

# Naturaleza dispersiva de los swells que llegan a Canarias desde el Atlántico Sur. Estudio del caso paradigmático de los eventos registrados durante el verano de 2023

*The dispersive nature of the swells that reach the Canary Islands from the South Atlantic. The paradigmatic case study of events recorded during the summer of 2023*

Emilio Megías <sup>a1,b\*</sup> y Manuel García-Román <sup>a2</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Náutica y Marítima de la Universidad de La Laguna. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería. Av. Ángel Guimerá Jorge. La Laguna. S/C de Tenerife. Islas Canarias. CP 38200. España.

<sup>b</sup> Satocan SA. C/ Fraternidad. La Laguna. S/C de Tenerife. Islas Canarias. CP 38296. España.

E-mail: <sup>a1\*</sup>emegiasd@ull.edu.es, <sup>a2</sup>mroman@ull.edu.es

\*Autor para correspondencia

Recibido: 15/09/2024

Aceptado: 23/10/2024

Publicado: 31/10/2024

**Citar como:** Megías, E., García-Román, M. 2024. The dispersive nature of the swells that reach the Canary Islands from the South Atlantic. The paradigmatic case study of events recorded during the summer of 2023. *Ingeniería del agua*, 28(4), 297-309. <https://doi.org/10.4995/ia.2024.22425>

---

## RESUMEN

El oleaje de mar de fondo plenamente desarrollado que alcanza Canarias procedente del hemisferio sur, caracterizado por alturas de ola moderadas y periodos largos, es generalmente difícil de distinguir. Sin embargo, las condiciones extraordinarias de calma permitieron a la boya de Puertos del Estado en el sur de Tenerife detectarlo de forma continuada durante el mes de agosto de 2023. En este trabajo se estudia la naturaleza dispersiva y se estima la distancia recorrida por el oleaje de tipo *swell* que llegó a Canarias procedente del sur en ese periodo. Contrastando estos resultados con los datos del modelo Wavewatch III del NOAA, se infiere que el área de generación de este oleaje se sitúa en la zona extratropical del Atlántico Sur, donde la actividad ciclónica es notable a lo largo de todo el año, y más aún durante el invierno austral.

**Palabras clave** | clima marítimo; Islas Canarias; mar de fondo; Océano Atlántico; hemisferio sur; ciclones extra tropicales.

---

## ABSTRACT

*The very mature swell reaching the Canary Islands from the southern hemisphere, characterized by moderate wave heights and long periods, is generally difficult to distinguish. However, the extraordinary calm conditions during August 2023 allowed the Puertos del Estado buoy in southern Tenerife to continuously detect it. This work studies the dispersive nature and estimates the distance traveled by the swell-type waves that reached the Canary Islands from the south during that period. By comparing these results with data from NOAA's Wavewatch III model, it is inferred that the generation area of this swell is located in the extratropical region of the South Atlantic, where cyclonic activity is notable throughout the year, and especially during the austral winter.*

**Key words** | wave climate; Canary Islands; swell; Atlantic Ocean; southern hemisphere; extratropical cyclones.

## INTRODUCCIÓN

A las Islas Canarias llega desde el hemisferio sur un tipo de mar de fondo, plenamente desarrollado, cuyas características fundamentales son sus limitadas alturas y frecuencias (Portillo *et al.*, 2007). Estas características complican su detección dentro del complejo estado de la mar que habitualmente se da en el Archipiélago (Megías, 2021).

El estudio del oleaje de esta índole es muy interesante por diversas razones: por un lado, da la oportunidad de comprobar las importantes transformaciones que sufre el oleaje tipo *swell* tras realizar travesías extremas como es este caso. Ya existen estudios muy interesantes sobre la transformación que sufre el mar de fondo al recorrer distancias de este calibre, algunos ya clásicos (Barber y Ursell, 1948; Snodgrass *et al.*, 1966; Ewans, 2001), pero la bibliografía referente a este tipo de *swells* originados en el Atlántico Sur que llegan a la región macaronésica es escasa.

Por otro lado, también es de gran interés estudiar de primera mano el comportamiento de este oleaje en costas con una plataforma costera como la de Canarias, que, comparada con la plataforma continental, es muchísimo más escasa y escarpada. Hay que recordar que la combinación de la acción de oleaje con largos periodos y bajo peralte a su llegada a costas de pendientes pronunciada, tendrá como resultado una escasa disipación y un elevado remonte (Grassa-Garrido, 2018).

Para este estudio se han aprovechado las especiales condiciones de calma acaecidas durante el mes de agosto del año 2023, que permitieron a la boya de aguas profundas que Puertos del Estado mantiene al Sur de Tenerife (en adelante, boya REDEX TF), el registro de este oleaje de forma continuada. Es importante remarcar que el mes de agosto es el mes central del invierno austral, momento de máxima intensidad de la actividad ciclónica de la zona extra tropical del Atlántico Sur (Crespo *et al.*, 2020).

También se ha acudido, como información complementaria, a las salidas del modelo de oleaje *Wavewatch III* (WW3 en adelante), desarrollado por el *National Oceanic and Atmospheric Administration* norteamericano (NOAA). El dominio a nivel planetario de este modelo lo convierte en una herramienta muy útil para el estudio de este tipo de *swells* transhemisféricos. La descripción de este modelo de oleaje de tercera generación puede consultarse en (WW3DG, 2019).

El objetivo de este trabajo es estudiar el carácter dispersivo de los *swells* que llegan a Canarias desde las zonas extra tropicales del hemisferio sur. Al ser tan grande la distancia recorrida por este oleaje, su ordenación según su celeridad es clara, lo que permite su estudio preciso a partir de la evolución a lo largo del tiempo de los valores de los parámetros obtenidos a partir de registros instrumentales (altura, periodo y dirección).

