



*Escuela Técnica Superior de  
Ingenieros de Caminos, Canales  
y Puertos.*



**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

# **CARACTERIZACIÓN MET- OCEÁNICA EN EL PN MARÍTIMO-TERRESTRE DEL ARCHIPIÉLAGO DE CABRERA E IMPLICACIONES EN LA NAVEGACIÓN**

Trabajo realizado por:

*Clara Megías Baños*

Dirigido:

*Melisa Menéndez García*

*Aina García Gómez*

Titulación:

**Máster Universitario  
en Costas y Puertos**

Santander, mes octubre de 2019

**TRABAJO FINAL DE MASTER**



## Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a las tutoras de este trabajo, Melisa y Aina, su ayuda, apoyo y paciencia para llevarlo adelante. Agradecer la ayuda mostrada en todo momento por Adrián Acevedo, sin el cual no hubiera sabido ni por dónde empezar en muchos aspectos.

En segundo lugar, agradecer a todos mis compañeros y compañeras del Máster, Alba, Héctor, William, Marce, Juan, Jorge, Michelle, Sara, Gustavo, Fer, Diego y Elodie, y en especial el apoyo mostrado de manera incondicional por Alba, sin la cual es muy probable que hubiera desistido en más de una ocasión.

En tercer lugar, dar las gracias al profesorado del Máster y al personal de la Universidad de Cantabria y del Instituto de Hidráulica Ambiental. Agradezco muy especialmente el apoyo y paciencia mostrada por algún profesor en particular, porque ha sido un Máster que en muchos aspectos superaba mis capacidades iniciales, y no ha sido sencillo encontrar motivación en muchas ocasiones que no fuera acompañada de mucho pesimismo.

Por último, agradecer a mis padres su apoyo para poder cursar el Máster, y a mi familia y amigos por estar siempre ahí, especialmente en los momentos de mayor caos académico y existencial.

**¡Gracias!**



# Caracterización met-oceánica en el PN Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera e implicaciones en la navegación

Clara Megías Baños

**Resumen:** El Parque Nacional Marítimo Terrestre del Archipiélago de Cabrera (PNMTAC), situado en las Islas Baleares (España), está formado por las islas e islotes del Archipiélago de Cabrera y una extensión de aproximadamente 90000 ha de aguas marinas. En el PNMTAC se regulan los diferentes usos y actividades (buceo, fondeo y navegación) dependientes del transporte marítimo para su desarrollo. La ordenación y planificación de usos y actividades debería ajustarse a niveles de operatividad elevados ligados, principalmente, a condiciones met-oceánicas óptimas. Por este motivo, resulta de interés obtener información a pequeña escala de las variables del oleaje en la zona objeto de estudio. Para analizar las condiciones del clima marítimo en el área del PNMTAC se hace necesario disponer de datos históricos del oleaje con alta resolución espacial. Para ello, en este trabajo, se ha desarrollado una regionalización (downscaling) del oleaje, combinando diferentes técnicas estadísticas con dinámicas (modelos de propagación del oleaje en áreas costeras). Como base metodológica se ha seguido el planteamiento de downscaling híbrido DOW (Camus *et al.* 2013), no obstante, se han implementado diversas mejoras. Entre ellas cabe destacar la utilización de datos espectrales 3D procedentes de la base de datos GOW2 como condiciones de contorno e iniciales y una configuración más actual y personalizada del modelo numérico SWAN. Tras un análisis exhaustivo de diversas fuentes de información relacionadas con el tráfico marítimo y tipologías de usos, se han seleccionado 35 localizaciones de interés para la navegación asociadas a los siguientes usos: buceo, fondeo diurno, fondeo nocturno, navegación de transporte marítimo y navegación de la ruta turística entre Mallorca y el Parque, y ubicación del puerto de S. Jordi del transporte de turistas. Tras la reconstrucción climática, se ha estimado la operatividad de dichos usos, tomando como umbrales de análisis, diferentes valores de altura de ola para cada uso. A partir de las series horarias obtenidas con el método de downscaling, se ha estimado la operatividad de dichos usos, tomando como umbrales de análisis, diferentes valores de altura de ola significativa para cada uso. Los resultados han mostrado que la mayor parte del año se ofrecen las condiciones adecuadas para la navegación y desarrollo de las actividades estudiadas. Se desprende que las técnicas de regionalización para la caracterización climática son efectivas para el análisis a pequeña escala y su posible aplicación en la gestión de las actividades desarrolladas en dichos entornos.

**Palabras clave:** Parque Nacional Marítimo Terrestre del Archipiélago de Cabrera; propagación del oleaje; regionalización climática; reconstrucción oleaje; buceo; fondeo; navegación.

## INTRODUCCIÓN

La caracterización climática es fundamental para un óptimo conocimiento de las zonas costeras. Los estudios globales de oleaje proporcionan información de largos periodos de tiempo, información que puede ser utilizada directamente como condición límite para la regionalización climática a escala costera (Camus, 2009).

Para llevar a cabo una regionalización climática, es necesario servirse de técnicas que reduzcan la cantidad de datos aportados por las bases de datos y resulten efectivas computacionalmente. Algunas de esas técnicas consisten en una regionalización híbrida, basada en la combinación de técnicas estadísticas con modelos numéricos (Rueda, 2016).

En el Parque del Archipiélago Cabrera, los usos y actividades son dependientes de la navegación. Debido a esta condición, se

considera necesario poder caracterizar el clima en dicha zona, para conocer las condiciones generales de operatividad donde es más probable obtener condiciones de buen estado del mar.

El objetivo principal de este trabajo es analizar las implicaciones de las condiciones met-oceánicas sobre los usos antrópicos del fondeo, el buceo y la navegación en el Parque Nacional Marítimo Terrestre del Archipiélago de Cabrera. Los objetivos secundarios son: i) analizar los usos y actividades del Parque Nacional Marítimo Terrestre del Archipiélago de Cabrera, ii) realizar una regionalización (downscaling) del oleaje en el Parque Nacional Marítimo Terrestre del Archipiélago de Cabrera con el fin poder caracterizar el clima marítimo con suficiente resolución espacial y iii) analizar la operatividad de los usos del buceo, fondeo y navegación en el PNMTAC en función de estadísticos climáticos.

## METODOLOGÍA

### Regionalización híbrida

Se han seleccionado 200 estados de mar de una serie histórica de 40 años (1979-2019), obtenidos de la base de datos de oleaje GOW 2, tras aplicar la técnica estadística de Análisis de Componentes Principales y de Máxima Disimilitud. Los casos seleccionados se han propagado con el modelo hidrodinámico SWAN, en un dominio definido por las coordenadas 2.75°E-3.5°E y 37.5°E-39.5°E, al cual se le han anidado dos mallas de menores dimensiones, en las que se ha incluido: i) el conjunto de islas del Archipiélago de Cabrera y ii) la zona del puerto de salida/llegada de las embarcaciones de turistas (Colònia de Sant Jordi).

Para la reconstrucción de las series horarias del oleaje se ha aplicado la técnica estadística basada en la Función de Base Radial (RBF), en 35 puntos geográficos del Parque de Cabrera y zonas adyacentes. Los puntos se han seleccionado con base en los usos y actividades permitidas de buceo, fondeo, navegación y ubicación del puerto de transporte de turistas.

### Análisis de la operatividad

La operatividad se ha analizado tomando como referencia el valor máximo de altura de ola ( $H_s$ ) tras la reconstrucción del oleaje, y usando un umbral de  $H_s$  para cada uso, de los cuales se ha analizado el número total de horas en las que se ha superado el valor umbral considerado. Se ha obtenido la probabilidad de encontrar las condiciones idóneas para la navegación y el desarrollo de las actividades. Posteriormente, se ha seleccionado el punto de cada uso que presentaba una probabilidad superior de condiciones óptimas. Se han seleccionado intervalos de las alturas de ola, con un aumento de 0.5 m, para estimar la frecuencia de cada altura de ola en la serie histórica analizada.

## RESULTADOS

El downscaling dinámico del oleaje desarrollado ha mostrado cómo la presencia de las islas y contornos del puerto modifican la dirección y generan zonas de menor energía del oleaje con menores alturas de ola.

La reconstrucción climática ha mostrado diferentes valores medios de  $H_s$  para cada punto, siendo el mayor valor de 1.06 m, al SE de Mallorca. De los situados en el Archipiélago de Cabrera, el mayor valor, de 0.97 m, se ha dado al Sur de Cabrera. El máximo valor de  $H_s$  del registro se ha dado al E de Mallorca, con 6.24 m, y del Archipiélago, se ha dado al E de Cabrera, con un valor de 5.30 m. Los puntos con menor valor de

$H_s$  media se han dado en el puerto y al W de Cabrera, en la zona autorizada para el fondeo.

La probabilidad de encontrar las condiciones óptimas para cada uso ha mostrado en términos generales que se da entre un 0.90 y un 0.99 de probabilidad de encontrar las condiciones ideales para el desarrollo de las actividades. Se ha observado un claro patrón estacional, con condiciones más favorables durante los meses de verano, y menos en invierno.

El análisis de la distribución de la altura de ola significativa por encima de los umbrales delimitados ha mostrado cómo la probabilidad de encontrar valores de  $H_s$  superiores al umbral, disminuye según aumenta el valor de  $H_s$ . La curva de probabilidad es inversamente proporcional a la curva de la media del número de horas en las que se han superado los rangos de  $H_s$ .

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La caracterización climática del Parque de Cabrera empleando la técnica de regionalización híbrida, ha resultado ser apropiada para el análisis de determinados puntos geográficos en los que se realizan actividades analizadas. No obstante, el modelo no se ha validado, por lo que plantea como una tarea pendiente.

Con los resultados obtenidos, se ha inferido que las condiciones generales de la zona, son óptimas entre un 90% y un 99% del tiempo. Durante los meses de verano, es cuando las condiciones son más favorables, coincidente con la mayor frecuentación de turistas al Parque.

Las visitas al Parque están aumentando durante los meses de primavera y otoño (Memoria del Parque, 2018), probablemente debido a las buenas temperaturas y del cambio climático. Conocer la relación entre los parámetros de mar analizados en este trabajo y los aspectos derivados del uso antrópico y el cambio climático, es necesario para una adecuada ordenación del espacio marítimo del Parque.

## REFERENCIAS

- Camus, P. (2009). Metodologías para la definición del clima marítimo en aguas profundas y someras. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria.
- Camus P., Mendez, F., Medina, R., Tomas A., Izaguirre C. (2013). High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. *Coastal Engineering*, 72. pp 56–68.
- Memoria anual de actuaciones en el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera (2018). Conselleria Medi Ambient, Agricultura i Pesca.
- Rueda, A.C. (2016). Metodologías para el análisis de riesgo de inundación en zonas costeras. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria.

