



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

FACTIBILIDAD DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE EL OLEAJE EN PUNTOS SOMBRAS DE LA COSTA CHILENA

Memoria de Título presentada por

Andrés Felipe Villalobos Cristensen

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Patricio Catalan

Abril de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: FACTIBILIDAD DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE EL OLEAJE EN PUNTOS SOMBRAS DE LA COSTA CHILENA

Nombre del candidato(a): Andrés Felipe Villalobos Cristensen

Carrera / Grado: Ingeniero Civil en Obras Civiles

Campus: San Joaquín **Departamento:** Departamento Civil Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Patricio Catalán, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

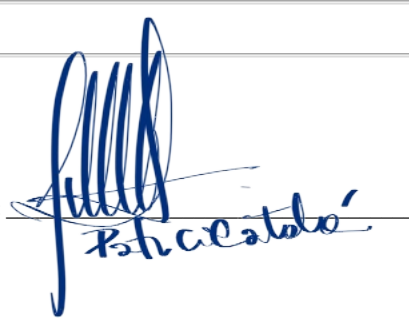
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 20 Agosto 2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21 Agosto 2026 **Firma:** Villalobos, Andres

Digitally signed by
Villalobos, Andres
DN: cn=Villalobos, Andres
Date: 2026.08.21 09:12:12 -
04'00'

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

“SE AGRADECE A LA ESCUELA DE INGENIERÍA OCEÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO POR FACILITAR LA INFORMACIÓN DE OLAJE EMPLEADA PARA EL DESARROLLO DE ESTE TRABAJO, LAS CUALES PUEDEN SER GESTIONADAS EN LAS PÁGINAS WEB OLAJE.UV.CL Y MAREJADAS.UV.CL”

Índice

1	Introducción.....	5
2	Marco Teórico	6
2.1	Fuente de Oleaje	6
2.2	Caracterización del Oleaje	6
2.3	Modelos y Conjunto de Datos.....	8
2.4	Antecedentes y Costa Nacional.....	9
2.5	Teoría Lineal del Oleaje.....	9
2.6	Prototipo Convertidor de Energía de Oleaje (OWC power buoy)	11
2.7	Teoría de Fuerzas Hidrodinámicas	12
3	Objetivos	14
3.1	Objetivo General	14
3.2	Objetivos Específicos.....	14
4	Metodología.....	15
4.1	Parametrización Energética y Selección de Áreas de Estudio	15
4.2	Validación y Recaudación de Datos Característicos.....	16
4.3	Transformación y Parametrización a Fuerza	16
5	Resultados	17
5.1	Datos y Selección de Zonas de Estudio	17
5.2	Validación y Resultados Zonas Seleccionadas	22
5.3	Resultados de Fuerza y Parámetros Comparativos	24
5.3.1	Conservación Energética	25
5.3.2	Reducción de Fuerza	26
5.3.3	Relación Entre Variación de Fuerza y Energía (Trade-Off).....	28
5.3.4	Estabilidad Energética	29
5.3.5	Extremos.....	30
5.4	Presentación Resultado Final.....	32
6	Análisis y Discusión.....	33
7	Conclusión.....	35
8	Bibliografía.....	37
9	Anexos.....	38
9.1	Datos por Mes para P10, P50, P90.....	38
9.2	Validación de Datos	40
9.3	Densidad de Probabilidad 6 Zonas:	44
9.4	Densidad de Fuerza Para las 8 Zonas:	47
9.5	Gráficos Radar	50

FACTIBILIDAD DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE EL OLEAJE EN PUNTOS SOMBRAS DE LA COSTA CHILENA

Andrés Villalobos Cristensen¹, Patricio Catalan²

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

1 Introducción

El calentamiento global ha impulsado una transición energética a nivel global, orientada a mitigar sus efectos mediante la incorporación de energía renovable y sostenible, que sean eficientes y moldeables a distintas situaciones y condiciones geográficas. Entre ellas se encuentra la energía undimotriz (energía generada por el oleaje), la cual se presenta como una opción prometedora por su alta densidad energética. Chile, con más de 4.000 kilómetros de costa frente al océano Pacífico, posee uno de los mayores potenciales de energía undimotriz a nivel mundial (López et al., 2013). Sin embargo, pese a su potencial, esta fuente ha sido escasamente incorporada en las estrategias de desarrollo energético nacional. Las dificultades asociadas a la hostilidad del oleaje en zonas expuestas y la escasa evaluación en sitios alternativos han limitado su desarrollo, desaprovechando una fuente de energía limpia y abundante. Al no tener esta fuente en consideración se deja de lado la diversificación energética nacional y además un desarrollo sustentable y sostenible de zonas costeras con acceso restringido energético.

Una de las barreras principales para el desarrollo de la energía undimotriz en Chile es la falta de estudios centrados en las zonas costeras protegidas del impacto directo del oleaje, denominadas “puntos sombras”. Estos corresponden a sectores geográficos que, debido a la configuración del relieve costero o de presencia de islas, presentan condiciones de oleaje menos extremas, lo cual podría favorecer la instalación de infraestructura para la captura de energía con menores exigencias estructurales y de mantenimiento. A nivel internacional, se han desarrollado varios estudios que analizan este tipo de zonas para proyectos de energía marítima, como en costas protegidas en Portugal y España (Iglesias & Carballo, 2010) utilizando modelos numéricos como SWAN y WAVEWATCH III para estimar recursos energéticos bajo distintas condiciones de contorno. En el caso chileno, la investigación ha estado mayormente enfocada en zonas expuestas como el borde de la región de Bio-Bio y la región de Valparaíso (Lucero et al., 2017), dejando sectores con potencial energético protegidos sin caracterización. Esta situación se da debido tanto al desconocimiento de la existencia de estos puntos, como a la escasa aplicación de herramientas de modelación para identificarlos. Como consecuencia, se ha generalizado la percepción de que el litoral chileno no presenta condiciones favorables para el desarrollo de la energía undimotriz, debido a hostilidad y agresividad costera, descartando su integración y desarrollo en la estrategia energética del país.

En cuanto a la captación de la energía undimotriz, se tienen varios modelos estructurales que cumplen esta función, tales como columnas de agua oscilante (OWC), absorbedores puntuales (PA), terminadores, atenuadores, entre otros, cada uno con características físicas y funcionales distintas, con funcionamientos variados y comportamientos distinto frente al oleaje, adecuándose así a distintas circunstancias marítimas (Falnes, 2007). Este trabajo se enfocará en el análisis sobre una OWC power buoy, siendo un dispositivo flotante que utiliza el movimiento vertical del oleaje para accionar el sistema de columna de agua y a través de esta generar la energía. Este tipo de estructura resulta especialmente relevante en contextos de puntos sombra, donde las condiciones más benignas de oleaje pueden favorecer tanto su instalación como su supervivencia estructural.

Ante esta carencia de estudio y teniendo en cuenta la estructura a investigar, el presente trabajo tiene como objetivo general proponer un análisis multicriterio que incorpore parámetros tradicionales de caracterización de energía con datos representativo de la supervivencia de la infraestructura. Para ello, se identificarán los puntos sombras a estudiar en Chile mediante análisis geográficos y datos oceanográficos, para luego recolectar datos mediante estudios que presenten herramientas numéricas para la evaluación del potencial energético o sensores locales a lo largo de toda la costa nacional que contengan datos característicos y así, por último, se busca relacionar la energía con fuerza para ver y

comparar las magnitudes con la resistencia de la infraestructura utilizada para la generación de energía en las distintas ubicaciones costeras del país. Este enfoque busca contribuir al conocimiento de estos sectores sub-explorados, localizar los mejores sectores para futuras investigaciones y aportar evidencia que fundamente su inclusión a futuras estrategias de aprovechamiento de la energía marítima en Chile.

2 Marco Teórico

2.1 Fuente de Oleaje

Según lo estipulado por el informe del SHOA (Shoa, 2023), debido a su extensa costa y ubicación frente al Océano Pacífico, Chile recibe oleaje generado en diversas regiones del océano. Entre las principales fuentes de oleaje que inciden en las costas chilenas se encuentra el mar de fondo del hemisferio sur (swell SW), el cual es generado por ciclones extra tropicales en latitudes comprendidas entre 30°S y 70°S. Este tipo de oleaje se presenta durante todo el año, alcanzando su mayor intensidad en invierno, y arriba a las costas chilenas desde el suroeste con períodos característicos entre 12 y 16 segundos, disminuyendo progresivamente su intensidad hacia el norte del país.

Por otra parte, el mar de fondo del hemisferio norte (swell NW) es producido por tormentas en las cercanías de las islas Aleutianas, frente a Alaska. Este tipo de oleaje es más frecuente durante los meses de verano y llega a las costas chilenas desde el noroeste, presentando períodos entre 18 y 25 segundos, con una intensidad que decrece hacia el sur del territorio.

Finalmente, el oleaje de generación local (sea) es provocado por vientos cercanos a la costa y se caracteriza por presentar períodos más cortos, generalmente entre 4 y 8 segundos.

En este trabajo se tomarán datos característicos de distintas zonas de la costa chilena a lo largo de una amplia línea temporal, en donde el comportamiento varía dependiendo de la ubicación y fecha de las mediciones, todo esto debido a la procedencia del oleaje, por lo que es importante entender de donde proviene la fuente de este y que implicancia puede tener en el resultado final.

2.2 Caracterización del Oleaje

El oleaje tiene distintos parámetros que influyen en su caracterización, así se da a entender en el paper Ocean Surface Wave, “En general, la forma resultante de la caracterización depende de las condiciones externas de generación del oleaje (velocidad del viento, alcance y duración del viento, profundidad del agua, presencia de oleaje de fondo y etapa de la tormenta), así como de los mecanismos internos en el campo de olas (interacción no lineal entre componentes del oleaje, disipación de energía debido a la rompiente o a la fricción con el fondo marino).” (Massel, 1996). Comprender estos parámetros es fundamental para estimar la cantidad de energía disponible en el oleaje y su interacción con estructuras marinas. En este estudio, la caracterización del oleaje constituye la base para calcular el potencial energético undimotriz y posteriormente determinar las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre el prototipo de infraestructura considerada.

A continuación, se presentan los principales parámetros utilizados en la caracterización del oleaje:

Altura significativa espectral de la ola (H_{m0}): Corresponde a una medida estadística de la altura de las olas obtenidas a partir del espectro de energía del oleaje, representando una estimación equivalente de la altura significativa del oleaje.

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (1)$$

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(f) df \quad (2)$$

Donde $S(f)$ representa la densidad espectral de energía de oleaje, la cual describe la distribución de la energía de las olas en función de la frecuencia.

Periodo medio (T_m) y periodo pico (T_p): Ambos parámetros se derivan del espectro de energía del oleaje. El periodo pico corresponde a la frecuencia donde el espectro tiene su máximo, mientras que el periodo medio representa un promedio ponderado por la distribución energética del espectro.

$$T_m = \frac{m_0}{m_1} \quad (3)$$

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (4)$$

Frecuencia angular (ω):

$$\omega = 2\pi f \quad (5)$$

Numero de onda (k): este valor se puede obtener de la dispersión de aguas de una profundidad arbitraria, donde g es el valor de la aceleración de gravedad, h la profundidad y k es el número de ondas.

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (6)$$

Longitud de onda (L) y velocidad de onda (c):

$$L = \frac{2\pi}{k} \quad (7)$$

$$c = \frac{\omega}{k} \quad (8)$$

Energía de oleaje (E): Energía por unidad de área:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H_{m0}^2 \quad (9)$$

La potencia del oleaje (P): Potencia por unidad de ancho correspondiente al caso de aguas profundas:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{m0}^2 T_e \quad (10)$$

Estos parámetros permiten cuantificar la magnitud y variabilidad del oleaje, además de definir las condiciones de contorno utilizadas en los cálculos hidrodinámicos posteriores. En el contexto de este trabajo, su determinación a partir de los datos del modelo ERA5 y datos prestados de la UV, posibilita evaluar con precisión la energía incidente sobre cada punto de la costa y establecer una base coherente para la comparación entre sectores abiertos y puntos sombra, que se desarrollará en las secciones siguientes.

2.3 Modelos y Conjunto de Datos

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron datos provenientes de dos fuentes distintas. En el caso de las condiciones de mar adentro, se emplearon datos obtenidos a partir de archivos descargados del reanálisis ERA5. Por otro lado, para la caracterización del oleaje en zonas costeras, se utilizaron datos proporcionados por la Universidad de Valparaíso, correspondientes a cinco nodos ubicados en distintos puntos a lo largo de la costa chilena.

El conjunto de datos ERA5 corresponde a un producto de reanálisis climático desarrollado por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), el cual proporciona una representación global, continua y consistente de variables atmosféricas, oceánicas y de superficie terrestre. En este trabajo se utiliza específicamente el producto “ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present”, que entrega información desde el año 1940 hasta la actualidad.

El reanálisis se basa en el principio de asimilación de datos, mediante el cual se combinan observaciones provenientes de diversas fuentes, tales como satélites, boyas y estaciones meteorológicas, con modelos numéricos fundamentados en las leyes físicas que gobiernan el sistema climático. (Climate Data Store, 2026). Este proceso permite generar estimaciones del estado del sistema en distintos instantes de tiempo, asegurando coherencia física y cobertura espacial completa, incluso en regiones con escasa o nula instrumentación. Adicionalmente, ERA5 incorpora estimaciones de incertidumbre basadas en un ensamble de múltiples simulaciones, lo que permite evaluar la confiabilidad de los datos en función de la disponibilidad y calidad de las observaciones.

En el contexto de este estudio, ERA5 permite caracterizar el oleaje en zonas alejadas de instrumentación directa, proporcionando una cobertura continua a lo largo del océano frente a la costa chilena. Los datos se encuentran en formato grillado, con una resolución espacial aproximada de 0.5° , lo que posibilita su utilización en análisis regionales mediante técnicas de interpolación.

Por otro lado, la información de oleaje correspondiente a los denominados nodos UV proviene de resultados obtenidos a partir de modelación numérica. Estos datos son generados mediante el modelo Wavewatch III (versión 4.18), ampliamente utilizado para la simulación del oleaje a escala oceánica. Para su implementación, se empleó una malla computacional regular con una resolución espacial de 1×1 , la cual abarca el océano Pacífico en el rango comprendido entre 64°S , 110°E y 64°N , 60°O . Además, estos puntos virtuales se obtienen de puntos donde la profundidad no sea menor a 20 metros, ubicándose frente a bahías y costas. (Universidad de Valparaíso, 2025).

En particular, los nodos utilizados en este estudio forman parte de una base de datos que ha sido calibrada y validada mediante mediciones satelitales y registros de boyas en aguas profundas. De esta manera, los datos en estos puntos corresponden a una representación numérica del estado del mar, basada en condiciones físicas y forzantes atmosféricas.

En este trabajo, los nodos UV son utilizados para caracterizar el oleaje en zonas cercanas a la costa, permitiendo su comparación con datos de reanálisis en mar adentro y, de esta forma, evaluar la factibilidad del aprovechamiento energético en zonas sombra de la costa chilena.

2.4 Antecedentes y Costa Nacional

Chile presenta una de las líneas de costa más extensas del planeta, superando los 4.000 km de longitud, lo que conlleva una amplia diversidad de condiciones oceanográficas y meteorológicas a lo largo del territorio. En consecuencia, y en base a lo definido en los puntos anteriores, el oleaje produce distintos escenarios energéticos, con variaciones significativas en la altura significativa, los periodos de las olas y, en última instancia, en el potencial energético del recurso.

Diversos estudios han caracterizado esta variabilidad espacial y temporal. En el libro *Costas de Chile*, (Morales Gamboa et al., 2019), destacan que las alturas significativas promedio anual muestran diferencias notables entre el norte y el sur del país, alcanzando valores promedios de 1,8 m en la zona de Arica y hasta 4,0 m en la Región de Aysén. Estas diferencias también se reflejan en los periodos de las olas, los cuales tienden a ser mayores en el norte (con diferencias cercanas a 2 s respecto del sur), lo que indica un régimen de olas más largas y menos pronunciadas en latitudes bajas.

Esta distribución espacial de las condiciones de oleaje se traduce directamente en una gradiente de energía a lo largo de la costa (Cruz et al., 2009). Y señalan que, dada la predominancia del recurso undimotriz, los sectores del sur de Chile presentan un mayor potencial energético en comparación con los del norte, lo que los posiciona como zonas más favorables para la explotación desde la perspectiva de la energía.

Lucero et al. (2017) evidencia que esta tendencia se mantiene tanto en condiciones de alta recurrencia (percentil 10) como en condiciones extremas o de baja recurrencia (percentil 90), demostrando que la energía promedio y la energía máxima siguen el mismo patrón espacial. Además, agregan que la estacionalidad también juega un rol fundamental en la dinámica del recurso. Describen que la energía undimotriz presenta una marcada dependencia con la estación del año: los meses de invierno concentran las condiciones más energéticas debido a la influencia de sistemas frontales y tormentas provenientes del sur del océano Pacífico. En contraste, durante el verano se observan periodos de menor intensidad energética, asociados a condiciones de mar más calmas. (Lucero et al., 2017)

En síntesis, la literatura evidencia que el potencial undimotriz en Chile aumenta progresivamente hacia el sur, con una fuerte variabilidad estacional. Por lo tanto, al modelar y analizar los datos de oleaje en este trabajo, se espera reproducir este comportamiento para la selección de zonas a estudiar, comparando regiones abiertas con puntos sombra cercanas a zonas costeras abrigadas, donde el recurso se atenúa.

2.5 Teoría Lineal del Oleaje

Teoría utilizada para describir el movimiento de las olas en aguas profundas e intermedias. Su formulación parte de la base de varias simplificaciones e hipótesis.

- Fluido homogéneo, incompresible, no viscoso e irrotacional, básicamente condiciones de fluido ideal, con el fin de introducir el potencial de velocidad.
- Se desprecia la tensión superficial.
- Fondo plano, constante e impermeable, esto con el fin de definir la condición cinemática del contorno en el fondo.
- La ola no interactúa con ningún otro movimiento del fluido y no existe pérdida de energía, propagándose por enormes distancias
- Alturas de olas pequeñas comparadas con su largo y la forma no varía en el tiempo, esto sirve para linealizar el problema.

(Universidad Politécnica de Catalunya, 2022.).

Resumen

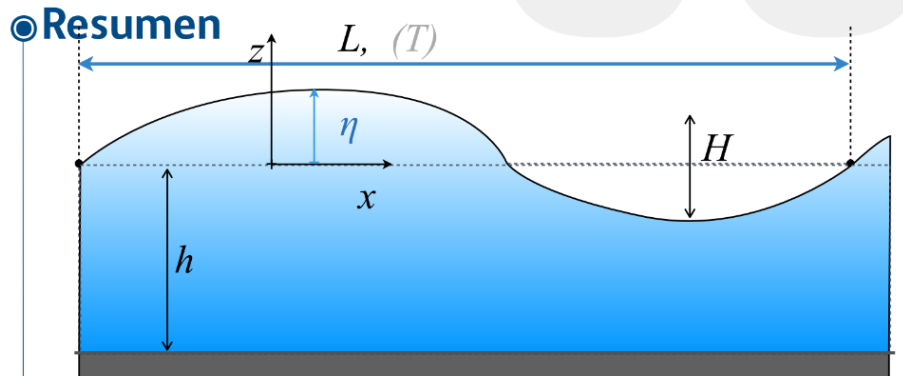


Figura 1: Esquema resumen de los parámetros de TLO
Fuente: Teoría lineal del oleaje, obras marítimas. (2024)

La TLO se compone por las siguientes formulas:

La frecuencia angular y fase σ está dada por:

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (11)$$

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad (12)$$

El número de onda k , este se representa por:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (13)$$

La componente de la forma de la superficie libre está representada por η , y esta se calcula de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx) \cos(\sigma t) \quad (14)$$

Tomando la simplificación de aguas profunda que instaura $\tanh(kh)$ tiende a 1, se tiene la componente L como:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (15)$$

Cabe destacar que esto se encuentra limitado por $h \leq \frac{1}{2} L$. De lo contrario se calcularía como:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh) \quad (16)$$

Por último, se tiene la ecuación de velocidad, la cual se representa por el símbolo ϕ , el cual se calcula de la siguiente forma:

$$\phi = \frac{Hg \cosh(k(h+z))}{2\sigma \cosh(kh)} \cos(kx) \sin(\sigma t) \quad (17)$$

La Teoría Lineal del Oleaje constituye la base teórica del modelo numérico desarrollado en este estudio. A partir del potencial de velocidad (ϕ) se obtienen las velocidades de partícula en las direcciones horizontal y vertical, y posteriormente la presión dinámica. Estos parámetros serán clave para el cálculo posterior que lleva a la evaluación y desempeño estructural de las zonas seleccionadas.

En síntesis, esta teoría proporciona las herramientas analíticas necesarias para vincular las condiciones de oleaje (H_s , T , h) con las fuerzas hidrodinámicas que experimenta la estructura a selección.

2.6 Prototipo Convertidor de Energía de Oleaje (OWC power buoy)

Para el análisis que se realizara en este trabajo, es fundamental entender la estructura a estudiar, la cual se basa en un mecanismo OWC en formato de power buoy.

OWC refiere a oscillating water column, un sistema de recaudación de energía que consta de una estructura vacía, la cual se encuentra parcialmente sumergida. La gracia es que el oleaje que entra por la parte sumergida genere en el vacío interior presión de aire que mueve y activa unas turbinas generando así electricidad. Esto mediante la compresión y descompresión del aire en la cavidad interior (Cuadra et al., 2016).

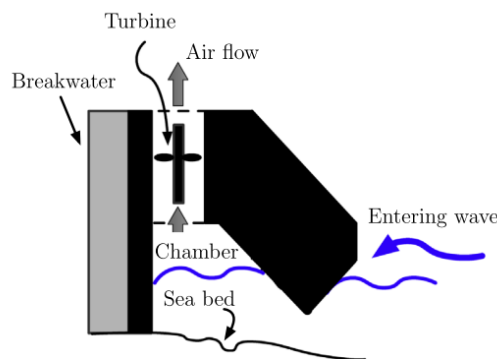


Figura 2. Esquema de OWC

Fuente: Computational intelligence in wave energy: Comprehensive review and case study (2016).

