

# Estudio del potencial energético undimotriz de Mar del Plata mediante modelado SWAN

**Griselda Alejandra Carreras<sup>1</sup>, Pablo Alejandro Haim<sup>1</sup>, Nicolás Tomazin<sup>2</sup>, Mario Pelissero<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Mecánica, Medrano 951, (C1179AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup> Instituto Nacional del Agua, Laboratorio de Hidráulica, Au. Ezeiza–Cañuelas, tramo Jorge Newbery Km 1620, (B1804), Ezeiza, Buenos Aires, Argentina

*undimotriz@gmail.com*

*Recibido el 3 de diciembre de 2020, aprobado el 4 de febrero de 2021*

## **RESUMEN**

Se trata de un estudio de base sobre el potencial undimotriz en Mar del Plata, provincia de Buenos Aires, Argentina. Se estudió el clima de olas en aguas profundas a partir de 12 años (2005-2016) de datos de reanálisis provenientes del modelo global NWW3, obteniéndose los estadísticos descriptivos de las condiciones del oleaje medias general y estacionales, los cuales fueron utilizados como condiciones de borde en la ejecución del modelo SWAN, propagando el oleaje hacia la costa y obteniendo los parámetros de olas con los cuales se calculó la potencia undimotriz teórica en la zona de estudios.

**PALABRAS CLAVE:** ENERGÍA RENOVABLE – POTENCIA UNDIMOTRIZ - MODELO SWAN – MAR DEL PLATA - ARGENTINA

## **ABSTRACT**

A baseline study was carried out on the wave potential in Mar del Plata city, province of Buenos Aires, Argentina. The wave climate in deep water was studied from 12 years (2005-2016) of reanalysis data from the global model NWW3, obtaining descriptive statistics of the general and seasonal average wave conditions, which were used as border conditions in the execution of the SWAN model, propagating the waves towards the coast and obtaining the wave parameters used for the calculation of the theoretical wave power in the study area.

**KEYWORDS:** RENEWABLE ENERGY – WAVE POWER – SWAN MODEL – MAR DEL PLATA – ARGENTINA

## Introducción

El estilo de vida actual y la creciente industrialización de las sociedades, son altamente dependientes de energía, que proviene principalmente de recursos fósiles (gas, petróleo y carbón). Este uso intensivo de energía de origen fósil ha devenido en graves problemas ambientales, produciendo la necesidad de investigar y desarrollar tecnologías para el aprovechamiento de fuentes renovables con bajo impacto en el medio ambiente.

Por otra parte, el enorme potencial energético de los océanos resulta de interés para muchos países y empresas, por lo que son numerosos los proyectos de I+D para desarrollar tecnologías que permitan aprovechar esta fuente de energía limpia e inagotable.

La Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires (UTN-FRBA) diseñó y testeó un dispositivo de captación undimotriz y desde el año 2018 se encuentra trabajando en cooperación con una empresa marplatense para construir e instalar en Mar del Plata un prototipo a escala 1:1, el cual se convertiría en el primero del país.

En este trabajo se realizó un estudio sobre el potencial energético teórico del oleaje para un eventual aprovechamiento del recurso undimotriz en la ciudad de Mar del Plata. La región de interés comprende la zona costera de la ciudad y hasta profundidades de aproximadamente 50 m, comprendida entre las latitudes  $37,8^{\circ}$  S y  $38,2^{\circ}$  S y longitudes  $57,6^{\circ}$  W y  $56,6^{\circ}$  W (Fig. 1).



**Fig. 1. Zona de estudio. Fuente: Google Earth**

## Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo general estudiar las características del oleaje y estimar el potencial energético teórico del recurso para el aprovechamiento de energía undimotriz en la Ciudad de Mar del Plata mediante simulaciones numéricas de propagación del oleaje con el modelo SWAN.

Los objetivos específicos que se abordaron en el desarrollo del trabajo son:

1. Conocer el régimen medio del oleaje (general y estacional) en aguas profundas cercanas a la zona de estudio.
2. Simular la propagación del oleaje desde aguas profundas hacia la zona costera bajo condiciones medias generales y estacionales.
3. Calcular el potencial teórico medio del recurso undimotriz en la zona de estudio aplicando las formulaciones para aguas profundas, intermedias y someras.
4. Determinar la variación estacional del recurso en la zona de estudio.
5. Identificar la/s región/es con mayor potencial dentro de la zona de estudio.

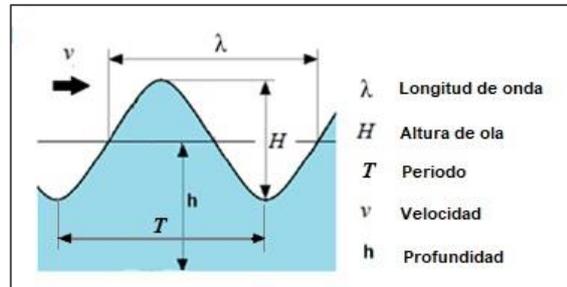
## Parámetros de las olas

Los parámetros de olas (Fig. 2) relevantes para este trabajo son:

- Longitud de onda ( $\lambda$ ): distancia horizontal que existe entre dos crestas o dos valles consecutivos.
- Altura de ola ( $H$ ): distancia vertical entre la cresta y el valle de la onda. Para caracterizar un "estado de mar" se utiliza la altura significativa de ola ( $H_s$ ), la cual se define como la altura media del tercio mayor de todas las olas observadas. Es la altura representativa de la banda máxima de energía que existe en un determinado oleaje.
- Periodo ( $T$ ): el tiempo en que se demoran dos crestas o dos valles de una onda en pasar por un mismo punto. El periodo pico ( $T_p$ ) se define como el periodo asociado a las olas de mayor energía dentro del estado de mar. El periodo de la energía ( $T_e$ ) es el periodo medio con respecto a la distribución espectral de la onda transporte de energía. El periodo medio de paso por 0 ( $T_z$ ) es el periodo o tiempo de paso de dos olas consecutivas, por una línea imaginaria a la mitad de la distancia entre la cresta y el valle.
- Dirección ( $D$ ): indica desde donde vienen las olas, midiendo un ángulo con respecto al norte en sentido horario. La dirección pico ( $D_p$ ) se define como la dirección de las olas de mayor energía.
- Velocidad o celeridad ( $v$ ): es la velocidad de desplazamiento del perfil de la ola. La velocidad de grupo ( $v_g$ ) es la velocidad a la cual se desplaza la energía del grupo de olas. En aguas someras, la velocidad de grupo es coincidente con la del frente de onda pero en aguas

profundas la velocidad de grupo es la mitad de la velocidad del frente de onda.

- Profundidad ( $h$ ) es la distancia vertical entre el nivel medio del mar y el suelo marino.



**Fig. 2. Parámetros de las olas**

## El potencial energético de las olas

Debido al calentamiento diferencial de la superficie de la tierra por la energía solar, se generan vientos. A medida que los vientos soplan sobre el agua, crean ondas y trasladan su energía a ellas. La cantidad de energía transferida depende de la velocidad del viento, el tiempo aplicado y la distancia recorrida (Czech y Bauer, 2012).

A medida que la energía solar se convierte en energía eólica, el flujo de energía se concentra espacialmente, desde una intensidad promedio típicamente de 0,1 a 0,3 kW/m<sup>2</sup> de superficie horizontal hasta 0.5 kW/m<sup>2</sup> de área perpendicular a la dirección del viento; una concentración espacial aún mayor tiene lugar a medida que la energía eólica se convierte en energía undimotriz, justo debajo de la superficie del océano la intensidad promedio del flujo de energía es de 2 a 3 kW/m<sup>2</sup> de área perpendicular a la dirección de la onda (Falnes, 2007).

Para describir al oleaje que está en desarrollo debido al forzamiento de vientos locales se utiliza el término "mar de viento" o *sea* (estas ondas viajan en o cerca de la dirección local del viento); para describir al oleaje de periodos largos que se ha trasladado fuera del área de tormenta dónde fue generado se utiliza el término "mar de fondo" o *swell* (los *swells* se propagan por el océano con poca pérdida de energía) (Falnes, 2007). Las olas de mar de fondo se caracterizan por tener gran amplitud y mayor periodo (menor frecuencia) que las olas de mar de viento (Martos, Reta y Guerrero, 2004).

La potencia de las olas está definida por el flujo de energía que atraviesa una superficie vertical perpendicular a la dirección de su propagación. Por lo tanto puede ser expresada en W/m<sup>2</sup>. Sin embargo, no es lo habitual, y se prefiere cuantificar la potencia de las olas en W/m (Watt por metro de frente de onda). Para una profundidad infinita, el 95 % de la energía de

la onda está contenida en una profundidad igual a la mitad de su longitud de onda (Multon, 2012).

Cuando la profundidad  $h$  es mayor que  $\lambda/2$ , la potencia undimotriz puede determinarse con la siguiente ecuación:

$$P_w = \frac{\rho_w g^2}{64\pi} H_s^2 T_e (W.m^{-1}) \quad (1)$$

Donde:

$\rho_w$  es la densidad del agua de mar (depende de la salinidad y la temperatura,  $\approx 1025 \text{ kg/m}^3$ ),  
 $g$  es la aceleración de la gravedad,  
 $H_s$  es la altura significativa de ola y  
 $T_e$  es el periodo de la energía ( $T_e \approx 0,86 T_p$ ).

En aguas de profundidades intermedias ( $\lambda/20 < h < \lambda/2$ ), se aplica la ecuación obtenida a partir de la teoría de Airy:

$$P_w = \frac{\rho_w g^2}{64\pi} H_s^2 T_z \left(1 + \frac{(2kh)}{\sinh(2kh)} \tanh(kh)\right) (W.m^{-1}) \quad (2)$$

Donde:

$k = 2\pi/\lambda$  es el número de onda,  
 $h$  es la profundidad y  
 $T_z$  es el periodo medio de paso por el cero ( $T_z \approx 0,76 T_p$ ).

En aguas someras ( $h < \lambda/20$ ), donde la velocidad de grupo coincide con la velocidad del frente de onda y no depende del periodo, sino de la profundidad  $h$ :

$$P_w = \frac{1}{8} \rho_w g H^2 \sqrt{gh} (W.m^{-1}) \quad (3)$$

### Condiciones para el aprovechamiento de la energía de las olas

Las condiciones necesarias para el aprovechamiento de la energía undimotriz dependen generalmente de combinaciones adecuadas de profundidad, altura y periodo de las olas. Las combinaciones óptimas serán diferentes según el tipo de dispositivo captador y su rango operativo. Además, en el caso de dispositivos orientables, es importante también conocer la dirección más frecuente del frente de ondas. No obstante, existe cierto consenso acerca de las condiciones mínimas necesarias para el aprovechamiento con la tecnología actual.

El límite inferior de  $H_s$  necesario para extraer energía oscila entre 0,5 y 1 m y el límite superior oscila en los 5 y 7 m (una  $H_s$  excesiva podría causar daños estructurales en el dispositivo por lo que se decide anteponer la

supervivencia a la extracción de energía desactivando el captador al sobrepasar una altura de ola determinada) (Cavia del Olmo, 2009).

Las potencias menores a 5 kW/m no son aprovechables (Mørk, *et al.*, 2010). La explotación de la energía puede ser económicamente viable cuando el potencial es mayor a 15-20 kW/m (Multon, 2012; Wave Energy Centre, 2004).

En el estudio sobre el recurso energético undimotriz en Hawaii, (Stopa, *et al.*, 2013) se indica que los convertidores Pelamis o Aqqua Buoy a ser instalados en Hawaii requieren 5 kW/m de potencia para estar operativos y una potencia media anual de 12 kW/m para ser viables.

## **Metodología**

La metodología de trabajo utilizada consistió en la selección de tres puntos alejados de la zona de estudio ( $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$ ) para los cuales fuera posible obtener datos de reanálisis del modelo NWW3.

Con dichas series de datos, se calcularon los estadísticos generales y estacionales de los parámetros velocidad del viento, altura significativa de ola y periodo pico, habiéndose seleccionado a la mediana como la medida de centralización más apropiada para representar a los datos. También se determinaron las direcciones predominantes de los vientos y de las olas tanto generales como estacionales.