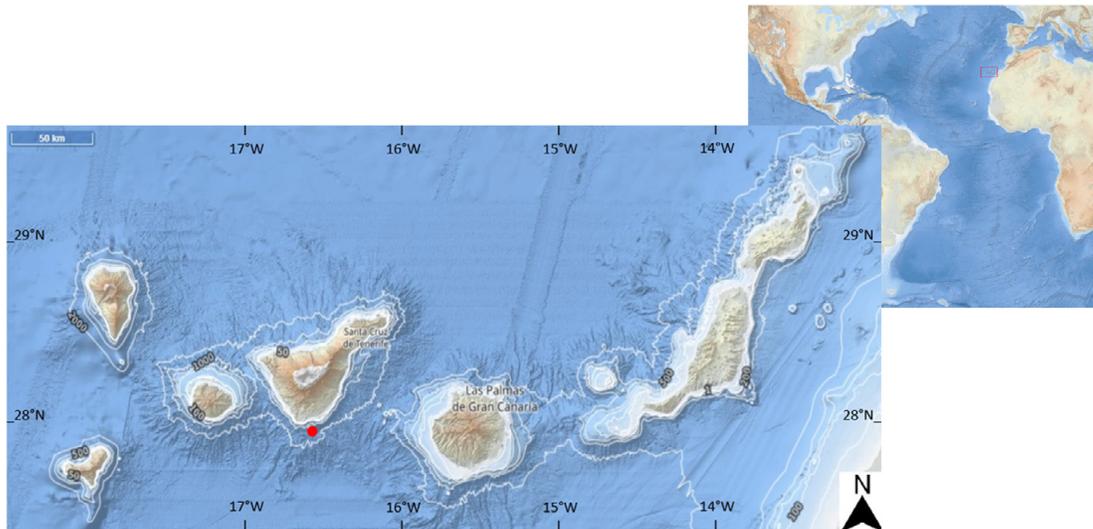
## Área de estudio

El Archipiélago Canario es un conjunto de islas de origen volcánico localizado en el Océano Atlántico Norte, entre los 27° y 29° de latitud Norte y los 13° y 18° de longitud Oeste. Está formado por 7 islas mayores, 4 islas menores y varios roques (Figura 1).

Forma parte de la región macaronésica, y está situado al norte de Cabo Verde, al sur de Madeira, y al oeste de la costa africana, estando distanciada de esta aproximadamente unos 100 km. Por su posición geográfica, el Archipiélago se expone a unos *fetchs* geográficos excepcionalmente largos al norte, sur, y oeste.

El origen de estas islas volcánicas de intraplaca está asociado a la actividad de un punto caliente (Carracedo, 2011). A diferencia de otros archipiélagos de este tipo, como el de Hawái, no se da de forma importante el fenómeno de subsidencia, lo que puede ser explicado por la gran antigüedad y rigidez de la corteza oceánica sobre la que se asientan. Esto permite que los edificios volcánicos del Archipiélago permanezcan emergidos durante más de 20 millones de años, siendo el orden de afloramiento de las islas el siguiente: Fuerteventura y Lanzarote, Gran Canaria, Tenerife, La Gomera, La Palma, y por último El Hierro (Troll y Carracedo, 2016).

Si se pudiera drenar el océano que circunda Canarias, aparecería un impresionante conjunto de edificios volcánicos coronados por el estratovolcán Teide, con una altura total de casi 8000 m. Debido a la mayor acción erosiva sufrida en las islas orientales, mucho más antiguas que las occidentales, su estructura será de menor altura, y contarán con unas plataformas costeras más amplias y de pendiente menos acusada.



**Figura 1** | Archipiélago Canario, de este a oeste: Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria, Tenerife, La Gomera, La Palma y El Hierro (Fuente: <https://emodnet.ec.europa.eu/geoviewer/>). Se ha marcado en rojo la posición de la boya REDEXT TF.

El clima marítimo del Archipiélago es del tipo multimodal, muy complejo (Lobeto, 2022), donde conviven mar de fondo proveniente de los dos hemisferios, junto al mar de viento cuyo origen principal son los vientos alisios tan persistentes en Canarias. Son precisamente esos vientos alisios, junto a la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la corriente de Canarias y la propia orografía de los edificios insulares los factores que quizás más influyan en el clima (y no solo el marítimo) de la zona (Megías, 2024).

El mar de fondo más importante que llega a Canarias es el procedente del cuarto cuadrante, cuya zona habitual de generación son las latitudes más septentrionales del Océano Atlántico, en el hemisferio norte. Este mar de fondo, muy energético, es especialmente importante de octubre a mayo, llegando a las fachadas oeste y norte de las Islas (Afonso, 2010).

Además de éste, también llegan a las Islas los *swells* provenientes del hemisferio sur, profundamente transformados a causa de la gran distancia recorrida, en la que han ido disminuyendo paulatinamente su peralte. Este oleaje, que, comparado con el anterior, cuenta con alturas mucho menores, alcanza las fachadas este y oeste de las Islas que quedan expuestas a él. La época del año en la que llegan con mayores alturas es el verano boreal, coincidiendo con el invierno austral (Megías, 2024).

La combinación de las fuertes pendientes existentes en las costas insulares y del bajo peralte de este tipo de oleaje favorece los mecanismos de remonte y rebase en el litoral expuesto, pudiendo ser la altura de la ola en la rotura mucho mayor que la altura en aguas profundas. Esto ha llevado a que se den eventos extremos, como los acaecidos en más de una ocasión en la costa de San Andrés, en Tenerife (Afonso, 2012).

Pero además del interés existente desde el punto de vista de la oceanografía y la ingeniería civil, este oleaje procedente del hemisferio sur también es seguido desde cerca por los practicantes del surf, siendo objeto de publicaciones en páginas web internacionales especializadas (Lock, 2024).

## Los eventos registrados durante el mes de agosto de 2023

Durante el mes de agosto de 2023 fue constante el registro de oleaje procedente del hemisferio sur, con alturas menores a los 2 m y periodos superiores a los 14 s. Esto puede estar relacionado con el gran número de periodos de ausencia casi total del alisio y del oleaje producido por éste en la zona de fondeo de la boya (un 50% mayor que la media del mes de agosto de los últimos 10 años, hasta el 2023). Esta disminución del viento facilita la detección del oleaje en estudio gracias a la reducción del ruido que produce el oleaje de viento, o de tipo *sea* (Megías y García-Román, 2022). La explicación de esta frecuencia inusual de periodos de calma en los vientos alisios podría estar en el marcado valor negativo que tuvo el índice NAO en ese año (NOAA, 2023).