# Met-oceanic characterization in the Maritime-Terrestrial NP of the Cabrera Archipelago and implications for navigation

Clara Megías Baños

**Abstract:** The Maritime Terrestrial National Park of the Cabrera Archipelago (PNMTAC), located in the Balearic Islands (Spain), is formed by the islands and islets of the Cabrera Archipelago and an area of approximately 90000 ha of marine waters. The PNMTAC regulates the different uses and activities (diving, anchoring and navigation) dependent on maritime transport for its development. The management and planning of uses and activities should be adjusted to high levels of operability linked, mainly, to optimal met-ocean conditions. For this reason, it is of interest to obtain small-scale information on the wave variables in the area under study. To analyze the maritime climate conditions in the PNMTAC area, it is necessary to have historical wave data with high spatial resolution. For this, in this work, a downscaling of the waves has been developed, combining different statistical techniques with dynamics (wave propagation models in coastal areas). As a methodological basis, the DOW hybrid downscaling approach has been followed (Camus et al. 2013), however, several improvements have been implemented. These include the use of 3D spectral data from the GOW2 database as boundary and initial conditions and a more current and customized configuration of the SWAN numerical model. After an exhaustive analysis of various sources of information related to maritime traffic and typologies of use, 35 locations of interest for navigation associated with the following uses have been selected: diving, daytime anchoring, night anchoring, maritime transport navigation and navigation of the tourist route between Mallorca and the Park, and location of the port of S. Jordi for tourist transport. After the climatic reconstruction, the operability of these uses has been estimated, taking as analysis thresholds, different wave height values for each use. From the time series obtained with the downscaling method, the operability of these uses has been estimated, taking as analysis thresholds, different values of significant wave height for each use. The results have shown that most of the year offers the right conditions for navigation and development of the activities studied. It follows that downscaling techniques for climate characterization are effective for small-scale analysis and their possible application in the management of activities carried out in these environments.

**Keywords:** Terrestrial Maritime National Park of the Cabrera Archipelago; wave propagation; climate downscaling; wave reconstruction; diving; anchoring navigation.

## INTRODUCTION

The climatic characterization is fundamental for an optimal knowledge of the coastal areas. Global wave studies provide information on long periods of time, information that can be used directly as a boundary condition for climate downscaling at a coastal scale (Camus, 2009).

To carry out a climate downscaling, it is necessary to use techniques that reduce the amount of data provided by the databases and be computationally effective. Some of these techniques consist of a hybrid downscaling, based on the combination of statistical techniques with numerical models (Rueda, 2016).

In the Cabrera Archipelago Park, the uses and activities are dependent on the navigation. Due to this condition, it is considered necessary to be able to characterize the climate in said area, to know the general operating

conditions where conditions of good sea conditions are more likely.

The main objective of this work is to analyze the implications of the met-oceanic conditions on the anthropic uses of anchoring, diving and navigation in the Maritime Terrestrial National Park of the Cabrera Archipelago. The secondary objectives are: i) analyze the uses and activities of the Maritime Terrestrial National Park of the Cabrera Archipelago, ii) conduct a downscaling of the waves in the Terrestrial Maritime National Park of the Cabrera Archipelago in order to characterize the maritime climate with sufficient spatial resolution and iii) analyze the operability of the uses of diving, anchoring and navigation in the PNMTAC based on climatic statistics.

## METHODOLOGY

### Hybrid downscaling

200 sea states have been selected from a historical series of 40 years (1979-2019),

obtained from the GOW 2 wave database, after applying the statistical technique of Principal Component Analysis and Maximum Dissimilarity. The selected cases have been propagated with the SWAN hydrodynamic model, in a domain defined by the coordinates 2.75°E-3.5°E and 37.5°E-39.5°E, to which two smaller meshes have been nested, in which it has been included: i) the group of islands of the Cabrera Archipelago and ii) the area of the departure / arrival port of tourist boats (Colònia de Sant Jordi).

For the reconstruction of the wave time series, the statistical technique based on the Radial Base Function (RBF) has been applied, in 35 geographical points of the Cabrera Park and adjacent areas. The points have been selected based on the permitted uses and activities of diving, anchoring, navigation and location of the tourist transport port.

### Operational Analysis

The operability has been analyzed taking as reference the maximum value of wave height (Hs) after the reconstruction of the waves, and using a threshold of Hs for each use, of which the total number of hours in which it has been analyzed exceeded the threshold value considered. The probability of finding the ideal conditions for navigation and the development of activities has been obtained. Subsequently, the point of each use that had a higher probability of optimal conditions was selected. Intervals of wave heights have been selected, with an increase of 0.5 m, to estimate the frequency of each wave height in the historical series analyzed.

### RESULTS

The dynamic downscaling of the developed waves has shown how the presence of the islands and contours of the port modify the direction and generate areas of lower wave energy with lower wave heights.

The climatic reconstruction has shown different average values of Hs for each point, being the highest value of 1.06 m, to the SE of Mallorca. Of those located in the Cabrera Archipelago, the highest value, of 0.97 m, has been given to the South of Cabrera. The maximum Hs value of the registry has been given to the E of Mallorca, with 6.24 m, and of the Archipelago, it has been given to the E of Cabrera, with a value of 5.30 m. The points with the lowest Hs average value have been given at

the port and at Cabrera W, in the authorized area for funding.

The probability of finding the optimal conditions for each use has shown, in general terms, that there is between a 0.90 and a 0.99 probability of finding the ideal conditions for the activities development. A clear seasonal pattern has been observed, with more favorable conditions during the summer months than in winter.

The analysis of the distribution of the significant wave height above the delimited thresholds has shown how the probability of finding Hs values above the threshold decreases as the Hs value increases. The probability curve is inversely proportional to the curve of the average number of hours in which the ranges of Hs have been exceeded.

### DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The climatic characterization of the Park of Cabrera using the technique of hybrid downscaling, has turned out to be appropriate for the analysis of certain geographical points in which the analyzed activities are carried out. However, the model has not been validated, so it poses as a pending task.

With the results obtained, it has been inferred that the general conditions of the area are optimal between 90% and 99% of the time. During the summer months, it is when the conditions are more favorable, coinciding with the greater frequency of tourists in the Park.

Visits to the Park are increasing during spring and autumn months (Memory of the Park, 2018), probably due to good temperatures and climate change. Knowing the relationship between the sea parameters analyzed in this work and the aspects derived from anthropic use and climate change is necessary for an adequate management of the Park's maritime space.

### REFERENCES

- Camus, P. (2009). Metodologías para la definición del clima marítimo en aguas profundas y someras. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria.
- Camus P., Mendez, F., Medina, R., Tomas A., Izaguirre C. (2013). High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. *Coastal Engineering*, 72. pp 56–68.
- Memoria anual de actuaciones en el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera (2018). Conselleria Medi Ambient, Agricultura i Pesca.
- Rueda, A.C. (2016). Metodologías para el análisis de riesgo de inundación en zonas costeras. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria.

# Índice

**Resumen**

**Abstract**

**Lista de acrónimos**

**Índice de Figuras**

**Índice de Tablas**

<b>1. Introducción</b>	<b>Pág. 1</b>
1.1. El Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera	Pág. 1
1.2. La navegación en el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera	Pág. 3
1.3. Limitaciones de los usos del Parque: el caso concreto de la navegación	Pág. 5
1.4. La caracterización met-ocean en la planificación de usos	Pág. 7
1.5. Justificación del trabajo y objetivos	Pág. 8
<b>2. Zona de estudio</b>	<b>Pág. 9</b>
2.1. Descripción geográfica y geológica	Pág. 11
2.2. Descripción climática y oceanográfica	Pág. 11
2.3. Descripción política y socioeconómica	Pág. 13
2.4. Ecosistemas y valores naturales	Pág. 14
2.5. Otras figuras de protección	Pág. 15
<b>3. Bases de datos</b>	<b>Pág. 16</b>
3.1. Batimetría, oleaje y viento	Pág. 16
3.2. Usos del Parque y rutas de navegación	Pág. 16
<b>4. Metodología</b>	<b>Pág. 17</b>
4.1. Regionalización híbrida del oleaje	Pág. 18
4.1.1. Mallas empleadas	Pág. 18
4.1.2. Selección de estados de mar estadísticamente representativos	Pág. 21
4.1.2.1. Análisis de Componentes Principales (PCA)	Pág. 21
4.1.2.2. Algoritmo de Máxima Disimilitud (Max-Diss)	Pág. 22
4.1.3. Propagación del oleaje con el modelo SWAN	Pág. 22
4.1.4. Reconstrucción del oleaje en los puntos objetivo: RBF	Pág. 24
4.2. Usos del Parque y rutas de navegación: puntos objetivo y umbrales de operatividad	Pág. 24
<b>5. Resultados</b>	<b>Pág. 31</b>
5.1. Propagación del oleaje con el modelo SWAN	Pág. 31
5.2. Reconstrucción climática en los puntos de interés	Pág. 35
5.3. Operatividad de los usos de interés	Pág. 38
5.3.1. Buceo	Pág. 38
5.3.2. Fondeo	Pág. 40
5.3.3. Navegación	Pág. 41
5.3.3.1. Ruta de tráfico marítimo entre Mallorca y Menorca	Pág. 41
5.3.3.2. Ruta de transporte de turistas entre Mallorca y el	

Parque del Archipiélago de Cabrera	Pág. 43
5.3.4. Análisis de los puntos con mayor número de horas registradas	Pág. 45
5.3.4.1. Punto 6 de buceo	Pág. 45
5.3.4.2. Punto 4 de fondeo	Pág. 47
5.3.4.3. Punto 5 de la ruta de tráfico marítimo	Pág. 48
5.3.4.4. Punto 7 de la ruta de transporte de pasajeros	Pág. 49
<b>6. Discusión/recomendaciones</b>	<b>Pág. 50</b>
6.1. Modelo hidrodinámico SWAN	Pág. 50
6.2. Operatividad de los usos de interés	Pág. 50
6.3. Implicaciones de los usos: frecuentación y cambio climático	Pág. 51
<b>7. Conclusiones</b>	<b>pág. 53</b>
<b>8. Referencias</b>	<b>Pág. 53</b>