Por otra parte, Power Buoy es un sistema de boya la cual se encuentra amarrada con tensores al fondo, este es un sistema flotante que oscila en la mar amarrada al fondo oceánico variando en distintos tamaños y formas, con distintas características físicas (Ocean Resource Limited, 2009).

Teniendo en consideración las definiciones anteriores, se describe un sistema OWC power buoy como una boya de forma cilíndrica, lo cual genera que sea insensible a la dirección del oleaje, de gran esbeltez y altura. En su interior posee el sistema OWC la cual está abierta en la parte sumergida donde el vacío sube por la boya hasta llegar a la parte superior conteniendo la cámara de aire con su respectiva turbina (Correia da Fonseca et al., 2016). Este sistema se encuentra con sus respectivos tensores sumergidos anclados al fondo marino, lo cual mantiene a la boya en su lugar evitando el arrastre del oleaje.

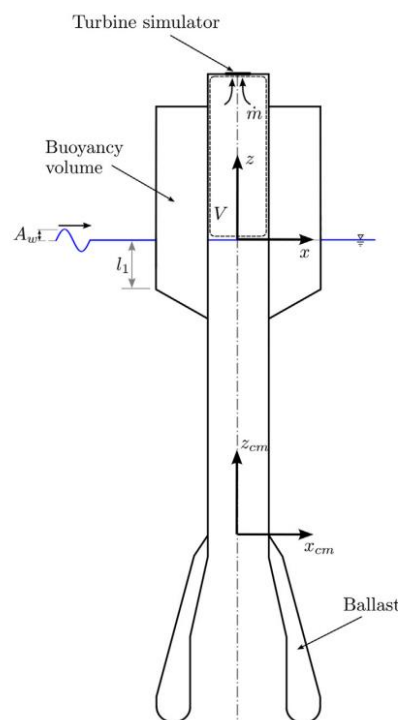


Figura 3: Esquema de un OWC Power buoy

Fuente: Model testing of an oscillating water column spar-buoy wave energy converter isolated and in array: Motions and mooring forces (2016).

Por otro lado, OWC Power Buoy tiene las siguientes características físicas, asumiendo una forma cilíndrica uniforme, las cuales son de importancia para los cálculos a utilizar en este trabajo:

Tabla 1: Datos físicos OWC power buoy

Magnitud	Descripción	Valor
D	Diámetro de la boya	16 m
L	Largo sumergido	24 m
B	Orificio Base	Abierto

Fuente: Model testing of an oscillating water column spar-buoy wave energy converter isolated and in array: Motions and mooring forces (2016)

En el marco del presente trabajo, esta configuración se considera una simplificación geométrica idealizada del sistema real, utilizada para evaluar de forma analítica y numérica la interacción entre el oleaje y la estructura flotante. La representación cilíndrica permite aplicar directamente la Teoría Lineal del Oleaje y calcular las presiones y fuerzas resultantes sobre la boya, las cuales serán analizadas en las secciones posteriores

2.7 Teoría de Fuerzas Hidrodinámicas

El comportamiento dinámico de una estructura flotante sometida a la acción del oleaje puede describirse mediante la suma de las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre su superficie. Según el modelo propuesto por (Cao et al., 2024) y retomado en el trabajo de referencia, la fuerza total sobre el cuerpo se expresa como:

$$\vec{F} = \vec{F}_r + \vec{F}_\omega + \vec{F}_d + \vec{F}_s \quad (18)$$

$\vec{F}_r$: Fuerza radiada, generada por las olas emitidas a consecuencia del movimiento del cuerpo.

$\vec{F}_\omega$: Fuerza de excitación del oleaje incidente, compuesta principalmente por la presión Froude–Krylov y el efecto de difracción.

$\vec{F}_d$: Fuerza de envolvimiento o difracción secundaria, producida por la redistribución del flujo alrededor del cuerpo.

$\vec{F}_s$: Fuerza hidrostática restauradora, asociada al empuje del fluido desplazado.

En el presente trabajo, se adopta una formulación simplificada acorde con las hipótesis de la teoría lineal del oleaje y las condiciones del modelo numérico empleado. En particular, se desprecian los términos de radiación ($\vec{F}_r$) y de difracción envolvente ($\vec{F}_d$), así como las fuerzas asociadas al viento y corrientes marinas, por considerarse de menor influencia en el contexto del análisis de fuerzas instantáneas sobre la estructura. Por otro lado, con las fuerzas restantes de la ecuación se puede lograr el objetivo planteado generando una comparativa de fuerzas por el oleaje en distintos puntos seleccionados.

De esta forma, la fuerza total se reduce a:

$$\vec{F} = \vec{F}_\omega + \vec{F}_s \quad (19)$$

La componente $\vec{F}_\omega$ se determina a partir de la presión dinámica del oleaje incidente, obtenida mediante la derivada temporal del potencial de velocidad definido por la Teoría Lineal del Oleaje:

$$p_{dyn}(z, t) = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} = -\rho A_\phi(z) \omega \sin(kx - \omega t + \phi_0) \quad (20)$$

donde $A_\phi(z)$ es la amplitud vertical del potencial, ω la frecuencia angular y k el número de onda. La fuerza de excitación Froude–Krylov se obtiene integrando dicha presión sobre la superficie sumergida del cuerpo:

$$F_{fk}(t) = \int_S p_{dyn}(z, t) dS \quad (21)$$

Al simplificar la estructura como un cilindro de radio R , el elemento de superficie se puede aproximar como:

$$dS \approx (2R)dz \quad (22)$$

Donde $2R$ representa el ancho proyectado del cuerpo, quedando una integral vertical:

$$F_{fk}(t) = 2R \int_{-z} p_{dyn}(z, t) dz \quad (23)$$

Donde z corresponde al calado sumergido de la estructura. Reemplazando con la ec. (20), se llega al siguiente termino:

$$F_{fk}(t) = -2R\rho\omega \sin(kx - \omega t + \phi_0) \int_{-z} A_\phi(z) dz \quad (24)$$

Posteriormente se tiene que reemplazar la definición de la amplitud $A_\phi(z)$, obteniendo:

$$A_\phi(z) = \frac{Hg}{2\omega} \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \quad (25)$$

$$F_{fk}(t) = -2R\rho\omega \sin(kx - \omega t + \phi_0) \int_{-z} \frac{Hg}{2\omega} \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} dz \quad (26)$$

El denominador dentro de la integral no depende de z , por lo que sale como una constante, y se realiza la integral de cosh, llegando como resultado final a:

$$F_{fk}(t) = -R\rho Hg \sin(kx - \omega t + \phi_0) \frac{1}{\cosh(kh)} \int_{-z} \cosh(k(h+z)) dz \quad (27)$$

$$F_{fk}(t) = -R\rho Hg \sin(kx - \omega t + \phi_0) \frac{1}{\cosh(kh)} \frac{1}{k} (\sinh(kh) - \sinh(k(h-z))) \quad (28)$$

Por otro lado, la fuerza hidrostática restauradora corresponde al empuje del volumen desplazado, en este caso la estructura a seleccionar, y se expresa como:

$$F_s = -C_{33} z \quad (29)$$

Donde $C_{33} = \rho g \pi R^2$ representa la constante de rigidez de una boya con radio R .

Finalmente, la fuerza total sobre el sistema se modela como la combinación de ambas componentes:

$$\vec{F}_{total}(t) = \vec{F}_{fk}(t) + \vec{F}_s \quad (30)$$

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

En este trabajo se busca proponer un análisis multicriterio que incorpore parámetros tradicionales de caracterización de energía con parámetros representativos de la supervivencia de la infraestructura.

3.2 Objetivos Específicos

OE1: Parametrización energética, filtración de datos y selección de puntos (puntos sombras) de la costa chilena.

OE2: Validación de datos ERA5 y nodos UV para la recaudación de datos característicos de las zonas a estudiar (H_s , T , ω , k , etc) con el fin de generar el cálculo del potencial energético.

OE3: Transformación y parametrización de la energía a fuerza sobre una estructura tipo OWC para evaluar la factibilidad de recaudación energética mediante un análisis multicriterio.

4 Metodología

El presente capítulo describe el conjunto de procedimientos realizados para alcanzar el objetivo principal de este estudio, que consiste en evaluar la factibilidad de producción de energía undimotriz en puntos sombra a lo largo de la costa chilena, integrando parámetros energéticos tradicionales con factores asociados a la supervivencia estructural de un sistema tipo OWC (*Oscillating Water Column*). Para ello, se desarrolló una metodología estructurada en tres etapas principales, correspondientes a los objetivos específicos planteados.

4.1 Parametrización Energética y Selección de Áreas de Estudio

En primera instancia, se realiza una revisión bibliográfica y cartográfica orientada al estudio del comportamiento del oleaje a lo largo de la costa chilena, con el propósito de comprender la distribución espacial del recurso energético undimotriz y los patrones de atenuación costera. Esta revisión permite identificar antecedentes relevantes sobre la variabilidad de la energía de ola entre el norte y el sur del país ((Morales Gamboa et al., 2019);(Lucero et al., 2017);(Mediavilla & Sepúlveda, 2016)), así como las diferencias entre zonas expuestas y sectores abrigados o denominados puntos sombra, caracterizados por una menor intensidad del oleaje incidente.

A partir de esta revisión, se establecen los criterios de selección geográfica para el análisis, priorizando sectores representativos del gradiente energético de la costa chilena (norte, centro y sur), y considerando la existencia de zonas naturalmente abrigadas cercanas a la línea costera.

Posteriormente, se procedió a la descarga de datos del reanálisis ERA5 del ECMWF, considerando un dominio entre las latitudes -20° y -40° S y las longitudes -80° y -70° W, correspondiente aproximadamente desde Arica hasta la Región de Los Lagos. Se recopilieron series horarias para el año 2024 de las variables altura significativa del oleaje (Hs) y periodo medio (mwp), ambas con resolución espacial de 0.5° en latitud y longitud.

Trabajos con registros con duración de años pueden capturar adecuadamente la variabilidad del recurso, sin embargo, se puede caracterizar el clima de oleaje con periodo de 3 y 6 meses, permitiendo una comparación robusta de distintas fuentes de datos, tal como algunos instrumentos lo hicieron en el estudio de Lucero (Lucero et al., 2017) Es por esto que se toma la serie de 1 año en este caso, para tener la variabilidad en distintas estaciones a lo largo de una serie de 12 meses.

Estos datos son procesados en Python mediante las librerías *xarray*, *numpy* y *matplotlib*, generándose mapas mensuales del comportamiento del oleaje con el fin de visualizar patrones de atenuación hacia la costa en comparación con condiciones mar adentro. Con base en esta evaluación visual y física, se seleccionaron seis zonas de estudio, cada zona contiene un punto costero y un punto mar adentro.

Debido a la proximidad de algunos puntos a la línea de costa y a la resolución original del modelo, algunas celdas carecían de información válida, por lo que se aplicó un proceso de filtrado y control de calidad para garantizar que las series utilizadas fueran físicamente consistentes y libres de vacíos o anomalías. Por este motivo, se aplicó un proceso de interpolación espacial sobre una malla más densa para obtener campos continuos de Hs y potencial energético. Este procedimiento permitió mejorar la definición espacial del comportamiento del oleaje en áreas próximas a la costa y obtener valores coherentes para el análisis comparativo.

A partir de los datos interpolados se calcularon los percentiles 10, 50 y 90 de Hs, representando escenarios típicos de baja recurrencia, condiciones medias y eventos energéticos extremos. Para garantizar consistencia entre las variables, el periodo asociado a cada percentil no se obtuvo mediante percentiles directos del periodo medio, sino despejando el periodo energético desde la ecuación del potencial, utilizando los valores interpolados de Hs y P para cada percentil.

Complementariamente, se incorporaron datos correspondientes a nodos de oleaje proporcionados por la Universidad de Valparaíso, los cuales corresponden a las seis zonas seleccionadas anteriormente, representativos de condiciones locales en sectores cercanos a la costa. Estos datos permiten caracterizar el comportamiento del oleaje en zonas abrigadas o de sombra, donde la influencia de la batimetría y la configuración costera genera una atenuación del oleaje incidente.

Por último, nos queda un mapa con la selección de seis puntos a lo largo de la costa chilena, cada zona contiene un punto mar adentro, correspondiente a los datos de ERA5, y dos puntos en la costa, uno perteneciente a ERA5 y el otro a los datos proporcionados por los nodos UV.

4.2 Validación y Recaudación de Datos Característicos

Previo a la recaudación y cálculo de datos característicos, se realizó una comparación entre los puntos costeros correspondientes a los nodos UV y los valores obtenidos desde la grilla de ERA5. Sin embargo, dado que algunos nodos se ubican muy próximos a la línea de costa, en ciertos casos no fue posible obtener información directa en las mismas coordenadas desde ERA5, debido a la ausencia de datos en dichas celdas. En estos casos, se optó por seleccionar el punto más cercano disponible en la grilla de ERA5 que contuviera información válida, asegurando así la continuidad del análisis y manteniendo la representatividad física de las condiciones de oleaje.

Esta etapa permitió verificar que, pese a las diferencias de resolución y naturaleza de los datos, ERA5 reproduce adecuadamente las tendencias generales del oleaje en relación con los valores costeros, justificando su uso como referencia en mar adentro.

Una vez validado los datos de cada zona de estudio, se procedió a extraer las series horarias correspondientes desde el conjunto interpolado. Se calcularon los parámetros fundamentales del oleaje necesarios para la modelación. Entre estos se incluyen la frecuencia angular (ω), utilizando la ec. 6, y el número de onda (k). Este último determinado resolviendo la ec. 12 de dispersión de la teoría lineal del oleaje mediante el método iterativo de Newton–Raphson. Asimismo, se estimó el potencial de velocidad mediante la ec. 17 asociado a cada condición, permitiendo caracterizar completamente el campo de oleaje para los percentiles analizados.

Finalmente, se generaron curvas de densidad de probabilidad para el potencial energético (P), calculado mediante la ec. 10, en cada punto de estudio para los percentiles 10, 50 y 90, permitiendo identificar la variabilidad, recurrencia y comportamiento estadístico del oleaje en mar adentro y en la zona costera.

4.3 Transformación y Parametrización a Fuerza

La tercera etapa corresponde a la transformación y parametrización de la fuerza hidrodinámica asociada al oleaje, con el objetivo de evaluar su impacto sobre una estructura tipo OWC Power Buoy. Para ello, se definieron las propiedades físicas y geométricas del prototipo, representado como un cilindro vertical de radio R y calado conocido. Utilizando los parámetros del oleaje obtenidos en la etapa anterior, se modeló la presión dinámica ejercida sobre la superficie sumergida del cilindro mediante la teoría lineal del oleaje, realizando una discretización vertical de la columna de agua y resolviendo numéricamente las integrales de presión (ec. 23) mediante funciones de integración en Python. Este procedimiento permitió obtener, para cada instante y percentil, la magnitud de la fuerza hidrodinámica total actuante sobre la estructura.

A partir de estos resultados, se realizó una comparación sistemática entre condiciones de mar adentro, representadas por datos provenientes de ERA5, y condiciones costeras, caracterizadas mediante los nodos UV, para un conjunto de seis zonas seleccionadas a lo largo de la costa chilena. Esta comparación permitió analizar la variación del recurso energético y de las cargas estructurales al desplazarse desde zonas expuestas hacia zonas costeras abrigadas o de sombra.

Con el fin de evaluar la factibilidad del aprovechamiento energético en estas zonas, se desarrolló un análisis multicriterio. Se definieron cinco criterios de evaluación que permiten caracterizar integralmente cada zona: la variación del potencial energético entre mar adentro y la costa, la variación

de la fuerza, la relación entre fuerza y energía como indicador de eficiencia o también lo llamaremos trade-off, la estabilidad del recurso energético en condiciones costeras referente a que tan volátil es el potencial energético, y la representatividad de eventos extremos en términos de ocurrencia. Estos criterios fueron seleccionados con el objetivo de evaluar no solo la magnitud del recurso, sino también su comportamiento y viabilidad desde un punto de vista operativo y estructural.

Posteriormente, los resultados obtenidos fueron parametrizados mediante una escala adimensional discreta de 1 a 6, donde 1 representa condiciones desfavorables y 6 condiciones altamente favorables. Esta parametrización se realizó a partir de una normalización relativa de cada variable, utilizando los valores mínimos y máximos observados entre todas las zonas de estudio. En particular, para cada criterio evaluado se definió un rango de variación global, a partir del cual se aplicó una transformación lineal que permitió escalar los valores. Este procedimiento asegura que la comparación entre zonas sea consistente y relativa al desempeño del conjunto completo de datos.

Finalmente, se generaron gráficos tipo radar para cada zona de estudio, así como un gráfico comparativo global, permitiendo visualizar de manera integrada el desempeño relativo de cada ubicación. Esta representación facilitó la identificación de las zonas con mejores condiciones para la instalación de dispositivos undimotrices tipo OWC, considerando simultáneamente la disponibilidad energética y la reducción de cargas estructurales

5 Resultados

5.1 Datos y Selección de Zonas de Estudio

Para estos primeros resultados, se grafican los datos descargados del ERA5 para ver el comportamiento general energético y identificando zonas con atenuación energética en la costa. En este caso se grafican mapas con distintas alturas de olas promedio por cada mes del año 2024 para facilitar este proceso:

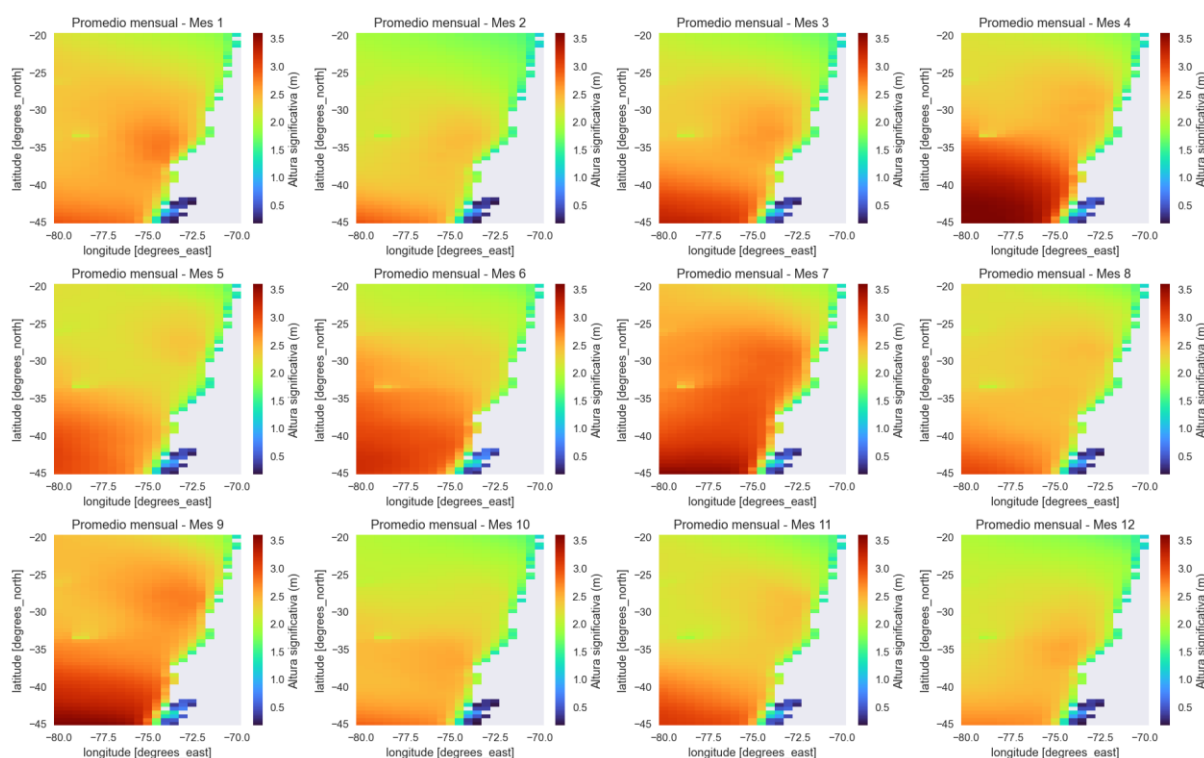


Figura 4: Datos de altura significativa proveniente de ERA5 promediado por mes.

Estos gráficos presentan la distribución espacial de la altura significativa del oleaje a lo largo de la costa chilena. Cada grafico corresponde a un mes del año 2024, representando el dominio en función de la latitud y longitud. La escala de colores identifica la magnitud, donde los tonos cálidos indican mayores alturas y los tonos fríos representan alturas menores.

Posteriormente, se realiza la interpolación de los datos de Hs y P, para mejorar el campo de valores y su resolución, obteniendo un nuevo mapeo como se muestra a continuación:

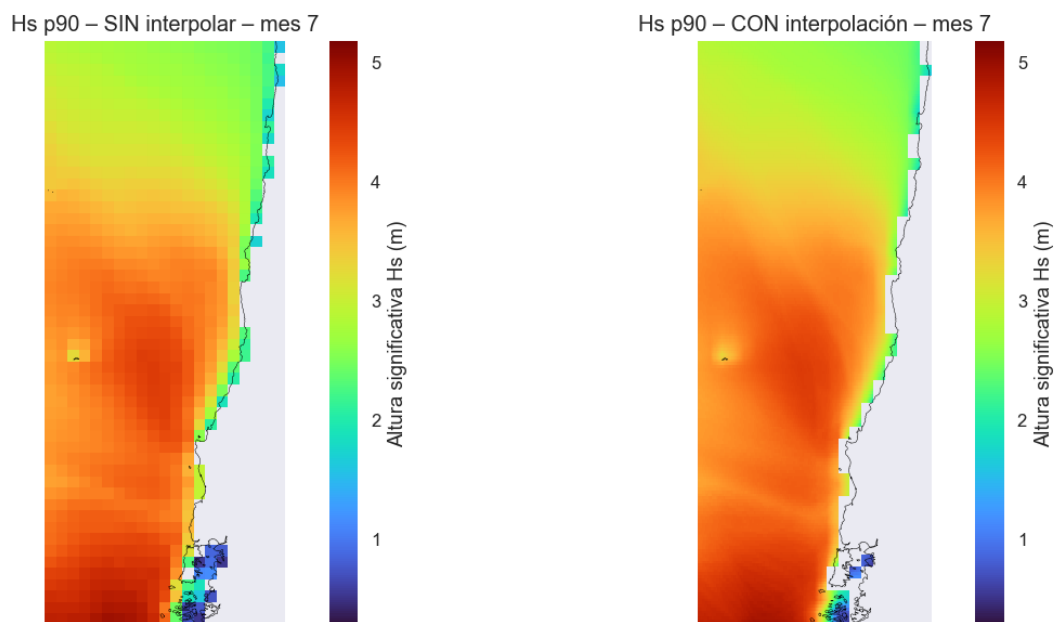


Figura 5: Interpolación de datos de Hs ejemplificado para el mes de Julio percentil 90.