La acción de este oleaje no solo ha quedado patente en los registros de la boya REDEXT TF, sino que ha sido detectado (haciendo incómodo el baño en algunas ocasiones) por los usuarios de las playas orientadas hacia el sur, que observaban con asombro cómo, a pesar del buen tiempo, y la ausencia de viento, llegaba a las zonas de baño un oleaje muy energético, aunque en aguas profundas el mar se viera en calma. Estos eventos fueron recogidos por los medios de comunicación locales (ver como ejemplo: Europa Press, 2023; El diario de Avisos, 2023; El Día, 2023), y pudieron ser disfrutados por los amantes del surf, en playas como La Tejita, en el sur de Tenerife (Lock, 2023).

## MATERIAL Y MÉTODOS

### La Boya REDEXT fondeada al sur de Tenerife

Todos los parámetros utilizados en este trabajo provienen de las lecturas de la boya REDEXT TF, fondeada al sur de la isla de Tenerife (ver Figura 1), frente a la punta de Rasca (Puertos del Estado, 2024). Debido a la gran profundidad de fondeo (710 m), el oleaje de periodo inferior a 30 s registrado por dicha boya no se encuentra afectado por el lecho marino, quedando justificada la aplicación de la teoría lineal para aguas profundas. Por otro lado, debido a su situación, esta boya se encuentra al abrigo del oleaje más energético que llega a Canarias, procedente del cuarto cuadrante, ya mencionado en el apartado anterior.

Por todo esto, las tres familias de oleaje más importantes que detecta la boya son: aquel que le llega desde el norte por el canal existente entre Gran Canaria y Tenerife (mar de viento y de fondo); el mar de fondo proveniente del hemisferio sur, objeto de este artículo; y el más importante de todos, el mar de viento producto de los vientos alisios predominantes. Hay que recordar que el régimen de vientos está muy influenciado, como todo el clima de las Islas, por la compleja orografía de los edificios insulares (Bechtel, 2016), sin obviar la existencia de jets costeros en la fachada este de Tenerife (Fernández-Villares y Fernández-González, 2019).

Los datos utilizados en esta investigación han sido series temporales de parámetros agregados obtenidos a partir de los espectros desarrollados por la boya que, Puertos del Estado tiene a disposición en su página web. Estos parámetros son la altura significativa espectral ( $H_{m0}$ ), el periodo de pico ( $T_p$ ), y la dirección media en el pico espectral ( $\theta_p$ ). Las series temporales utilizadas han sido las que abarcan el periodo entre el año 2008 y 2022, lo que implica el uso de 15 años para la caracterización del clima marítimo de la zona, periodo de tiempo adecuado para este análisis. Posteriormente se ha trabajado con las lecturas del mes en estudio (agosto de 2023).

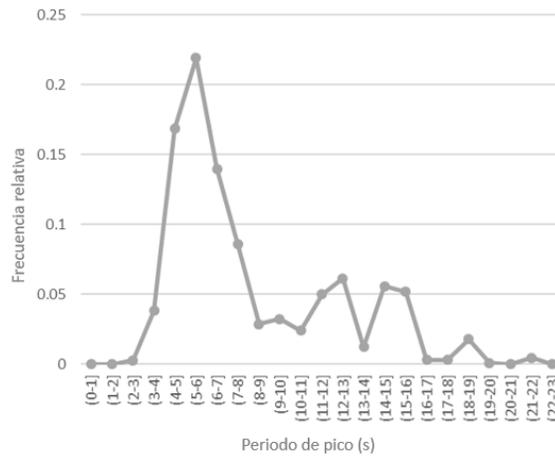
### Filtrado de datos

La existencia de tres familias de oleaje (los swells provenientes de los dos hemisferios y el mar de viento local) queda patente si se trabaja con espectros promedios (Lobeto *et al.*, 2022). En este caso, la separación de las distintas familias de oleaje no es una tarea fácil, y aún no hay un procedimiento generalizado de uso común, siendo múltiples las metodologías propuestas (ver como ejemplo: Wang y Hwang, 2001; Portilla *et al.*, 2009; Hwang *et al.*, 2012; Ailliot *et al.*, 2013).

Esta dificultad se acentúa aún más cuando se trabaja, como es este caso, con series temporales de parámetros agregados. Al realizar histogramas, ya sea de frecuencias absolutas o relativas, se obtienen gráficas multimodales (Figura 2). En estos histogramas se puede comprobar la preponderancia de los registros con valores bajos de  $T_p$ , correspondientes al oleaje de viento ya comentado.

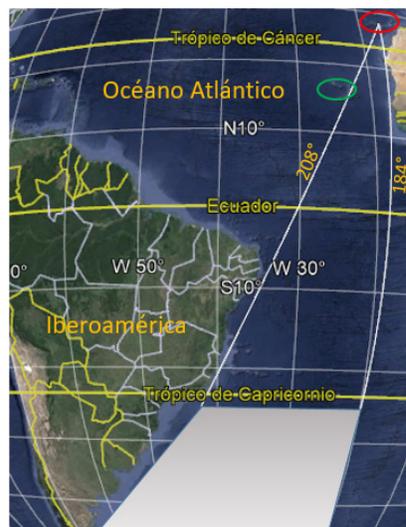
Para esta investigación se propone la separación del mar de fondo procedente del hemisferio sur, a partir de los valores de las direcciones de procedencia ( $\theta_p$  comprendidos entre  $184^\circ$  y  $208^\circ$ ) y de los periodos ( $T_p \geq 14$  s). A continuación, se justifican estos valores, y los pasos realizados para conseguir separar este sistema de oleaje del total de familias que conforman el clima marítimo de la zona:

- Paso 1.- Cribado por direcciones de procedencia: Si se admite que este tipo de mar de fondo se desplaza siguiendo las rutas ortodrómicas, como se acepta desde hace décadas (ver, por ejemplo, artículos pioneros como Munk *et al.*, 1963; Snodgrass *et al.*, 1966), es posible delimitar el rango de direcciones del oleaje que puede llegar a Canarias desde