Estos valores fueron usados como condiciones de borde en las simulaciones numéricas de propagación del oleaje utilizando el modelo SWAN, aplicando el enfoque híbrido de condiciones de borde, el cual consiste en tomar los datos de dichos puntos como si fueran boyas virtuales. A este modelo también se lo alimentó con los datos locales de mareas y batimétricos de la zona.

Como resultado, se obtuvieron datos de altura significativa, periodo pico y dirección pico de las olas a lo largo de la zona de estudio, con los cuales se realizaron mapas de alturas significativas de olas y mapas de potencia energética.

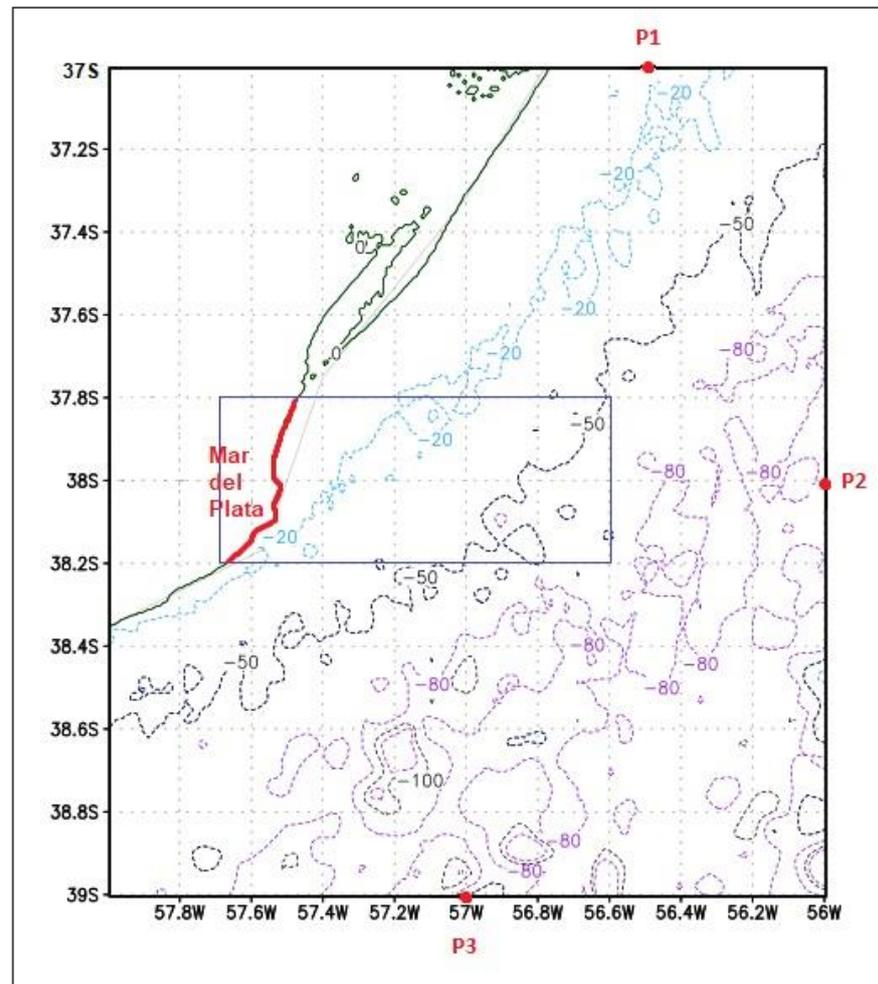
Para la grilla de cómputos se eligió el área comprendida entre las latitudes  $37^\circ$  S y  $39^\circ$  S y las longitudes  $56^\circ$  W y  $58^\circ$  W, siendo el área de interés del estudio la comprendida entre latitudes  $37,8^\circ$  S y  $38,2^\circ$  S y longitudes  $57,6^\circ$  W y  $56,6^\circ$  W, que incluye la zona costera de la ciudad de Mar del Plata y profundidades hasta 50 m aproximadamente (Fig. 3).

Ante la ausencia de mediciones in situ en la región estudiada, se recurrió a datos de altimetría satelital para validar parcialmente los datos de reanálisis en aguas profundas y los resultados de las simulaciones.

## **Fuentes de datos**

### **Batimetría**

Se utilizó el producto Datos Batimétricos Mallados de la base mundial GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*). La resolución de malla de esta base de datos abierta es de 30 segundos de arco ( $0,00833^\circ \approx 0.9$  km). Se descargó la región que comprende la zona de cálculos de  $2^\circ \times 2^\circ$  en formato Esri ASCII (Fig. 3).



**Fig. 3. Batimetría de la zona de cálculos. La zona de estudio demarcada con rectángulo azul y las boyas virtuales P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> y P<sub>3</sub> con puntos rojos**

### **Oleaje en aguas profundas y viento**

Para el estudio de las características del oleaje y vientos en aguas profundas se utilizaron los parámetros altura significativa, periodo pico, dirección pico y componentes de velocidad del viento del producto

*Reanalysis Multigrid NOAA WAVEWATCH III® (NWW3)*, disponibles en el sitio FTP de la NOAA. Se descargó un archivo por cada mes y variable para un periodo de 12 años (02/2005-12/2016) pertenecientes al dominio

global, por ser este dominio el único que posee datos de Argentina. Estos archivos en formato GRIB-2 tienen una resolución espacial de  $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$  y una resolución temporal de 3 horas (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC). Se programaron scripts para automatizar la extracción de datos de los 572 archivos y su compilación en un único archivo por ubicación y variable.

### **Datos de altimetría satelital**

Se utilizaron dos sets de datos del catálogo IMOS (*Integrated Marine Observing System*) (Ribal y Young, 2019), descargados del sitio web de la Red Australiana de Datos Oceánicos, AODN (*Australian Ocean Data Network*).

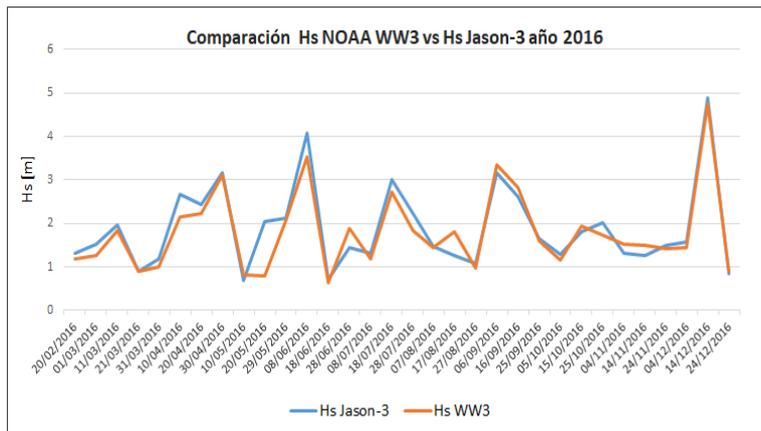
Uno de ellos correspondiente a la misión SENTINEL-3A por coincidir con una región de la zona de estudios fue usado para validar los resultados de las simulaciones en dicha región. Contiene observaciones cada 12-15 días desde el 07-03-2016, entre las latitudes  $38^{\circ}\text{S}$  y  $37,68^{\circ}\text{S}$  y longitudes  $57,44^{\circ}\text{W}$  y  $57,23^{\circ}\text{W}$ , donde la profundidad media es de 20 m.

El otro, correspondiente a la misión JASON-3, al ser cercano a la ubicación de uno de los puntos de aguas profundas ( $P_2$ ) para el cual se obtuvieron los datos de reanálisis, se utilizó para validar parcialmente dichos datos de reanálisis. Contiene observaciones cada 10 días desde el 20-02-2016, entre las latitudes  $38,21^{\circ}\text{S}$  y  $38,01^{\circ}\text{S}$  y longitudes  $56^{\circ}\text{W}$  y  $55,86^{\circ}\text{W}$ , donde la profundidad media es de 82 m.

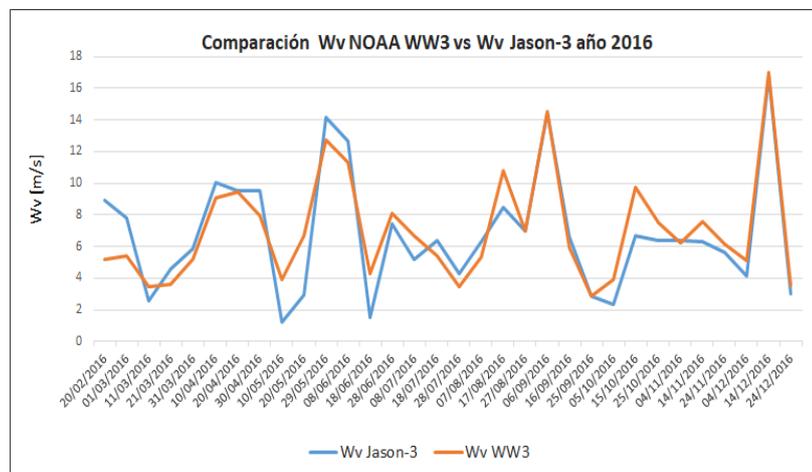
### **Validación de datos de olas y vientos del año 2016 en Punto 2**

Dado que los datos de reanálisis utilizados en este trabajo abarcan el periodo 2005-2016 y los datos satelitales más cercanos a  $P_2$  que se pudieron obtener comienzan en 2016, solo se pudo realizar la comparación de los datos del 2016 de las variables altura significativa de ola y velocidad del viento.

En la Fig. 4 se muestra gráficamente la comparación de la variable altura significativa de ola y en la Fig. 5, la comparación de la variable velocidad de viento, en color naranja los datos de reanálisis y en azul las observaciones satelitales. En ambos gráficos existe una coincidencia aceptable teniendo en cuenta que las ubicaciones de los *sets* de datos no son exactas sino cercanas.



**Fig. 4. Comparación de H<sub>s</sub> de reanálisis NWW3 en P<sub>2</sub> vs. observaciones de la misión JASON-3 en las cercanías de P<sub>2</sub> para el**



**Fig. 5. Comparación de W<sub>v</sub> de reanálisis NWW3 en P<sub>2</sub> vs. observaciones de la misión JASON-3 en las cercanías de P<sub>2</sub> para el año 2016**