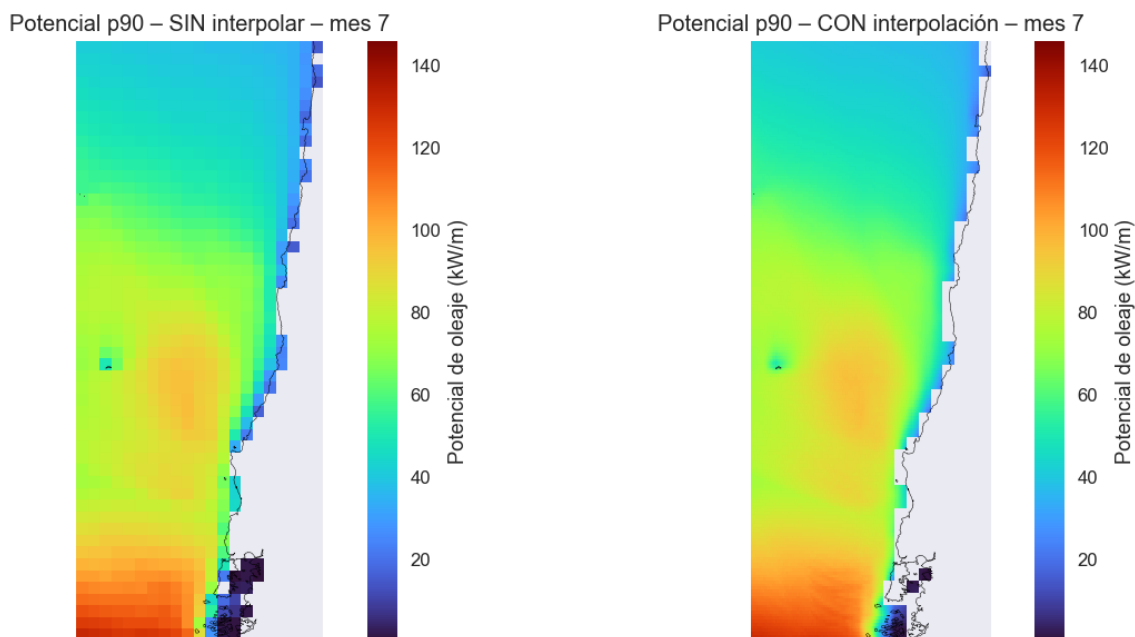


Figura 6: Interpolación de datos de P ejemplificado para el mes de Julio percentil 90.

A continuación, se realiza el despeje del periodo de la ecuación de potencial energético con los valores interpolados, ejemplificado en el siguiente gráfico.

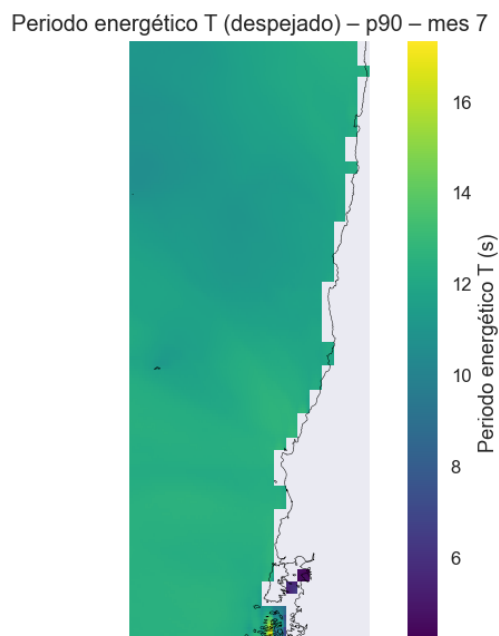


Figura 7: Valores de T despejados ejemplificado para el mes de Julio percentil 90.

Una vez realizado las interpolaciones y limpieza de datos, se marcan las seis zonas seleccionadas a lo largo del mapa, identificando tres puntos por cada zona. Uno mar adentro correspondiente a ERA5 y dos en la costa, uno entregado por los nodos UV y el otro perteneciente a ERA5.

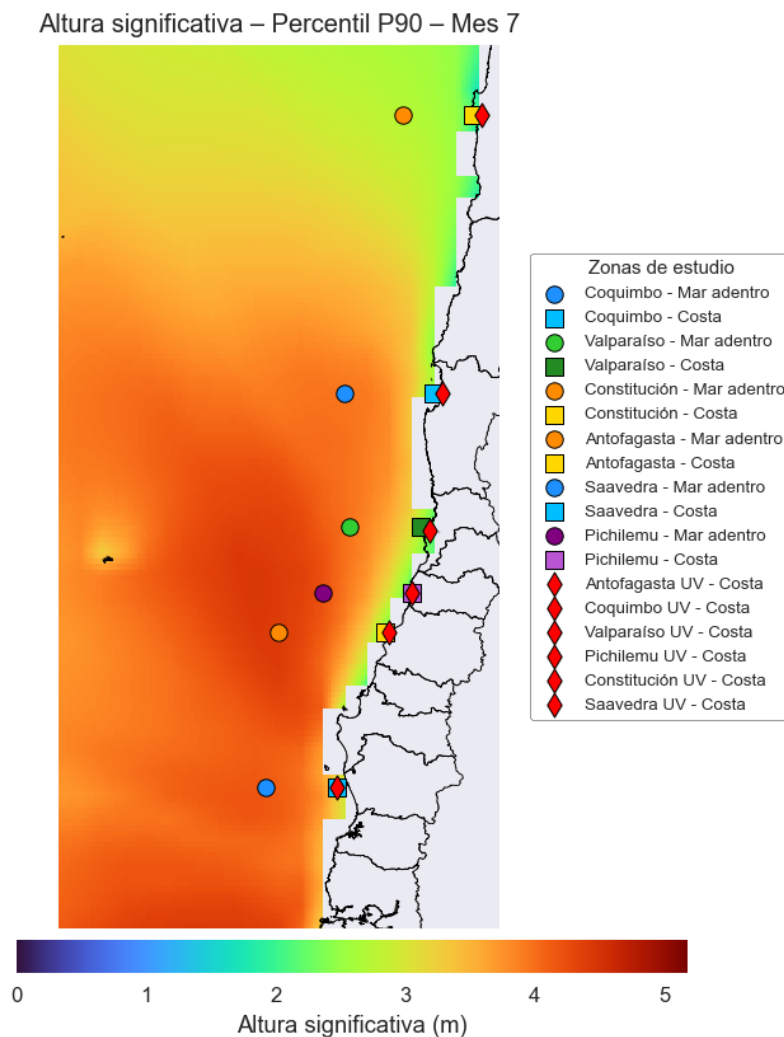


Figura 8: Zonas seleccionadas en mapa de altura de oleaje representado por el mes Julio percentil 90.

Una vez seleccionados, se anotan sus ubicaciones exactas y con ayuda del programa Google Earth se extraen sus profundidades que serán útiles para cálculos posteriores. Para las profundidades de los nodos UV, se tiene en consideración lo estipulado por la Universidad de Valparaíso, dictaminando que sus nodos no se encuentran en zonas con menos de 20 metros de profundidad, por lo que en caso de que Google Earth muestra un valor menor en las coordenadas del nodo, se dejara por criterio en 20 m de profundidad.

Tabla 2: Ubicación y parámetros lugares seleccionados ERA5

Lugar	Mar Adentro	Frente Costa
Antofagasta	lat: -23.6 ; lon: -72.2 Profundidad: 4183 m	lat: -23.6 ; lon: -70.6 Profundidad: 520 m
Coquimbo	lat: -29.9 ; lon: -73.5 Profundidad: 3559 m	lat: -29.9 ; lon: -71.5 Profundidad: 1632 m
Valparaíso	lat: -32.9 ; lon: -73.4 Profundidad: 4081 m	lat: -32.9 ; lon: -71.8 Profundidad: 331 m
Pichilemu	lat: -34.4 ; lon: -74.0 Profundidad: 4160 m	lat: -34.4 ; lon: -72.0 Profundidad: 2700 m
Constitución	lat: -35.3 ; lon: -75.0 Profundidad: 4077 m	lat: -35.3 ; lon: -72.6 Profundidad: 797 m
Saavedra	lat: -38.8 ; lon: -75.3 Profundidad: 3777 m	lat: -38.8 ; lon: -73.7 Profundidad: 2444 m

Tabla 3: Ubicación y parámetros lugares seleccionados nodos UV

Lugar	Costa
Antofagasta UV	lat: -23.6 ; lon: -70.4 Profundidad: 115.89 m
Coquimbo UV	lat: -29.9 ; lon: -71.3 Profundidad: 20 m
Valparaíso UV	lat: -32.9 ; lon: -71.6 Profundidad: 31.26 m
Pichilemu UV	lat: -34.4 ; lon: -72.0 Profundidad: 20 m
Constitución UV	lat: -35.3 ; lon: -72.5 Profundidad: 20 m
Saavedra UV	lat: -38.8 ; lon: -73.7 Profundidad: 20.13 m

5.2 Validación y Resultados Zonas Seleccionadas

En primer lugar, se realiza la comparación entre la serie de datos entregados por ERA5 y los nodos UV, con el fin de validar la posterior comparación entre ambas fuentes. Esto se realiza tanto para la altura como el periodo entregado.

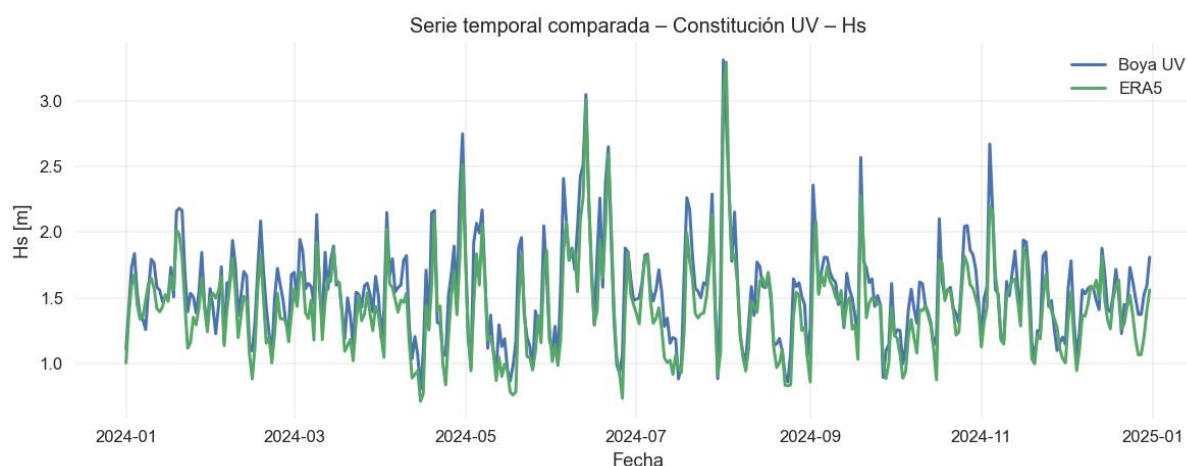


Figura 9: Comparación serie de altura significativa entre Nodos UV y ERA5 ejemplificado con Constitución.

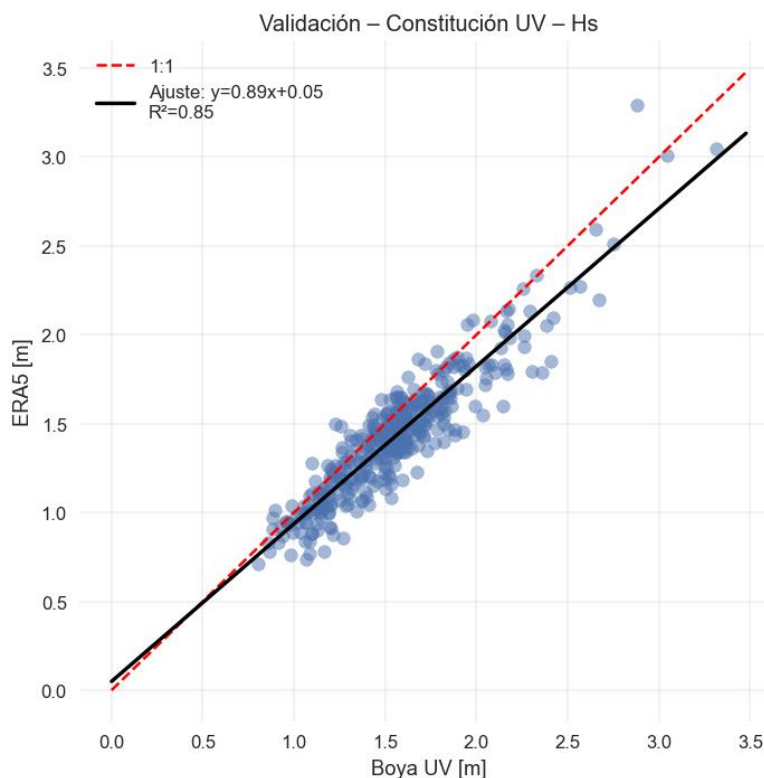


Figura 10: Validación numérica entre Nodos UV y ERA5 para Hs ejemplificado con Constitución.

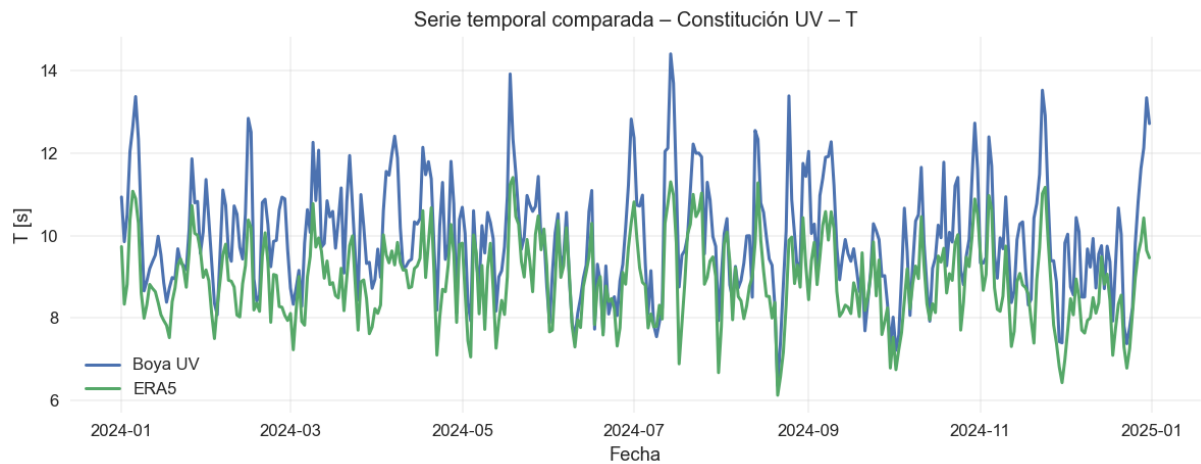


Figura 11: Comparación serie de periodo entre Nodos UV y ERA5 ejemplificado con Constitución.

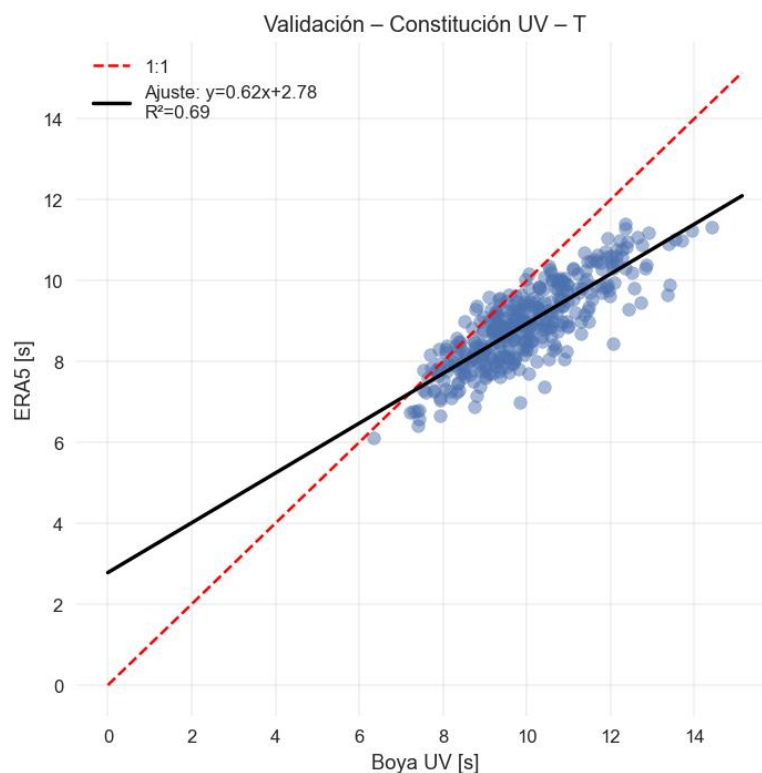


Figura 12: Validación numérica entre Nodos UV y ERA5 para periodo ejemplificado con Constitución.

La serie temporal permite comparar la evolución del oleaje en el tiempo entre los datos de los nodos UV y el ERA5. Cada curva representa la variación de la variable analizada a lo largo del periodo de tiempo a estudiar, evidenciando tanto la tendencia general como eventos puntuales.

Por otra parte, el grafico de dispersión permite comparar directamente los valores de la variable del oleaje obtenidos tanto por los nodos UV (en el eje x) como por ERA5 (eje y). Cada punto representa una observación simultánea en ambos conjuntos de datos. La línea roja corresponde a la relación “ideal”

de 1:1, donde ambos datos coinciden exactamente. La línea negra representa el ajuste lineal entre ambos conjuntos, evidenciando una tendencia general de la relación, permitiendo así evaluar el grado de concordancia.

Una vez realizada la validación de los datos, se procede a la comparación entre los puntos ubicados mar adentro y en la zona costera. Para ello, se calculan los parámetros necesarios para la estimación del potencial energético del oleaje en cada ubicación. A partir de estos resultados, se construyen gráficos que permiten visualizar y analizar las diferencias entre ambos casos, destacando particularmente la distribución del recurso energético. De esta manera, se obtiene una representación comparativa que facilita la interpretación de las variaciones entre condiciones mar adentro y en zonas costeras.

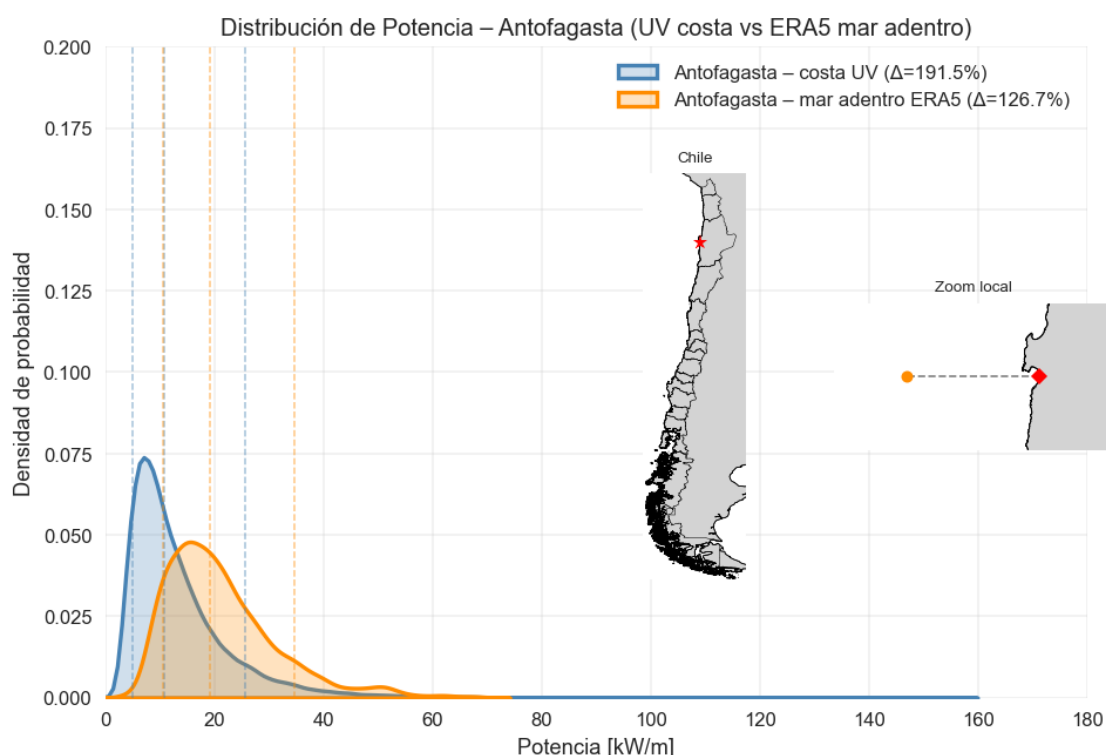


Figura 13: Distribución de potencia de energía ejemplificada para Antofagasta.