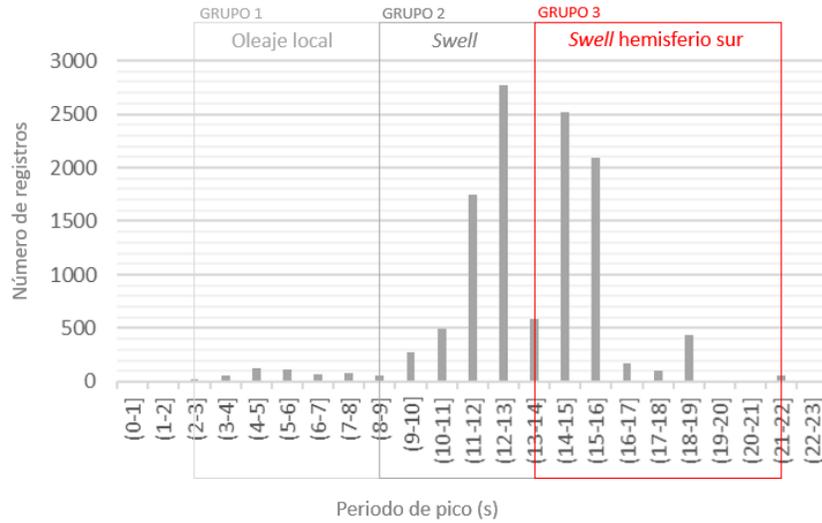
**Figura 2** | Histograma de frecuencias relativas de los registros de la boya REDEXT TF respecto al periodo de pico (años 2008 a 2022). Elaborado a partir de los datos obtenidos en <https://portus.puertos.es/#/>

el hemisferio austral. Este dependerá de la localización de la boya REDEXT TF, la forma de la cuenca atlántica, y la localización de las zonas de generación, en latitudes extra tropicales del Atlántico Sur. El abanico de direcciones resultante para la dirección media en el pico espectral  $\theta_p$  es aquel comprendido entre los  $184^\circ$  y  $208^\circ$  (Figura 3). Para poder determinar este abanico de direcciones, se han desestimado los posibles efectos de refracción y difracción del oleaje que algunos cabos y archipiélagos (por ejemplo, Cabo Verde) hayan podido producir durante tan larga travesía.



**Figura 3** | Límites de direcciones de procedencia (líneas blancas) y posible zona de generación (sombreado gris). Se han marcado las Islas Canarias (en rojo) y Cabo Verde (en verde). Sin escala.

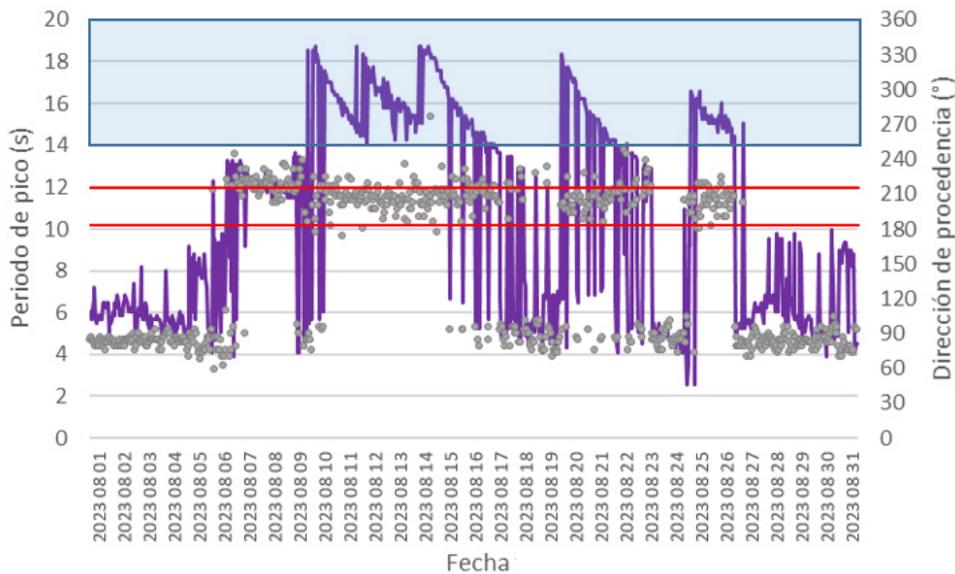
- Paso 2.- Cribado según el valor del periodo de pico  $T_p$ : A partir de la serie temporal obtenida tras el proceso de cribado descrito en el paso 1, se realiza un histograma de frecuencias respecto a los valores de  $T_p$  de los registros (Figura 4). En él se pueden apreciar tres grupos de registros bien diferenciados, que pueden ser asimilados a tres sistemas de oleaje: un primer grupo que abarcan los valores de  $T_p$  desde los 2 s hasta los 9 s (oleaje de viento, en adelante, Grupo 1), un segundo grupo con valores desde los 8 s a los 14 s (mar de fondo originado a suficiente distancia para que se desarrolle como tal, en adelante, Grupo 2), y un tercer grupo de valores desde los 13 s hasta los 22 s (valores habituales para mar de fondo completamente desarrollado, en adelante, Grupo 3). Quedan los tres grupos separados por los intervalos de  $T_p$  8-9 s y 13-14 s. Se decide tomar como valor umbral inferior del Grupo 3 el de 14 s.



**Figura 4** | Histograma realizado con las lecturas de la boya REDEXT TF para las direcciones de procedencia comprendidas entre los valores de  $\theta_p$  184 y 208°. Se han diferenciado los tres grupos de oleaje, quedando el Grupo 3 delimitado por el rectángulo rojo. Elaborado a partir de los datos obtenidos en <https://portus.puertos.es/#/>

## Representación de los registros de la boya REDEXT TF tomados durante el mes de agosto de 2023

En la Figura 5 se han representado los registros de periodo de pico  $T_p$  (línea) y dirección  $\theta_p$  (puntos) de la boya REDEXT TF realizados durante el mes estudiado. Se puede comprobar cómo han sido frecuentes las lecturas de oleaje que superan el valor umbral de  $T_p \geq 14$  s (área sombreada en celeste) y cuyos valores de  $\theta_p$  quedan dentro del abanico de direcciones entre los 184° y 208° (limitados por las líneas horizontales de color rojo). Queda clara la pertenencia al Grupo 3 de dichos registros. Gran parte del resto de los registros corresponde a oleaje que no supera los 10 s y cuya dirección de procedencia es de componente Este (mar de viento local, que habitualmente es el predominante en la zona en estudio).



