	0.031	0.000
25-35	0.000	0.000	3.560	14.947	1.123	0.620	0.856	0.000	0.000
35-45	0.000	0.000	2.057	11.603	0.664	0.585	0.421	0.000	0.000
45-55	0.000	0.000	1.171	8.215	0.445	0.301	0.140	0.003	0.000
55-65	0.000	0.000	0.863	5.466	0.394	0.157	0.072	0.003	0.000
65-75	0.000	0.000	0.507	3.214	0.188	0.079	0.041	0.000	0.000
75-85	0.000	0.000	0.277	2.115	0.082	0.086	0.014	0.000	0.000
>85	0.000	0.000	0.308	4.152	0.366	0.058	0.024	0.003	0.000

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.28: Tabla de MAEP para P050.

Hsig Te	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75
1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.50	0.00	0.05	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.50	0.00	0.11	0.15	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.50	0.00	0.15	0.63	0.08	0.10	0.03	0.06	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.50	0.00	0.36	1.27	0.33	0.16	0.14	0.09	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9.50	0.00	1.25	3.47	1.14	0.21	0.26	0.13	0.06	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.50	0.00	2.00	7.39	3.33	0.63	0.25	0.13	0.04	0.08	0.00	0.09	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
11.50	0.00	1.72	10.04	4.88	1.40	0.56	0.09	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.50	0.00	1.10	8.40	6.36	1.59	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13.50	0.00	0.58	3.93	4.17	1.39	0.81	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14.50	0.00	0.19	1.15	1.36	0.42	0.11	0.20	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15.50	0.00	0.23	1.18	1.52	0.73	0.17	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16.50	0.00	0.09	0.56	0.85	0.49	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17.50	0.00	0.01	0.21	0.34	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.50	0.00	0.03	0.13	0.20	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19.50	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.50	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.50	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.29: Tabla de MAEP para P100.

Hsig Te	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75
1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.50	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.50	0.00	0.01	0.14	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.50	0.00	0.00	0.37	0.19	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.50	0.00	0.04	0.49	0.92	0.19	0.05	0.05	0.02	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.50	0.00	0.13	1.33	1.46	0.30	0.22	0.11	0.09	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9.50	0.00	0.39	4.14	4.17	1.20	0.23	0.30	0.20	0.08	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.50	0.00	0.47	7.47	9.82	4.05	0.82	0.49	0.09	0.08	0.10	0.00	0.10	0.06	0.00	0.00	0.00
11.50	0.00	0.37	7.68	13.62	6.36	2.01	0.98	0.17	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.50	0.00	0.27	5.20	12.64	6.81	2.10	1.09	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13.50	0.00	0.20	2.69	5.97	4.40	1.71	0.63	0.34	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14.50	0.00	0.08	0.80	1.56	1.13	0.53	0.23	0.15	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15.50	0.00	0.13	0.87	1.68	1.51	0.41	0.17	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16.50	0.00	0.06	0.43	0.96	0.75	0.31	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17.50	0.00	0.01	0.13	0.34	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.50	0.00	0.01	0.14	0.23	0.12	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19.50	0.00	0.00	0.01	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.50	0.00	0.00	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.50	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.30: Tabla de MAEP para P150.

Hsig Te	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75
1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.50	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.50	0.00	0.00	0.01	0.17	0.22	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.50	0.00	0.00	0.01	0.21	0.89	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.50	0.00	0.01	0.11	0.45	1.31	1.26	0.26	0.06	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.50	0.00	0.01	0.36	1.95	2.54	1.73	0.42	0.23	0.05	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9.50	0.00	0.02	0.99	5.44	8.18	4.76	1.89	0.41	0.23	0.09	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.50	0.00	0.02	1.07	8.26	17.52	15.39	7.30	1.72	0.87	0.17	0.13	0.00	0.12	0.07	0.00	0.00
11.50	0.00	0.01	0.83	7.29	19.21	23.22	14.07	5.55	2.81	0.99	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.50	0.00	0.02	0.85	5.37	12.84	20.26	16.50	7.22	3.29	1.79	0.46	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00
13.50	0.00	0.02	0.67	3.62	7.29	7.57	6.72	5.03	2.37	1.30	0.66	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
14.50	0.00	0.00	0.25	1.07	2.14	2.16	1.58	1.38	0.96	0.58	0.24	0.28	0.25	0.00	0.00	0.00
15.50	0.00	0.01	0.37	1.47	2.28	1.71	1.08	0.77	0.37	0.05	0.38	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
16.50	0.00	0.01	0.18	0.80	1.40	0.94	0.28	0.14	0.18	0.05	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17.50	0.00	0.00	0.06	0.29	0.42	0.18	0.03	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.50	0.00	0.00	0.08	0.17	0.28	0.04	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19.50	0.00	0.00	0.01	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.50	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.50	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.31: Tabla de MAEP para P200.