## Listado de acrónimos

**ANEI** – Área Natural de Especial Interés

**Dir** – Dirección media del olaje

**DMT** - Modelo Digital de Terreno

**EMODNET** – European Marine Observation and Data Network

**ECMWF** – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

**GEBCO** – General Bathymetric Chart of the Oceans

**GOW 2** – Global Ocean Waves

**H<sub>s</sub>** – altura de ola

**IDEIB** – Infraestructura de Datos Espaciales de las Islas Baleares

**MAX-DISS** – Algoritmo de Máxima Disimilitud

**PCA** – Análisis de Componentes Principales

**PN** – Parque Nacional

**PNMTAC** – Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera

**PORN** – Plan Rector de los Recursos Naturales del Parque

**PRUG** – Plan Rector de Uso y Gestión

**SWAN** – Simulating WAVes Nearshore

**T<sub>m</sub>** – Periodo medio

**WW3** – Wave Watch III

**ZEC** – Zona de Especial Conservación

**ZEE** – Zona Económica Exclusiva

**ZEPA** – Zonas de Especial Protección para las Aves

**ZEPIM** – Zonas de Especial Protección de Importancia para el Mediterráneo

## Índice de Figuras

Número figura	Descripción	Página
1.1	Historia de la Red de Parque Nacionales de España	2
1.2	Los 15 Parque Nacionales de España	2
1.3	Límites de las zonas y actividades permitidas en el PNMTAC	6
1.4	Ubicación puerto Colònia de Sant Jordi	7
1.5	Zonas de fondeo autorizadas en el PNMTAC y clasificación por eslora	7
2.1 (A)	Ubicación general zona de estudio	10
2.1 (B)	Ubicación zona de estudio en islas Baleares	10
2.1 (C)	Límites PNMTAC	10
2.2.	Islas e islotes del Archipiélago de Cabrera	10
2.3	Series de $H_s$ , $T_m$ y Dir para el periodo de tiempo de 1979 al 2019	12
2.4 (A)	Diagrame de dispersión de $H_s$ frente a $T_m$	12
2.4 (B)	Diagrame de dispersión de $H_s$ frente a dirección del oleaje	12
2.5 (A)	Rosa de oleaje de altura de ola significativa	13
2.5 (B)	Rosa de oleaje de altura de periodo medio	13
2.6 (A)	Reconstrucción series altura de ola significativa	13
2.6 (B)	Reconstrucción series periodo medio	13
2.7 (A)	Límites Zona Económica Exclusiva de España	14
2.7 (B)	Límites Marítimos Islas Baleares	14
2.8	Mapas con las figuras del protección del PNMTAC	15
4.1	Mapa conceptual de la metodología desarrollada	18
4.2	Imagen de las islas Baleares con las mallas de trabajo	19
4.3 (A)	Malla general con las mallas anidadas y límites del PNMTAC	20
4.3 (B)	Malla del Archipiélago de Cabrera	20
4.3 (C)	Malla de detalle del puerto de Sant Jordi	20
4.4 (A)	Malla general de la batimetría interpolada	21
4.4 (B)	Malla del Archipiélago de Cabrera de la batimetría interpolada	21
4.4 (C)	Malla de detalle del puerto de Sant Jordi batimetría interpolada	21
4.5	Localización de los espectros de los contornos	23
4.6	Ficha de los puntos de buceo	25
4.7	Ficha de los puntos de fondeo diurno	26
4.8	Ficha de los puntos de fondeo nocturno	27
4.9	Ficha del punto del puerto deportivo	28
4.10	Ficha de los puntos de transporte marítimo	28
4.11	Ficha de los puntos del transporte de pasajeros	29
4.12	Imagen de la isla de Cabrera con los puntos de la malla de detalle	29
5.1	Número total de casos simulados para cada año	31
5.2	Representación $H_s$ y $T_m$ resultados SWAN para febrero del año 1989	33
5..3	Representación $H_s$ y $T_m$ resultados SWAN para enero del año 2004	34
5.4	Representación $H_s$ y $T_m$ resultados SWAN para septiembre del año 2018	35
5.5	Nº de horas de alturas de ola > 1.5 m para cada punto analizado de buceo	39
5.6	Nº de horas de alturas de ola > 1.5 m para cada año en los seis puntos	39
5.7	Nº de horas de alturas de ola > 1.5 m para cada mes en los seis puntos	39
5.8	Nº de horas de alturas de ola > 2 m para cada punto analizado de fondeo	40
5.9	Nº de horas de alturas de ola > 2 m para cada año en los dos puntos	41

5.10	Nº de horas de alturas de ola > 2 m para cada mes en los dos puntos	41
5.11	Nº de horas de alturas de ola > 4 m para cada punto analizado de la ruta de transporte marítimo	42
5.12	Nº de horas de alturas de ola > 4 m para cada año en los cinco puntos	43
5.13	Nº de horas de alturas de ola > 4 m para cada mes en los cinco puntos	43
5.14	Nº de horas de alturas de ola > 2 m para cada punto analizado de transporte turístico	44
5.15	Nº de horas de alturas de ola > 2 m para cada para cada año en los nueve puntos	45
5.16	Nº de horas de alturas de ola > 2 m para cada para cada mes en los nueve puntos	45
5.17	Nº de horas de alturas de ola > 1.5 m clasificadas en el intervalo de 1.5 a > 5 m, cada 0.5 m	46
5.18 (A)	Porcentaje de no superación de horas de los valores de altura de ola entre 1.5 y 5 m	46
5.18 (B)	Media del número de horas de superación valores de altura de ola buceo	46
5.19	Nº de horas de alturas de ola > 2 m clasificadas en el intervalo de 2 a > 3 m, cada 0.5 m	47
5.20 (A)	Porcentaje de no superación de horas de los valores de altura de ola entre 2 y 3 m	48
5.20 (B)	Media del número de horas de superación valores de altura de ola fondeo	48
5.21	Nº de horas de alturas de ola > 2 m clasificadas en el intervalo de 2 a > 6 m, cada 0.5 m	48
5.22 (A)	Porcentaje de no superación de horas de los valores de altura de ola entre 2 y 6 m	49
5.22 (B)	Media del número de horas de superación valores de altura de ola ruta tráfico marítimo	49
5.23	Nº de horas de alturas de ola > 2 m clasificadas en el intervalo de 2 a > 3 m, cada 0.5 m	49
5.24 (A)	Porcentaje de no superación de horas de los valores de altura de ola entre 2 y 3 m	50
5.24 (B)	Media del número de horas de superación valores de altura de ola ruta transporte colectivo	50

## Índice de Tablas

Número tabla	Descripción	Página
2.1.	Valores mínimos, medios y máximos de los parámetros del estado de mar para el archipiélago de Cabrera en el periodo de tiempo desde el año 1979 al 2019	12
4.1.	Características generales de las tres mallas empleadas	19
4.2.	Características generales de las tres mallas empleadas	21
4.3.	Número de puntos seleccionados para cada uso	24
4.4.	Valor de Hs para cada uso y criterio de selección	30
5.1.	Valor de Hs máxima, medio y mínima y dirección de oleaje en los puntos de estudio, obtenidos con RBF. Se indica en la última columna la malla origen. B = buceo, FD = fondeo diurno, FN = fondeo nocturno, RM = ruta marítima, RP = ruta empresas turísticas y P = puerto	37
5.2.	Horas de superación para cada punto de buceo y probabilidad de superación y no superación	38
5.3.	Horas de superación para cada punto de fondeo y probabilidad de superación y no superación	40
5.4.	Horas de superación para cada punto de ruta marítima y probabilidad de superación y no superación	42
5.5.	Horas de superación para cada punto de transporte turístico y probabilidad de superación y no superación	44



## 1. Introducción

Desde hace miles de años, las zonas costeras de todo el planeta han sido zonas de interés humano debido a sus recursos naturales, especialmente los vivos, y desde hace unas décadas, la práctica del turismo nacional e internacional está cobrando cada vez mayor fuerza en dichas zonas, sobre todo en verano, fundamentalmente por la oferta turística “de sol y playa” (Dodds y Kelman, 2008); aunque este modelo de producto a vender está cambiando gradualmente con la desestacionalización de la oferta (Megías-Baños, 2019).

El sector turístico moviliza anualmente a millones de personas por todo el planeta. Los datos del último informe de la Organización Mundial del Turismo de 2018, muestran cómo España es el segundo destino elegido de Europa, después de Francia, para recibir visitas de turistas internacionales. En el año 2018, llegaron a España 82.6 millones de turistas internacionales, tanto a territorio peninsular como a insular, batiendo de nuevo el récord de visitantes (UNWTO, 2019).

Las personas eligen visitar entornos costeros, y sobre todo playas, fundamentalmente por cinco motivos principales (“*Big Five*”): seguridad, servicios, calidad del agua, ausencia de residuos sólidos y paisaje (Williams y Micallef, 2009). Normalmente, las playas con infraestructuras son de tipo urbano o semiurbano, no siendo siempre esta la mejor opción para un sector de turismo que busca tranquilidad y disfrute del paisaje, por ejemplo (Megías-Baños, 2019).

Las islas Baleares son foco de gran número de turistas anualmente, y la isla de Mallorca en concreto, se estima que es visitada por un número de turista diez veces mayor que el de la población local (Memoria Parque, 2018). Parte de esos visitantes encuentran un atractivo en las visitas al Archipiélago de Cabrera, motivados por la conservación de su patrimonio natural. Desde el año 1991 en que se declaró Parque, se ha posibilitado reforzar la conservación de dichos valores naturales, los cuales, son de incalculable valor para un determinado sector poblacional, y entre los que destacan las aguas transparentes y paisajes vírgenes (Roig-Munar, 2003).

### 1.1. El Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera

Los Parques Nacionales son espacios naturales de especial conservación debido a sus altos y excepcionales valores naturales y culturales, además de sus particularidades de biodiversidad y geomorfología. Debido a tal singularidad, se consideran de interés general para el Estado, al ser representativos del patrimonio natural. El objetivo fundamental de los Parques es asegurar la conservación de sus valores naturales. Se consideran otros objetivos secundarios de los Parques: compatibilizar su conservación con el uso por la ciudadanía y estar al servicio de la investigación científica (MITECO).

Según define el Ministerio para la Transición Ecológica, son seis las características o requisitos que deben reunir los espacios para ser definidos Parques: representación del sistema natural al que pertenece, extensión adecuada para su evolución natural y que aseguren los procesos ecológicos, presentar un estado de conservación en el que haya escasa intervención humana, continuidad territorial sin elementos de fragmentación, inexistencia de núcleos urbanos en su interior y estar rodeados de un territorio susceptible para ser declarado como zona periférica de protección (MITECO).

El 8 de diciembre de 1916 se desarrolló la primera Ley de Parques Nacionales española, haciendo que fuera uno de los países pioneros en Europa en relación a las figuras de protección (Mollá Ruiz-Gómez, 1995). Con esta ley, aunque solo constaba de tres artículos, se declararon los

dos primeros Parques Nacionales españoles: el de Ordesa y el de la Montaña de Covadonga. Hasta el año 1954, no hubo cambios ni ampliaciones relevantes, momento a partir del cual, se fueron sumando 13 figuras más (Fig. 1.1), con diversos cambios legislativos, en los que se fue ampliando la definición de la figura de los Parques y fueron cobrando mayor fuerza los factores ecológicos, y no solamente los históricos y paisajísticos (MITECO).

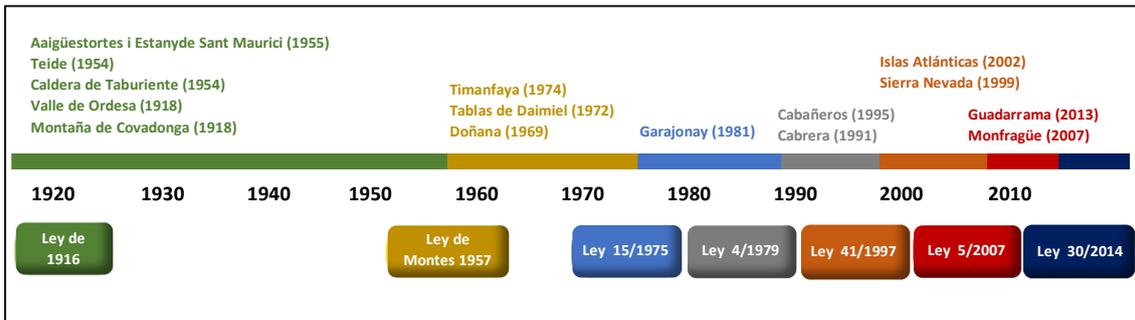


Fig. 1.1 – Historia de la Red de Parques Nacionales de España. Tomado de: [www.miteco.gob.es](http://www.miteco.gob.es)

Actualmente, la Red de Parque Nacionales de España se compone de 15 Parques, de los cuales, dos son Parque Marítimo-Terrestres, y el resto exclusivamente terrestres (Fig. 1.2). Los dos Parques Marítimo-Terrestres corresponden al Archipiélago de Cabrera (Islas Baleares) (PNMTAC) y a las Islas Atlánticas de Galicia (Galicia), siendo el Parque de Cabrera el más grande de la Red, desde su ampliación en febrero del año 2019. El PNMTAC tenía una superficie inicial de 10021 hectáreas, de las cuales, 8703 eran marinas y el resto terrestres, pero tras su ampliación, su superficie ha aumentado a 90794 hectáreas, de las cuales, 89478 ha son marinas y 1316 ha son terrestres; a diferencia del Parque de las Islas Atlánticas, cuya superficie es notablemente inferior: 8480 hectáreas, de las cuales 7285.2 son marinas y 1194.8 son terrestres (MITECO).