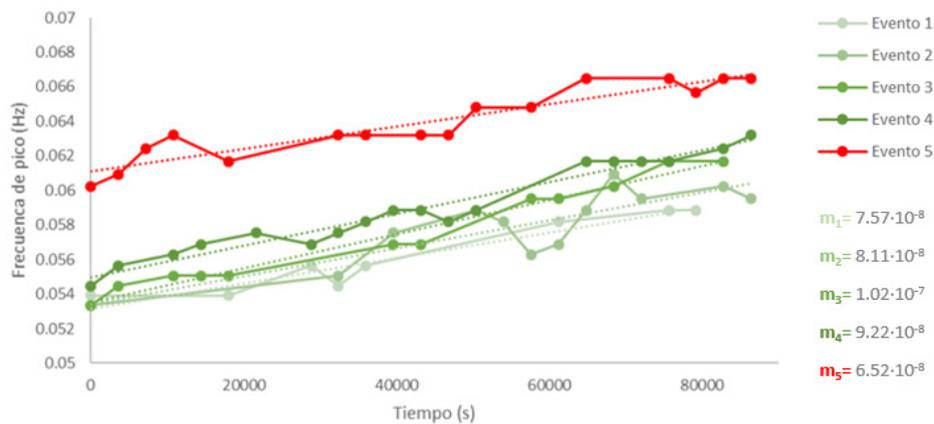
**Figura 5** | Registros tomados por la boya REDEXT TF, de  $T_p$  (línea) y de  $\theta_p$  (puntos), correspondientes al mes de agosto de 2023 (modificado de Megías, 2024).

En esta gráfica (Figura 5) se aprecia claramente cómo los registros pertenecientes al denominado Grupo 3 se encuentran agrupados en cinco eventos. La evolución de los registros en estos 5 eventos se repite: a partir de unos valores de  $T_p$  máximos (que superan los 18 s en las primeras 4 ocasiones, y los 16 s en la quinta) se va produciendo una disminución paulatina hasta la llegada del siguiente evento. Esta disminución constante del periodo del oleaje también pudo ser observada en las salidas del visor del modelo de oleaje WW3.

Esta disminución progresiva de los periodos registrados para cada evento denota la clara naturaleza dispersiva del oleaje en estudio. Debido a la ordenación del oleaje según sus periodos, las primeras olas que arriban la costa, tras una larga travesía, serán aquellas con mayor periodo (y por tanto con mayor celeridad) y a continuación irá llegando paulatinamente, el oleaje con menor periodo (recuérdese que, en aguas profundas, la celeridad es directamente proporcional al periodo (Muñoz-Pérez, 2011)).

### Estimación de la tasa de disminución del periodo del oleaje. Obtención de la pendiente de variación de la frecuencia de pico

Siendo la frecuencia de pico  $f_p$  la inversa de  $T_p$ , si se representa gráficamente  $f_p$  con sus valores para las primeras 24 horas de registros de cada uno de los 5 eventos descritos en el apartado anterior, se pueden obtener sus líneas de tendencia (líneas de puntos), y por regresión lineal la tasa  $m$  que mejor se ajusta al aumento del valor de  $f_p$  en cada uno de los eventos (Figura 6). Los valores de la pendiente de las 5 rectas de regresión se encuentran entre  $6.52 \cdot 10^{-8}$  para el evento 5 y  $1.02 \cdot 10^{-7}$  para el evento 3.

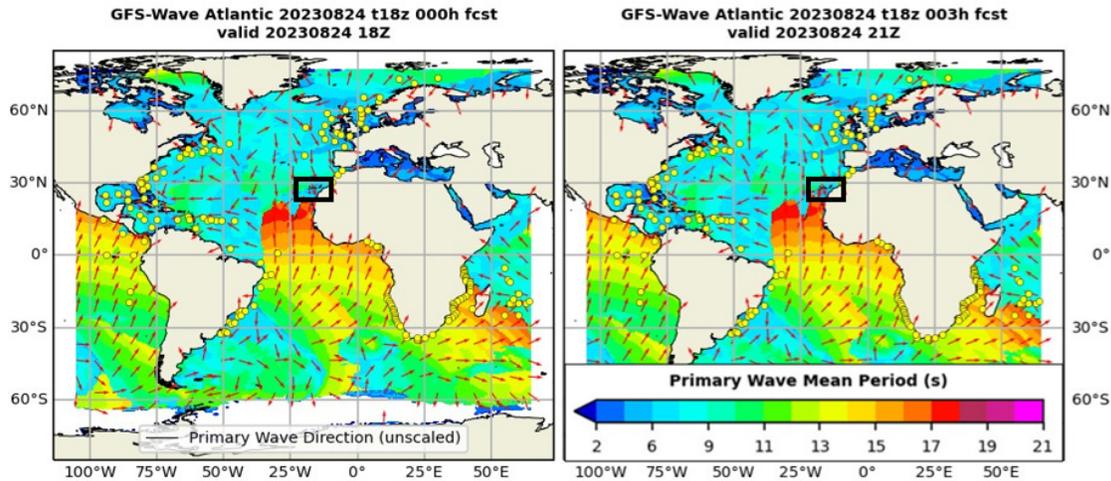


**Figura 6** | Evolución de los valores de  $f_p$  durante las primeras 24 horas de registros de cada uno de los 5 eventos en estudio. Se muestran las pendientes  $m_i$  de las 5 líneas de tendencia obtenidas (modificado de Megías, 2024).

Resulta cuanto menos curioso comprobar cómo los registros del evento 5 (resaltados en color rojo en la Figura 6) están relativamente separados de los otros 4 eventos. Eso es debido a que el valor de  $T_p$  de su primer registro (valor máximo registrado por la boya) es mucho menor que el de los demás, siendo de 16.6 s, mientras que los valores iniciales de  $T_p$  para el resto de eventos superaron ampliamente los 18 s. La razón de esta posible anomalía está en que la primera lectura de la boya REDEXT TF para el evento 5 corresponde al registro horario de las 7:00 horas del día 25 de agosto, mientras que el modelo WW3 preveía su llegada para la tarde del día 24, como se puede apreciar en la Figura 7. Es necesario aclarar que oleaje con pequeñas alturas de ola, como es el aquí estudiado, puede pasar desapercibido en el tratamiento de los registros de la boya, ante otras familias de oleaje coincidentes en el tiempo. Es por ello que se complementará la información de la boya con las salidas del modelo.

La previsión del modelo WW3 coincidió con las observaciones realizadas desde tierra, donde se estaba haciendo el seguimiento de este oleaje (Figura 8): Desde la isla de Tenerife se avistó oleaje de gran longitud de onda, de componente Sur,

poco antes del atardecer. Dicho seguimiento se estaba realizando en un punto de observación fijo a una cota de 200 m s.n.m. en una de las zonas de la isla con mayor pendiente de la costa, lo que garantizaba la observación del oleaje en aguas profundas, sin que existiera interacción con el fondo.