Hsig Te	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75
1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.50	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.50	0.00	0.00	0.01	0.10	0.33	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.50	0.00	0.00	0.01	0.13	0.73	0.64	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.50	0.00	0.00	0.09	0.40	1.04	1.59	0.71	0.06	0.06	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.50	0.00	0.00	0.27	1.75	2.51	2.55	0.66	0.26	0.07	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9.50	0.00	0.01	0.67	4.78	8.27	6.78	3.38	0.63	0.25	0.09	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.50	0.00	0.01	0.72	6.34	16.17	19.53	11.80	3.72	1.23	0.31	0.17	0.00	0.12	0.07	0.00	0.00
11.50	0.00	0.01	0.61	5.20	16.51	25.16	20.94	10.24	3.97	1.64	0.70	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
12.50	0.00	0.01	0.66	4.42	10.92	17.42	22.14	13.40	5.72	2.12	1.47	0.30	0.14	0.00	0.00	0.00
13.50	0.00	0.01	0.52	3.10	6.51	7.84	7.83	6.71	4.99	2.06	1.21	0.39	0.08	0.00	0.00	0.00
14.50	0.00	0.00	0.18	1.05	1.91	2.61	1.87	1.56	1.31	0.77	0.65	0.42	0.17	0.19	0.00	0.00
15.50	0.00	0.01	0.22	1.51	2.10	2.17	1.20	1.03	0.54	0.15	0.06	0.38	0.09	0.00	0.00	0.00
16.50	0.00	0.00	0.14	0.71	1.39	1.21	0.41	0.14	0.18	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17.50	0.00	0.00	0.03	0.29	0.47	0.18	0.05	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.50	0.00	0.00	0.07	0.17	0.26	0.12	0.06	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19.50	0.00	0.00	0.01	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.50	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.50	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.32: Tabla de frecuencia relativa para gráficos dispersión-energía en P050.

Hsig Te	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75
1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.50	0.01	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.50	0.00	0.38	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.50	0.00	0.72	0.35	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.50	0.05	0.81	1.26	0.08	0.06	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.50	0.11	1.75	2.23	0.29	0.09	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9.50	0.12	5.43	5.44	0.91	0.10	0.09	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.50	0.08	7.88	10.47	2.41	0.28	0.07	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11.50	0.07	6.17	13.00	3.22	0.56	0.15	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.50	0.05	3.64	10.00	3.86	0.59	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13.50	0.08	1.77	4.33	2.34	0.47	0.18	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14.50	0.02	0.55	1.18	0.71	0.13	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15.50	0.03	0.62	1.14	0.74	0.22	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16.50	0.01	0.22	0.50	0.39	0.14	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17.50	0.01	0.03	0.17	0.15	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.50	0.00	0.06	0.11	0.08	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19.50	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.50	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.50	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.33: Tabla de frecuencia relativa para gráficos dispersión-energía en P100.

Hsig Te	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75
1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.50	0.00	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.50	0.00	0.07	0.39	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.50	0.00	0.03	0.84	0.22	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.50	0.02	0.20	0.98	0.93	0.12	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.50	0.00	0.62	2.33	1.30	0.16	0.08	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9.50	0.01	1.70	6.49	3.33	0.58	0.08	0.07	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.50	0.01	1.85	10.59	7.10	1.77	0.24	0.10	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
11.50	0.01	1.32	9.93	9.00	2.54	0.54	0.19	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.50	0.00	0.89	6.18	7.68	2.50	0.52	0.19	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13.50	0.01	0.61	2.96	3.36	1.50	0.39	0.10	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14.50	0.00	0.24	0.82	0.81	0.36	0.11	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15.50	0.00	0.34	0.83	0.82	0.45	0.08	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16.50	0.00	0.14	0.39	0.44	0.21	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17.50	0.00	0.03	0.11	0.15	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.50	0.00	0.02	0.11	0.10	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19.50	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.50	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.50	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.34: Tabla de frecuencia relativa para gráficos dispersión-energía en P150.