### **Análisis de datos de oleaje en aguas profundas**

#### **Análisis de datos NWW3 en Punto 1 (P<sub>1</sub>) (37° S y 56.5° W)**

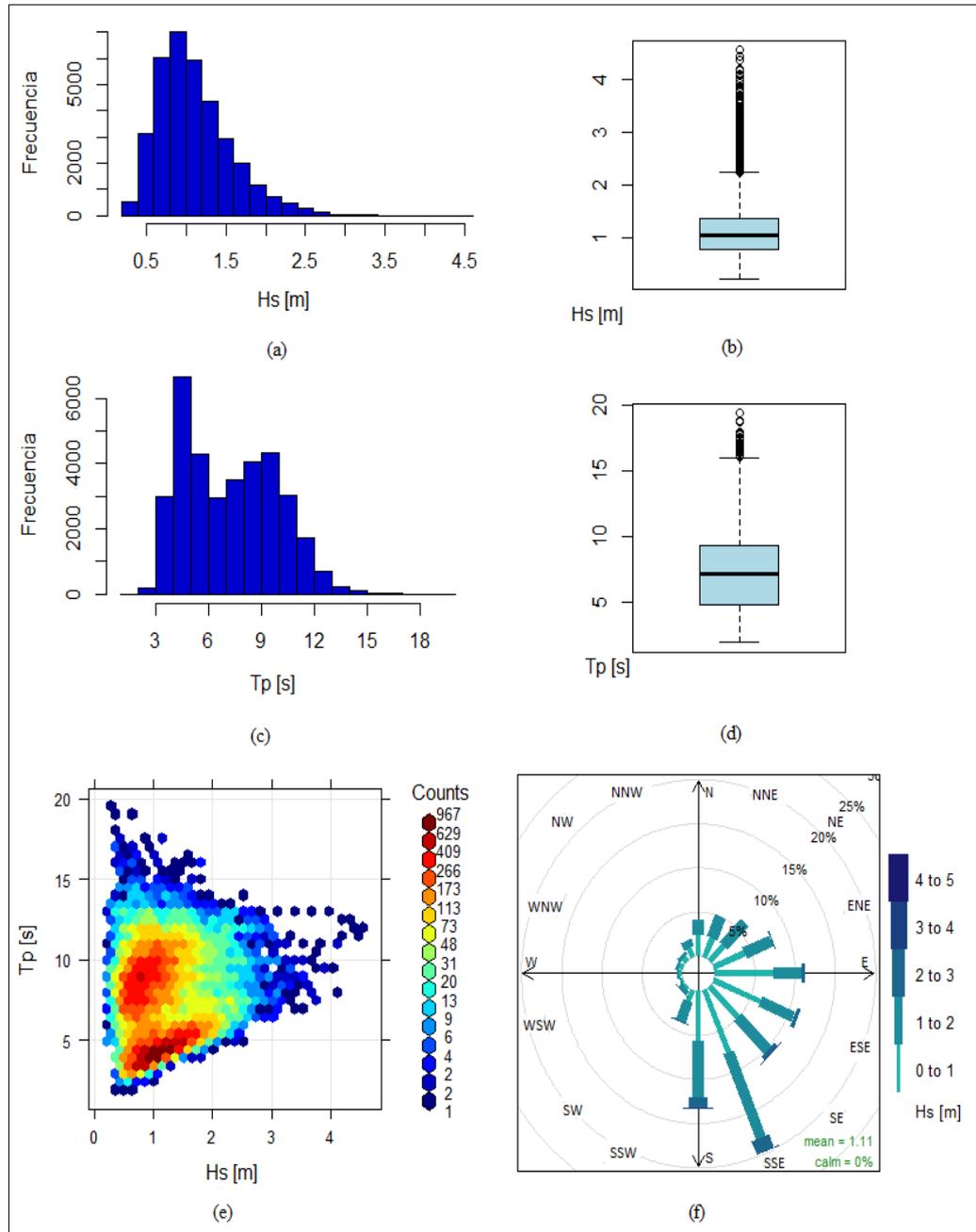
La profundidad en P<sub>1</sub> es de aproximadamente 20 m. Si bien P<sub>1</sub> no se encuentra en aguas profundas, fue seleccionado con el fin de proporcionar valores de borde al segmento norte de la grilla de cómputos.

Las alturas de ola más frecuentes están en el orden de 1 m (ver histograma de frecuencias en Fig. 6.a). La mediana de la serie es 1,03 m y el rango intercuartílico de 0,58 m, comprendiéndose la mitad de los valores de la serie dentro del rango que va desde 0,78 m a 1,36 m, primer y tercer cuartil respectivamente (ver diagrama de cajas en Fig. 6.b).

Los periodos más frecuentes ocurren entre valores cercanos a los 5 s y hasta valores cercanos a los 9 s, siendo la mediana de la serie 7,2 s con un rango intercuartílico de 4,5 s (Fig. 6.c y 6.d).

En la distribución conjunta de las alturas de ola y los periodos de pico (Fig. 6.e), se observa que las combinaciones más frecuentes comprenden alturas entre 0,5 y 1,8 m con periodos entre 3 s y 5 s y entre 7 s y 11 s. Las dos manchas rojas del gráfico representan los dos tipos de oleaje, la inferior es el *wind sea* y la superior (que muestra mayor dispersión) corresponde al *swell*.

La rosa del oleaje para este punto (Fig. 6.f) muestra que la dirección del oleaje predominante es SSE y en menor medida las direcciones S, SE, ESE y E.



**Fig. 6. Gráficos de estadísticos generales para la serie histórica NWW3 (2005-2016) en P<sub>1</sub> (37° S y 56,5° W): histograma y diagrama de cajas de H<sub>s</sub> (a) y (b) y de T<sub>p</sub> (c) y (d); diagrama de distribución conjunta de H<sub>s</sub>-T<sub>p</sub> (e); rosa de oleaje H<sub>s</sub>-D<sub>w</sub> (f)**

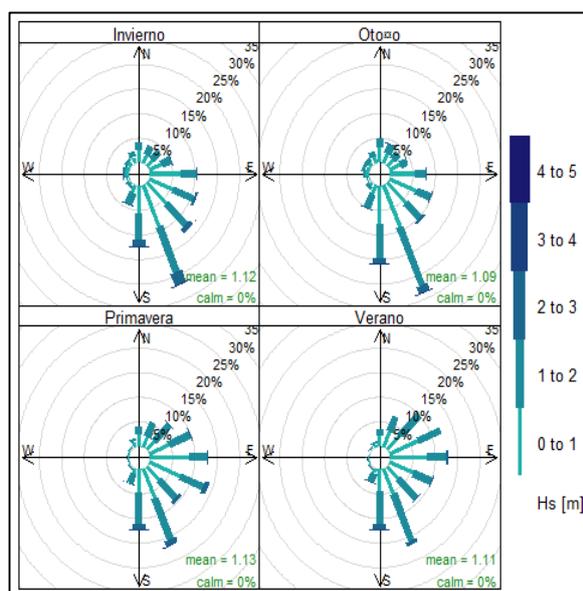
En la Tabla 1 se presentan las medianas de H<sub>s</sub> y T<sub>p</sub> para cada estación. En el caso de H<sub>s</sub> no se observa variación y en el caso de T<sub>p</sub> la variación es pequeña siendo en otoño-invierno alrededor de un segundo mayor que en primavera-verano.

En la **iError! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan las rosas de oleaje para cada estación, observándose la

dirección SSE como predominante en todas las estaciones. Este predominio es más acentuado en las estaciones de otoño e invierno.

**Tabla 1. Medianas de  $H_s$  y  $T_p$  por estación para la serie histórica NWW3 (2005-2016) en  $P_1$  ( $37^\circ$  S y  $56.5^\circ$  W)**

| Estación  | Mediana $H_s$ [m] | Mediana $T_p$ [s] |
|-----------|-------------------|-------------------|
| Otoño     | 1,00              | 7,7               |
| Invierno  | 1,02              | 7,9               |
| Primavera | 1,05              | 6,9               |
| Verano    | 1,04              | 6,2               |



**Fig. 7. Rosas de oleaje  $H_s$ - $D_p$  por estación para la serie histórica NWW3 (2005-2016) en  $P_1$  ( $37^\circ$  S y  $56.5^\circ$  W)**

### **Análisis de datos NWW3 en Punto 2 ( $P_2$ ) ( $38^\circ$ S y $56^\circ$ W)**

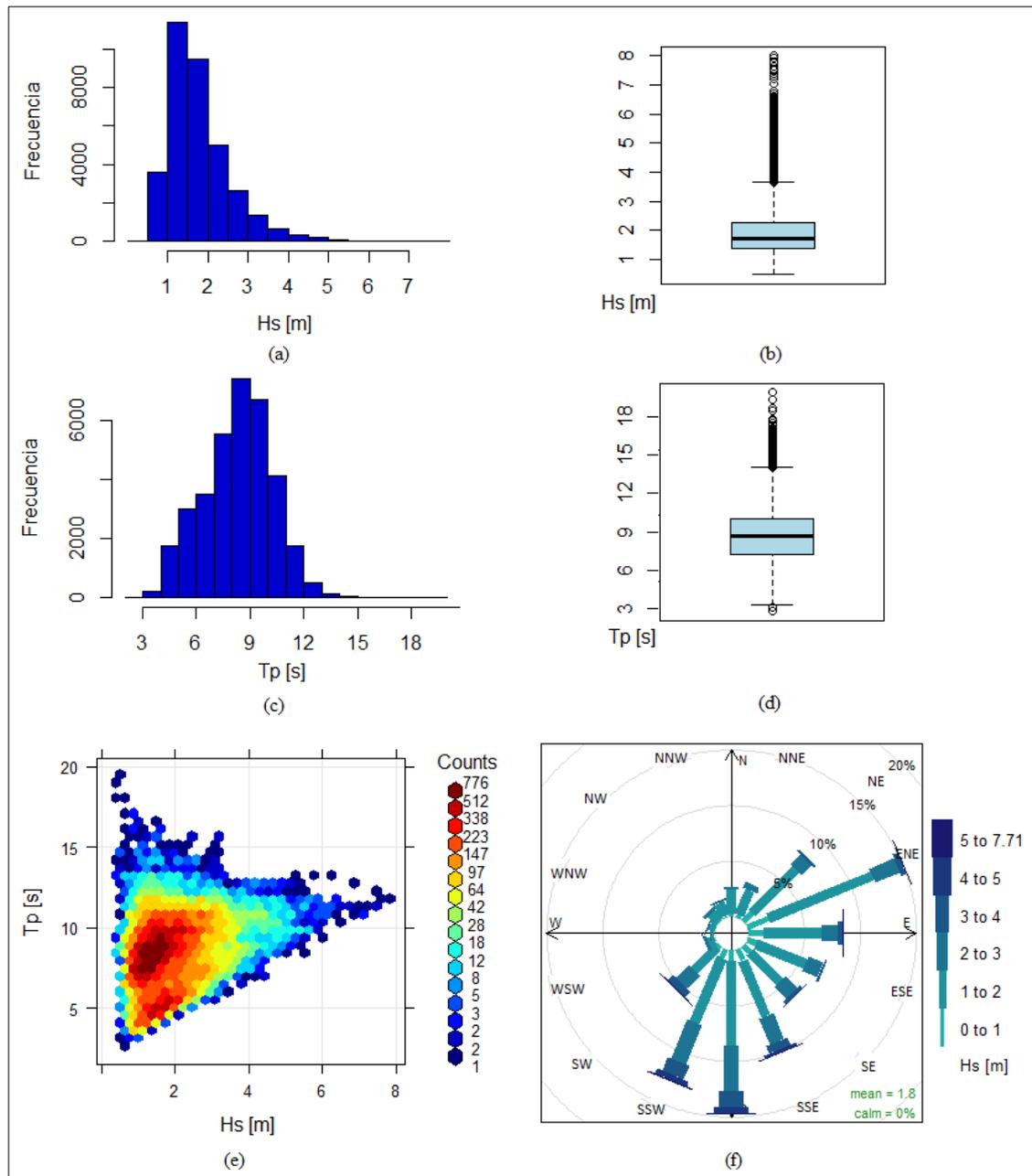
La profundidad en  $P_2$  es de aproximadamente 80 m. El histograma de frecuencias (Fig. 8.a) indica que las alturas más frecuentes son las comprendidas en el rango de 1 m a 2 m, siendo la mediana de 1,61 m. El rango intercuartílico es de 0,89 m, comprendiéndose la mitad de los valores de la serie dentro del rango que va desde 1,25 m a 2,14 m (Fig. 8.b).

Los periodos más frecuentes están entre 7 s y cerca de 10 s, tal como se observa en el histograma de frecuencias (Fig. 8.c). La mediana de la serie es de 8,4 s con un rango intercuartílico de 2,7 s (Fig. 8.d).

En la Fig. 8.e se muestra la distribución conjunta de  $H_s$  y  $T_p$ , donde puede observarse que existe mayor cantidad de ocurrencias en las

combinaciones de alturas comprendidas entre 1 m y 2 m y periodos comprendidos entre 7 s y 10 s principalmente (debido al aporte de oleaje tipo *swell*) y en menor medida entre 4 s y 6 s (debido al oleaje tipo *wind sea*).

La rosa del oleaje para este punto (Fig. 8.f) muestra que existen dos direcciones de olas principalmente predominantes, ENE y S, siendo las olas más elevadas aquellas provenientes del sector S.