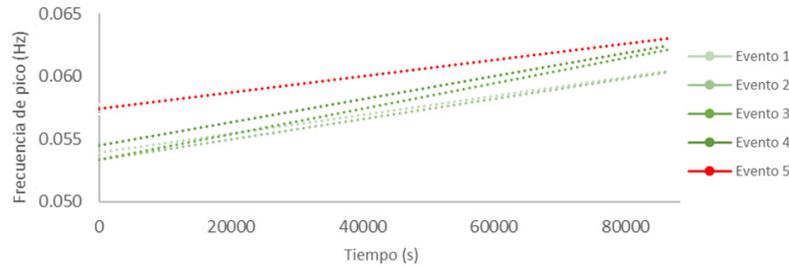


**Figura 7** | Salidas del visor del modelo *Wavewatch III* (*Forecasting* para el para el día 24 de agosto de 2023, concretamente para las horas 18:00 y 21:00 (hora Zulu). La situación de las Islas Canarias ha sido marcada con un rectángulo negro. Elaborado a partir de las salidas del visor del WW3. <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>



**Figura 8** | Imagen tomada a las 19:26 horas del día 24 de agosto desde la costa sureste de Tenerife donde se aprecia el oleaje en estudio (Fotografía: Emilio Megías)

Si se acepta que la llegada del oleaje coincide con el avistamiento desde la costa, aunque no fuera detectado por la boya REDEXT TF (hay que tener en cuenta la pequeña altura de este tipo de oleaje, que como ya se ha indicado, dificulta su detección, para este evento en concreto, los primeros registros fueron de 35 cm de  $H_{m0}$ ), y teniendo en cuenta la tasa de aumento de la frecuencia del oleaje calculada para ese evento ( $m_5 = 6.52 \cdot 10^{-8}$ ), se puede estimar la  $f_p$  y el  $T_p$  inicial corregida del evento 5. Siendo los nuevos valores de  $f_p = 0.057$  Hz y de  $T_p = 17.42$  s. En la Figura 9 se muestran las 5 líneas de tendencia tras realizar esta corrección.



**Figura 9** | Líneas de tendencia de los valores de  $f_p$  de los 5 eventos acaecidos durante el mes de agosto del 2023. Elaborado a partir de los datos de la boya REDEXT TF obtenidos de <https://portus.puertos.es/#/>

### Cálculo de la distancia recorrida, y el tiempo de travesía invertido por cada una de las series de oleaje que conforman los eventos estudiados

El marcado carácter dispersivo que tiene el mar de fondo tan transformado objeto de este trabajo puede ayudarnos a estimar su origen. Portilla-Yandún propuso hace ya más de una década una solución matemática para que, dentro de la teoría lineal, y a partir de la expresión de la celeridad de grupo para aguas profundas  $C_g$ , se pudiera calcular la distancia  $d$  recorrida por el mar de fondo (Portilla-Yandún, 2012).

$$C_g = \frac{g}{4\pi f} \quad (1)$$

$$d = \frac{g}{4\pi m} \quad (2)$$

La expresión para el cálculo de dicha distancia se muestra en (2), siendo  $g$  la aceleración de la gravedad en  $m/s^2$ ,  $f$  la frecuencia en Hz, y  $m$  la pendiente con la que disminuye  $f$  expresada en tanto por uno.

Para el uso de este algoritmo, que ya ha sido utilizado por otros autores (ver por ejemplo el trabajo de Amores y Marcos, 2020), se supondrá que todo el oleaje perteneciente a un mismo evento tiene el mismo origen tanto en el espacio como en el tiempo. Esta hipótesis, aun siendo una simplificación (ya que el área de generación debe ser suficientemente amplia y el temporal generador del oleaje debe tener cierta duración), es una aproximación necesaria y aceptable para este caso.

Aplicando la expresión (1) a los valores de  $f_p$  iniciales mostrados en la Figura 9 (los correspondientes al origen del eje de abscisas) se obtiene la  $C_g$  de las primeras familias de oleaje que alcanzan Canarias para cada uno de los eventos. Por otro lado, usando los valores de  $m$  calculados previamente (ver la Figura 6) en la Ecuación (2), se obtienen las distancias recorridas por el oleaje perteneciente a cada uno de los eventos.

La estimación del tiempo de travesía para las primeras familias de oleaje de cada evento es directa, a partir de los valores de  $C_g$  y  $d$ , si se asume que la celeridad de cada grupo de olas es constante durante toda la travesía (Ecuación 3).

$$t = \frac{d}{C_g} \quad (3)$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Siguiendo la metodología propuesta se ha estimado el origen de cada uno de los eventos en estudio, así como el tiempo invertido por los primeros grupos de oleaje (los de mayor celeridad) en la travesía desde el área de generación hasta la detección por la boya, para cada evento.

En la Tabla 1 se recogen los valores obtenidos en los cálculos realizados siguiendo el procedimiento descrito. En la Tabla 2 se muestran, como información complementaria, los datos promedio de la  $H_{m0}$  y  $\theta_p$  de las primeras 24 horas de registros de cada evento. A partir de los valores obtenidos se podrá realizar el análisis necesario sobre el comportamiento de los swells procedentes del hemisferio sur, componente fundamental del clima marítimo de las aguas canarias.

**Tabla 1** | Valores obtenidos para la pendiente  $m$  de la frecuencia y su coeficiente de ajuste  $R^2$ , la distancia  $d$  recorrida, la celeridad  $C_g$  de los primeros grupos de oleaje que llegan a las aguas canarias en cada uno de los eventos, así como el tiempo  $t$  de travesía invertido, redondeados a días completos.

Evento	Fecha llegada a Canarias	$T_p$ inicial (s)	$f_p$ inicial $\cdot 10^{-2}$ (Hz)	$m \cdot 10^{-6}$	$R^2$ recta	$d$		$C_g$ (m/s)	$t$ (días)
						(km)	(MN)		
1	09/08/23	18.55	5.39	0.08	0.95	10309	5567	14.48	8
2	11/08/23	18.75	5.33	0.08	0.74	9630	5200	14.64	8
3	14/08/23	18.75	5.33	0.10	0.98	7669	4141	14.64	6
4	20/08/23	18.36	5.45	0.09	0.96	8467	4572	14.33	7
5	24/08/23	17.42	5.74	0.07	0.88	11981	6469	13.60	10

**Tabla 2** | Valores promedios de  $H_{m0}$  y  $\theta_p$  de los registros pertenecientes a las primeras 24 horas desde la detección de cada evento por la boya REDEXT TF.