En el eje horizontal (x) se muestra el rango de valores de potencia, mientras que en el eje vertical (y) se presenta la densidad de probabilidad, la cual indica qué tan frecuentemente ocurren los valores dentro del rango observado. Ambas curvas, una para la costa (azul) y otra para mar adentro (naranja), muestran la forma de la distribución estadística de la potencia en cada sitio. Las áreas coloreadas bajo cada curva corresponden a la estimación de densidad. En cada distribución se incluyen tres líneas verticales punteadas, que representan los percentiles 10, 50 y 90 de la potencia para cada punto representada por el color de la curva. En la leyenda se indica también el $\Delta\%$, que corresponde al rango relativo de potencia. Además, se presenta un esquema de la zona costera chilena para tener una mejor interpretación de la zona que se está estudiando.

5.3 Resultados de Fuerza y Parámetros Comparativos

En el último subobjetivo, correspondiente al cálculo de las fuerzas, se obtienen resultados que son representados mediante el mismo tipo de gráfico utilizados para el potencial energético. Esto permite mantener un criterio visual uniforme y facilita la comparación directa entre ambas variables.

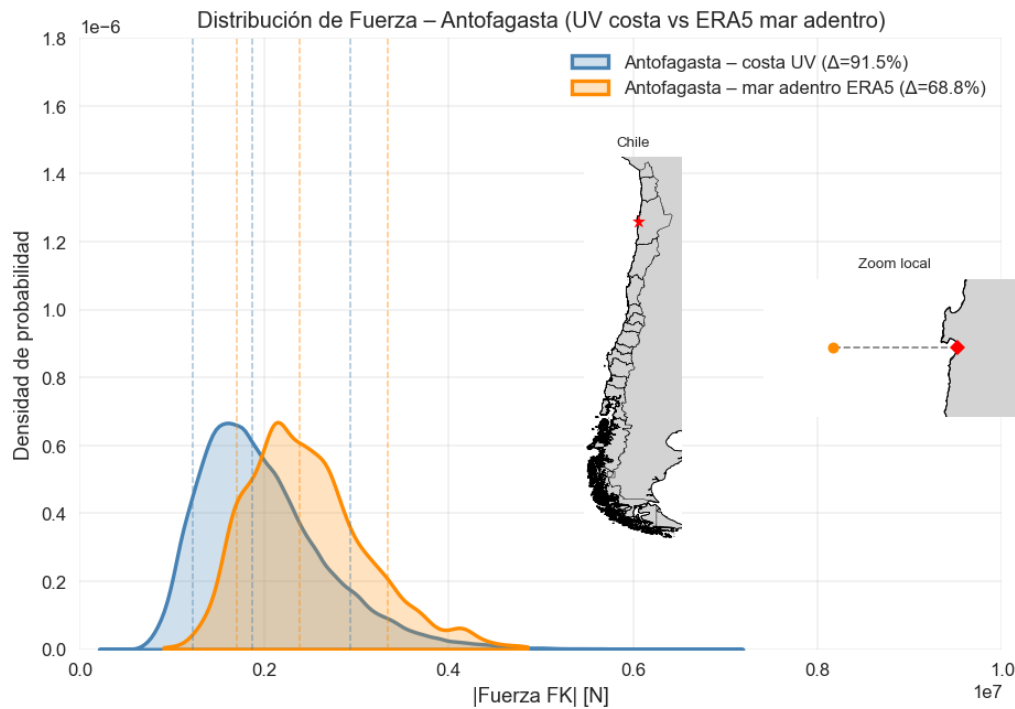


Figura 14: Distribución de Fuerza ejemplificada para Antofagasta.

Con la fuerza calculada para las seis zonas, tanto mar adentro como costa, se generan los siguientes resultados correspondientes a los cinco parámetros que se compararán para ver la factibilidad de la recaudación energética.

5.3.1 Conservación Energética

Se genera un gráfico de barras comparativo con el objetivo de evidenciar la variación del potencial energético entre los puntos mar adentro y en la zona costera, permitiendo identificar si existe una reducción o aumento del recurso, para así también cuantificar su porcentaje de cambio. Para asegurar una comparación representativa de las condiciones más habituales, el análisis se realiza en base al percentil 50, el cual corresponde al valor típico o de mayor recurrencia del sistema.

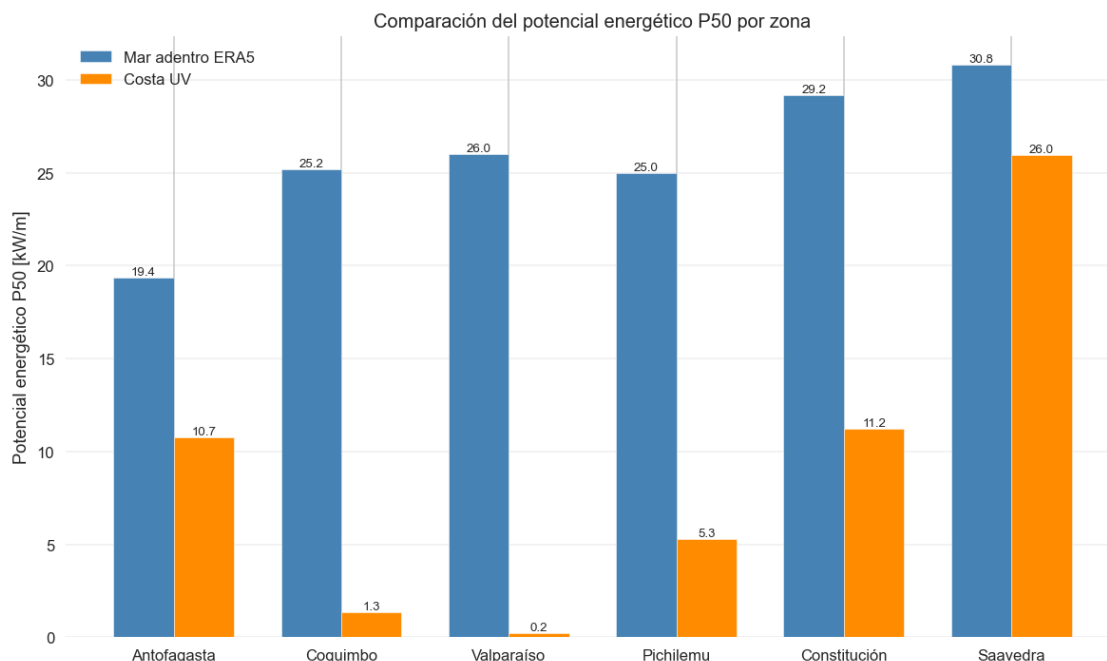


Figura 15: Comparación del potencial energético entre costa y mar adentro.

Se evidencian dos barras por cada zona de estudio, la barra azul representa las condiciones mar adentro obtenidas a partir de los datos ERA5, mientras que la barra naranja corresponde a las condiciones en la zona costera, derivadas de los nodos UV. Al procesar estos resultados se genera la tabla resumen que cuantifica los porcentajes de variación. Dado que en ningún caso se observa aumento de energía hacia la costa, se representará el porcentaje como pérdida de energía.

Tabla 4: Valores resumen de pérdida de energía.

Zona	Perdida Energética %
Antofagasta	43.773
Coquimbo	94.728
Valparaíso	99.155
Pichilemu	81.014
Constitución	61.729
Saavedra	16.836

5.3.2 Reducción de Fuerza

Se sigue la misma lógica que con los gráficos de conservación de energía, pero esta vez para la fuerza, logrando evidenciar lo siguiente.

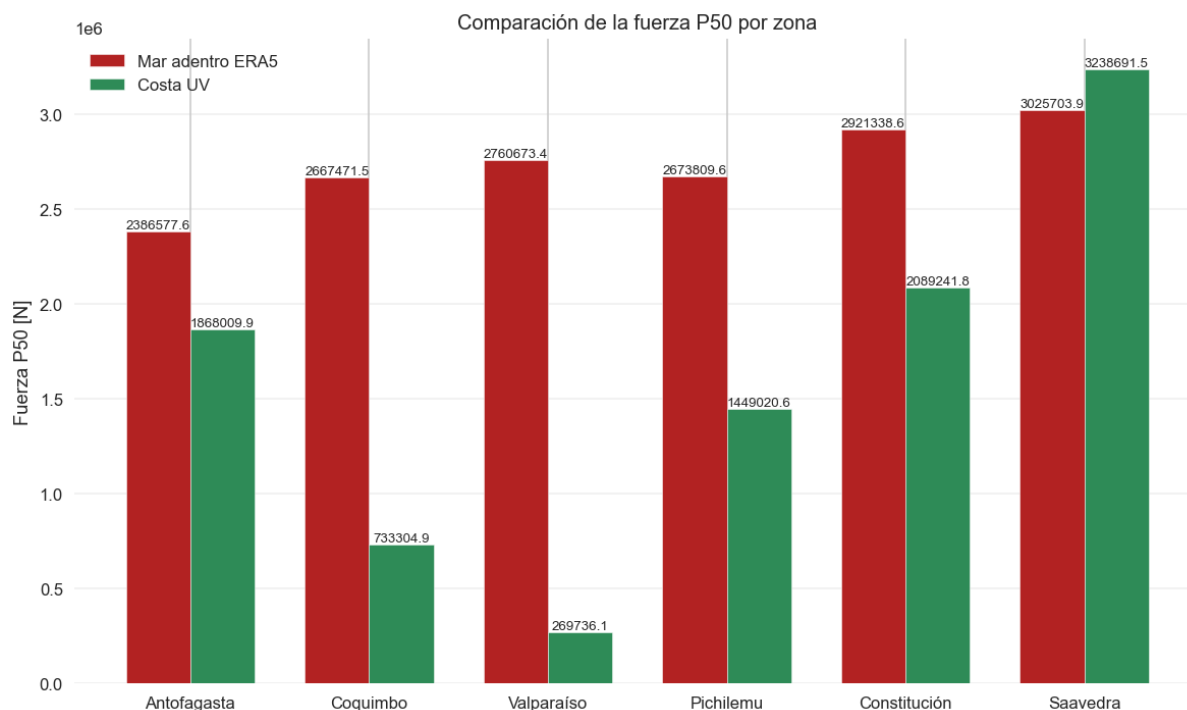


Figura 16: Comparación de la fuerza entre costa y mar adentro.

En este caso, la barra de color rojo representa las condiciones mar adentro, mientras que la barra de color verde representa a la zona costera. A partir de estos resultados, se calcula el porcentaje de variación de la fuerza entre ambas ubicaciones, observándose casos en los que disminuye hacia la costa y otros en los que aumenta. Dado que el objetivo de este parámetro es el análisis de la reducción de las cargas estructurales en la zona costera, la variación se expresará de manera que los aumentos de fuerza hacia la costa se representen con el signo negativo (-), facilitando así la interpretación del comportamiento desde el punto de vista de factibilidad.

Tabla 5: Valores resumen reducción de fuerza.

Zona	Reducción de fuerza %
Antofagasta	21.72
Coquimbo	72.50
Valparaíso	90.22
Pichilemu	48.49
Constitución	28.48
Saavedra	-7.03

5.3.3 Relación Entre Variación de Fuerza y Energía (Trade-Off)

El “trade-off” corresponde al balance entre la pérdida de energía del oleaje y la reducción de fuerzas hacia la costa, permitiendo identificar las zonas donde este compromiso resulta más favorable para la factibilidad de aprovechamiento energético. En este caso se representa mediante un gráfico de dispersión, donde cada cuadrante representa un escenario que relaciona energía con fuerza.

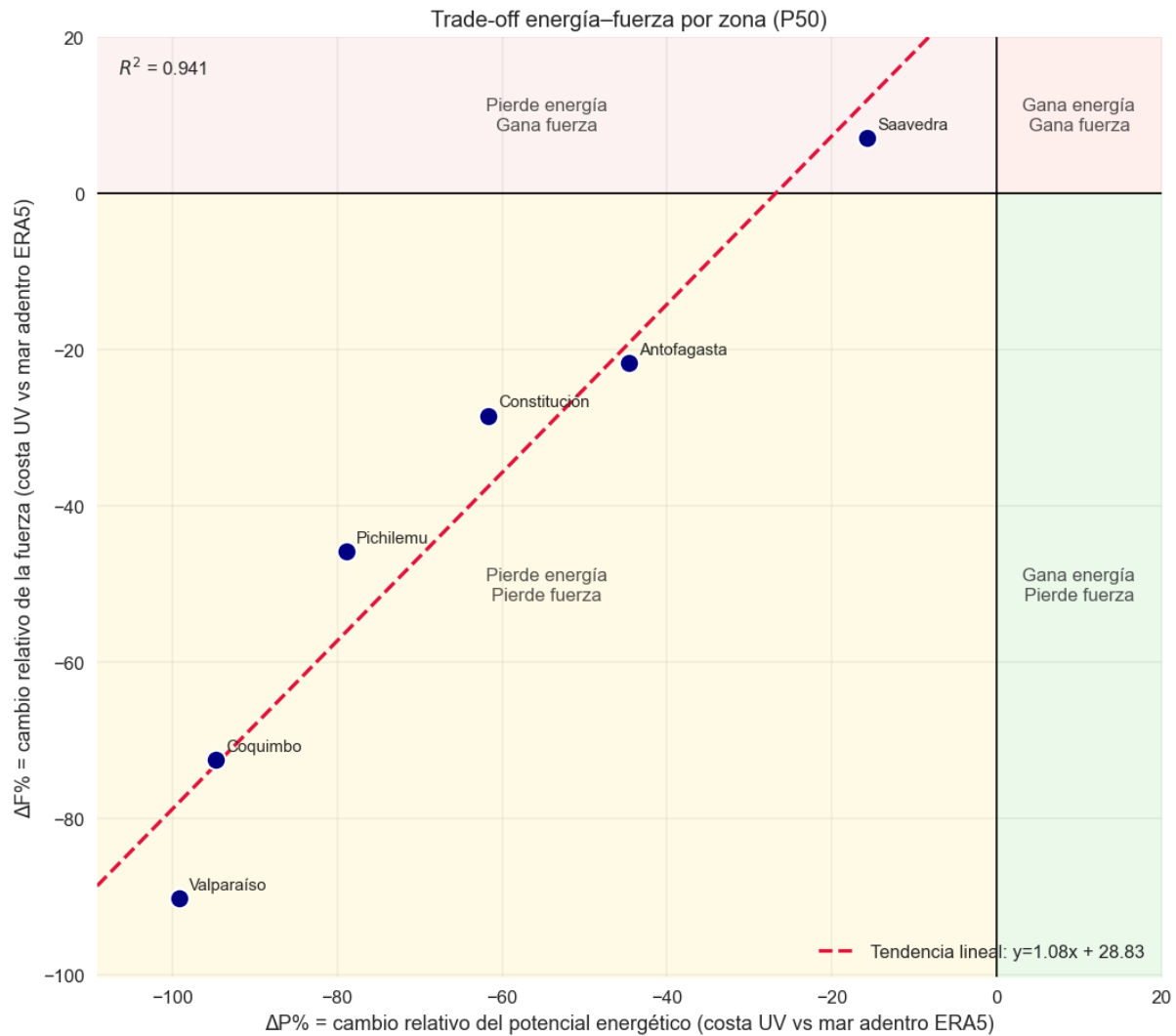


Figura 17: Comparación de la fuerza entre costa y mar adentro.

En el gráfico, el eje horizontal representa el cambio relativo del potencial energético, mientras que el eje vertical corresponde al cambio relativo de la fuerza. Cada punto representa una zona de estudio. Los cuadrantes se encuentran diferenciados mediante colores, donde el color verde indica los escenarios mas favorables desde el punto de vista del trade-off, es decir, aquellos en los que se logra una reducción de fuerza con menor perdida de energía. Por otro lado, el color rojo oscuro representa los escenarios menos favorables, donde se combinan pérdidas energéticas con incrementos en las cargas estructurales.

El valor del trade-off se calcula como la diferencia entre la variación relativa del potencial energético y la variación relativa de la fuerza, permitiendo evaluar en una sola magnitud el compromiso entre ambas variables. Valores positivos indican condiciones favorables, donde la reducción de fuerza compensa la pérdida de energía, mientras que valores negativos representan escenarios menos convenientes desde el punto de vista de la factibilidad.

Tabla 6: Valores resumen Trade-off.

Zona	Trade-off
Antofagasta	0.496
Coquimbo	0.765
Valparaíso	0.910
Pichilemu	0.599
Constitución	0.461
Saavedra	-0.418

5.3.4 Estabilidad Energética

La estabilidad del recurso energético se cuantifica mediante un índice de inestabilidad definido como la diferencia entre los percentiles 90 y 10, normalizado por el percentil 50. Este indicador permite evaluar la variabilidad relativa del potencial energético, donde valores bajos representan un comportamiento más estable y valores altos una mayor fluctuación del recurso.

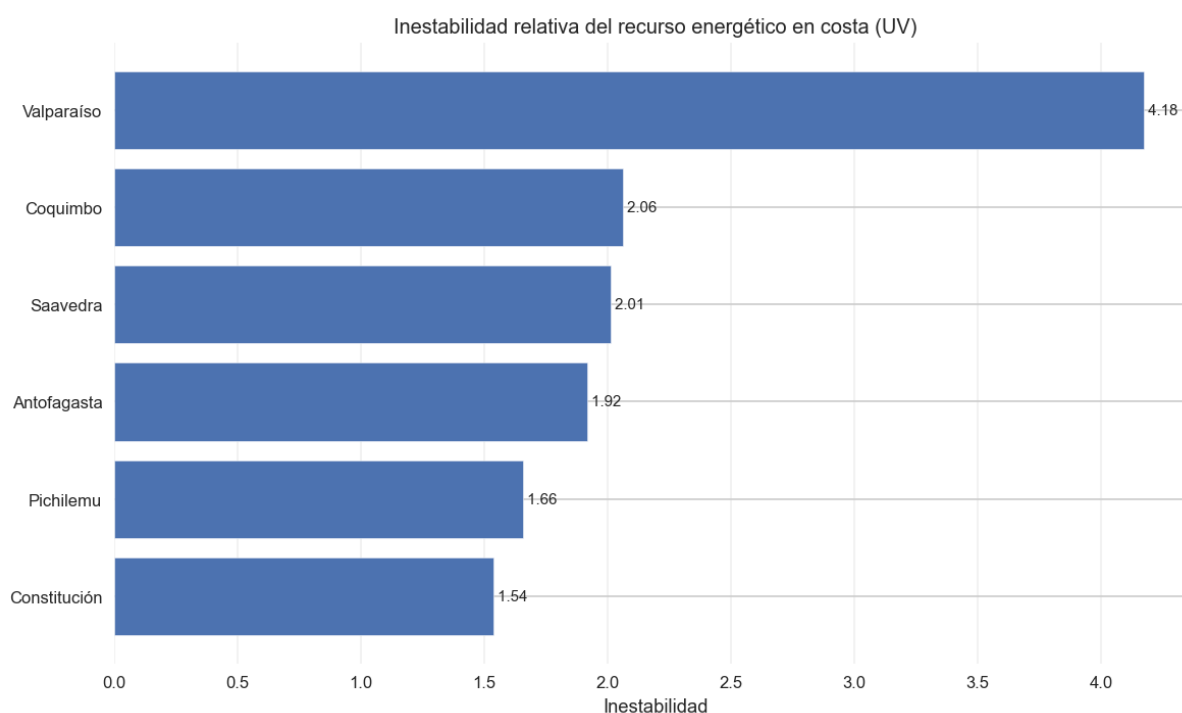


Figura 18: Índice de inestabilidad del potencial energético para la costa.

Como se está evaluando factibilidad en las zonas protegidas, se considera solo este índice para el comportamiento de la boya en los puntos costeros de las zonas seleccionadas.

Tabla 7: Valores de índice de inestabilidad.

Zona	Índice Inestabilidad
Antofagasta	1.915
Coquimbo	2.062
Valparaíso	4.175
Pichilemu	1.657
Constitución	1.536
Saavedra	2.011

5.3.5 Extremos

Las fuerzas extremas se analizan a partir de un umbral definido como el percentil 95 de la fuerza calculado sobre el conjunto total de datos, es decir, considerando todas las localidades en estudio, lo que permite establecer un criterio común de comparación entre zonas. En función de este umbral, se evalúa la probabilidad de excedencia en cada caso, integrando así la magnitud y la frecuencia de ocurrencia de las cargas extremas.

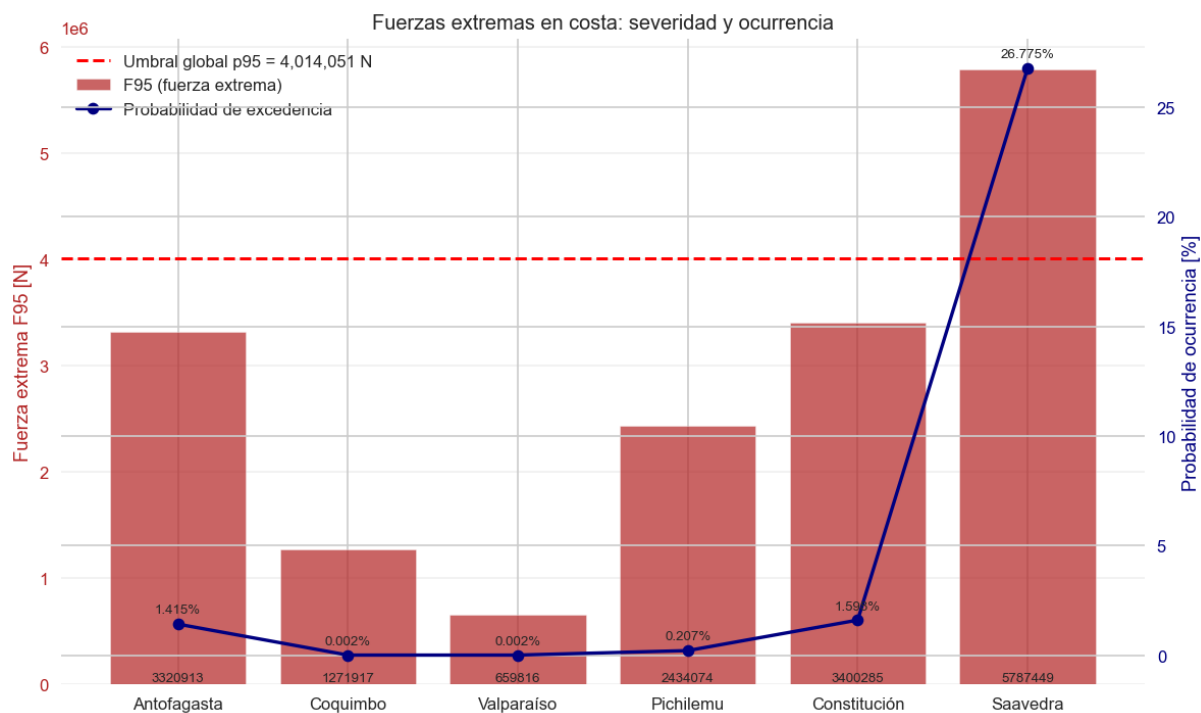


Figura 19: Fuerzas extremas y probabilidad de ocurrencia.