Hsig Te	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75
1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.50	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.50	0.00	0.00	0.03	0.23	0.18	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.50	0.00	0.00	0.02	0.25	0.63	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.50	0.00	0.05	0.22	0.46	0.80	0.52	0.08	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.50	0.00	0.04	0.62	1.74	1.37	0.63	0.11	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9.50	0.00	0.07	1.55	4.35	3.96	1.54	0.44	0.07	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.50	0.00	0.08	1.52	5.98	7.66	4.51	1.53	0.27	0.11	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
11.50	0.00	0.05	1.07	4.81	7.67	6.21	2.69	0.80	0.31	0.09	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.50	0.00	0.05	1.02	3.26	4.72	4.98	2.91	0.95	0.34	0.15	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
13.50	0.00	0.07	0.74	2.03	2.48	1.73	1.10	0.62	0.23	0.10	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
14.50	0.00	0.01	0.26	0.56	0.68	0.46	0.24	0.16	0.09	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
15.50	0.00	0.02	0.36	0.72	0.67	0.34	0.15	0.08	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16.50	0.00	0.02	0.16	0.37	0.39	0.17	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17.50	0.00	0.00	0.05	0.13	0.11	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.50	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19.50	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.50	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.50	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(Fuente: Elaboración Propia.)

Tabla 6.35: Tabla de frecuencia relativa para gráficos dispersión-energía en P200.

Hsig Te	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75
1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.50	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.50	0.00	0.00	0.02	0.13	0.27	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.50	0.00	0.00	0.02	0.15	0.51	0.30	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.50	0.00	0.02	0.18	0.41	0.64	0.65	0.21	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.50	0.00	0.01	0.47	1.56	1.36	0.92	0.17	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9.50	0.00	0.03	1.05	3.82	4.00	2.19	0.78	0.11	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.50	0.00	0.04	1.02	4.59	7.07	5.72	2.47	0.59	0.15	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
11.50	0.00	0.03	0.78	3.43	6.59	6.73	4.01	1.47	0.44	0.15	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12.50	0.00	0.04	0.78	2.69	4.01	4.29	3.90	1.77	0.59	0.17	0.10	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
13.50	0.00	0.04	0.57	1.74	2.21	1.79	1.28	0.82	0.48	0.16	0.08	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
14.50	0.00	0.01	0.19	0.55	0.61	0.55	0.28	0.18	0.12	0.05	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00
15.50	0.00	0.02	0.21	0.74	0.62	0.43	0.17	0.11	0.04	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
16.50	0.00	0.01	0.13	0.33	0.39	0.23	0.05	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17.50	0.00	0.00	0.03	0.13	0.12	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.50	0.00	0.00	0.05	0.07	0.07	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19.50	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.50	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(Fuente: Elaboración Propia.)

Histogramas del potencial energético undimotriz.

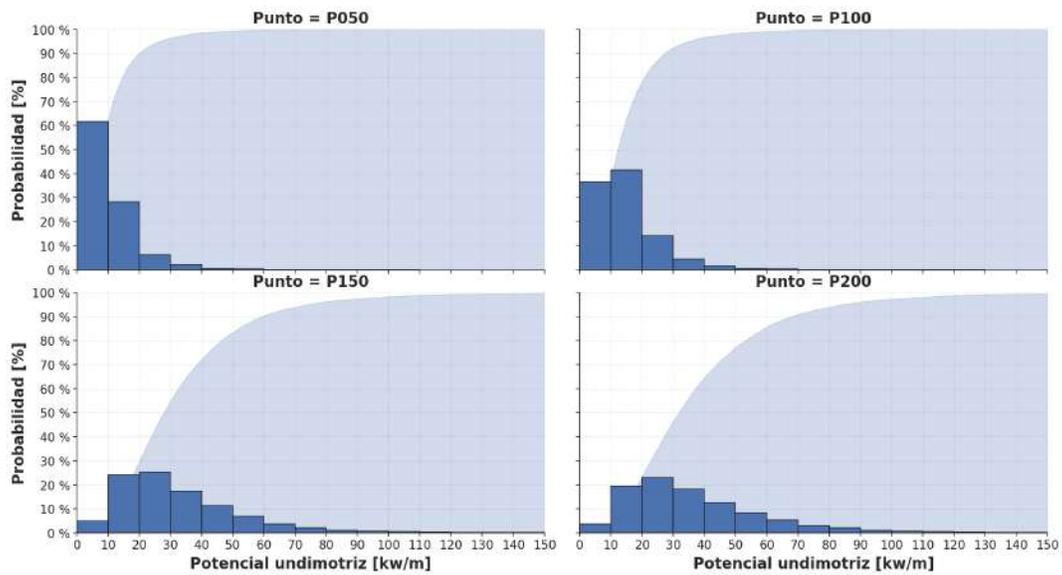


Figura 6.33: Histograma del potencial energético undimotriz.

(Fuente: Elaboración Propia.)