Evento	Fecha llegada a Canarias	$H_{m0}$ (m)	$\theta_p$ (°)
1	09/08/23	1.08	198
2	11/08/23	1.77	204
3	14/08/23	1.82	203
4	20/08/23	0.94	201
5	24/08/23	0.43	202

A pesar del reducido número de eventos (solo 5) concentrados en un único mes de un año concreto, a partir de los resultados obtenidos se pueden realizar las siguientes apreciaciones:

- El ajuste mediante regresión lineal de la frecuencia de pico frente al tiempo (Figura 6) es suficientemente representativo, siendo el menor de los valores del coeficiente  $R^2$  de 0.74 para el evento número 2.
- Como era de esperar, tal como muestra la Ecuación (2), a menor pendiente de la recta de regresión, mayor es la distancia recorrida por el oleaje.
- Las distancias estimadas (Tabla 1) y las direcciones medias calculadas para cada evento (Tabla 2) corresponden siempre a orígenes situados al sur del paralelo 35°S (zona extra tropical del hemisferio austral), en el área occidental del Océano Atlántico, llegando incluso a zonas más meridionales, como es el caso del evento 5. Estas zonas están caracterizadas por su gran actividad ciclónica, con gran capacidad generadora de temporales marinos (Reboita *et al.*, 2018; Gramcianinov *et al.*, 2020; Lodise *et al.*, 2022)
- Los valores  $H_{m0}$  promedio son relativamente modestos, siempre por debajo de los 2 m. Sólo en el evento número 2 se han producido registros horarios donde la altura significativa ha superado este valor, sin llegar en ningún momento a los 2.5 m.
- Los valores menores y mayores de  $H_{m0}$  promedio, corresponden a los eventos con el origen más lejano y más cercano a las Islas Canarias respectivamente. Esto concuerda con la idea de que a mayor distancia recorrida la pérdida de energía será mayor, y por tanto la  $H_{m0}$  disminuirá más respecto a su valor inicial.
- Similar comportamiento se ha detectado durante el mes de agosto de 2024, aunque en una proporción mucho menor respecto al total de registros horarios (mientras que durante agosto de 2023, el 20% del total de los registros pasaron el cribado por dirección y periodo pico, para el mismo mes de 2024, solo el 6% pasaron esa criba). La razón es que en

agosto de 2024 la velocidad del viento alisio ha sido superior a la registrada en 2023 y eso ha marcado la predominancia del oleaje de viento del NE. Tal y como se muestra en la Tabla 3, se han detectado 3 eventos durante el mes de agosto de 2024, el primero de ellos iniciado el día 30 de julio. Para comparar con las lecturas de la boya en años anteriores se puede acudir al trabajo realizado previamente centrado en el periodo comprendido entre los años 2009 y 2020 (Megías y García-Román, 2023).

**Tabla 3** | Eventos detectados durante el mes de agosto de 2024 y su  $T_p$  inicial registrado por la boya REDEXT TF.

Evento	Fecha llegada a Canarias	$T_p$ inicial (s)
1	30/07/24	18.75
2	12/08/24	18.55
3	20/08/24	16.21

## CONCLUSIONES

A modo de conclusiones generales se pueden reseñar los siguientes puntos:

- Queda demostrado el origen en la zona extra tropical del hemisferio sur del oleaje tipo *swell* estudiado, que alcanza las costas del sur de Canarias durante los meses de verano.
- En las lecturas de la boya REDEXT TF se aprecia con toda claridad el carácter dispersivo de este tipo de oleaje, los valores de altura y periodo registrados son los esperables para un mar de fondo tan transformado debido a su gran nivel de madurez.
- Es llamativa la gran similitud en el orden de magnitud de los valores máximos de  $T_p$  de los 5 eventos *swell* registrados en agosto de 2023.
- Los pequeños valores de altura del oleaje dificultan su registro por parte de la boya REDEXT TF, como ha quedado patente en el evento número 5.
- Es notorio el ajuste del modelo WW3 respecto a este tipo de eventos, en comparación con otros modelos cuyo dominio no abarca la zona de generación del oleaje transhemisférico.

## REFERENCIAS

- Afonso, J.A. 2010. Canarias y los Eventos extremos en el mar, en *Boletín de la Real Sociedad Económica de Amigos del Pais de Tenerife*. San Cristobal de La Laguna, España, 63-111.
- Afonso, J.A. 2012. Inundaciones en la costa de San Andrés. Causas y posibles soluciones. *Seminario Planeta Tierra-Ciencias de la Tierra para la Sociedad*. San Cristobal de La Laguna: Real Sociedad Económica de Amigos del Pais de Tenerife.
- Ailliot, P., Maisondieu, C., Monbet, V. 2013. Dynamical partitioning of directional ocean wave spectra. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 33, 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2013.03.002>
- Amores, A., Marcos, M. 2020. Ocean swells along the global coastlines and their climate projections for the twenty-first century. *Journal of Climate*, 33(1), 185-199. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0216.1>
- Barber, N.F., Ursell, F. 1948. The generation and propagation of ocean waves and swell. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 240(824), 527-560. <https://doi.org/10.1098/rsta.1948.0005>