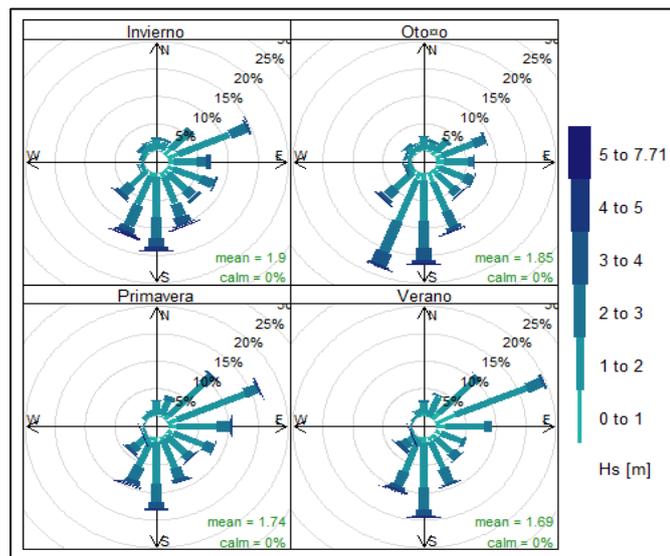
**Fig. 8. Gráficos de estadísticos generales para la serie histórica NWW3 (2005-2016) en P<sub>2</sub> (38° S y 56° W): histograma y diagrama de caja de  $H_s$  (a) y (b) y de  $T_p$  (c) y (d); diagrama de distribución conjunta de  $H_s$ - $T_p$  (e), rosa de oleaje  $H_s$ - $D_p$  (f)**

En la Tabla 2 se presentan las medianas de  $H_s$  y  $T_p$  para cada estación del año. Para ambas variables, la variación es muy leve con valores mayores en otoño-invierno y menores en primavera-verano.

En la Fig. 9 se presentan las rosas de oleaje para cada estación, observándose el predominio de la dirección ENE y S en invierno, primavera y verano. En cambio, en otoño, se observa un claro predominio de la dirección SSW y S. Puede verse también que en general las olas más altas son las provenientes del sector S y que en otoño-invierno las alturas extremas son mayores que en primavera-verano.

**Tabla 2. Medianas de  $H_s$  y  $T_p$  por estación para la serie histórica NWW3 (2005-2016) en  $P_2$  ( $38^\circ$  S y  $56^\circ$  W)**

| Estación  | Mediana $H_s$ [m] | Mediana $T_p$ [s] |
|-----------|-------------------|-------------------|
| Otoño     | 1,65              | 8,8               |
| Invierno  | 1,70              | 8,8               |
| Primavera | 1,57              | 7,3               |
| Verano    | 1,53              | 8,0               |



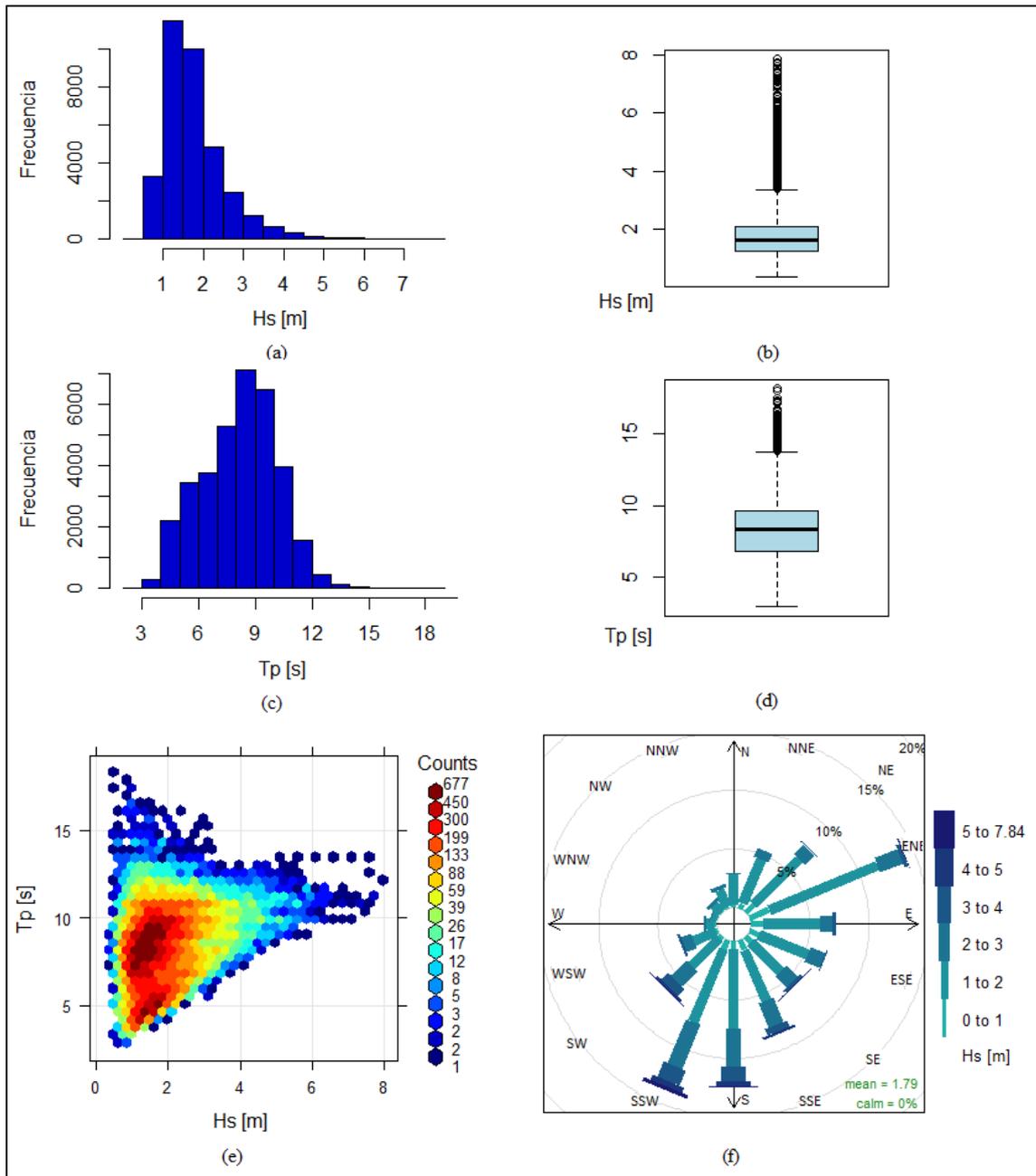
**Fig. 9. Rosas de oleaje  $H_s$ - $D_p$  por estación para la serie histórica NWW3 (2005-2016) en  $P_2$  ( $38^\circ$  S y  $56^\circ$  W)**

### **Análisis de datos NWW3 en Punto 3 ( $P_3$ ) ( $39^\circ$ S y $57^\circ$ W)**

Al igual que en  $P_2$ , la profundidad en  $P_3$  es de aproximadamente 80 m. Las alturas más frecuentes son las comprendidas en el rango de 1 m a 2 m (ver histograma de frecuencias en Fig. 10.a y diagrama de cajas en Fig. 10.b), siendo la mediana de 1,61 m. El rango intercuartílico es de 0,85 m, comprendiéndose la mitad de los valores de la serie dentro del rango que va desde 1,25 m a 2,10 m.

Los periodos más frecuentes están entre 7 s y 10 s, la mediana de la serie es de 8,3 s con un rango intercuartílico de 2,8 s (Fig. 10.c y 10.d).

La distribución conjunta de las alturas de ola y los periodos de pico (Fig. 10*Error! No se encuentra el origen de la referencia.*e) se presenta muy similar a la de  $P_2$ , las zonas de mayor concentración se dan en las combinaciones de alturas comprendidas entre 1 m y 2 m y periodos comprendidos entre 7 s y 10 s (oleaje tipo *swell*) principalmente, y en menor medida para periodos de  $\sim 5$  s (oleaje tipo *wind sea*).



**Fig. 10. Gráficos de estadísticos generales para la serie histórica NWW3 (2005-2016) en P<sub>3</sub> (39° S y 57° W): histograma y diagrama de caja de H<sub>s</sub> (a) y (b) y de T<sub>p</sub> (c) y (d); diagrama de distribución conjunta de H<sub>s</sub>-T<sub>p</sub> (e); rosa de oleaje H<sub>s</sub>-D<sub>p</sub> (f)**

La rosa del oleaje para este punto (Fig. 10.f) indica direcciones de olas predominantes ENE y SSW, observándose olas de mayor altura cuando provienen del SSW que cuando provienen del ENE.

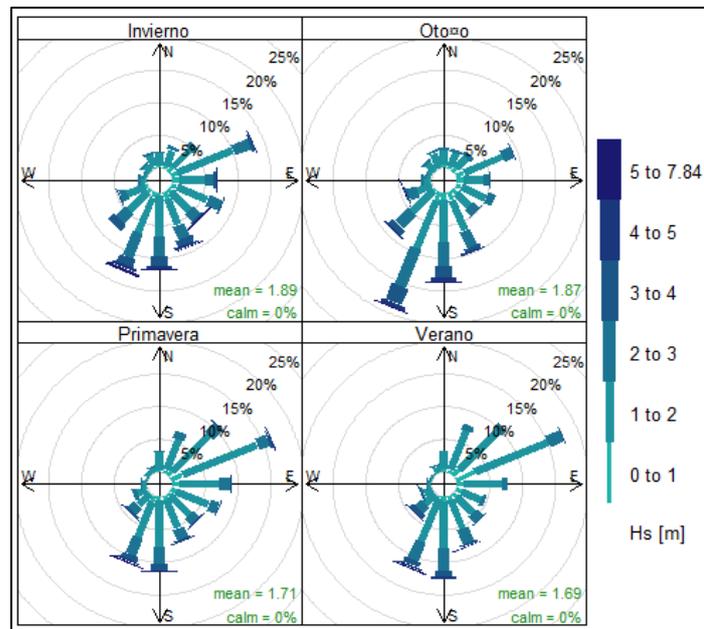
En la Tabla 3 se presentan las medianas de H<sub>s</sub> y T<sub>p</sub> para cada estación del año. Para ambas variables, la variación es muy leve con valores mayores en otoño-invierno y menores en primavera-verano.

En la Fig. 11 se presentan las rosas de oleaje para cada estación. En invierno predominan las direcciones ENE y SSW, en otoño predomina más notablemente la dirección SSW, mientras que en primavera y verano

predominan ENE y S-SSW. Las olas provenientes de los sectores Sur son de mayores alturas que la provenientes del cuadrante NE, especialmente en las estaciones otoño-invierno.

**Tabla 3. Medianas de  $H_s$  y  $T_p$  por estación para la serie histórica NWW3 (2005-2016) en  $P_3$  ( $39^\circ$  S y  $57^\circ$  W)**

| Estación  | Mediana $H_s$ [m] | Mediana $T_p$ [m] |
|-----------|-------------------|-------------------|
| Otoño     | 1,68              | 8,6               |
| Invierno  | 1,69              | 8,7               |
| Primavera | 1,55              | 8,3               |
| Verano    | 1,53              | 7,9               |



**Fig. 11. Rosas de oleaje  $H_s$ - $D_p$  por estación para la serie histórica NWW3 (2005-2016) en  $P_3$  ( $39^\circ$  S y  $57^\circ$  W)**

### Análisis del oleaje *swell*

Se seleccionaron casos representativos de *swell* para los puntos *offshore*  $P_2$  y  $P_3$ . Los criterios de selección fueron: altura significativa de ola mayor a 1 m, periodo pico mayor a 10 s y dirección pico de ola difiera en más de  $45^\circ$  con la dirección del viento. La cantidad de ocurrencias es similar en ambos puntos (representan el 13 % del conjunto de datos). Otoño e invierno tienen la mayor cantidad de casos, doblando las cantidades de primavera y verano respectivamente. Las medianas de  $H_s$  y  $T_p$  (Tabla 4) tienen valores muy similares en ambos puntos, siendo las diferencias despreciables. Los valores generales son 2 m para  $H_s$  y 10,8 s para  $T_p$ .