En el gráfico se presentan las barras rojas correspondientes a los valores de las fuerzas P95 calculados para cada zona de manera individual, los cuales representan la magnitud de los eventos extremos característicos en cada sector. Asimismo, se incluye una línea roja punteada que indica el valor de la fuerza P95 obtenida a partir del conjunto completo de datos, funcionando como referencia global para la comparación entre zonas. Complementariamente, la línea azul representa la probabilidad de excedencia asociada a este umbral global, permitiendo evaluar frecuencia con la cual dicho nivel extremo es superado en cada zona.

Tabla 8: Valores Probabilidad de extremos.

Zona	Probabilidad de extremos %
Antofagasta	1.415
Coquimbo	0.002
Valparaíso	0.002
Pichilemu	0.207
Constitución	1.959
Saavedra	26.775

5.4 Presentación Resultado Final

Una vez impresos todos los resultados, se procede a normalizar los resultados en una escala de 1 a 6, con el fin de generar calificaciones con 6 la mejor calificación y 1 la peor calificación.

Tabla 9: Resultados de los parámetros comparativos a utilizar en grafico radar normalizados de 1 a 6.

Zonas	Conservación energética	Reducción de fuerza	Trade-off	Estabilidad	Extremos
Antofagasta	4.36	2.48	4.44	5.28	3.39
Coquimbo	1.27	5.09	5.46	5.00	5.37
Valparaíso	1.00	6.00	6.00	1.00	6.00
Pichilemu	2.10	3.85	4.83	5.77	4.26
Constitución	3.27	2.83	4.31	6.00	3.28
Saavedra	6.00	1.00	1.00	5.10	1.00

Esto con el fin de evidenciar mejor la comparativa, así logrando generar gráficos radar para cada zona. Además, se genera un grafico general que presenta todas las zonas para mejorar la comprensión en las diferentes características, con cada lugar diferenciado por color.

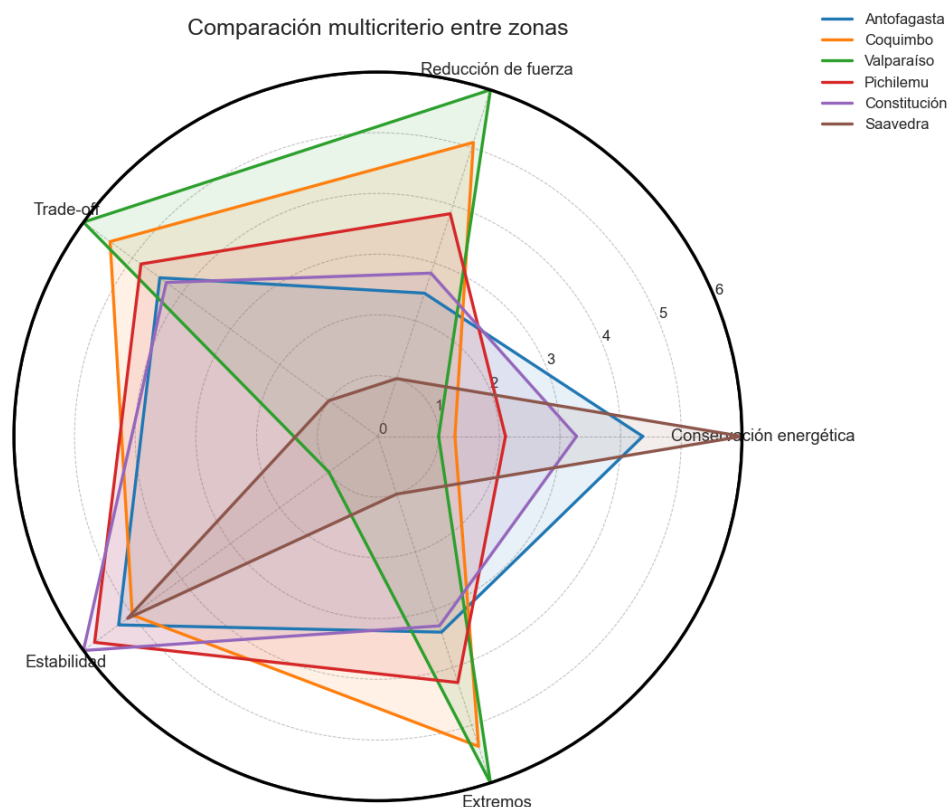


Figura 20: Grafico de radar final, con los parámetros establecidos para cada zona.

6 Análisis y Discusión

Dentro de los primeros resultados, las variaciones observadas entre regiones son consistentes con la climatología de oleaje del país, donde las zonas más energéticas se sitúan entre la zona centro-sur y sur de Chile, mientras que las regiones del norte muestran menor energía, pero con un comportamiento más estable y menos variable. Asimismo, se evidencia una disminución considerable en magnitud de oleaje en las cercanías del archipiélago de Chiloé, donde se registran valores más bajos del dominio analizado. Este comportamiento refleja la influencia de la configuración geográfica y los efectos de abrigo generados por la presencia de islas, los cuales atenúan significativamente la energía del oleaje.

Con respecto a la validación de los datos, se observa que, si bien existen diferencias en la magnitud de la altura significativa del oleaje y periodos, ambas señales presentan una evolución temporal similar. En particular, se evidencia una correspondencia en la ocurrencia de eventos, donde los máximos y mínimos se presentan en instantes coincidentes, indicando que ambos conjuntos de datos se capturan de manera consistente.

Las zonas que cumplen de mejor manera con los datos corresponden a Antofagasta, Pichilemu, Constitución y Saavedra, manteniendo el mismo comportamiento y variando levemente las magnitudes, tanto para altura como periodo, por lo que las similitudes se mantienen para el potencial energético. Por otra parte, Valparaíso y Coquimbo son los que más difieren en magnitudes, pero de todas formas mantienen su tendencia. Estas diferencias observadas responden principalmente a la naturaleza de cada fuente de datos. Mientras ERA5 representa condiciones de oleaje en mar abierto con resolución espacial más gruesa, los nodos entregados por UV corresponden a resultados de modelaciones calibradas con datos in situ, lo que permite incorporar efectos locales como refracción, difracción y procesos de disipación asociados a la cercanía de costa, es por eso que en estas últimas dos ciudades, al ser portuarias, se refleja de mejor manera como interviene la geometría de la costa para la atenuación del oleaje.

Al analizar los gráficos de densidad del potencial energético, se aprecia que las distribuciones correspondientes a mar adentro se encuentran desplazadas hacia valores significativamente mayores de energía, con curvas más extendidas y colas largas, lo que indica una mayor disponibilidad energética y la presencia de eventos de alta energía. Este comportamiento es especialmente evidente en zonas como Coquimbo, Valparaíso y Constitución, donde el potencial energético en mar abierto alcanza valores considerablemente más altos y presenta una mayor dispersión. Siguiendo la misma línea, en la zona costera se observa una fuerte concentración de los valores en rangos bajos de energía, con distribuciones más estrechas y desplazadas hacia la izquierda. Nuevamente este patrón se marca en Valparaíso y Coquimbo, lo que sugiere una fuerte influencia de efectos locales como abrigo costero o portuario como se menciona anteriormente.

En contraste, en zonas como Pichilemu, Constitución y Saavedra, si bien se mantiene la tendencia general de reducción de energía hacia la costa, la diferencia entre ambas son menos pronunciadas. Se pueden observar una mayor superposición entre las curvas de costa y mar adentro, lo que indica que el oleaje conserva una mayor parte de su energía al aproximarse a la costa.

Cuando se comparan las fuerzas, los resultados evidencian que la fuerza tiende a disminuir hacia la costa en la mayoría de las zonas analizadas, en concordancia a la atenuación del oleaje. Sin embargo, esta reducción no es uniforme, observándose diferencias significativas entre localidades. Mientras que en sectores como Valparaíso y Coquimbo la disminución de las cargas es considerable, en zonas como Saavedra las fuerzas se mantienen o incluso aumentan en la costa, reflejando una mayor exposición al oleaje y la influencia de efectos locales. Adicionalmente, las diferencias observadas entre zonas pueden interpretarse a la luz de la profundidad local de los nodos UV. La batimetría condiciona la transformación del oleaje en sectores costeros, ya que en aguas más someras aumenta la interacción con el fondo y se intensifican procesos como refracción, disipación y rompimiento de oleaje.

Haciendo el análisis de factibilidad final, tomando en consideración los parámetros que se evalúan y analizando zona por zona, se puede apreciar que Antofagasta presenta un comportamiento bastante equilibrado en términos de factibilidad. Como en la mayoría de los casos, existe una pérdida de energía hacia la costa, sin embargo, no es tan severa en comparación a otras zonas, lo que refleja un valor relativamente alto de conservación comparado a sus contrapartes. En cuanto a fuerza, se observa una reducción moderada, lo cual es favorable desde el punto de vista estructural. En el trade-off se ubica en un cuadrante esperado, con pérdida tanto de energía como de fuerza, obteniendo un compromiso razonable entre ambos factores. Además, presenta una buena estabilidad de recurso con niveles de extremos controlados, sin eventos severos ni frecuentes.

Por otro lado, Coquimbo evidencia una de las mayores pérdidas de energía hacia la costa, sin embargo, esta disminución viene acompañada de una importante reducción de la fuerza, lo que es positivo en el ámbito estructural. El trade-off es alto, lo que indica que, a pesar de perder energía, la reducción de fuerza compensa ese efecto. El bajo nivel de extremos es otro punto para destacar para Coquimbo, lo que sugiere condiciones operacionales seguras para la estructura.

Siguiendo con Valparaíso, esta zona presenta la mayor pérdida de energía hacia la costa, con valores prácticamente nulos en el nodo UV comparado con mar adentro. Esto se traduce en una reducción significativa de la fuerza, siendo el que se lleva mejor puntuación en este punto. Su trade-off es alto, debido a lo mencionado anteriormente. El gran problema, aparte de la baja energía, es la alta inestabilidad para sus valores extremos, aunque este presente peaks extremos muy bajos, estos eventos son hasta cuatro veces mas grande que su valor medio de fuerza.

Pichilemu, por otra parte, presenta un comportamiento intermedio. Existe una pérdida de energía moderada, acompañada de una reducción leve de fuerza, la cual no representa una ventaja tan marcada. El trade-off es medio, indicando un equilibrio parcial entre reducción de energía y de fuerza. Por último, Pichilemu destaca por su alta estabilidad del recurso, lo que es favorable para una operación continua y segura, además de tener niveles extremos relativamente bajos en comparación a sus contrapartes.

En el caso de Constitución, este presenta uno de los mas equilibrados en promedio general. A pesar de que la pérdida de energía no es extrema, se observa que la disminución de fuerza también es baja, manteniendo valores altos en la costa. Esto refleja uno de los peores desempeños en reducción de fuerza y trade-off, aun así bien cerca de los demás. Sumado a esto, presenta valores de fuerzas extremas y mayor probabilidad de excedencia que no lo destacan frente al resto, siendo el segundo peor evaluado en esta categoría. Por otra parte, Constitución tiene la mejor puntuación en estabilidad y tercera mejor puntuación en conservación de energía, lo que lo deja como un lugar bastante neutral en factibilidad.

Por último, Saavedra, tiene el peor desempeño de todos, siendo la única zona donde la fuerza aumenta hacia la costa, tal vez porque es el nodo UV que se encuentra mas alejado de la costa. Sin embargo, esto también refleja el por qué es el mejor evaluado en conservación de energía. Su trade-off es el peor de todos, siendo el único que se encuentra en el cuadrante que pierde energía y gana fuerza. Para finalizar, Saavedra contiene niveles altos de extremos y de excedencia, nuevamente ubicándolo como el peor evaluado.

7 Conclusión

En esta sección se presentan las principales conclusiones obtenidas a partir del análisis desarrollado:

- Los resultados evidencian que los comportamientos del oleaje, tanto en su distribución espacial (zona norte, centro y sur) como en la comparación entre mar adentro y costa, son consistentes con lo esperado teóricamente. Se observa una mayor concentración energética en mar adentro, especialmente en la zona centro-sur del país, donde el recurso undimotriz es más intenso.
- En términos solamente de conservación energética, la zona de Saavedra destaca como la más favorable, al presentar la menor pérdida de potencial energético desde mar adentro hacia la costa. Esto la posiciona como la mejor alternativa cuando el objetivo principal es maximizar la disponibilidad del recurso.
- Si se prioriza la supervivencia estructural, la zona de Valparaíso presenta el mejor desempeño, evidenciando una disminución significativa de las fuerzas hidrodinámicas hacia la costa. Este comportamiento se asocia principalmente a la presencia de bahías y estructuras portuarias que atenúan el oleaje incidente.
- No obstante, a pesar de que Valparaíso presenta altos puntajes en varios de los parámetros evaluados, no constituye una zona idónea para la instalación de dispositivos OWC, debido a que el potencial energético disponible en la costa es extremadamente bajo, lo que limita su viabilidad energética. Esto mismo ocurre con Coquimbo, que debido a su baja energía en la costa se descarta su factibilidad.
- Pichilemu también es descartado del todo, aunque presenta buena energía en la costa, esta zona es demasiado hostil para la estructura OWC. Las altas fuerzas y probabilidades de extremos hacen que el mantenimiento y cuidado de los instrumentos sean demasiados altos y costosos.
- Considerando el análisis conjunto de todos los parámetros, la zona de Antofagasta se posiciona como la alternativa más favorable para la recaudación de energía undimotriz debido a su desempeño promedio en todas las evaluaciones. Si bien Antofagasta presenta el segundo peor desempeño en reducción de fuerza, este efecto se ve compensado por su alta conservación energética, buena estabilidad y niveles de extremos controlados, favoreciendo tanto la eficiencia como la integridad estructural.
- La zona de Constitución destaca como la alternativa más equilibrada, mostrando un buen compromiso entre disponibilidad energética, reducción de fuerzas y estabilidad del recurso, lo que la convierte en una opción robusta para una implementación conservadora.
- La opción de Pichilemu también se ve factible, especialmente en el ámbito estructural, aunque su nivel energético es menor a Constitución y Antofagasta, Pichilemu es mejor evaluado en general en las otras características.
- La presencia de puertos y bahías influye directamente en la atenuación del oleaje y, por ende, en la reducción de las fuerzas hidrodinámicas. Esto se evidencia claramente en zonas como Coquimbo y Valparaíso, donde, si bien las cargas disminuyen considerablemente, el potencial energético también se reduce de forma significativa, limitando su aprovechamiento.
- Se genera un factor común, que el comportamiento de reducción de energía y fuerza (trade-off) hacia la costa tiene un comportamiento lineal, por lo que se refleja una dependencia explícita en los resultados del estudio y entre estos dos cálculos.

- Como proyección de este estudio, se recomienda que futuras investigaciones incorporen fuerzas adicionales no consideradas en el análisis actual, particularmente aquellas asociadas a corrientes y viento. La inclusión de estos factores permitiría una evaluación más completa y realista del comportamiento del sistema.
- Asimismo, se sugiere analizar la influencia de parámetros geométricos del dispositivo, tales como diámetro, calado y forma, ya que variaciones en estos pueden modificar significativamente la respuesta hidrodinámica y, por ende, la factibilidad de implementación.

8 Bibliografía

- Cao, Y., Wang, K., Xi, C., & Wang, F. (2024). Hydrodynamic performance characteristics of small-scale in-situ buoys with critical motion requirements. *Ocean Engineering*, 313, 119420. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2024.119420>
- Correia da Fonseca, F. X., Gomes, R. P. F., Henriques, J. C. C., Gato, L. M. C., & Falcão, A. F. O. (2016). Model testing of an oscillating water column spar-buoy wave energy converter isolated and in array: Motions and mooring forces. *Energy*, 112, 1207–1218. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.07.007>
- Cruz, J., Thomson, D., & Stavroulia, E. (2009). *PRELIMINARY SITE SELECTION-CHILEAN MARINE ENERGY RESOURCES*. www.garradhassan.com
- Cuadra, L., Salcedo-Sanz, S., Nieto-Borge, J. C., Alexandre, E., & Rodríguez, G. (2016). Computational intelligence in wave energy: Comprehensive review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1223–1246. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.253>
- Falnes, J. (2007). A review of wave-energy extraction. In *Marine Structures* (Vol. 20, Number 4). <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2007.09.001>
- Iglesias, G., & Carballo, R. (2010). Wave energy resource in the Estaca de Bares area (Spain). *Renewable Energy*, 35(7). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.10.019>
- Lineal, O. T. (n.d.). *ETSECCPB. Teoría Lineal de Oleaje*.
- López, I., Andreu, J., Ceballos, S., Martínez De Alegría, I., & Kortabarria, I. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 27). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.009>
- Lucero, F., Catalán, P. A., Ossandón, Á., Beyá, J., Puelma, A., & Zamorano, L. (2017). Wave energy assessment in the central-south coast of Chile. *Renewable Energy*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.076>
- Massel, S. R. (1996). *Ocean surface waves : their physics and prediction : Massel, Stanislaw R : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive*. <https://archive.org/details/oceansurfacewave0000mass/mode/2up>
- Mediavilla, D. G., & Sepúlveda, H. H. (2016). Nearshore assessment of wave energy resources in central Chile (2009-2010). *Renewable Energy*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.066>
- Morales Gamboa, E., Winckler Grez, P., & Herrera Araya, M. (2019). *Costas de Chile. Medio natural, Cambio climático, Ingeniería oceánica, Gestión costera*.
- Ocean Resource Limited. (2009). *Sea commander power buoy*. Introducing the Sea Commander Power Buoy an Advanced Offshore Power Solution. <http://buoysolutions.com/index.php>
- Shoa. (2023). *SERVICIO HIDROGRÁFICO Y OCEANOGRÁFICO DE LA ARMADA DE CHILE a EDICIÓN • 202 SHOA INSTRUCCIONES GRÁFICAS N° Especificaciones técnicas y administrativas para ÚLTIMA ACTUALIZACIÓN: Agosto de 2024*. <http://www.shoa.cl>

9 Anexos

9.1 Datos por Mes para P10, P50, P90

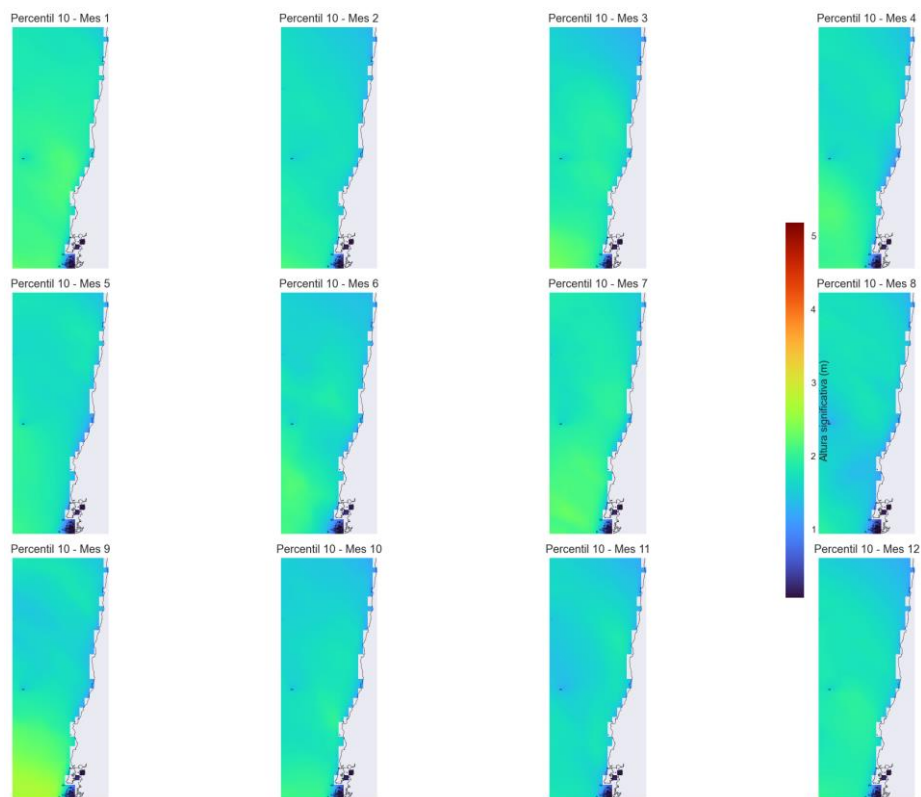


Figura 21: Mapas por mes de altura significativa P10.