Fig. 1.2 – Imagen con los 15 Parques Naturales de España. Se recuadra en el Parque del Archipiélago de Cabrera. Tomado de: [www.miteco.gob.es](http://www.miteco.gob.es)

Debido a las cualidades geográficas y ecológicas del Archipiélago de Cabrera, y basándose en estudios relativos al entorno y biodiversidad, se consideró necesario elevar la figura de protección del Archipiélago de Cabrera a la de Parque Nacional Marítimo-Terrestre. El PNMTAC se declaró el 29 de abril de 1991, mediante la Ley 14/1991 (*BOE* núm. 103, de 30 de abril de 1991), quedando definido según lo que establece el artículo 22.3 de la Ley 4/1989 de 27 de marzo, de Conservación de Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestre (*Ley 14/1991, de 29 de abril*).

El 7 de febrero del año 2019 se formalizó la ampliación de los límites del Parque, incorporando espacios marinos colindantes. En la actualidad, el PNMTAC está formado por el Archipiélago de Cabrera, dentro del cual se encuentra la isla de Cabrera, Cabrera Gran, isla de Conills y quince islotes (*Conselleria de Medi Ambient i Territori – GOIB*), además de las aguas que las rodean, que ocupan la mayor superficie del PNMTAC, siendo la mayor extensión insular del Mediterráneo español sin urbanizar (*Mollá Ruiz-Gómez, 1995*).

La gestión de este se define en el Plan Rector de los Recursos Naturales del Parque (PORN) (Real Decreto 1431/1992 de 27 de noviembre. *BOE* núm. 42, de 18 de febrero de 1993) y en el Plan Rector de Uso y Gestión (PRUG) (Decreto 58/2006 de 1 de julio. *BOIB* núm. 97 de 11 de julio de 2006). El PRUG se aprobó para el periodo 2006-2012, que figura en el anexo, tal y como prevé la disposición final tercera de la Ley 14/1991, de 29 de abril, de creación del PNMTAC y la disposición adicional única del Real decreto 277/1995, por el que se aprueba el Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Nacional Marítimo Terrestre del Archipiélago de Cabrera, en relación con el artículo 31 de la Ley 5/2005. No obstante, transcurrido este plazo, su vigencia se prorrogará hasta la entrada en vigor de un nuevo Plan Rector de Uso y Gestión.

En el año 2009, la gestión del PNMTAC se transfirió al Gobierno de las Islas Baleares, quedando recogido en el Real Decreto 1043/2009, de 29 de junio, *BOE* núm. 157, de 30 de junio de 2009, de ampliación de las funciones y servicios de la Administración del Estado traspasados a la Comunidad Autónoma de las Illes Balears, en materia de conservación de la naturaleza (Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera).

En el PORN de Cabrera se define el estado de conservación y evolución de los valores naturales considerados, clasificándose estos en ecosistemas, paisajes y elementos singulares. Además, se especifican las limitaciones de usos y zonas, así como actividades, obras e instalaciones sujetas a evaluación de impacto ambiental, y los criterios de referencia que tienen incidencia en el Parque (*Real Decreto 1431/1992*).

## 1.2. La navegación en el Parque Nacional Marítimo Terrestre del Archipiélago de Cabrera

No todas las personas eligen visitar un lugar concreto por los mismos motivos, y el Parque de Cabrera no es excepción para dicha elección; no obstante, el aumento de visitas ha ido en aumento en los últimos años, alcanzándose la cifra de 39670 personas en el año 2018 (*Memoria Anual del Parque 2018*). Respecto a la frecuentación a un lugar concreto, uno de los factores más relevantes es la consideración del tipo de visitantes que deciden acudir a un lugar y el tipo de actividades a desarrollar (*Garcias-Gomila, 1999*).

Con independencia de las actividades que se pueden realizar en el PNMTAC, las visitas se realizan exclusivamente por embarcaciones, bien de transporte colectivo, bien por embarcaciones propias que tengan permiso para navegar más allá de las 2 millas de la costa, distancia permitida por Capitanía Marítima (*PRUG - Decreto 58/2006*), permitiéndose el fondeo

en las zonas definidas por el PRUG. También se establecen una serie de usos relacionados con otras administraciones: usos militares y actividades de la Guardia Civil y la pesca profesional, la cual está regulada por las especificaciones del Real Decreto 1431/1992.

El Plan define una serie de categorías en base al anexo del Real Decreto 1803/1999 de 26 de noviembre, en el que se establecen las siguientes zonas y actividades (ANEXO I):

- **Zona de Reserva:** áreas con valores naturales definidos por su rareza, fragilidad, biodiversidad o interés científico, que requieren del grado máximo de protección.
- **Zona de Uso Restringido:** áreas capaces de albergar un cierto número de uso público. Dentro de estas se establecen las Zonas de Uso Restringido marino (ZURm): zonas de buceo y zonas de fondeo diurno. Las cuatro zonas de buceo: Illa de ses Bledes, Derelicta Ana Rosa, Zona de Cala Galiota y Zona SW de l'Ílla dels Conills; y las tres zonas de fondeo diurno: Zona de la Coveta Roja, zona del puerto y zona de fondeo des Burri.
- **Zona de Uso Moderado:** áreas donde predomina un ambiente natural con mayor capacidad de acoger a visitantes que los casos anteriores. En relación a las zonas marinas, se definen dos: Sa Cova Blava y las aguas restantes del PNMTAC, salvo las delimitadas como reserva marina, zonas de uso restringido marino o como zonas de uso especial.
- **Zona de Uso Especial:** áreas de pequeña extensión donde se encuentran construcciones e instalaciones mayores.

De entre las opciones de visitar el Parque, en la Memoria Anual de Actuaciones 2018 del Archipiélago de Cabrera, se observa cómo ha sido la evolución de las visitas a través de tres vías diferentes: barcos colectivos, fondeos y navegación por embarcaciones propias. En todos los casos, los mayores picos se han dado en los meses de julio y agosto. Por otro lado, de estas vías, a la que se añade el uso en las zonas de buceo, la mayor concentración de personas ha sido debida a los fondeos, seguido del transporte colectivo, navegación con embarcaciones propias y buceo ([Memoria Parque, 2018](#)) (ANEXO II).

Paralelamente, y aunque no forma parte de los usos turísticos, en términos de navegación, es relevante considerar que el Parque cuenta con cinco embarcaciones propias, centradas en apoyo, gestión, vigilancia y gestión del Parque. A lo largo del año 2018, dichas embarcaciones, en conjunto, realizaron 420 trayectos en 190 días (una media de 2.2 al día) ([Memoria Parque, 2017](#)).

Respecto a las rutas de navegación de los barcos colectivos de transporte de pasajeros, se ha observado un aumento de más del doble del número de visitantes en siete años a través de este servicio de transporte. En el año 2012, el número de visitantes por barco colectivo fue de 21272, cifra que aumentó a 39670 en el año 2018; no obstante, la mayor cantidad de visitantes recibida por esta vía fue de 43428 personas en el año 2017. De dicho cómputo anual, fueron los meses de diciembre y enero en los que no hubo ningún visitante por esta vía ([Memoria Parque, 2018](#)).

Por otro lado, el número de visitantes en los meses que no son de temporada alta, varía entre años, siendo los meses de julio y agosto los de mayor número de visitas. *Grosso modo*, en el resto de meses, ha habido un aumento considerable del número de visitantes, no repartido de manera homogénea a lo largo del año. Se destaca también, cómo en el año 2017, pese a tener mayor número de visitantes, los meses de febrero, septiembre, octubre y noviembre, recibieron menos visitantes que en el año anterior, lo cual supone mayor concentración de visitantes en menos meses del año, ampliándose, por otro lado, el número de visitantes de abril a junio (ANEXO III).

Se torna importante la relación entre la afluencia de visitantes y las condiciones climáticas, por diferentes motivos ([Garcias-Gomila, 1999](#)): heterogeneidad espacio-temporal de visitantes,

perfil de demanda y actividades a realizar. Si bien el número máximo de visitas al Parque está reglamentado, la demanda en los meses con buenas condiciones es un factor relevante para tratar de evitar impactos derivados de la *turistificación* o *gentrificación* (Megías-Baños, 2019).

Como se ha mencionado anteriormente, las únicas vías de acceso posibles al Parque son mediante embarcaciones de diferente categoría, muchas de las cuales eligen el fondeo como opción para disfrutar del entorno (Roig-Munar, 2003). Estas actividades, junto al buceo, están estrechamente relacionadas con la climatología, y dependen directamente de que se cumplan ciertos umbrales de operatividad para poder desarrollarlas como, por ejemplo, valores de una altura de ola para las embarcaciones de transporte pasajeros.

### 1.3. Limitaciones de los usos del Parque: el caso concreto de la navegación

Las limitaciones de usos del Parque están definidas en el PORN, en el cual se establece por un lado las limitaciones generales, y por otro, las limitaciones específicas y criterios de zonificación. En cuanto a las limitaciones generales, se limitan los usos que puedan generar un perjuicio en la evolución natural de los paisajes, ecosistemas y recursos. En relación a las limitaciones específicas, se remarcan zonas de elevado valor natural e histórico que requieren de protección especial, siendo dichas zonas determinadas en el PRUG.

En relación a las implicaciones de la zonificación sobre el régimen de los usos, en el PRUG se establecen las capacidades de carga y requisitos de acceso a cada una de ellas. Se explican dichas condiciones para las actividades relacionadas con la navegación, el fondeo y el buceo con escafandra autónoma. Tanto la navegación como el fondeo y el buceo con escafandra autónoma requieren de previa autorización. Para consultar las diferentes zonas, usos, actividades y prohibiciones (Fig. 1.3), se puede visitar la web de la Conselleria de Medi Ambient i Territori.

- El número autorizado para el fondeo es de un máximo de 50 permisos al día, repartidos de la siguiente entre tres zonas: 30 en Burri, 12 en el muelle y 8 en la Coveta Roja, y ocasionalmente, se permite el abarloadamiento, exclusivamente durante un día.
- El número máximo de permisos de buceadores fija su límite máximo en 40 por día.
- El transporte colectivo tiene un máximo permitido de 300 personas de manera simultánea.

A continuación, se enumeran una serie de requisitos para los usos y actividades permitidas:

- **Visitas al Parque:** se puede realizar de dos formas: a través de barcas turísticas de empresas autorizadas para trasladar turistas, o bien por embarcaciones propias, para lo cual es necesario solicitar autorización de navegación o fondeo. En relación a las empresas autorizadas para realizar excursiones turísticas, son dos: Mar Cabrera y Excursiones a Cabrera, las cuales tienen salida desde el puerto situado en la Colònia de Sant Jordi (Mallorca) (Fig. 1.4) (Institut Balear de la Natura).