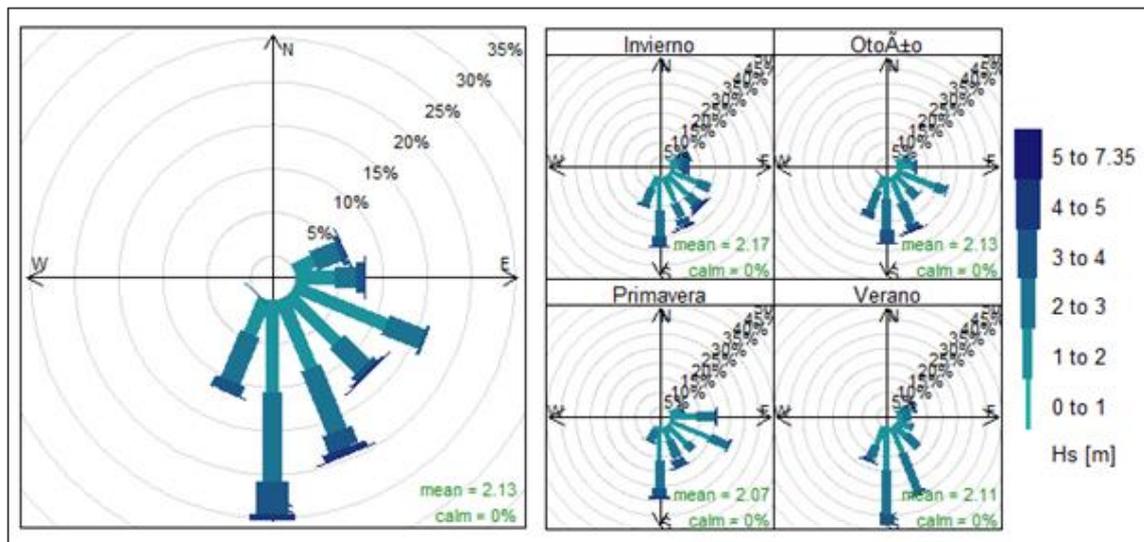
**Tabla 4. Medianas de H<sub>s</sub> y T<sub>p</sub> generales y estacionales para los casos de swell.**

|                      | P <sub>2</sub> (38° S y 56° W) |      |      |      |      | P <sub>3</sub> (39° S y 57° W) |      |      |      |      |
|----------------------|--------------------------------|------|------|------|------|--------------------------------|------|------|------|------|
|                      | Gral.                          | Oto. | Inv. | Pri. | Ver. | Gral.                          | Oto. | Inv. | Pri. | Ver. |
| <b>H<sub>s</sub></b> | <b>2,01</b>                    | 2,03 | 1,99 | 1,92 | 2,09 | <b>1,99</b>                    | 2,01 | 1,98 | 1,90 | 2,07 |
| <b>T<sub>p</sub></b> | <b>10,8</b>                    | 11,0 | 10,8 | 10,6 | 10,7 | <b>10,8</b>                    | 10,9 | 10,7 | 10,6 | 10,7 |

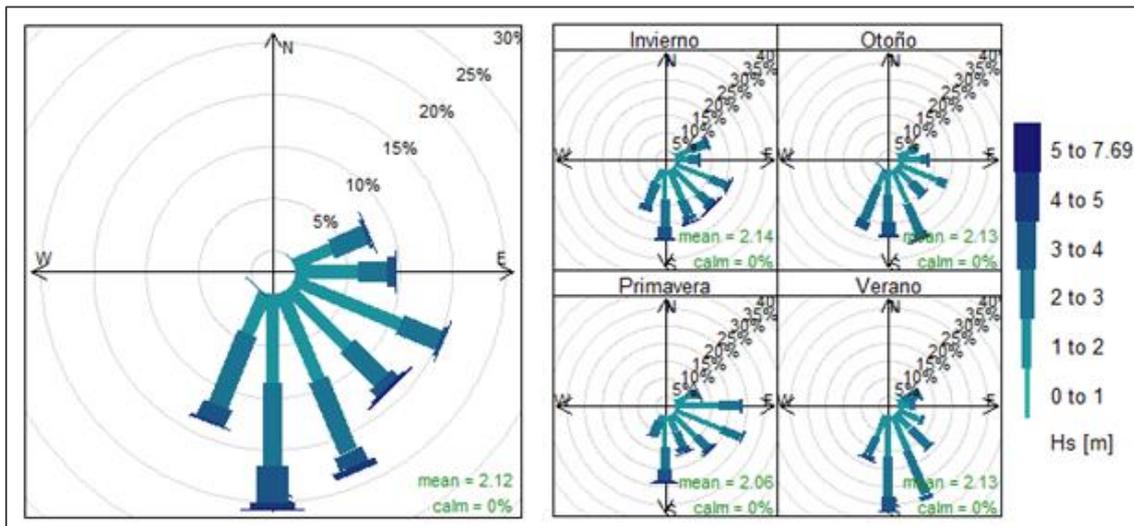
En ambos puntos, la totalidad de los eventos provienen del sector comprendido entre las direcciones ENE y SSW, con predominio principal de la dirección S y la SSE en segundo lugar. En tercer lugar, hay componentes importantes en las direcciones SSW, SE y ESE (**iError! No se encuentra el origen de la referencia.** y **iError! No se encuentra el origen de la referencia.**). En verano, la mayoría de los eventos provienen de las direcciones S y SSE, mientras que en las otras estaciones los eventos están más distribuidos.

En ambos puntos, la totalidad de los eventos provienen del sector comprendido entre las direcciones ENE y SSW, con predominio principal de la dirección S y la SSE en segundo lugar. En tercer lugar, hay componentes importantes en las direcciones SSW, SE y ESE (**iError! No se encuentra el origen de la referencia.** y **iError! No se encuentra el origen de la referencia.**). En verano, la mayoría de los eventos provienen de las direcciones S y SSE, mientras que en las otras estaciones los eventos están más distribuidos.

### **Análisis de datos NWW3 de vientos**



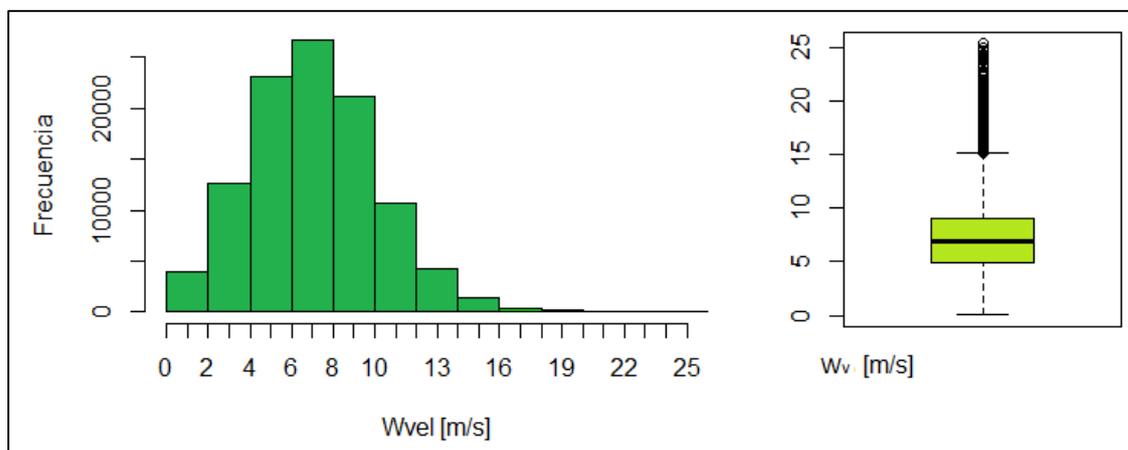
**Fig. 12. Rosa de olas general y estacional de los casos de swell en P<sub>2</sub> (38° S y 56° W)**



**Fig. 13. Rosa de olas general y estacional de los casos de swell en P<sub>3</sub> (39° S y 57° W)**

En las simulaciones, el viento se consideró constante y homogéneamente distribuido en el área modelada. Es decir, solo se ingresó un valor de velocidad y dirección del viento por simulación. Por ello, los datos de vientos de los tres puntos se analizaron conjuntamente, construyéndose con ellos una única serie.

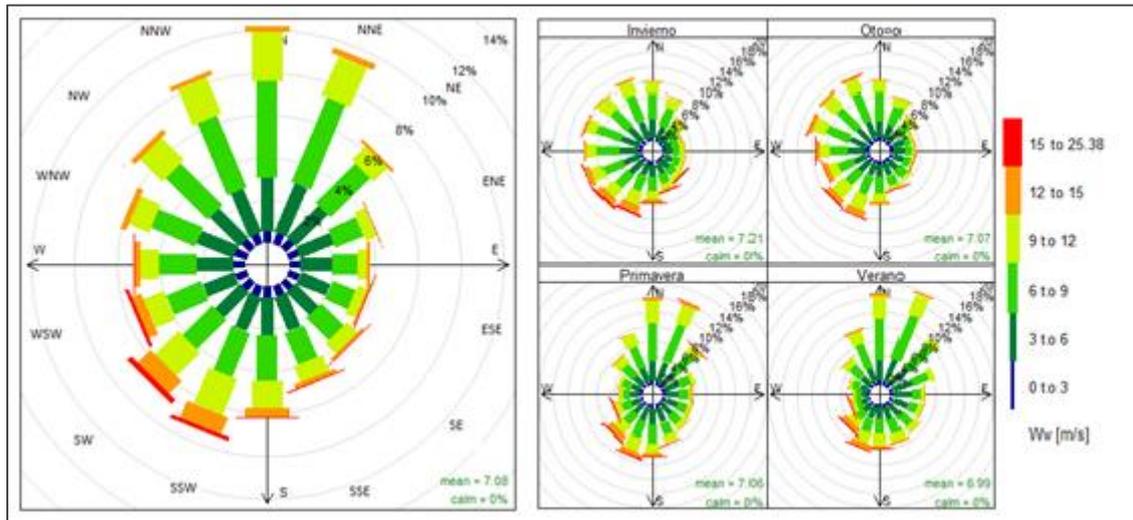
Las velocidades más frecuentes son las comprendidas entre 6 m/s y 8 m/s. La mediana de la serie es 6,93 m/s y el rango intercuartílico de 4 m/s, comprendiéndose la mitad de los valores de la serie dentro del rango que va desde 5 m/s a 9 m/s (ver histograma de frecuencias y en el diagrama de cajas en Fig. 14).



**Fig. 14. Histograma y diagrama de caja de la velocidad del viento (Wv) la serie histórica NWW3 (2005-2016)**

La rosa de vientos general (**iError! No se encuentra el origen de la referencia.**) muestra una distribución bastante homogénea de las direcciones de procedencia del viento, siendo la dirección N ligeramente preponderante para los vientos de velocidades medias más frecuentes y en segundo lugar la dirección SSW para los vientos con las velocidades más altas. Hay diferencias importantes en la distribución direccional por

estación. En otoño e invierno predominan en general los vientos continentales con una muy ligera preponderancia de las direcciones del cuadrante NW, mientras que en primavera y verano predominan fuertemente la dirección N y NNE. Durante los eventos de *swell*, predominan los vientos provenientes del sector comprendido entre las direcciones WNW y NNE, con predominio principal de la dirección N.