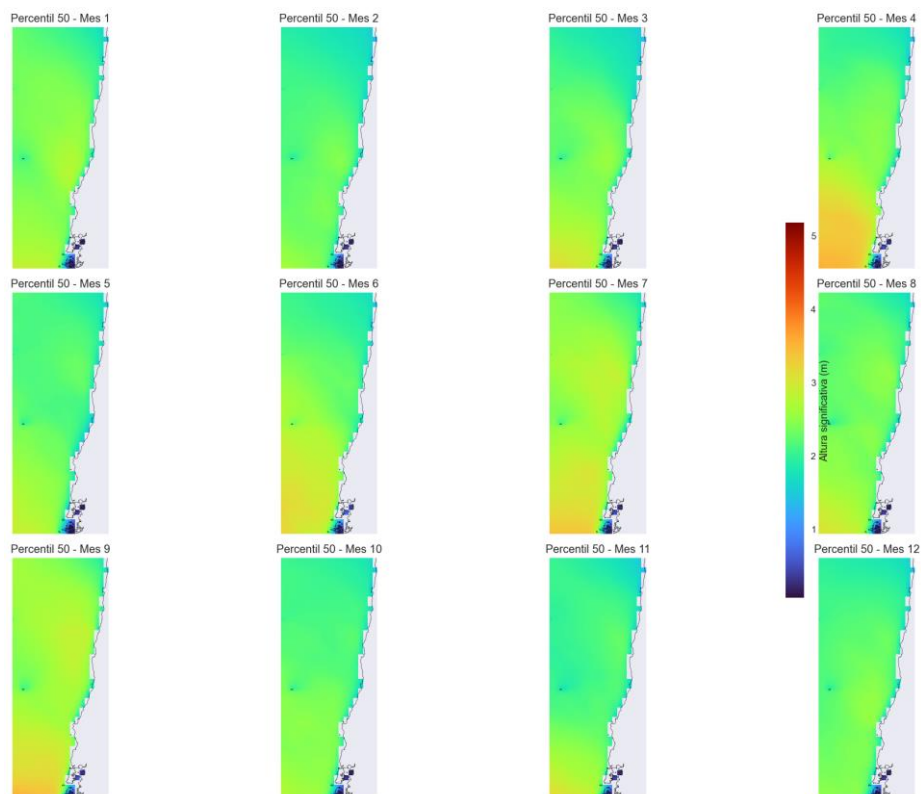


Figura 22: Mapas por mes de altura significativa P50.

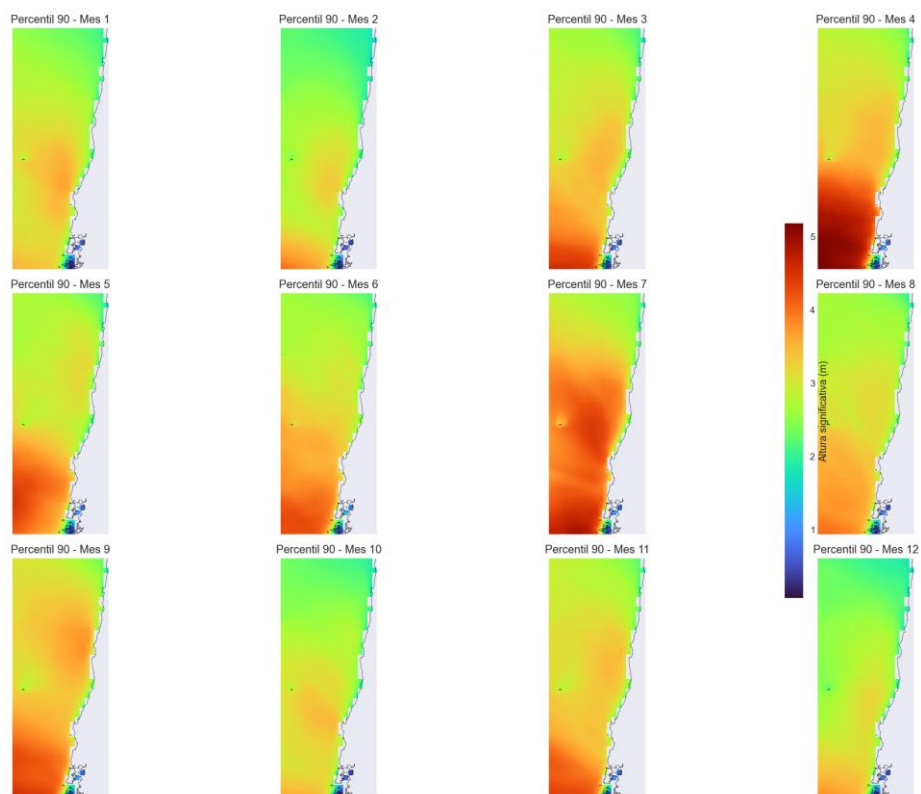


Figura 23: Mapas por mes de altura significativa P90.

9.2 Validación de Datos

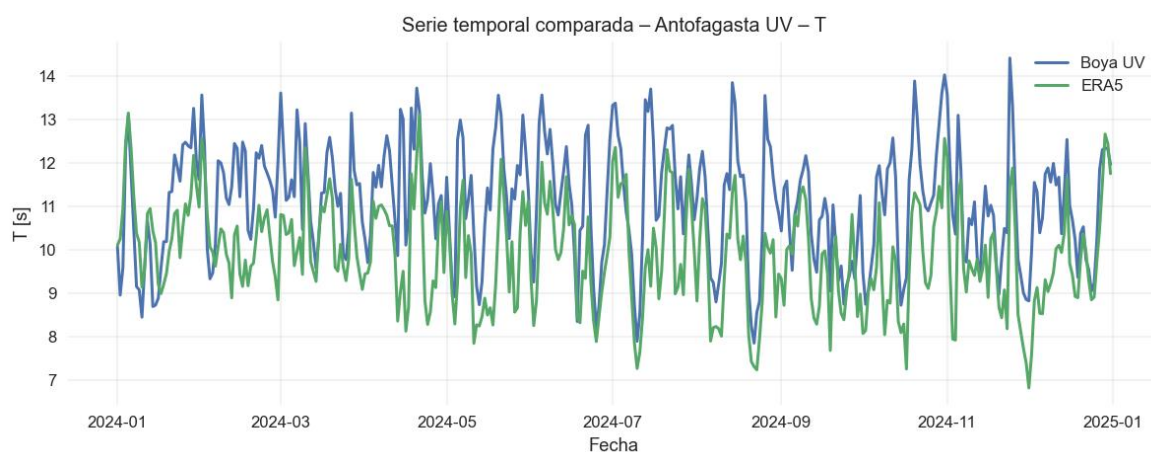
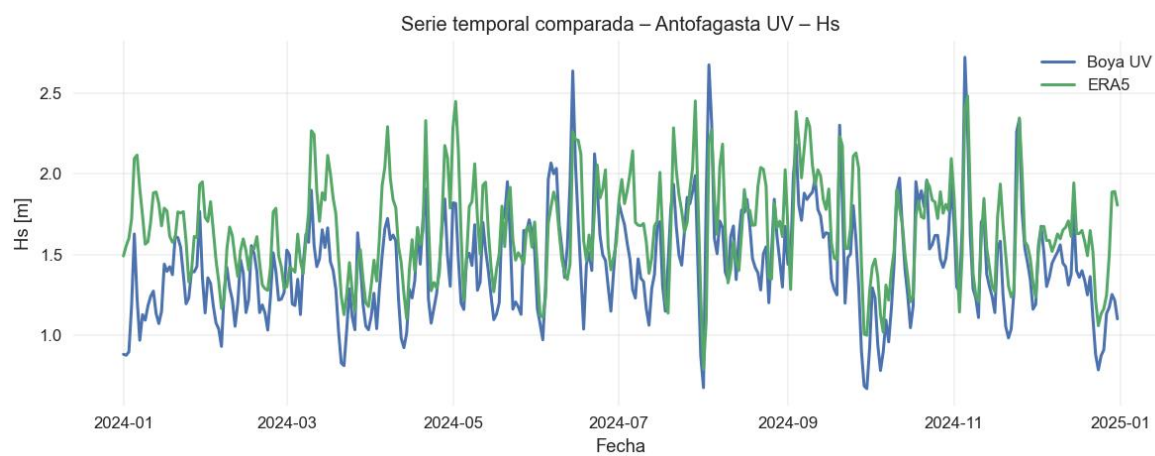
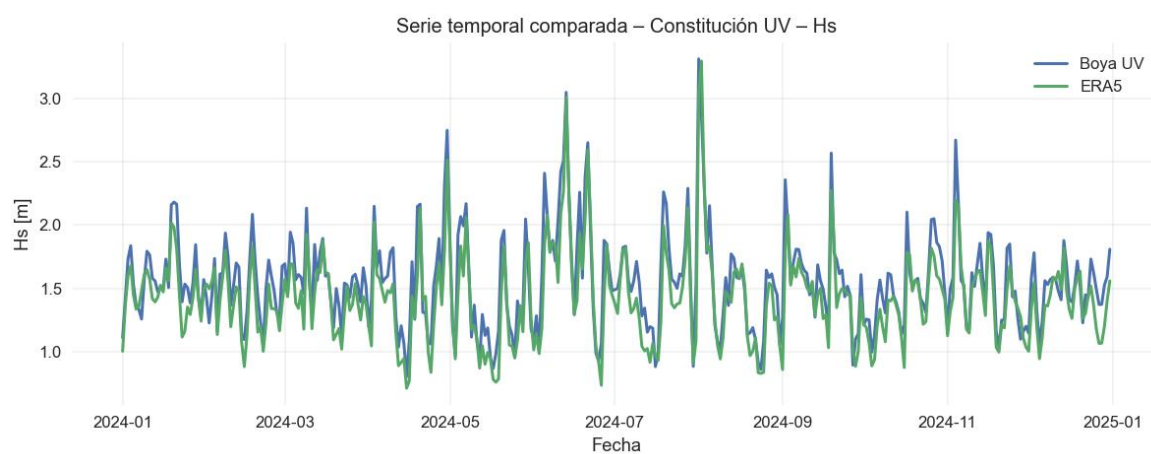


Figura 24: Series temporales de Hs y T para ERA5 y nodos UV, Antofagasta.



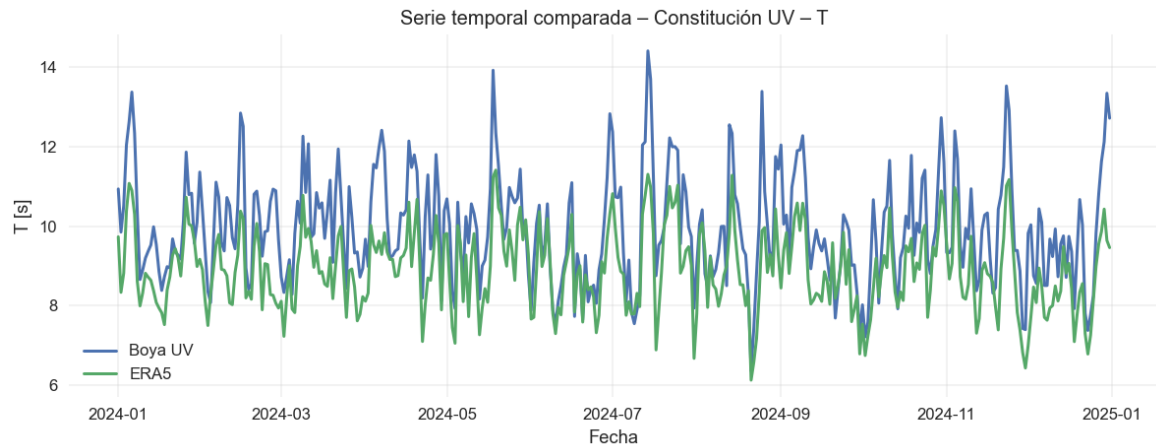


Figura 25: Series temporales de Hs y T para ERA5 y nodos UV, Constitución.

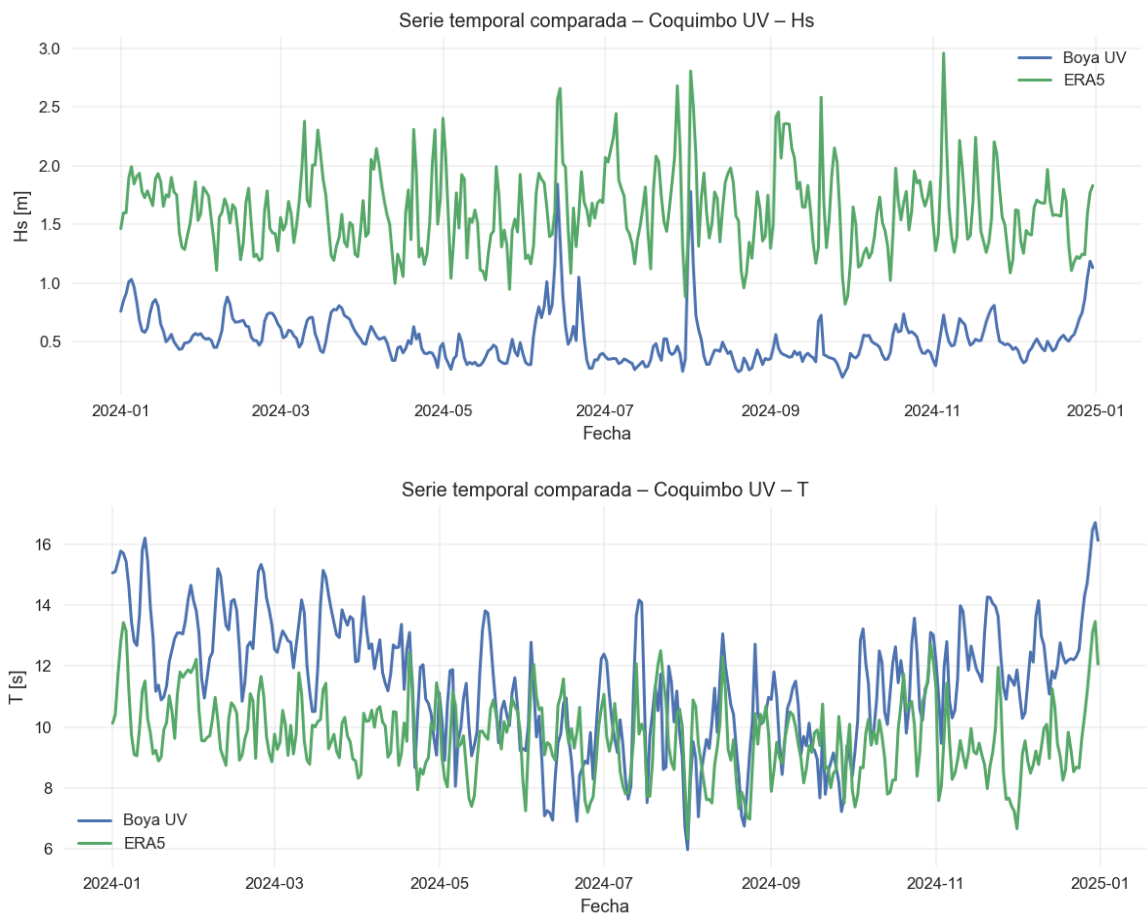


Figura 26: Series temporales de Hs y T para ERA5 y nodos UV, Coquimbo.

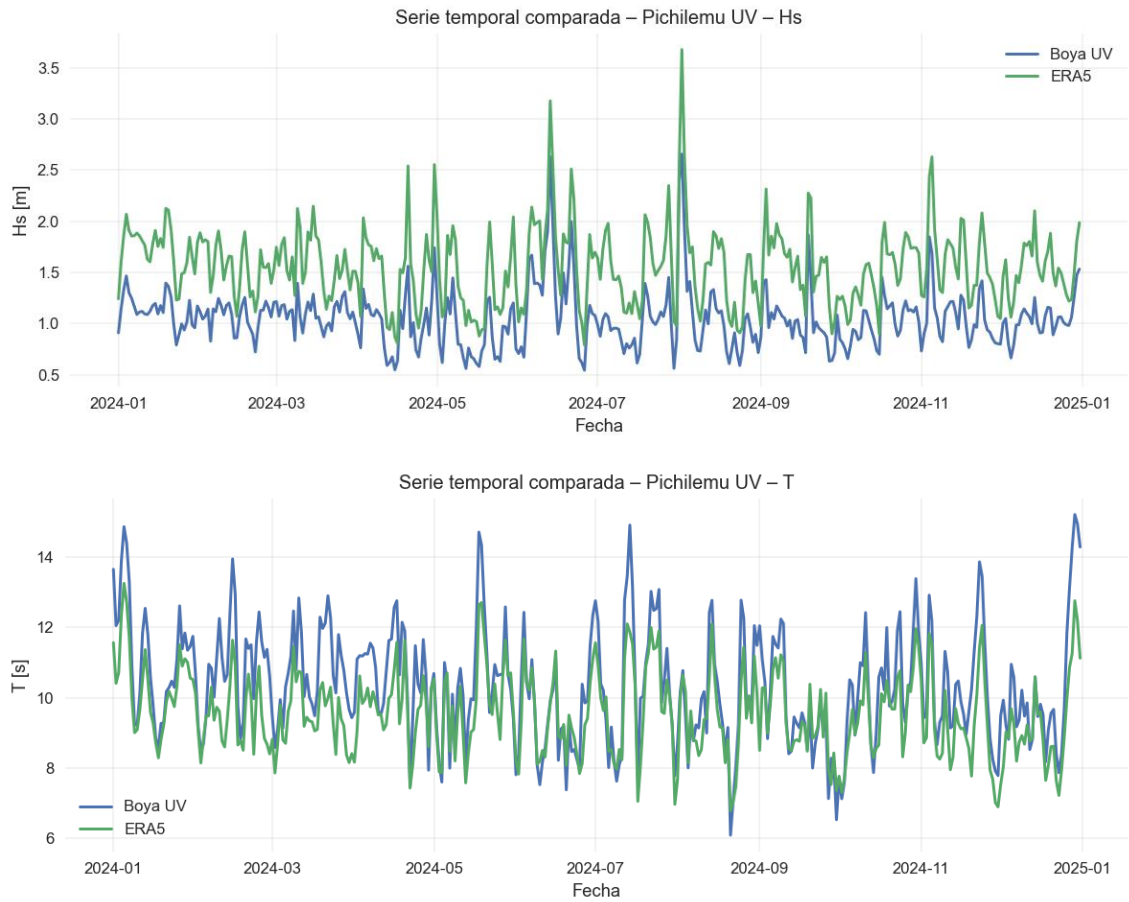
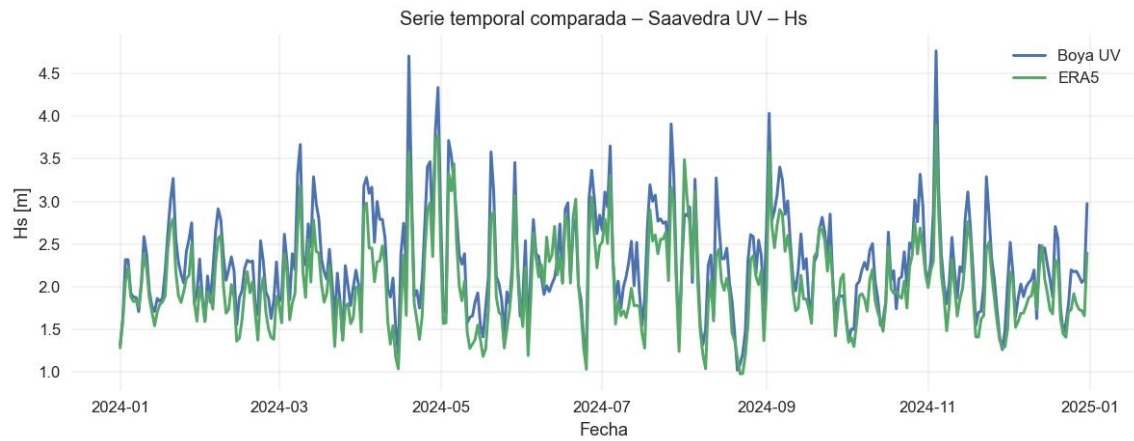


Figura 27: Series temporales de Hs y T para ERA5 y nodos UV, Pichilemu.



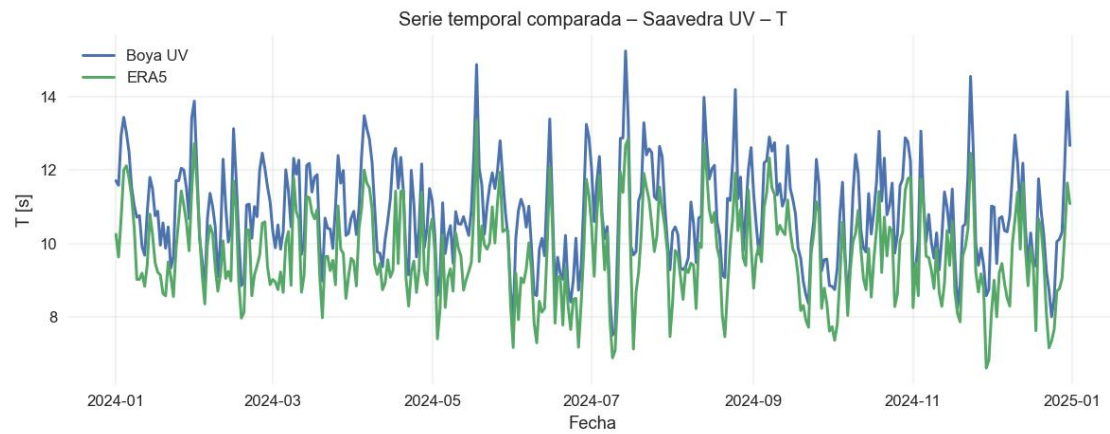


Figura 28: Series temporales de Hs y T para ERA5 y nodos UV, Saavedra.