- **Permisos de navegación:** los permisos tienen una vigencia anual, y no se permite el fondeo en ninguna zona del Parque; no obstante, se permite el amarre en las boyas de fondeo diurno para embarcaciones de hasta 15 metros de eslora, en horario marcado entre una hora después del alba y una hora antes de la puesta de sol; y no se permite el amarre en el muelle salvo casos de emergencia. Para poder desembarcar, es necesario contar con embarcaciones auxiliares, y tan solo se permite en los dos muelles del Parque.





Fig. 1.4 – Ubicación del Puerto de la Colònia de Sant Jordi (Sur de Mallorca, Illes Balears). Tomado de: Google Earth®



Fig. 1.5 – Imagen con las zonas de fondeo autorizadas en el Parque del Archipiélago de Cabrera y su clasificación en función de la eslora de la embarcación. Tomado de: www.caib.es

#### 1.4. La caracterización met-ocean en la planificación de usos

La caracterización del clima marítimo es fundamental para una óptima gestión de las infraestructuras marítimas (Camus, 2009), pero también puede ser una información muy importante en la gestión de las zonas litorales, especialmente en tramos costeros en los que haya factores socio-económicos, humanos y/o medioambientales de interés.

Las bases de datos globales de oleaje procedentes de productos de reanálisis o hindcast, proporcionan información histórica durante largos periodos de tiempo, lo que ayuda a mejorar el conocimiento de la variabilidad climática a largo plazo, así como de las tendencias y los valores extremos. Esta información es también de gran utilidad en estudios costeros, y puede ser utilizada directamente como condiciones límites para la regionalización climática a pequeña escala (Pérez *et al.*, 2017).

El oleaje, entendido como la sucesión de ondas con periodos entre 0.5 segundos hasta 10 minutos, es el resultado de la interacción de las condiciones atmosféricas del viento en superficie sobre la superficie del mar. La variable oleaje se considera un proceso estocástico, lo que permite analizar a corto plazo sus características, así como las variaciones de los parámetros de los estados de mar, tales como: altura de ola significativa ( $H_s$ ), periodo medio ( $T_m$ ) y dirección del oleaje (Dir). La combinación de estos parámetros permite obtener un conocimiento más completo del oleaje, pero a su vez, dichos parámetros varían para cada estado de mar. Las condiciones variantes de los estados de mar horarios a lo largo del tiempo se describen a través de series temporales, cuyas características definen el clima marítimo a largo plazo para una zona concreta (Izaguirre, 2010)

Para caracterizar el clima marítimo a una escala de largo plazo, es necesario contar con una serie histórica de variables de estudio para poder realizar la caracterización estadística correspondiente. Normalmente, para definir un estado de mar se emplean tres variables: altura de ola significativa, periodo medio o periodo pico y dirección media del oleaje (Camus, 2009). En particular, la altura de ola significativa suele ser la variable más utilizada para caracterizar las condiciones climáticas del oleaje y sus posibles implicaciones en cuestiones de operatividad.

Por otro lado, estudios previos sobre la navegación recreativa para la planificación del espacio marino en Mallorca, permitieron estimar el promedio de fondo marino disponible para el fondeo durante los meses de temporada alta (verano), considerando la distancia promedio de los barcos y las condiciones climáticas. Dicha metodología es extrapolable a diferentes escenarios de gestión espacial de zonas litorales y entornos marinos considerando las componentes climáticas (Balaguer *et al.*, 2009).

## 1.5. Justificación del trabajo y objetivos

El aumento de visitantes con el paso del tiempo al Parque de Cabrera, requiere una gestión apropiada para la zona litoral en cuestión. Para la gestión de las zonas litorales, caracterizar las condiciones del oleaje en las zonas costeras y de navegación, permite conocer la operatividad de diferentes usos limitados por ciertos umbrales de energía del oleaje. Generar sinergias entre las variables oceanográficas y los usos antrópicos, puede conllevar una mejor gestión del litoral a nivel local.

Las actividades en el mar están condicionadas por parámetros del oleaje que condicionan su funcionalidad. Sin embargo, no hay una normativa al respecto para muchos usos, y la mayor parte de las veces se rigen por “criterio experto” para realizar una determinada actividad, como bucear o navegar. Ofrecer un valor determinado de un parámetro de oleaje que determina si una actividad se puede realizar o no, resulta complejo debido a la componente multivariante que afecta al oleaje y, en la mayoría de los casos, requiere de un aumento de resolución espacial a partir de la información climática disponible (proceso denominado *downscaling*), ya que la cercanía de la costa y efectos batimétricos locales condicionan aspectos de propagación del oleaje local costero frente a las condiciones en pleno mar abierto (Winckler, 2017). Para embarcaciones de recreo, por ejemplo, se establecen unos criterios de altura de ola que pueden soportar las embarcaciones de las diferentes categorías de diseño de los barcos. Por otro lado, aunque Balaguer *et al.*, 2011 mencionaran una altura óptima inferior a 0.5 m para el fondeo en aguas mallorquinas, no hay una normativa clara al respecto. Pese a todo ello, se puede inferir o

aproximar un valor para parametrizar, bien fundamentado con literatura existente, bien por haber sido experimentado o bien por “criterio experto”.

Tratar de relacionar las variaciones meteo-oceanográficas a largo plazo en una escala local, puede favorecer la ordenación del espacio marítimo en espacios en los que se desarrolla una actividad muy concreta, como es el caso de la navegación en el PNMT del Archipiélago de Cabrera. Por tanto, este estudio trata de relacionar el estudio del clima del oleaje a largo plazo con los usos de actividades principales realizados en el Parque de Cabrera, para tratar de comprender las implicaciones que pudiera tener sobre determinadas actividades y usos.

El **objetivo principal** del estudio es analizar las implicaciones de las condiciones met-oceánicas sobre el uso antrópico en la navegación en el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera.

Los objetivos secundarios que se plantean para llevar a cabo el objetivo principal son los siguientes:

- Analizar los usos y actividades del Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera. Para ello se requiere de una recopilación, análisis y postproceso de la información pertinente existente.
- Desarrollar un downscaling costero del oleaje sobre la zona objeto de este estudio. Se espera que las técnicas de regionalización híbrida del oleaje permitan ofrecer una reconstrucción apropiada para el Archipiélago de Cabrera.
- Realizar una caracterización del clima marítimo del Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera.
- Analizar la operatividad (global, anual y mensual) del buceo, fondeo y navegación en el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera en función de estadísticos climáticos.

## 2. Zona de estudio

El Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera es un ecosistema insular no alterado del mar Mediterráneo perteneciente al municipio de Palma, ubicado al sur de la isla de Mallorca (Illes Balears), a 10 millas náuticas de Cap Salines (Colònia de Sant Jordi) desde Na Foradada, el primer islote del archipiélago (Moreno y Pino, 2004), extendiéndose a lo largo del eje nor-noroeste y sur-suroeste (Fig. 2.1).

El conjunto de islas e islotes que configuran el PNMTAC es el siguiente: Na Foradada, S'illot de Na Foradada, S'illot Pla, Na Pobra, Na Plana, L'Esponja, Conejera (Conillera o Illa dels Conills), Na Redona, Cabrera, Illa des Fonoll, S'illa de ses Bledes, S'illa de ses Rates, S'Estell Xapat, S'Estell de s'Esclatasang, L'Imperial, S'Estell des Coll y S'Estell de Fora (Conselleria de Medi Ambient i Territori – GOIB) (Fig. 2.2). Entre todas suman poco más de 13 km<sup>2</sup> de superficie emergida, con una línea de costa de aproximadamente 57 km. La altitud máxima y mínima es de 172 m y 0 m sobre el nivel del mar, respectivamente, con una profundidad máxima del fondo marino registrada de 118 m (MITECO).

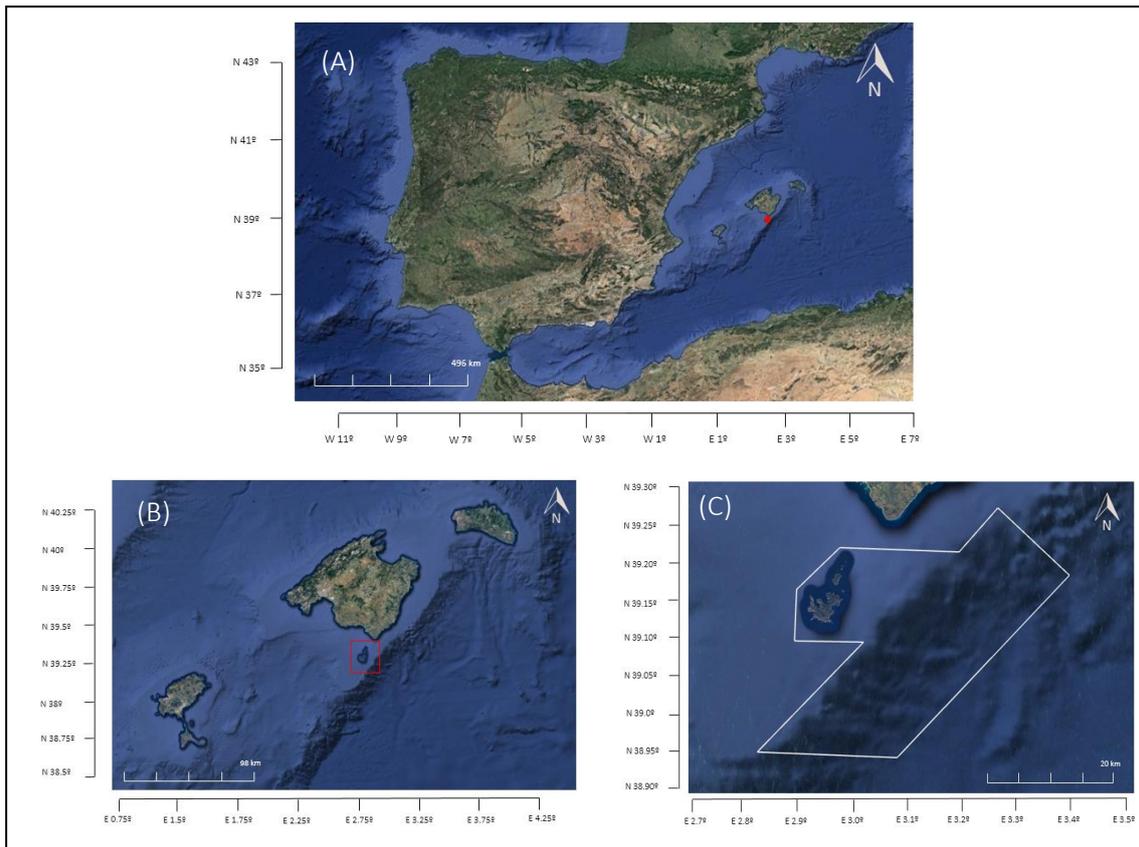


Fig. 2.1 – (A) Ubicació de la zona de estudi indicada amb un punt vermell, en un mapa general de la Península Ibèrica i les Illes Balears, (B) ubicació de l'Arxipèlag de Cabrera al sud de Mallorca i (C) límits del PNMTAC. Tomado de: Google Earth®