**Fig. 15. Rosa de los vientos general y estacionales para la serie histórica NWW3 (2005-2016)**

**Tabla 5. Condiciones de borde utilizadas en las simulaciones generales y estacionales**

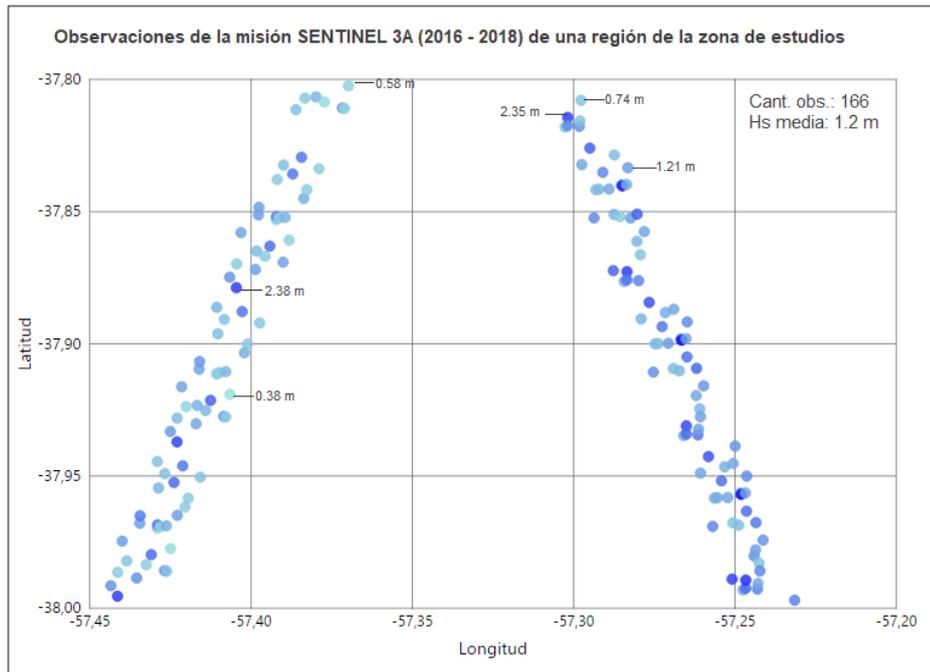
| Simulación     |             | Borde N               |                       |                       | Borde E               |                       |                       | Borde S               |                       |                       | Viento<br>(a 10 m de altura) |                       |       |
|----------------|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-------|
| Nº             | Descripción | H <sub>s</sub><br>(m) | T <sub>p</sub><br>(s) | D <sub>p</sub><br>(°) | H <sub>s</sub><br>(m) | T <sub>p</sub><br>(s) | D <sub>p</sub><br>(°) | H <sub>s</sub><br>(m) | T <sub>p</sub><br>(s) | D <sub>p</sub><br>(°) | W <sub>v</sub><br>(m/s)      | W <sub>d</sub><br>(°) |       |
| <b>GRUPO 1</b> | 1           | General 1             | 1,03                  | 7,2                   | 112,5                 | 1,61                  | 8,4                   | 67,5                  | 1,61                  | 8,3                   | 67,5                         | 6,93                  | 0     |
|                | 2           | Otoño 1               | 1,00                  | 7,7                   | 112,5                 | 1,65                  | 8,8                   | 67,5                  | 1,68                  | 8,6                   | 67,5                         | 6,92                  | 315   |
|                | 3           | Invierno 1            | 1,02                  | 7,9                   | 112,5                 | 1,70                  | 8,8                   | 67,5                  | 1,69                  | 8,7                   | 67,5                         | 7,00                  | 315   |
|                | 4           | Primavera 1           | 1,05                  | 6,9                   | 112,5                 | 1,57                  | 7,3                   | 67,5                  | 1,55                  | 8,3                   | 67,5                         | 6,91                  | 11    |
|                | 5           | Verano 1              | 1,04                  | 6,2                   | 90                    | 1,53                  | 8,0                   | 67,5                  | 1,53                  | 7,9                   | 67,5                         | 6,89                  | 11    |
| <b>GRUPO</b>   | 6           | General 2             | 1,03                  | 7,2                   | 157,5                 | 1,61                  | 8,4                   | 180                   | 1,61                  | 8,3                   | 202,5                        | 6,93                  | 202,5 |
|                | 7           | Otoño 2               | 1,00                  | 7,7                   | 157,5                 | 1,65                  | 8,8                   | 202,5                 | 1,68                  | 8,6                   | 202,5                        | 6,92                  | 214   |

|                      |    |             |      |     |       |      |      |     |      |      |       |      |       |
|----------------------|----|-------------|------|-----|-------|------|------|-----|------|------|-------|------|-------|
| <b>P<br/>O<br/>2</b> | 8  | Invierno 2  | 1,02 | 7,9 | 157,5 | 1,70 | 8,8  | 180 | 1,69 | 8,7  | 202,5 | 7,00 | 236   |
|                      | 9  | Primavera 2 | 1,05 | 6,9 | 157,5 | 1,57 | 7,3  | 180 | 1,55 | 8,3  | 191   | 6,91 | 202,5 |
|                      | 10 | Verano 2    | 1,04 | 6,2 | 157,5 | 1,53 | 8,0  | 180 | 1,53 | 7,9  | 191   | 6,89 | 202,5 |
|                      | 11 | Swell       | -    | -   | -     | 2,00 | 10,8 | 170 | 2,00 | 10,8 | 170   | 6,93 | 0     |

Se ejecutaron 11 simulaciones introduciendo los valores de la Tabla 5 como condiciones de borde. Obsérvese en dicha tabla, que hay 10 simulaciones agrupadas en dos conjuntos de 5 simulaciones cada uno (una general y una por cada estación). En el grupo 1 se consideran las direcciones de vientos provenientes del sector N (NW, N y N-NNE) conjuntamente con las direcciones del oleaje predominantes del sector ENE y en menor medida del sector ESE y E. Por otra parte, en el grupo 2 se consideran las direcciones de vientos provenientes del sector SSW (WSW, SW y SSW) combinadas con direcciones del oleaje también provenientes del sector S (SSW, S y SSE). La simulación N° 11 se realizó con los valores representativos de los casos de *swell*.

### **Validación parcial de resultados**

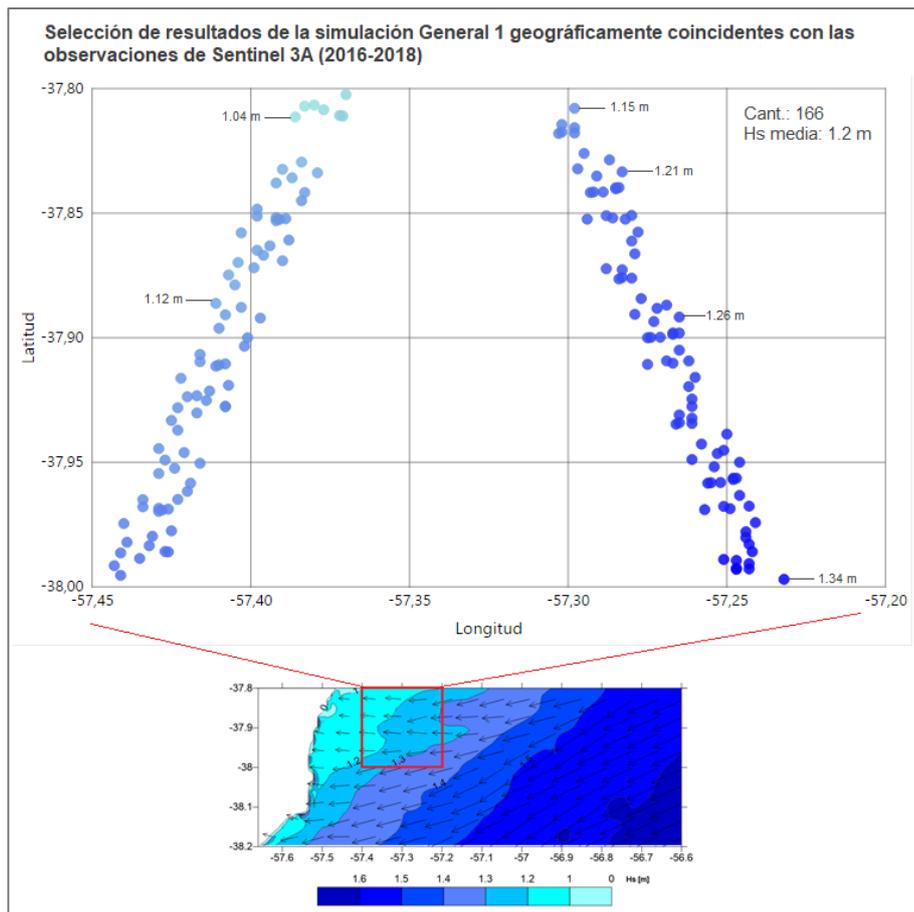
En la Fig. 16 se han graficado las observaciones mediante altimetría satelital de altura significativa de olas correspondientes a la misión SENTINEL-3A coincidentes geográficamente con una región de la zona de estudios (latitudes 38°S y 37,8°S y longitudes 57,44 °W y 57,23 °W). Los valores van desde los 0,38 m hasta los 3,14 m y se encuentran representados por la intensidad del color, siendo los puntos de color más intenso aquellos que representan observaciones de alturas más elevadas. La altura significativa media de este conjunto de observaciones es de 1,2 m.



**Fig. 16. Observaciones de  $H_s$  de la misión SENTINEL-3A de una porción de la zona de estudios para los años 2016-2018**

Con el objetivo de validar parcialmente los resultados de las simulaciones, se han extraído de las simulaciones generales, los resultados correspondientes a las mismas ubicaciones geográficas que el conjunto de observaciones satelitales y se ha calculado la media aritmética de ambos conjuntos. En la Fig. 17 se representan gráficamente los valores de altura de olas extraídos de la simulación General 1 y la respectiva miniatura de la región de la zona de estudios a la cual pertenecen.

La media aritmética para el conjunto de resultados extraídos de la simulación General 1 es de 1,2 m, coincidiendo exactamente con la media aritmética del conjunto de observaciones satelitales. La media aritmética para el conjunto de resultados extraídos de la simulación General 2 es de 1,24 m. La coincidencia de las medias aritméticas de ambos conjuntos de datos con respecto a al conjunto de observaciones satelitales, permiten validar parcialmente los resultados de las simulaciones.



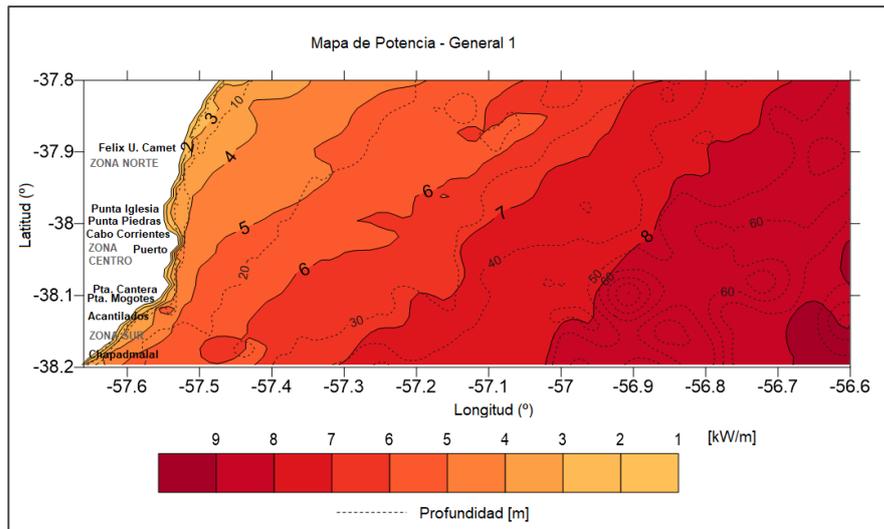
**Fig. 17. Gráfico de resultados de la simulación General 1 geográficamente coincidentes con las observaciones de SENTINEL-3A**

### Cálculo de potencia undimotriz

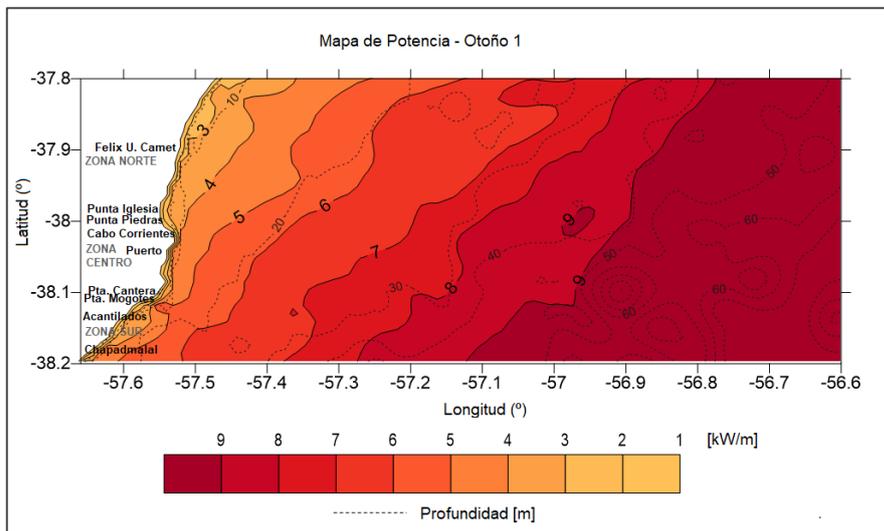
A partir de las salidas de cada simulación, se calculó la potencia undimotriz utilizando la ecuación (1) para aguas profundas ( $h > \lambda/2$ ), (2) para aguas intermedias ( $\lambda/20 \leq h \leq \lambda/2$ ) y (3) para aguas someras ( $h < \lambda/20$ ).