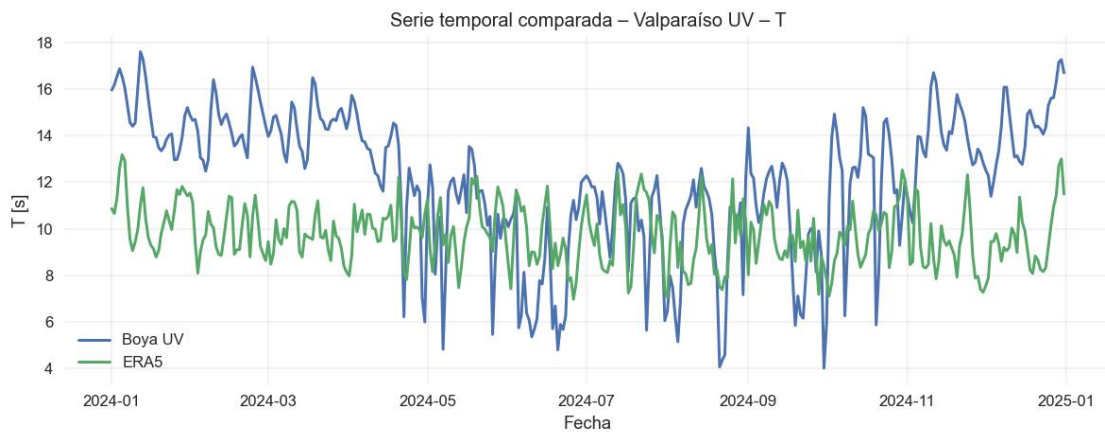
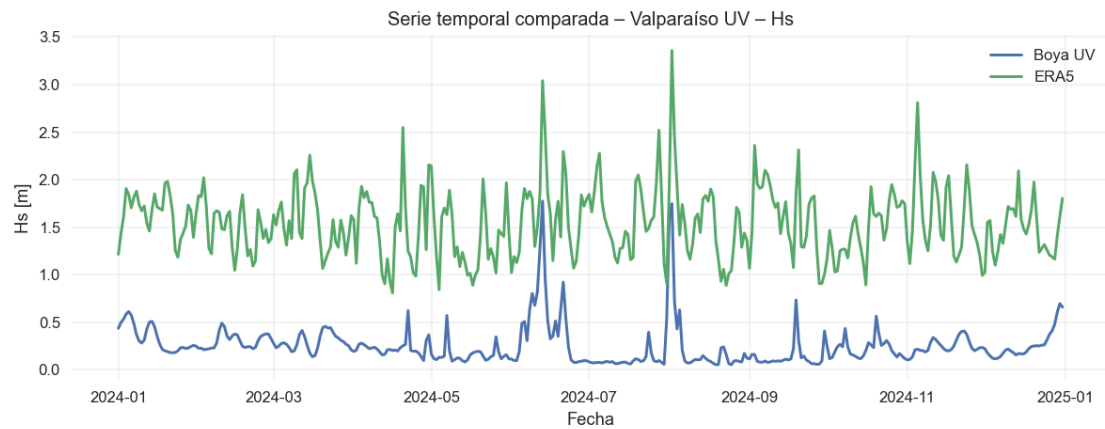


Figura 29: Series temporales de Hs y T para ERA5 y nodos UV, Valparaíso.

9.3 Densidad de Probabilidad 6 Zonas:

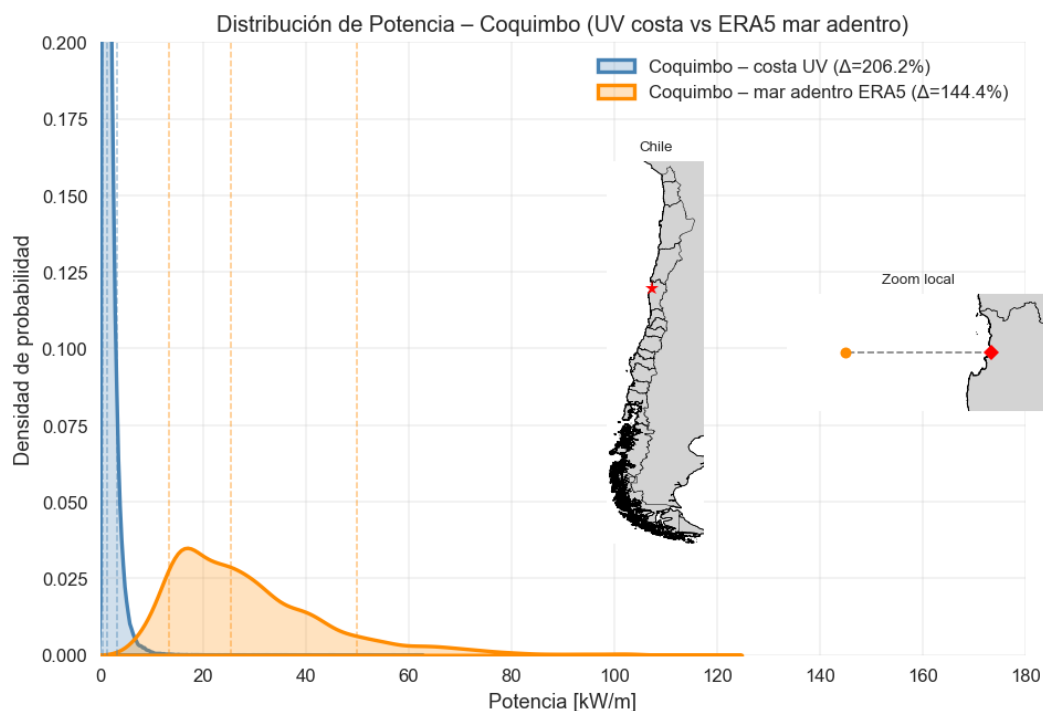


Figura 30: Densidad de probabilidad potencia energética Coquimbo.

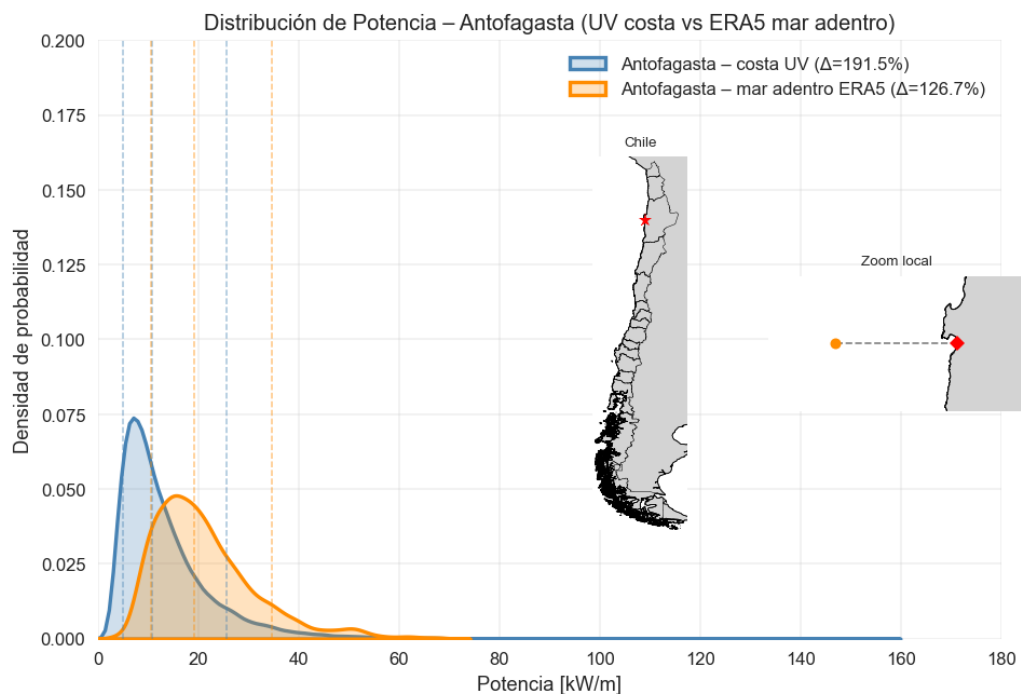


Figura 31: Densidad de probabilidad potencia energética Antofagasta.

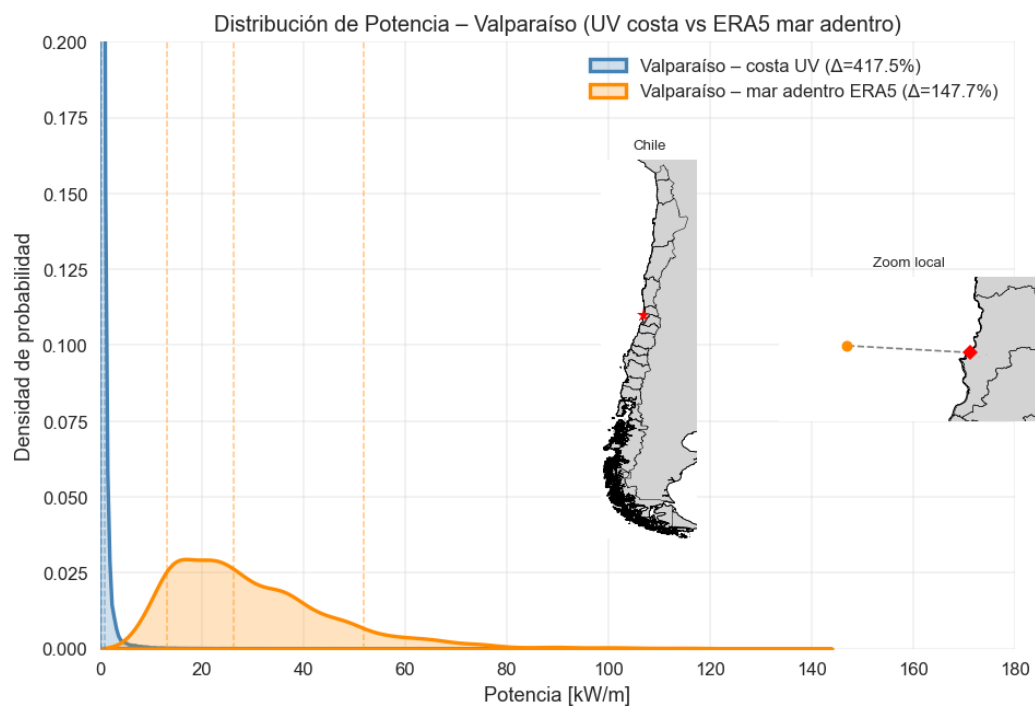


Figura 32: Densidad de probabilidad potencia energética Valparaíso.

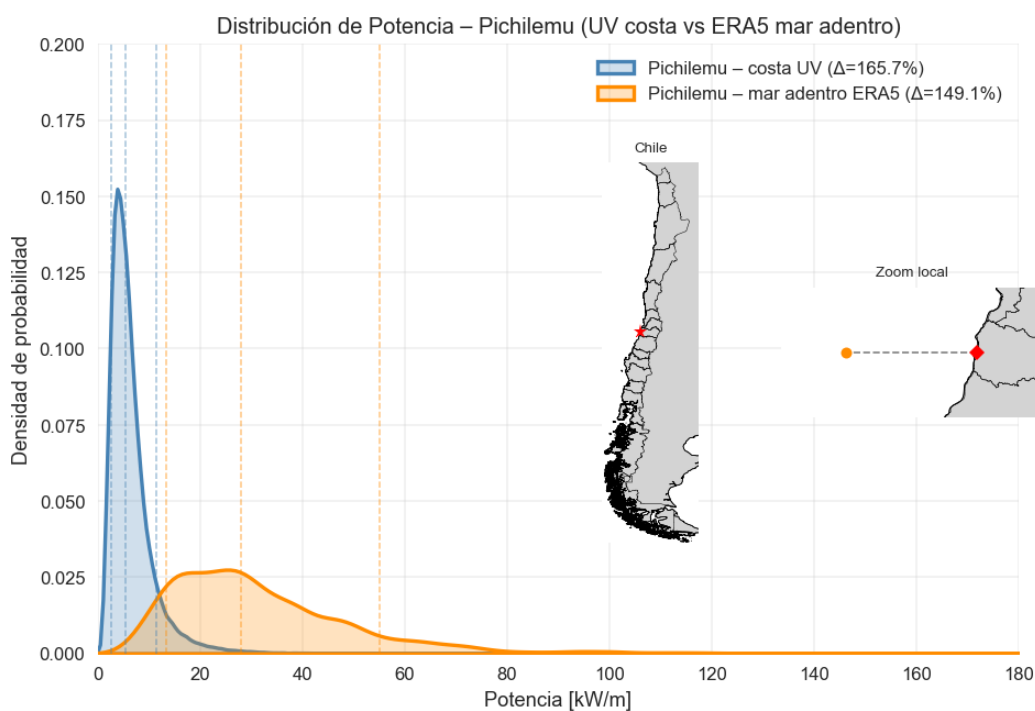


Figura 33: Densidad de probabilidad potencia energética Pichilemu.

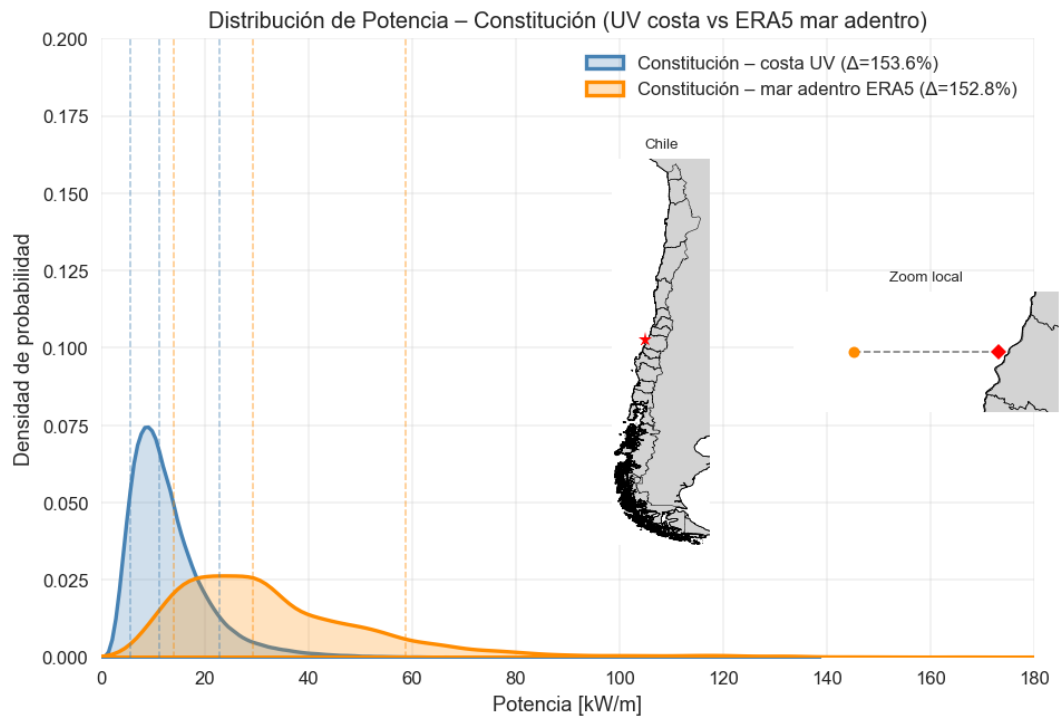


Figura 34: Densidad de probabilidad potencia energética Constitución.

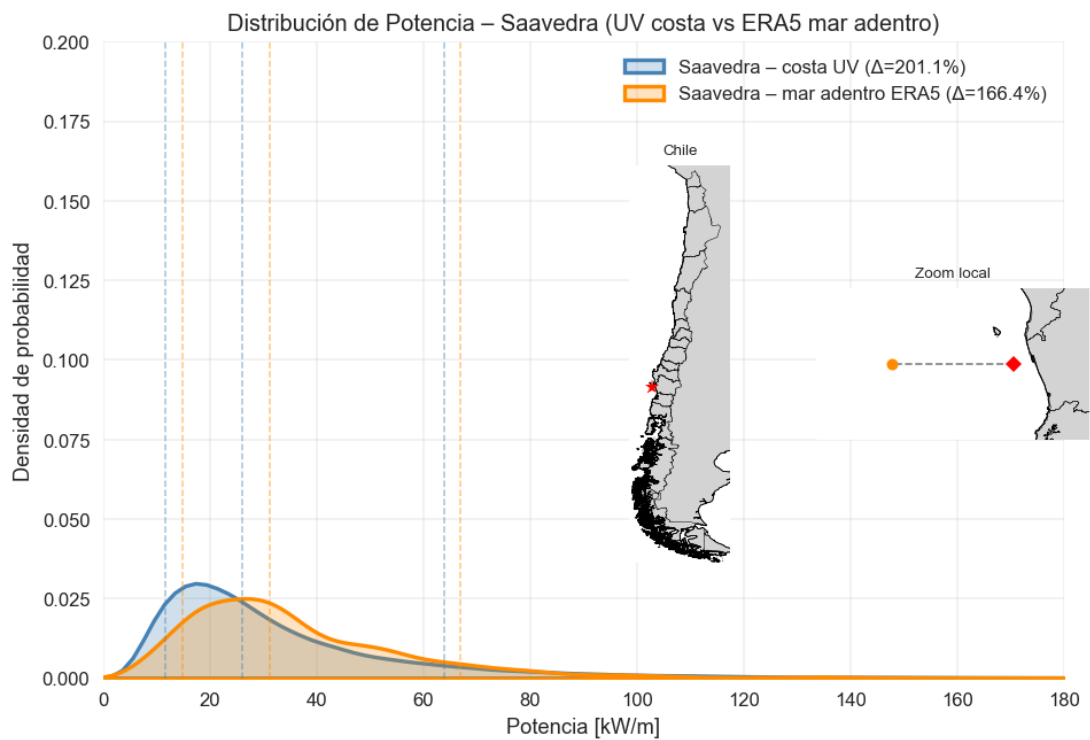


Figura 35: Densidad de probabilidad potencia energética Saavedra.

9.4 Densidad de Fuerza Para las 8 Zonas:

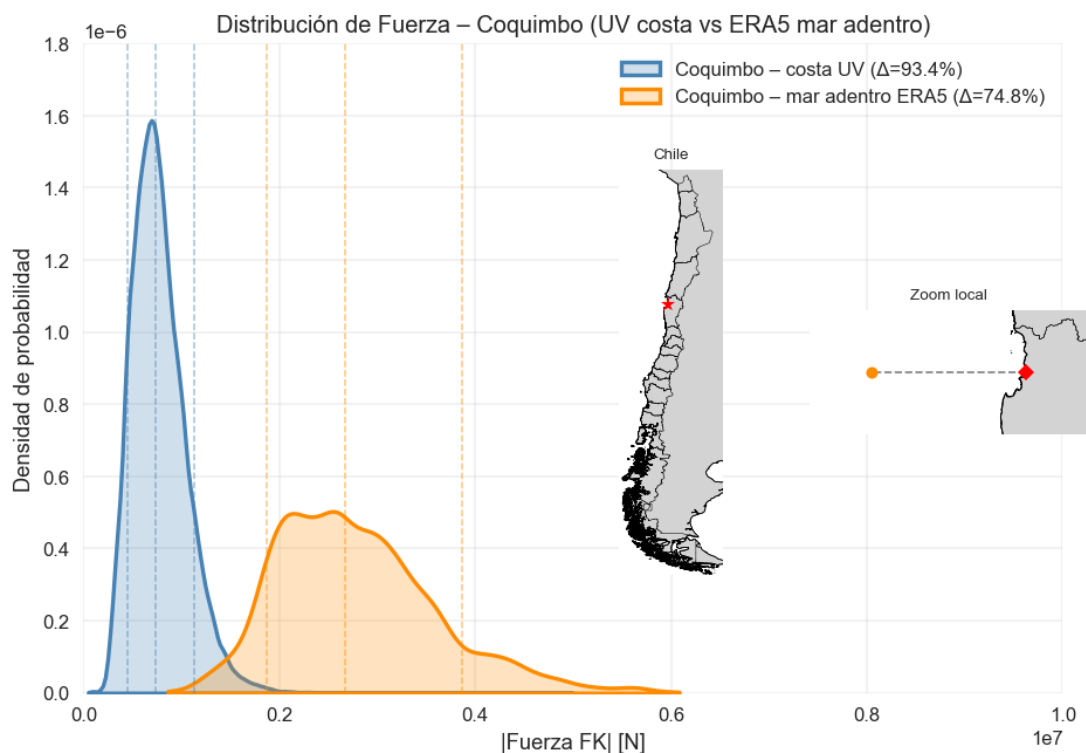


Figura 36: Densidad de probabilidad de la fuerza Coquimbo.

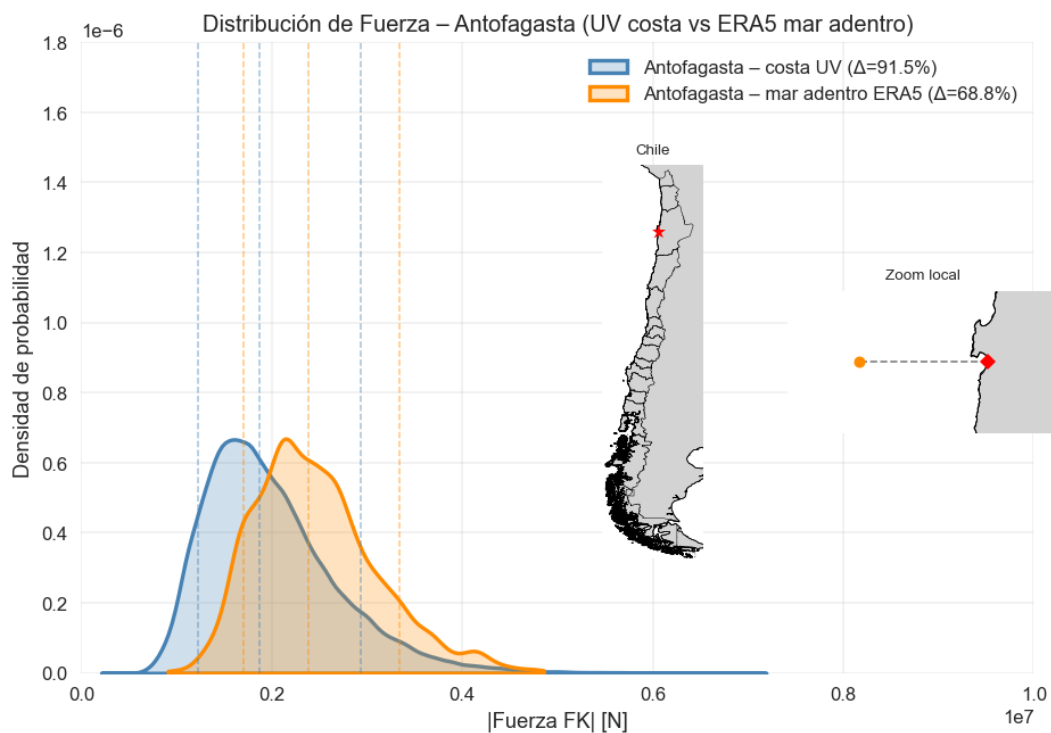


Figura 37: Densidad de probabilidad de la fuerza Antofagasta.