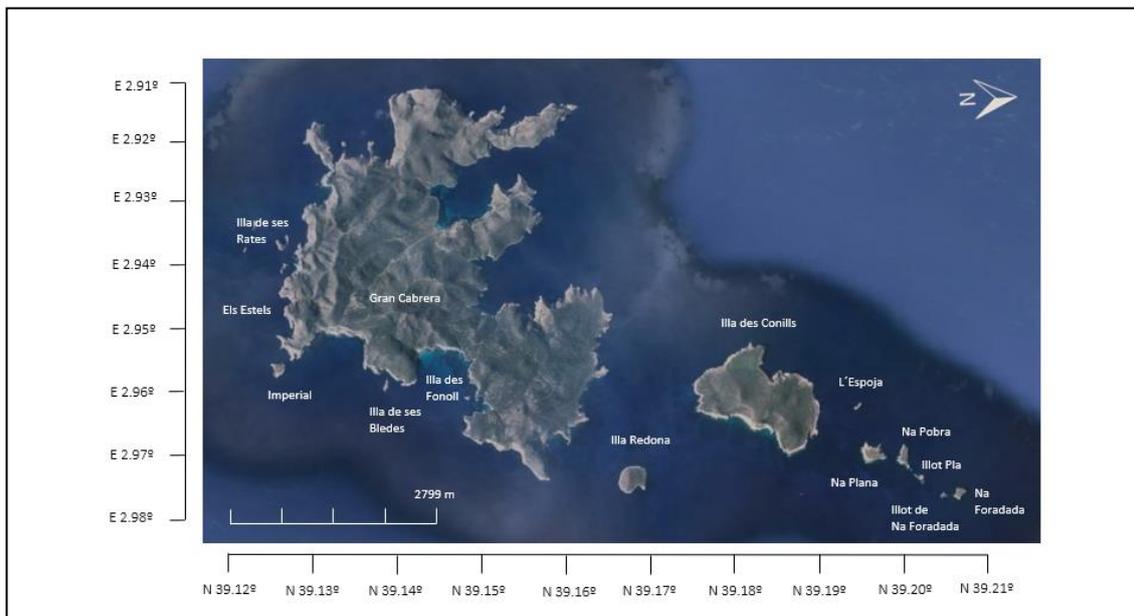


Fig. 2.2 – Islas e islotes que configuran el PNMTAC. Tomado de: Google Earth®

## 2.1. Descripción geográfica y geológica

El archipiélago de Cabrera es un afloramiento meridional de las Sierras de Levante ([Wikipedia, castellano: Parque nacional marítimo-terrestre del Archipiélago de Cabrera, 2019](#)), compuesto por un conjunto de islas e islotes calcáreos que emergen del mar, y que en general, han estado deshabitadas a lo largo de la historia ([Moreno y Pino, 2004](#)), si bien, han sido foco de búsqueda de refugio y recursos naturales de piratas y ciertas civilizaciones, como la romana, la fenicia o la cartaginesa, entre otras ([MITECO](#)). Por otro lado, la geomorfología presenta irregularidades, dotando al archipiélago de numerosos acantilados y calas ([Real Decreto 1431/1992](#)). El archipiélago se enmarca dentro del archipiélago Balear, en la cuenca occidental del Mediterráneo, suponiendo un 0.36% de la superficie de este, y se caracteriza por un relieve escarpado y abrupto ([Moreno y Pino, 2004](#)).

Al igual que la península Ibérica, forma parte de la placa euroasiática, destacando al sur del archipiélago, una montaña submarina conocida como escarpe de Emile Baudot, una de las zonas más profundas del Mediterráneo español que se extiende casi 300 km desde Formentera hasta Menorca, con un inicio, en la cuenca argelino-balear, a una profundidad de más de 2 km, llegando a la plataforma continental a unos 200 m de profundidad ([OCEANA](#)). Alrededor de éste, se han registrado 118 pitones volcánicos, configurando el Campo Volcánico Sur Balear, cuya extensión es superior a los 500 km<sup>2</sup> ([Acosta, 2006](#)).

Junto a las islas de Mallorca, Ibiza y Formentera, forma parte de la prolongación de la Cordillera Bética, a diferencia de Menorca, la cual es una prolongación entre Córcega y Cerdeña y las Cadenas Costero-Catalanas. Son islas continentales, no de origen volcánico, que en su momento formaron parte de extensiones mayores, logrando la separación definitiva de Mallorca hace unos 12000 años, tras las variaciones del mar del último periodo glacial ([Moreno y Pino, 2004](#)).

## 2.2. Descripción climática y oceanográfica

Con un clima característico mediterráneo semiárido, el Parque tiene una precipitación media anual de 330 mm a 407 mm, y una temperatura media de 18°C ([MITECO](#)). La región bioclimática a la que pertenece, la del Mediterráneo, se caracteriza por unos inviernos húmedos y templados y veranos calurosos y secos ([Moreno y Pino, 2004](#)), y con un régimen de mareas micromareal. Los vientos dominantes son la Tramontana (N), el Gregal (NE) y el Llevant (E) ([Real Decreto 1431/1992](#)).

Debido a la ausencia de registros instrumentales in-situ disponibles (ej. boyas), se ha recurrido a la base de datos GOW2 para realizar una caracterización inicial del oleaje. GOW2 es una reconstrucción histórica que cubre 40 años, desde el año 1979 al 2019, y presenta una resolución horaria y espacial de ~25km. El nodo de análisis seleccionado se encuentra en el punto central de la malla de estudio (longitud 3°E y latitud 39°N).

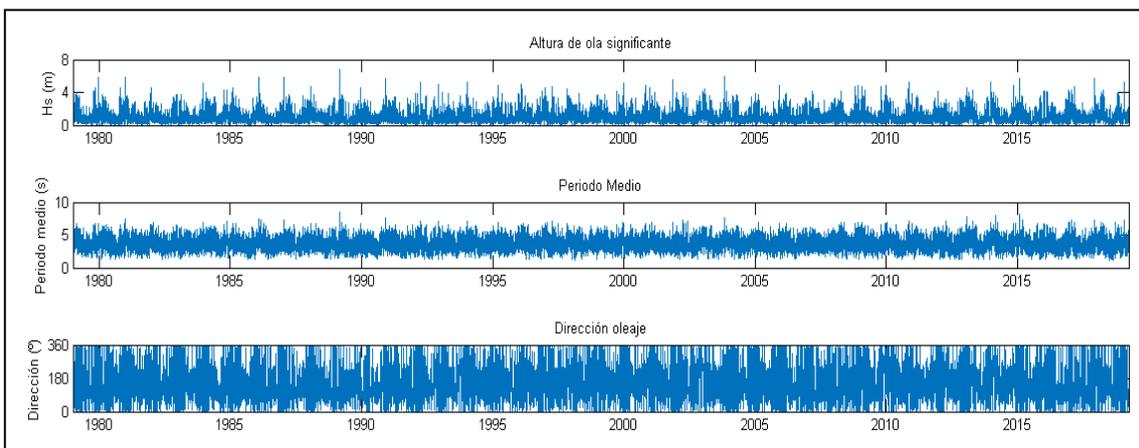
El registro de altura de ola significativa oscila entre una altura mínima de 0.04 m y una altura máxima de 6.83 m, con una altura de ola media de 0.92 m. El periodo medio analizado tiene unos valores mínimo de 1.26 s, medio de 3.71 s y máximo de 8.51 s (Tabla 2.1). Las variaciones de altura de ola a lo largo de los 40 años muestran un patrón de máximo y mínimos anuales, correspondiendo el mayor valor de altura de ola el año 1989 (Fig. 2.3).

Por otro lado, al mayor valor de altura de ola significativa, de 6.83 m, le corresponde un periodo medio de 8.26 s y una dirección de 230°. Se aprecian tres familias del oleaje: 50°, 90° y 225°, siendo las de 225° las que mayores alturas de ola presentan (Fig. 2.4). Pese a que los vientos dominantes en dicha zona tengan mayor componente N y NE, son los vientos provenientes del W los que se relacionan con mayores temporales en dicha región climática.

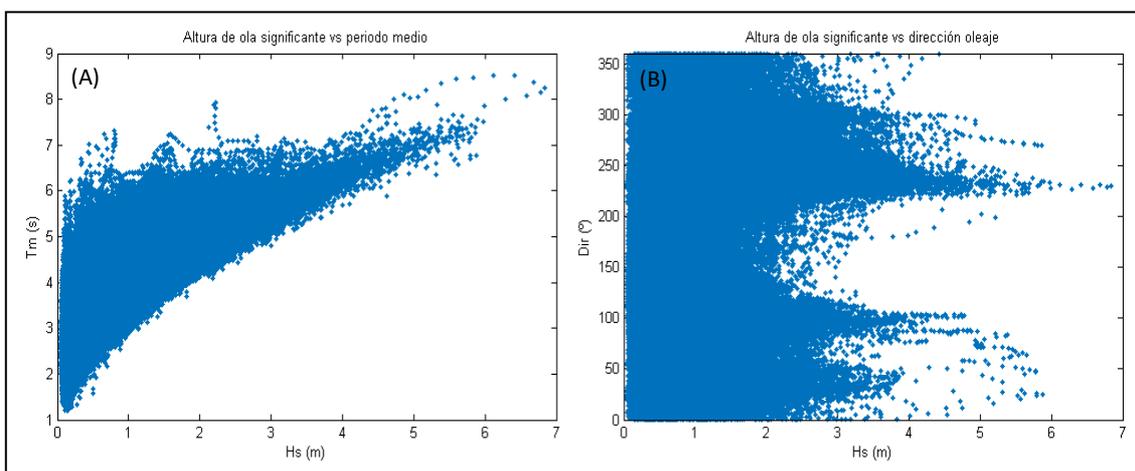
Las alturas de ola más frecuentes son aquellas con una altura no superior 1 metro, siendo más abundantes en la dirección E. No obstante, mayores alturas de ola, de 1 a 3 m, se dan en las direcciones SW. El periodo medio más frecuente y abundante es el comprendido entre 3 y 4 s, manifestándose este en la dirección E, pero de manera análoga a la altura de ola, son periodos mayores, de entre 4 y 6 s, los que se dan con más frecuencia para las direcciones de SW (Fig. 2.5).