- Bechtel, B. 2016. The climate of the canary Islands by annual cycle parameters». *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. Prague. Czech Republic, 12-19 July 2016, 243-250. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B8-243-2016>
- Carracedo, J.C. 2011. *Geología de Canarias: Origen, evolución, edad y volcanismo. I*. Madrid, España: Rueda, S.L. (Geología de Canarias). Disponible en: [https://books.google.es/books?id=8%5C\\_sRMwEACAAJ](https://books.google.es/books?id=8%5C_sRMwEACAAJ)
- Crespo, N.M., Porfirio, R., Marcos de Jesus, E. 2020. Cyclones density and characteristics in different reanalyses dataset over South America. *EGU General Assembly 2020*. Online, 4–8 May 2020. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-11316>
- El Día*. 2023. «Momentos de tensión en Radazul por el fuerte oleaje», 12 agosto. Disponible en: <https://www.eldia.es/tenerife/2023/08/12/momentos-tension-radazul-fuerte-oleaje-90916782.html>
- El diario de Avisos*. 2023. «El verano sacude Canarias con calor extremo, calima y oleaje», 13 agosto. Disponible en: <https://hemeroteca.diariodeavisos.com/thumbs/2023/08/13/2023-08-13-DA-pagina-1.pdf.0.gif>
- Europa Press*. 2023. «Canarias activa la situación de alerta por fenómenos costeros en todo el archipiélago con olas de hasta 2 metros», 14 agosto. Disponible en: <https://www.europapress.es/>
- Ewans, K.C. 2001. Directional spreading in ocean swell. *Proceedings of the International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*, 1(June), 517-529. [https://doi.org/10.1061/40604\(273\)54](https://doi.org/10.1061/40604(273)54)
- Fernández-Villares, J., Fernández-González, S. 2019. Jets costeros en Gran Canaria y Tenerife. Caracterización y mejora de la predicción. *Sexto Simposio Nacional de Predicción «Memorial Antonio Mestre», 1*, 223-240. <https://doi.org/10.31978/639-19-010-0.223>
- Gramscianinov, C.B., Campos, R.M., Guedes Soares, C., de Camargo, R. 2020. Extreme waves generated by cyclonic winds in the western portion of the South Atlantic Ocean. *Ocean Engineering*, 213(January), p. 107745. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107745>
- Grassa-Garrido, J.M. 2018. La costa construida, el cambio de clima y el número de Iribarren. Built Coast, Climate Change and the Iribarren Parameter. *Ingeniería Civil*, 191, 57-73.
- Hwang, P.A., Ocampo-Torres, F.J., García-Nava, H. 2012. Wind sea and swell separation of 1D wave spectrum by a spectrum integration method. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(1), 116-128. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00075.1>
- Lobeto, H. 2022. La complejidad del clima marítimo del oleaje en las costas del archipiélago de Canarias, en Gómez-Martín, M.E. (ed.) *Libro de Resúmenes: XVI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*. Vigo: Editorial Universitat Politècnica de València.
- Lock, J. 2023. *Canaries: «It's Our Own 50-Year Storm!»*, *Surfline*. Disponible en: <https://www.surfline.com/surf-news/canaries-50-year-summer-storm/185423> (Accedido: 23 de agosto de 2023).
- Lock, J. 2024. *Canary Islands Under a South Atlantic Bomb*. Disponible en: <https://www.surfline.com/surf-news/canary-islands-south-atlantic-bomb-storm/202141> (Accedido: 16 de agosto de 2024).
- Lodise, J., Merrifield, S., Collins, C., Rogowski, P., Behrens, J., Terrill, E. 2022. Global climatology of extratropical cyclones from a new tracking approach and associated wave heights from satellite radar altimeter. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(11), e2022JC018925. <https://doi.org/10.1029/2022JC018925>
- Megías, E. 2021. Observation of transhemispheric waves on the southern coast of the Canary Islands. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Maritime Engineering*, 174(2), 34-52. <https://doi.org/10.1680/jmaen.2020.30>
- Megías, E. 2024. *Estudio del comportamiento de los swells provenientes del hemisferio sur en las costas de las Islas Canarias. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Civil, Náutica y Marítima*. Universidad de La Laguna. Disponible en: <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/37734>

- Megías, E., García-Román, M. 2022. Influence of Trade Winds on the Detection of Trans-Hemispheric Swells near the Canary Islands», *Atmosphere*, 13(4), 505. <https://doi.org/10.3390/atmos13040505>
- Megías, E., García-Román, M. 2023. A methodology for statistical mean wave climate regime characterisation in oceanic islands: the case of the southern coast of Tenerife. *Journal of Marine Science and Technology*, 31(3). <https://doi.org/10.51400/2709-6998.2707>
- Munk, W., Miller, G.R., Snodgrass, F.E., Barber, N.F. 1963. Directional recording of swell from distant storms», *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 255(1062), 505-584. <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0039>
- Muñoz-Pérez, J.J. 2011. *Ondas regulares y su aplicación a la ingeniería de costas*. Servicio de Publicaciones, 2011. 1ª. Cádiz: Servicio de Publicaciones. Universidad d Cádiz. Disponible en: <https://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/20998>
- NOAA, C.P.C. 2023. *North Atlantic Oscillation (NAO)*. Disponible en: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/norm.nao.monthly.b5001.current.ascii.table> (Accedido: 16 de diciembre de 2023).
- Portilla-Yandún, J. 2012. Storm-source-locating algorithm based on the dispersive nature of ocean swells», *Avances*, 4(1), C22-C36.
- Portilla, J., Ocampo-Torres, F.J., Monbaliu, J. 2009. Spectral partitioning and identification of wind sea and swell. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(1), 107-122. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHO609.1>
- Portillo, E., Peñate-de la Rosa, I., Conde, J. 2007. *Mar De Fondo En Las Islas Canarias Procedente Del Atlántico Sur. La Importancia De Incorporar Las Condiciones De Contorno Del Modelo Wam Al Atlántico Sur*. Disponible en: <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/13189>
- Puertos del Estado. 2024. *Conjunto de datos : REDEXT*. Disponible en: <https://portus.puertos.es/#/>
- Reboita, M.S., da Rocha, R.P., de Souza, M.R., Llopart, M. 2018. Extratropical cyclones over the southwestern South Atlantic Ocean: HadGEM2-ES and RegCM4 projections. *International Journal of Climatology*, 38(6), 2866-2879. <https://doi.org/10.1002/joc.5468>
- Snodgrass, F.E., Hasselmann, K.F., Miller, G.R., Munk, W., Powers, W.H. 1966. Propagation of ocean swell across the Pacific. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 259(1103), 431-497. <https://doi.org/10.1098/rsta.1966.0022>
- Troll, V.R., Carracedo, J.C. 2016. *The Geology of the Canary Islands*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04268-X>
- Wang, D.W., Hwang, P.A. 2001. An operational method for separating wind sea and swell from ocean wave spectra. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(12), 2052-2062. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<2052:AOMFSW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<2052:AOMFSW>2.0.CO;2)
- WW3DG, T.W.I.D.G. 2019. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07. *NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note*, (333), p. 311.