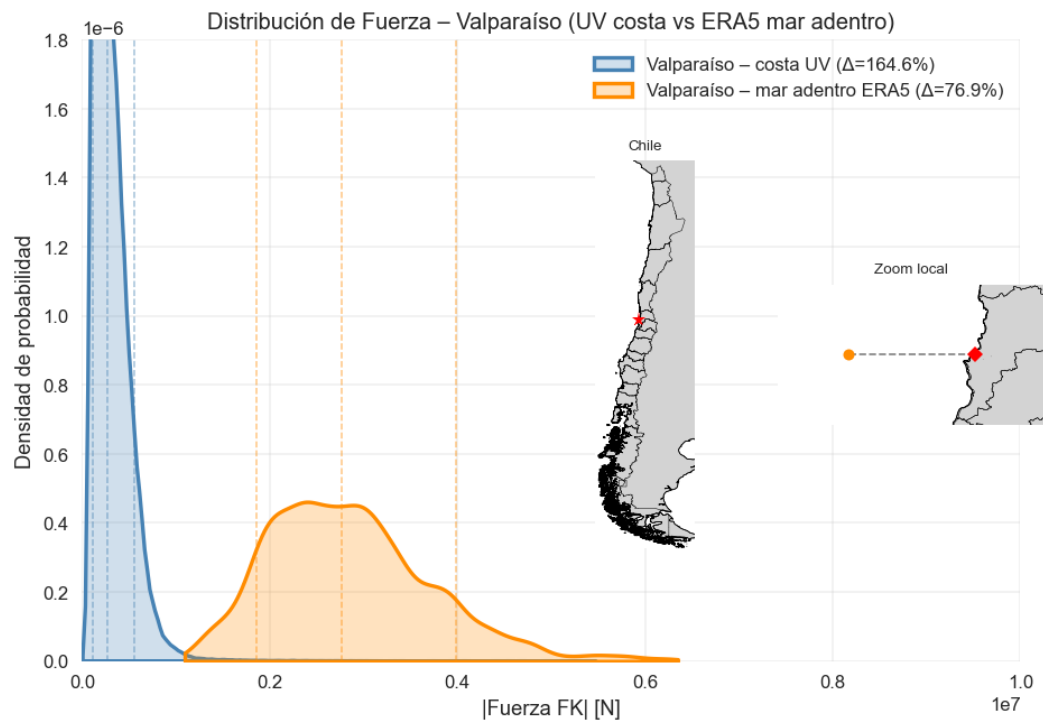


Figura 38: Densidad de probabilidad de la fuerza Valparaíso.

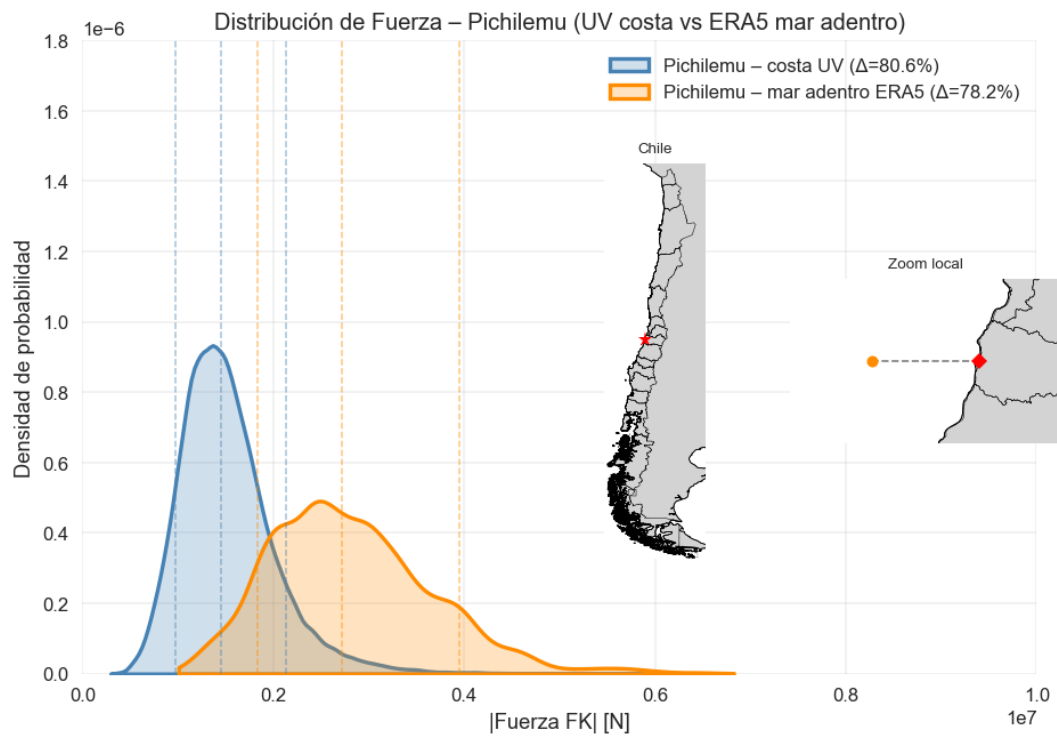


Figura 39: Densidad de probabilidad de la fuerza Pichilemu.

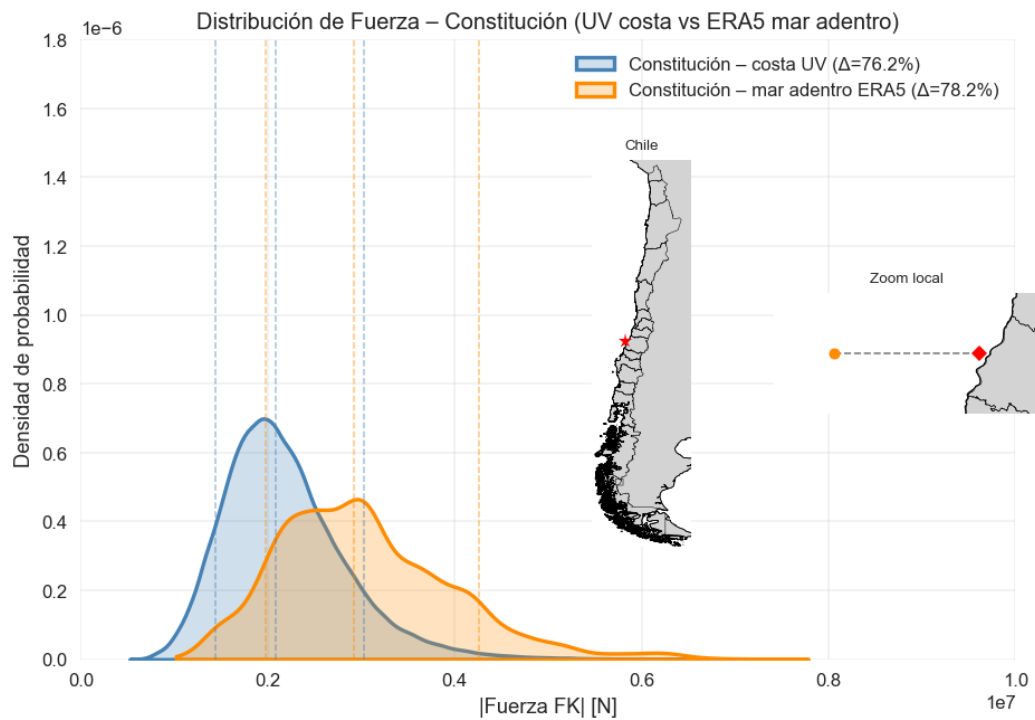


Figura 40: Densidad de probabilidad de la fuerza Constitución.

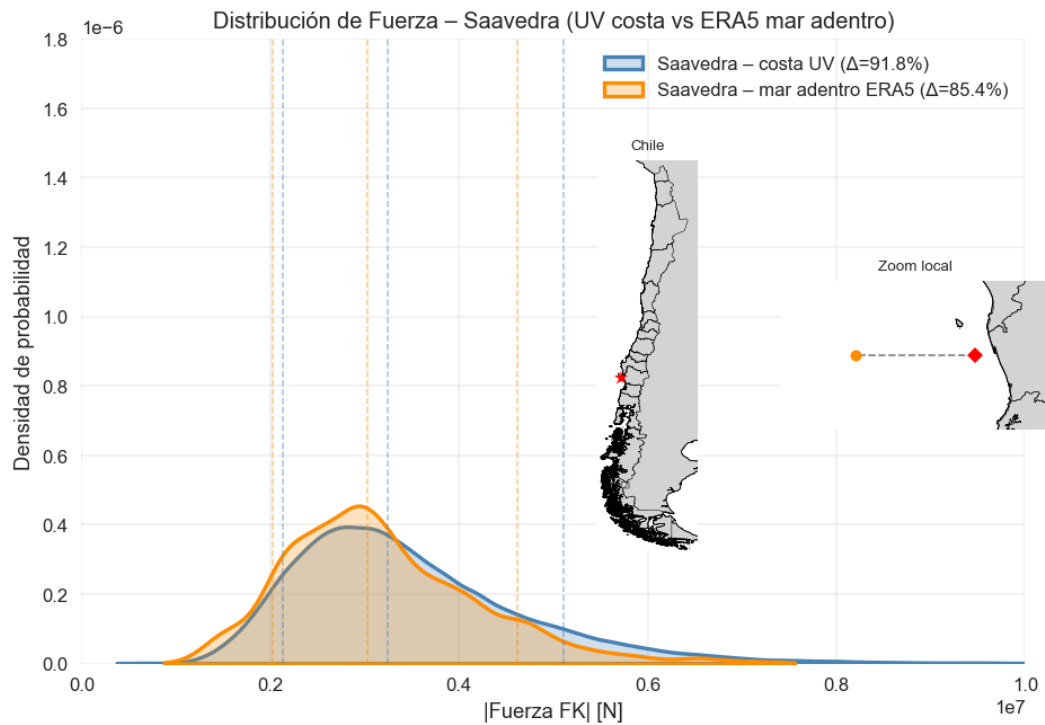


Figura 41: Densidad de probabilidad de la fuerza Saavedra.

9.5 Gráficos Radar

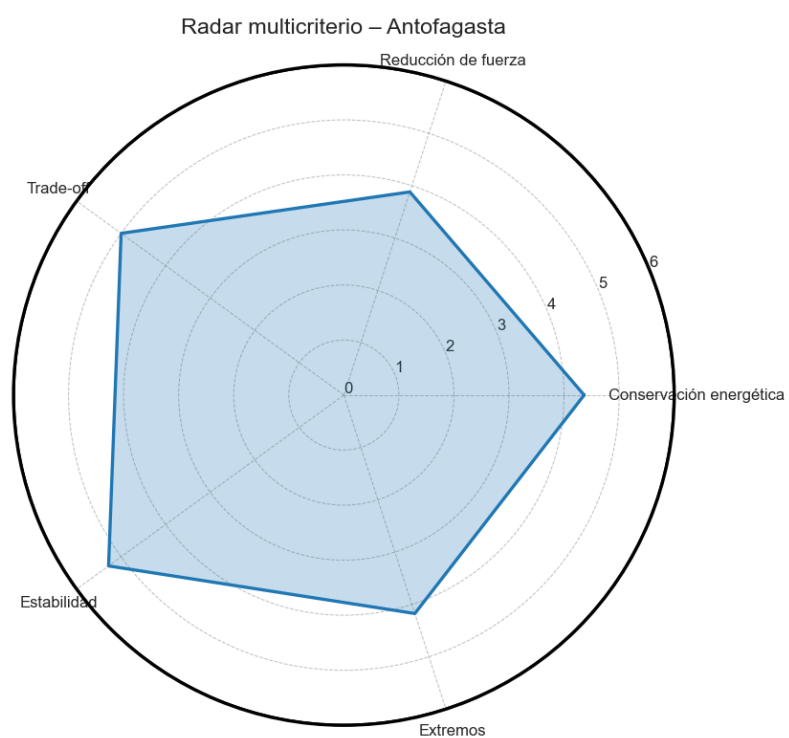


Figura 42: Grafico Radar Antofagasta.

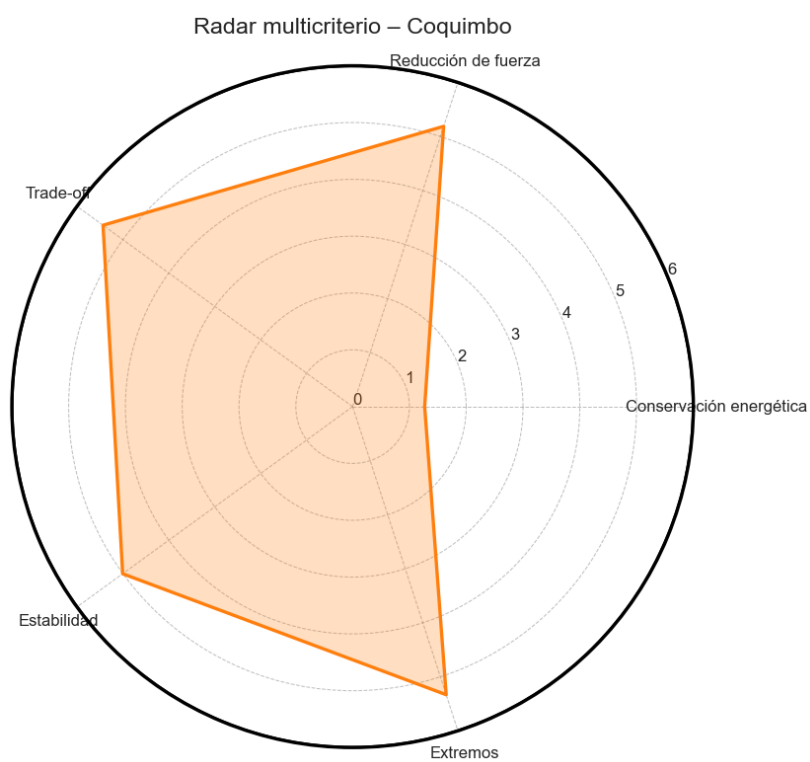


Figura 43: Grafico Radar Coquimbo.

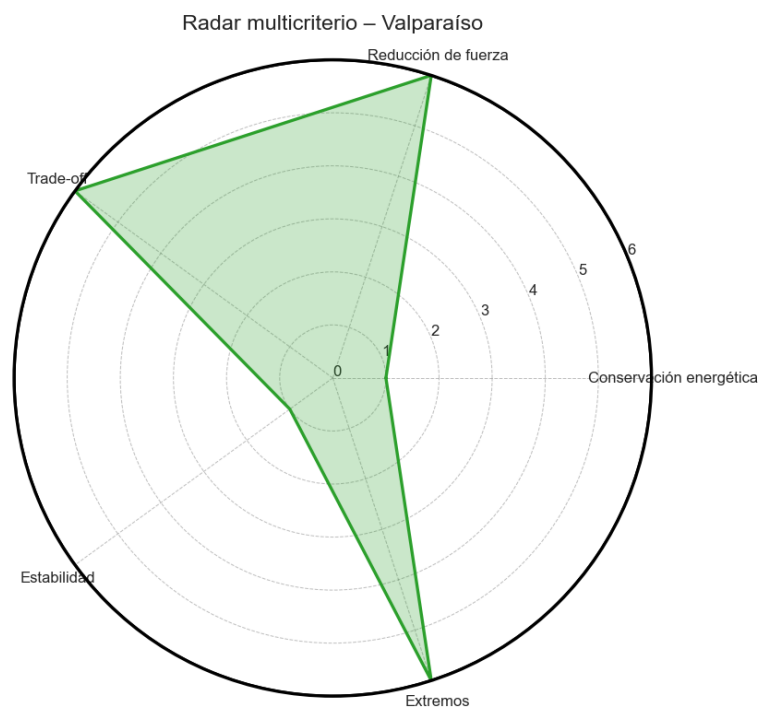


Figura 44: Grafico Radar Valparaíso.

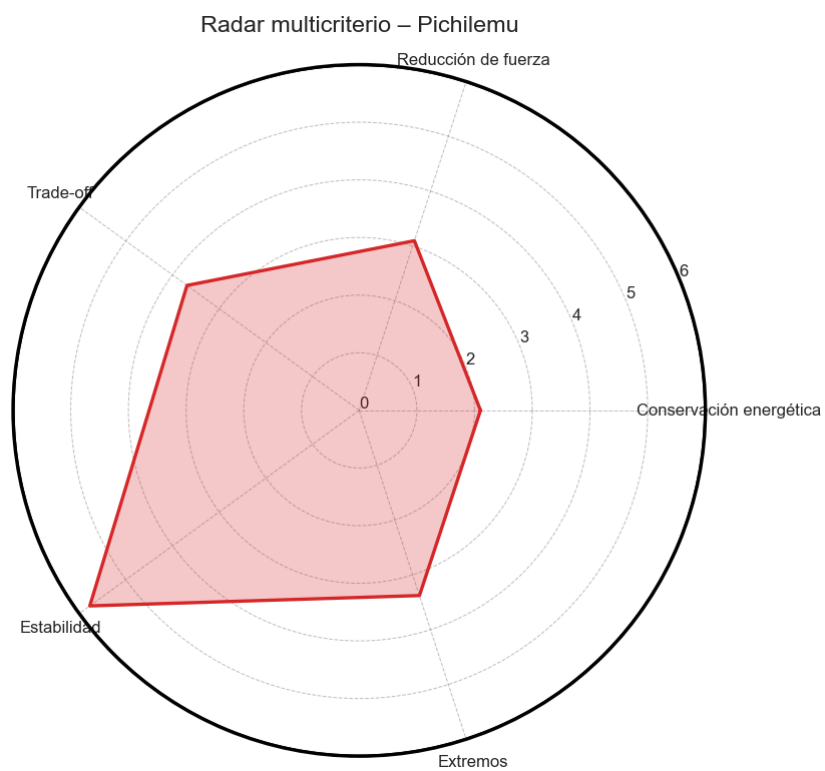


Figura 45: Grafico Radar Pichilemu.

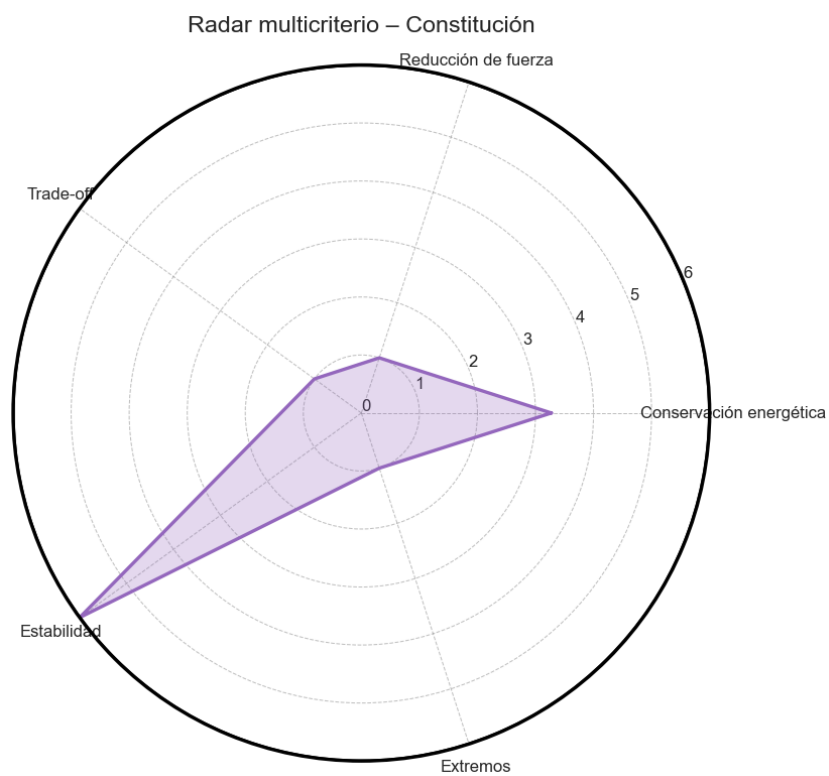


Figura 46: Grafico Radar Constitución.

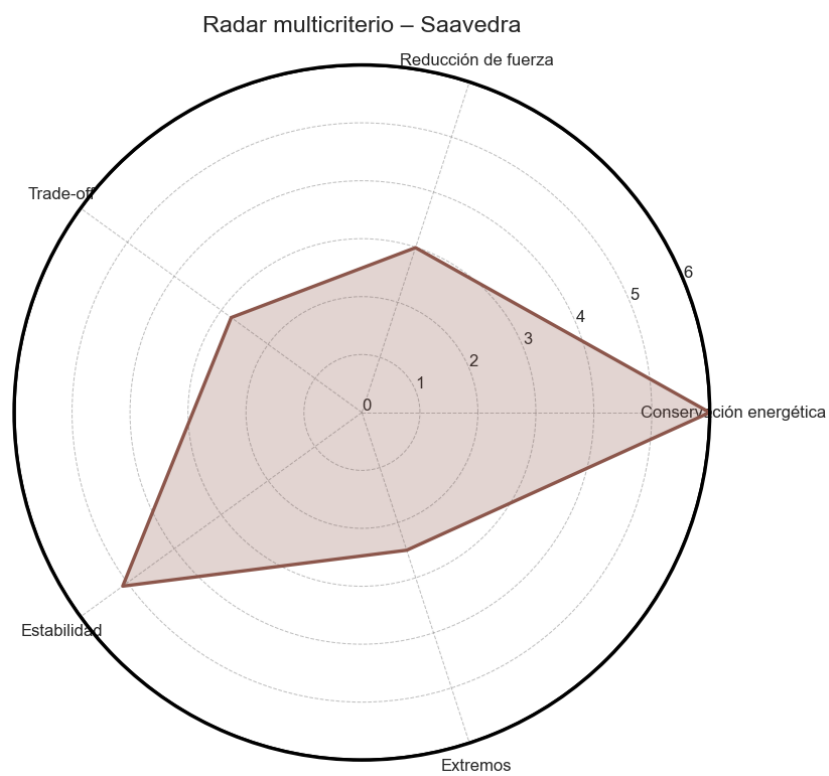


Figura 47: Grafico Radar Saavedra.