**Tabla 2.1** – Valores mínimos, medios y máximos de los parámetros del estado de mar para el archipiélago de Cabrera en el periodo de tiempo desde el año 1979 al 2019

	Máximo	Medio	Mínimo
Altura de ola	6.83 m	0.92 m	0.04 m
Periodo medio	8.51 s	3.71 s	1.26 s
Dirección del oleaje	360°	153.58°	0.01°



**Fig. 2.3** – Series de altura de ola significativa, periodo medio y dirección media del oleaje para un periodo de tiempo de 40 años (1979 a 2019)



**Fig. 2.4** – (A) Diagrama de dispersión de altura de ola significativa frente a periodo medio y (B) Diagrama de dispersión de altura de ola significativa frente a dirección media del oleaje, para un periodo de tiempo de 40 años (1979 a 2019)

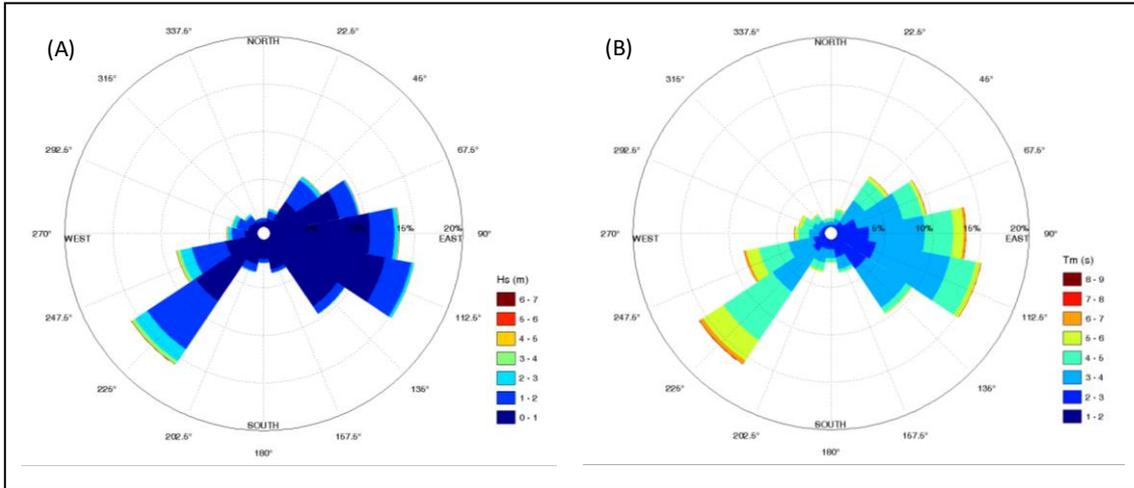


Fig. 2.5 – (A) Rosa de oleaje de altura de ola significativa y – (B) Rosa de oleaje de periodo medio, para un periodo de tiempo de 40 años (1979 a 2019)

Tanto la altura de ola como el periodo medio presentan un patrón estacional, siendo más marcado en el primer caso que en el segundo. En relación a la altura de ola, los valores más altos se dan en invierno (diciembre a febrero), mostrando el valor máximo de la serie reconstruida para el mes de febrero. Los valores de altura de ola van disminuyendo progresivamente hasta los meses de verano, entre los cuales se dan los menores valores, y a partir de este (Fig. 2.6 A). En relación al periodo medio, pese a haber estacionalidad, no es tan marcada como en el caso anterior. No obstante, el patrón es similar, coincidiendo también los picos máximos para el mes de febrero (Fig. 2.6 B).

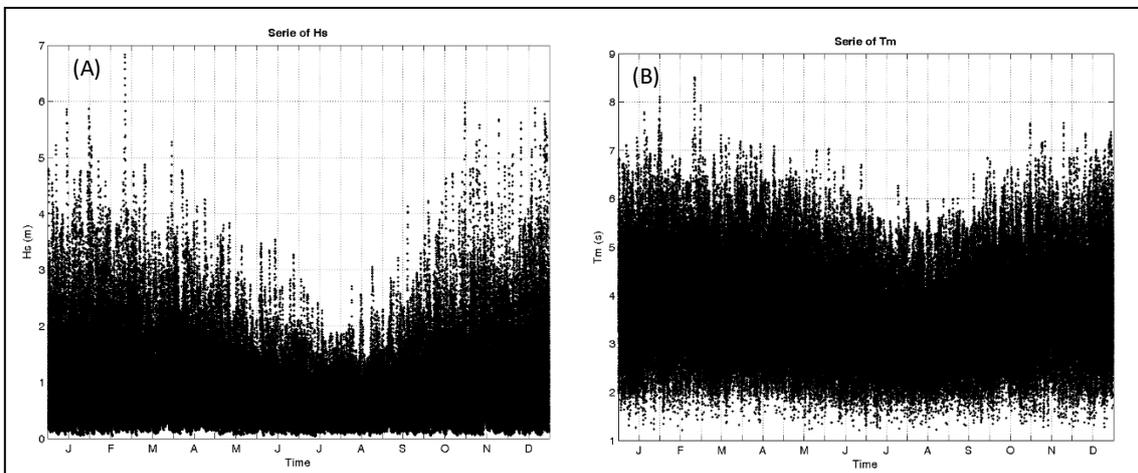


Fig. 2.6 – (A) Reconstrucción series altura de ola significativa y (B) Reconstrucción series periodo medio a lo largo del periodo de estudio, desde el año 1979 hasta el año 2019, clasificadas mensualmente

### 2.3. Descripción política y socioeconómica

Se pretende comprender en qué situación política se halla la zona de estudio, en relación a la Zona Económica Exclusiva (ZEE). La ZEE es la franja marítima situada en el límite exterior del mar territorial (extensión de hasta 22.22 km o 12 millas), a una distancia de 370.4 km (200 millas

náuticas). Las zonas marítimas actuales, se aprobaron en el año 1982 en la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (Wikipedia, castellano: Zona Económica Exclusiva, 2019). En la página [Marineregions.org](http://Marineregions.org) es posible acceder a todas las ZEE del mundo introduciendo las coordenadas o bien desde el mapa global (Fig. 2.7). El Estado español cuenta con un área de ZEE de 1039233 km<sup>2</sup>, repartida en 26902 km<sup>2</sup> de plataforma.

En cuanto a la situación socioeconómica, su área de influencia se integra por el municipio de Palma, al cual pertenece el terreno del Parque, siendo el área de influencia del PNMTAC de 24918.31 ha. A pesar de esto, también adquiere gran relevancia la influencia socioeconómica del municipio de Ses Salines, del cual parten las embarcaciones autorizadas para el transporte de turistas al archipiélago, además de disponer en el centro urbano el centro de visitantes del Parque (MITECO). El municipio de Palma cuenta con una población registrada en 2018, de 409661 habitantes y una superficie de 208.63 km<sup>2</sup>, por lo que la densidad poblacional es de 1948.39 hab/km<sup>2</sup>. No obstante, como se ha mencionado anteriormente, el archipiélago de Cabrera está deshabitado en la actualidad.

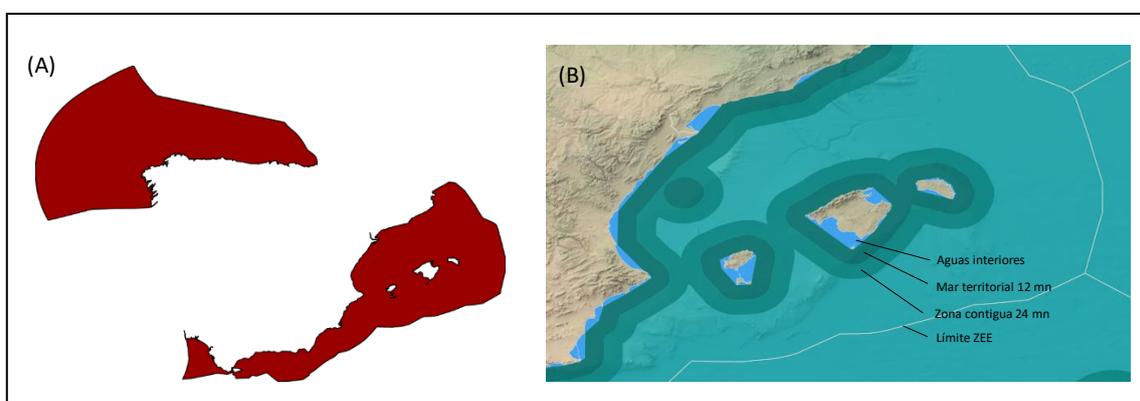


Fig. 2.7 – (A) Límites Zona Económica Exclusiva de la Península Ibérica y (B) Límites Marítimos de las Islas Baleares. Tomado de: [Marineregions.org](http://Marineregions.org)

## 2.4. Ecosistemas y valores naturales

El clima condiciona un paisaje vegetal terrestre con plantas adaptadas a la escasez de agua y con matorrales de hoja perenne, además de influir en el tamaño de la fauna. Por otro lado, en comparación con el territorio peninsular, hay menos especies, pero es mayor el número de especies endémicas (Moreno y Pino, 2004).

La vegetación, tanto marina como terrestre, está formada por 516 especies de plantas vasculares, 22 especies de musgos, 21 especies de líquenes y 162 especies de algas marinas. Del conjunto de estas, 20 especies y 1 subespecie, son endemismos del Archipiélago (MITECO).

De los hábitats marinos, se destacan: praderas de fanerógamas marinas formadas por las especies *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*, fondos de máerl, de arena, detríticos, rocosos con especies algares o cuevas submarinas. En ellos conviven estacional o permanentemente especies de diferentes grupos taxonómicos, de entre las cuales, destacan algunas especies protegidas por convenios internacionales, como por ejemplo los caballitos de mar (*Hippocampus* spp), el delfín mular (*Tursiops truncatus*), la tortuga boba (*Caretta caretta*) o el mero (*Epinephelus marginatus*) (OCEANA).

Adquieren especial relevancia las praderas de fanerógamas marinas formadas por la especie *P. oceanica*, especie endémica del Mediterráneo y de mayor abundancia (Simeone and De Falco, 2013), con una extensión total de 1159.05 km<sup>2</sup> (70.9% del total), correspondiendo su mayor abundancia a Baleares (633.16 km<sup>2</sup>), Alicante (243.03 km<sup>2</sup>) y Murcia (112.86 km<sup>2</sup>) (Ruiz *et al.*, 2015), y que actualmente se encuentra en regresión. *P. oceanica* se encuentra protegida por diversas normativas, desde el ámbito autonómico hasta el europeo, ya que ejerce un papel fundamental en los entornos marinos en los que se encuentra.

## 2.5. Otras figuras de protección

El Parque Nacional se encuentra incluido en una serie de figuras de protección: Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA, Directiva 74/409/CEE), Lugar de Importancia Comunitaria (LIC), Zona Especial de Conservación (ZEC), Área Natural de Especial Interés (ANEI, Ley 1/91 del Parlamento Balear, de 30 de enero) y Zonas de Especial Protección de Importancia para el Mediterráneo (ZEPIM) (GOIB) (Fig. 2.8).

- La Red Natura 2000 (LIC y ZEPA ES0000083 Arxipèlag de Cabrera) está formada por un conjunto de áreas de conservación de la biodiversidad de países miembros de la Unión Europea, formado por la figura de protección ZEPA y ZEC. El Archipiélago de Cabrera se encuentra en la ZEPA ES0000518 – Espacio marino del Sur de Mallorca y Cabrera. Dicha ZEPA está compuesta por las aguas marinas del archipiélago de Cabrera y parte de las aguas de las islas de Mallorca y Menorca. Fue declarado ZEPA debido a la presencia de una diversidad de colonias de aves marinas, de entre las que destacan en Cabrera, colonias de *Calonectris diomedea* (pardela cenicienta), *Puffinus mauretanicus* (pardela balear) o *Hydrobates pelagicus* (paño europeo) (MITECO), habiéndose catalogado más de 130 especies de especies diferentes, incluidas en el Anexo I de la Directiva 2009/147/CE y en el Anexo IV de la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y Biodiversidad.

- La Zona de Especial Protección de Importancia para el Mediterráneo (ZEPIM) es una figura otorgada por contener ecosistemas específicos mediterráneos y hábitats de especies en peligro (MITECO). El Archipiélago de Cabrera se declaró ZEPIM en el año 2003.