### Resultados

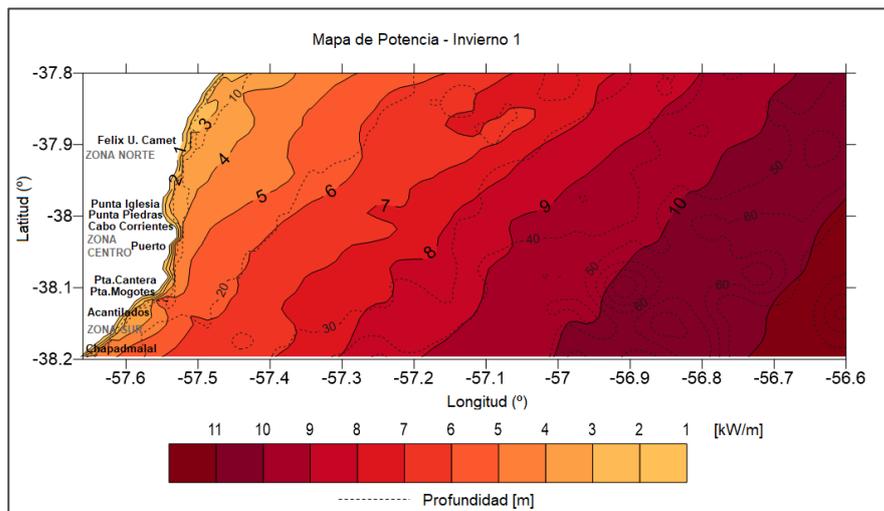
En las Figuras 18 a 28 se presentan los mapas de potencia del oleaje en kW/m (también se muestra la profundidad en línea de puntos).



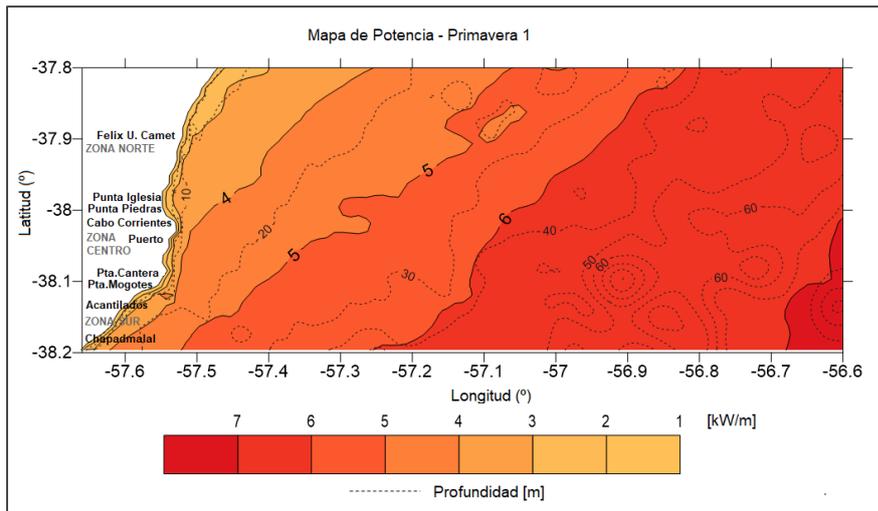
**Fig. 18. Mapa de potencias en kW/m – General 1**



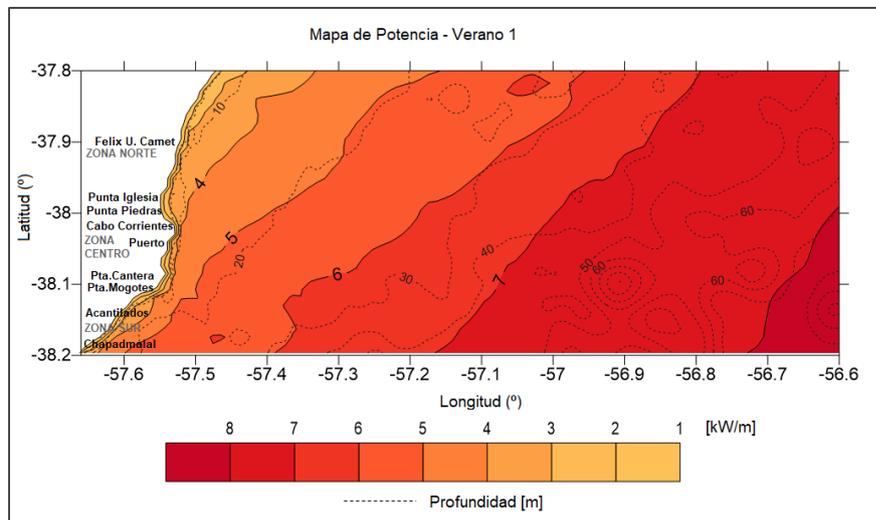
**Fig. 19. Mapa de potencias en kW/m – Otoño 1**



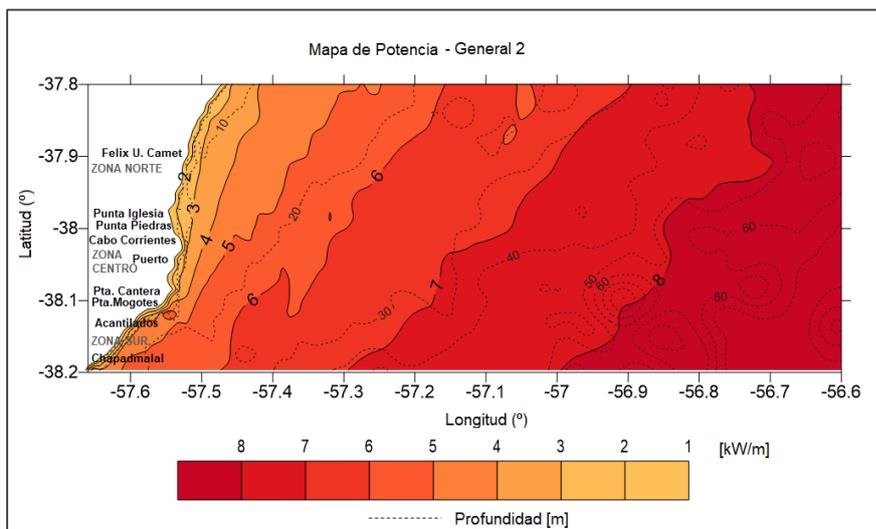
**Fig. 20. Mapa de potencias en kW/m – Invierno 1**



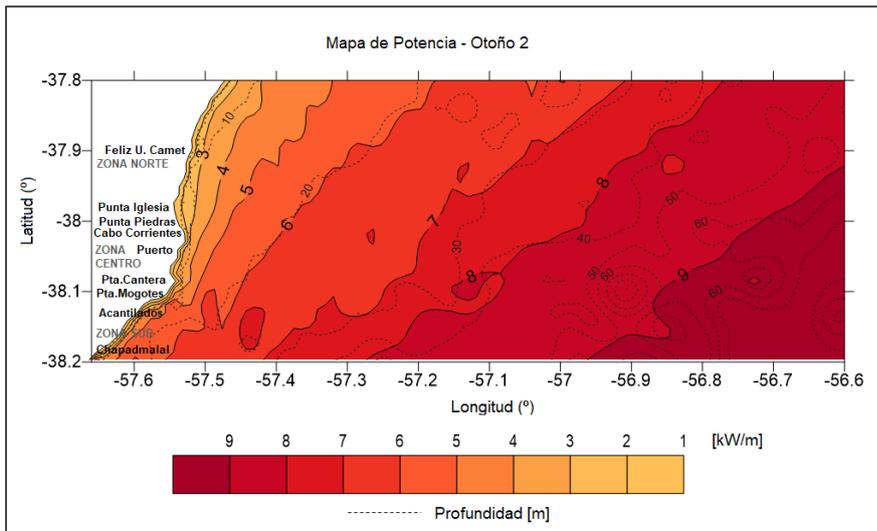
**Fig. 21. Mapa de potencias en kW/m – Primavera 1**



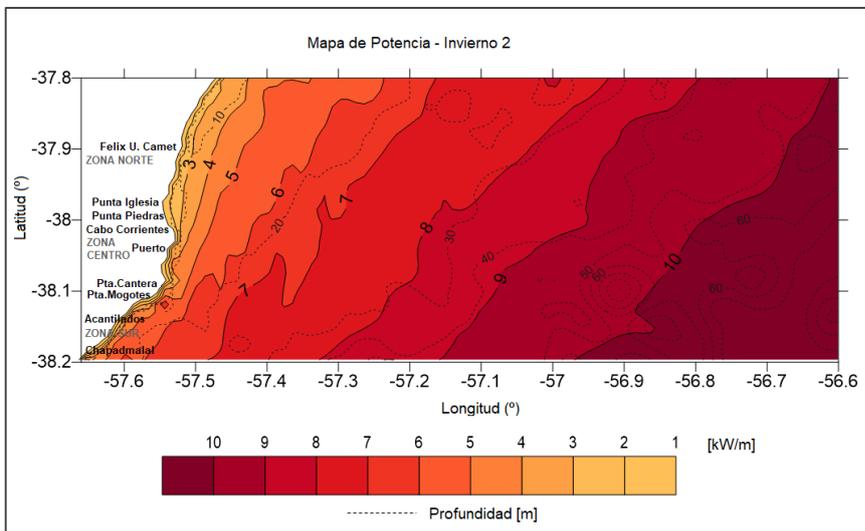
**Fig. 22. Mapa de potencias en kW/m – Verano 1**



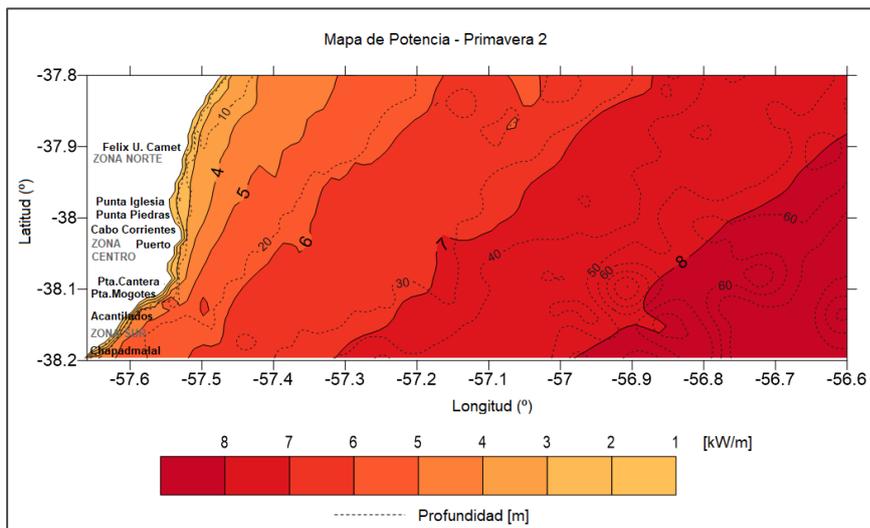
**Fig. 23. Mapa de potencias en kW/m – General 2**



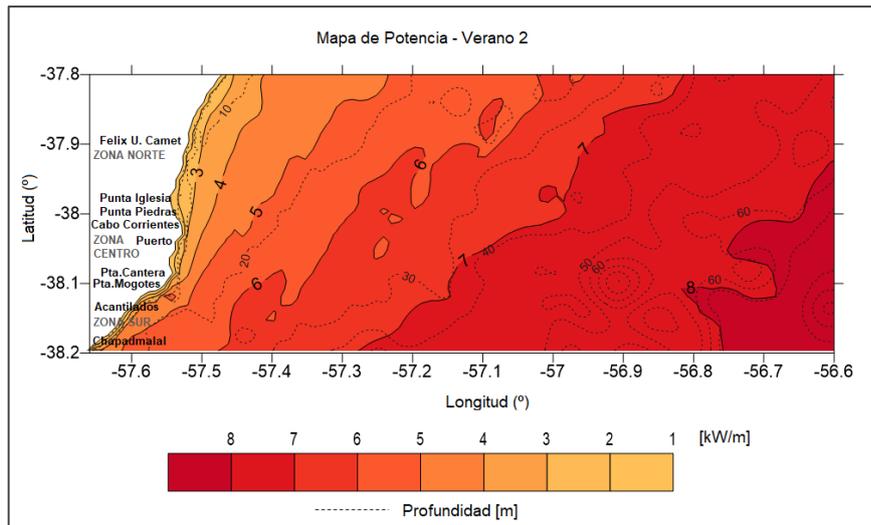
**Fig. 24. Mapa de potencias en kW/m – Otoño 2**



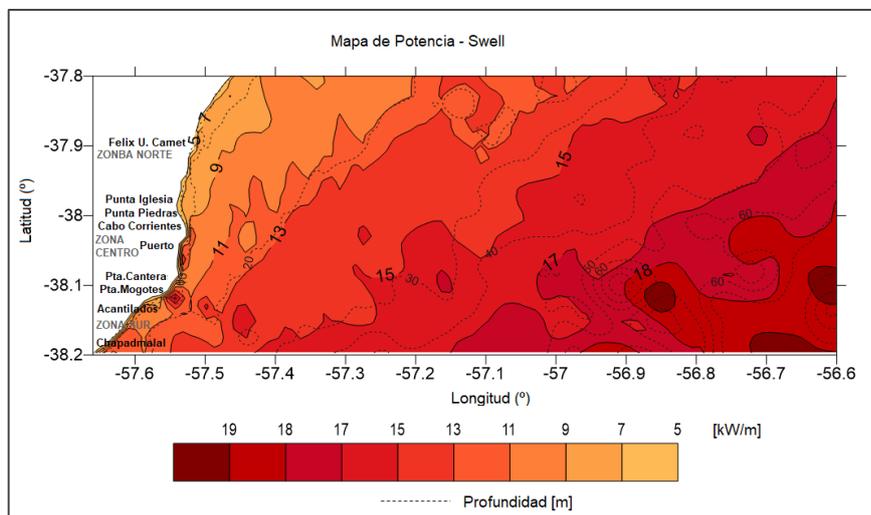
**Fig. 25. Mapa de potencias en kW/m – Inviernos 2**



**Fig. 26. Mapa de potencias en kW/m – Primavera 2**



**Fig.27. Mapa de potencias en kW/m - Verano 2**



**Fig.28. Mapa de potencias en kW/m - Swell**

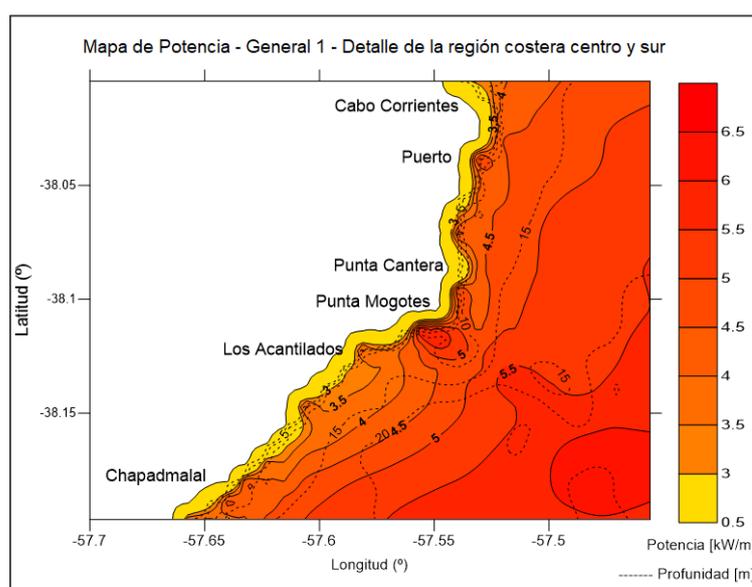
## Discusión

Las potencias aprovechables ( $> 5$  kW/m) más cercanas a la costa se obtienen en el Sur de la zona de estudios a aproximadamente 5 km, existiendo una distancia de más del doble en la zona central y de 4; 5 o más veces en la zona Norte, respecto a la zona Sur. La situación menos energética se da en primavera con dirección de oleaje preponderante ENE ya que las potencias aprovechables están disponibles a distancias de aproximadamente 11 km de la costa.

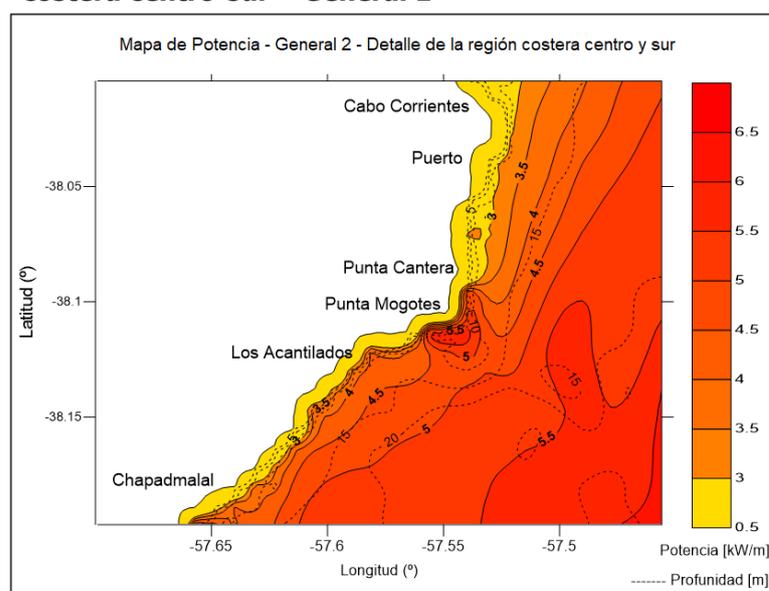
En todos los casos aparece en mayor o menor medida una zona de mayor concentración al sur de Punta Mogotes ( $\sim 2-3$  km de la costa), donde la potencia es más elevada ( $\sim 4-6$  kW/m) que la franja de valores preponderante en esa región.

La mayor variabilidad estacional se observa entre invierno y primavera cuando la dirección de propagación del oleaje es ENE, donde se da una diferencia de hasta 2 kW/m en profundidades menores a los 30 m y diferencias de hasta 4 kW/m en profundidades mayores a 30 m.

Los sitios de preferencia para la instalación de un prototipo convertidor son aquellos donde puede obtenerse una potencia adecuada para su funcionamiento y a su vez la mayor cercanía posible a la costa para disminuir los costos de instalación y mantenimiento. En la zona de estudio, las mejores condiciones se observan en la zona centro y sur de la misma, por ello, en las Figuras 29 y 30 se presentan mapas de dicha porción costera con mayor detalle. En color amarillo, las franjas de potencias



**Fig. 29. Mapa de potencia en kW/m de la región costera centro-sur – General 1**



**Fig.30. Mapa de potencia en kW/m de la región costera centro-sur – Genera 2**

menores a 3 kW/m. cuando las olas se aproximan desde la dirección ENE (General 1) se producen potencias más altas cerca de la costa en la zona centro (Cabo Corrientes, Puerto), mientras que cuando las olas se aproximan desde el sector Sur (General 2) se producen potencias más altas cerca de la costa en la zona Sur (Punta Mogotes, Los Acantilados). En ambos casos, al sur de Punta Mogotes se presenta una zona interesante con potencias de hasta 5,5 kW/m.

En esta región de cercanía a la costa, las potencias máximas obtenibles son de alrededor de 5 kW/m, solo en otoño e invierno se superan los 6 kW/m a profundidades mayores a 20 m. Son potencias adecuadas para testeado de prototipos y proyectos pilotos *nearshore* de demostración.

## Conclusiones

Del estudio del clima de olas en aguas profundas se concluye que: las alturas son mayores en las estaciones de otoño e invierno con respecto a primavera y verano; en general se destacan dos grupos de direcciones de oleaje preponderantes, ENE, E y ESE en primer lugar y SSW, S y SSE en segundo lugar, obteniéndose alturas de olas levemente superiores cuando ocurren las del segundo grupo; los oleajes tipo swell provienen del sector comprendido por las direcciones ENE y SSW, con predominio de las direcciones S/SSW, comprenden solo un 13 % de las observaciones y si bien ocurren en todas las estaciones, la mayor ocurrencia se da en otoño.

Del análisis de los mapas de potencias se concluye que el potencial undimotriz aumenta gradualmente en dirección ESE, presentándose los valores más elevados (7-11 kW/m) en el extremo SE de la zona de estudio. Cerca de la costa las potencias disminuyen y no son tan atractivas como en aguas profundas. En general, las potencias mayores a 5 kW/m comienzan a darse a unos 5 km de la costa en la zona S (excepto en primavera donde la distancia puede duplicarse). Merece atención, una zona al sur de Punta Mogotes, a unos 2,5 km de la costa, donde se observan en general potencias del orden de los 5 kW/m, mayores a las de la región circundante.

Existe cierta variabilidad estacional a considerar, dado que las mejores potencias se dan en invierno y la situación menos favorable en primavera, pudiendo llegar hasta 4 kW/m de diferencia en profundidades mayores a 30 m.

Las mejores condiciones de oleajes se encuentran alejadas de la costa, lo que eleva el costo de instalación, operación y mantenimiento de los equipos. Sin embargo, los valores obtenidos demuestran que es posible ubicar granjas *nearshore* de demostración, proyectos piloto y testeado de prototipos.

Un sitio adecuado para instalar el prototipo de la UTN es en las cercanías del puerto hacia el Sur (cuanto más cercano al puerto sea el sitio menor será el gasto de combustible para el traslado vía marítima tanto para su

instalación como para su mantenimiento). Al Sur del puerto los potenciales mayores a 5 kW/m se encuentran más cercanos a la costa (aprox. 5 km) que al Norte del mismo. Otro sitio candidato para ser tenido en cuenta es al sur de Punta Mogotes donde existe una región cuya topografía favorece la concentración energética. No obstante, este sitio se encuentra en las cercanías del área protegida Las Restingas del Faro Punta Mogotes, lo cual podría ser un impedimento para este tipo de proyectos.

## Referencias

- CAVIA DEL OLMO, B., (2009). Explotación del potencial de energía del oleaje en función del rango de trabajo de prototipos captadores. Tesina de grado no publicada, Universitat Politècnica de Catalunya. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/8720/00.pdf>
- CZECH, B., & BAUER, P., (2012). Wave Energy Converter Concepts : Design Challenges and Classification. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 6, 4-16. doi:10.1109/MIE.2012.2193290
- FALNES, J., (2007). A review of wave-energy extraction. *Marine Structures*, 20, 185–201. doi:10.1016/j.marstruc.2007.09.001
- MARTOS, P., RETA, R., & GUERRERO, R., (2004). El ambiente físico de las costas marplatenses: su clima y sus aguas. En E. Boschi, & M. Cousseau (Edits.), *La vida entre mareas: vegetales y animales de las costas de Mar del Plata, Argentina* (1a ed.). Mar del Plata: INIDEP.
- MULTON, B., (2012). *Marine Renewable Energy Handbook*. Reino Unido y Estados Unidos: ISTE Ltd. y John Wiley & Sons, Inc.
- RIBAL, A., & YOUNG, I. R., (2019). 33 years of globally calibrated wave height and wind speed data based on altimeter observations Background and Summary. Melbourne. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/330546310>
- STOPA, J. E., FILIPOT, J.-F., LI, N., CHEUNG, K. F., CHEN, Y.-L., & VEGA, L., (2013). Wave energy resources along the Hawaiian Island chain. *Renewable Energy*, 55, 305-321. doi:10.1016/j.renene.2012.12.030
- WAVE ENERGY CENTRE, (2004). *Potential and Strategy for the Development of Wave Energy in Portugal*. Obtenido de [http://www.wavec.org/content/files/DGGE\\_sumario\\_executivo\\_ING\\_2004.pdf](http://www.wavec.org/content/files/DGGE_sumario_executivo_ING_2004.pdf)