- El Área Natural de Especial Interés (ANEI) es un espacio natural protegido por el Gobierno de las Islas Baleares.

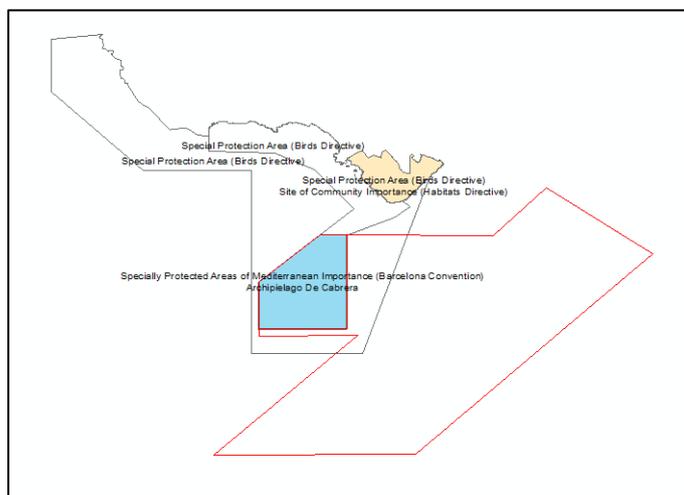


Fig. 2.8 – Mapa con los límites de PNMTAC en el que se muestra la Zona de Especial Protección para las Aves, el Lugar de Importancia Comunitaria y las Zonas de Especial Protección de Importancia para el Mediterráneo. Elaborado con ArcGIS

### 3. Bases de datos

A continuación, se describen las bases de datos y las fuentes de obtención de los datos y cartografías empleadas en este trabajo.

#### 3.1. Batimetría, oleaje y viento

##### a) Batimetría

La fuente de datos batimétricos empleada en este estudio se ha obtenido de “European Marine Observation and Data Network” (EMODnet), que permite descargar gratuitamente un Modelo Digital de Terreno (DTM) de las regiones marinas europeas, generado por la asociación Batimetría EMODnet ([www.emodnet-bathymetry.eu/](http://www.emodnet-bathymetry.eu/)). Los datos empleados proceden de batimetría de derivación satelital (SDB), integrando la batimetría digital de “The General Bathymetric Chart of the Oceans” (GEBCO). La resolución de las cuadrículas es de  $1/16 * 1/16$  minutos de arco (unos  $115 * 115$  metros), que supone una mejora de la versión anterior, puesta en funcionamiento desde septiembre de 2018 (EMODnet).

##### b) Oleaje

Los datos de oleaje proceden de espectros de la base de datos GOW 2.0 (Global Ocean Waves), basado en el modelo numérico WaveWatch III versión 4.18 (WW3). WW3 es un modelo de oleaje espectral de tercera generación. GOW 2.0 es una reconstrucción histórica de oleaje global que actualiza a la base de datos GOW 1.0. GOW 2.0 se compone de cuatro dominios: uno global de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , dos regionales del Ártico y la Antártida, de áreas de  $0.25^\circ$  latitud  $\times$   $0.5^\circ$  longitud, y un cuarto dominio que cubre áreas costeras e islas oceánicas, con una resolución de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ . Los forzamientos empleados para GOW 2.0 han sido la cobertura de hielo marino y los vientos, con datos horarios extraídos de Climate Forecast Reanalysis (CFSR). GOW 2.0 cubre el periodo histórico de 1979-2019 y supone una mejora para el estudio en cuencas semicerradas y en áreas de batimetría compleja. Los productos disponibles de GOW 2.0 incluyen parámetros horarios de estados de mar, y ha sido validado con boyas (Pérez *et al.*, 2017).

##### c) Viento

Los datos de los vientos se han obtenido del reanálisis ERA5, el último reanálisis climático producido por el “European Centre for Medium-Range Weather Forecasts” (ECMWF). Estos datos se pueden encontrar en el Climate Data Store, en cuadrículas regulares con una resolución espacial de  $0.25^\circ * 0.25^\circ$ , y son promedios horarios a 10 m de altura sobre el nivel del mar. Los datos cubren la Tierra en una cuadrícula de 30 km con una altura de la atmósfera desde la superficie hasta 80 km (ECMWF).

#### 3.2. Usos del Parque y rutas de navegación

Las zonas de buceo, fondeo diurno y fondeo nocturno se han obtenido del PRUG (ver mapa en ANEXO I). Se explican las fuentes empleadas para los diferentes usos:

- a) **Red de transporte marítimo:** Infraestructura de Datos Espaciales de las Islas Baleares (IDEIB). Sistema de referencia de coordenadas EPSG:25831, a escala 1:1000.
- b) **Instalaciones recreativas:** Centro Nacional de Información Geográfica del Ministerio de Fomento (Corine Land Cover, versión 2018). Sistema de referencia de coordenadas ETRS89, en formato Geodatabase (.gdb).
- c) **Puerto deportivo:** extraído de Atlas de susceptibilidad a la contaminación en zonas marinas. Aplicación a la costa Española (García *et al.*, 2017).

**d) Rutas turísticas de transporte colectivo**

La información para las rutas turísticas de transporte colectivo de pasajeros se ha obtenido de las páginas web de las dos empresas que ofrecen dicho servicio: Mar Cabrera ([www.marcabrera.com/es/excursiones](http://www.marcabrera.com/es/excursiones)) y Excursions a Cabrera ([www.excursionsacabrera.es](http://www.excursionsacabrera.es)). Se escogieron los puntos de parada de ambas empresas y relevantes para este estudio, entre los que se incluyen recorridos entre islotes, circunnavegación por la isla de Cabrera o Cueva Azul.

**e) Rutas de navegación**

Se ha empleado la página web de acceso restringido de Puertos del Estado (Shiplocus) ([shiplocus.puertos.es](http://shiplocus.puertos.es)) para la obtención de datos de comunicación de los buques, recogidos por el Sistema de Identificación Automática (AIS – Automatic Identification System) (Wikipedia, castellano: Sistema de Identificación Automática, 2019). Se han descargado los informes mensuales para el año 2018 para diferentes tipologías de embarcaciones: i) las rutas de navegación total en las que se incluyen las tipologías de buques y ii) rutas de navegación de embarcaciones de recreo. Se han descargado los informes del periodo estival del año 2018 para las embarcaciones de clase B (veleros).

## 4. Metodología

Se ha desarrollado una regionalización híbrida de oleaje en el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera, lo que ha permitido realizar una caracterización climática del oleaje en la zona de estudio y un análisis de las actividades y usos permitidos en este. Con base en los diferentes objetivos de estudio, el desarrollo metodológico ha sido el siguiente (Fig. 4.1).

a) Para poder realizar una caracterización climática del oleaje se ha realizado una regionalización costera con base a la metodología híbrida DOW (Camus *et al.* 2011, Camus *et al.*, 2013). Esta consiste en un análisis estadístico de selección de casos de un conjunto de estados de mar obtenidos de la base de datos GOW 2.0, mediante la técnica estadística de clasificación Análisis de Componentes Principales y el algoritmo de selección Max-Diss. El análisis dinámico ha consistido en la propagación del oleaje de los casos seleccionados, mediante el modelo hidrodinámico SWAN, utilizando los datos espectrales 3D en los contornos.

b) Para la selección de los puntos objetivo de los diferentes usos del PNMTAC se han analizado las zonas descritas por el PRUG y una serie de rutas de navegación en el Archipiélago de Cabrera a lo largo del año 2018.

c) Para llevar a cabo la reconstrucción temporal con resolución horaria en dichos puntos, se ha empleado la Función de Base Radial (RBF).

d) Para el análisis de operatividad, se ha calculado la probabilidad de superación de un umbral de altura de ola significativa para cada uso seleccionado. Se ha escogido el que mayor número de horas ha presentado de cada uso, calculando el porcentaje de no superación y la media de horas de superación.

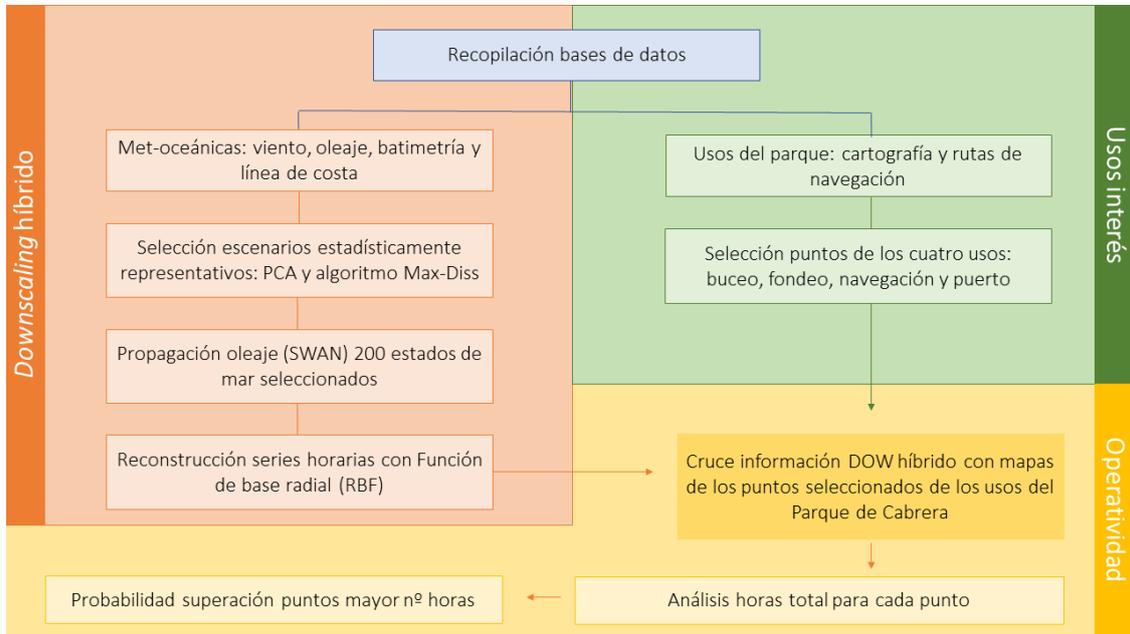


Fig. 4.1 – Mapa conceptual en el que se esquematiza la metodología desarrollada para la elaboración de este trabajo

#### 4.1. Regionalización híbrida del oleaje

La regionalización híbrida (*downscaling* híbrido) del oleaje empleada se basa en una combinación de métodos dinámicos (mediante modelado numérico en áreas costeras) y estadísticos (a partir de la metodología DOW desarrollada por Camus *et al.* 2011). En primer lugar, se han definido una serie de ubicaciones para las variables a seleccionar. Posteriormente se ha seleccionado un número de casos representativos de estados de mar a partir del conjunto total de casos. Después, estos casos se han simulado mediante el modelo numérico SWAN, para finalmente realizar una reconstrucción temporal horaria de los mismos en diferentes puntos seleccionados, mediante la técnica de interpolación de funciones de base radial (RBF – Radial Basis Function).

##### 4.1.1. Mallas empleadas

Se han generado tres mallas de diferente resolución y dominio: una general y dos de detalle. La malla general se ha usado para aproximar el oleaje a la zona de estudio, e incluye a las dos más pequeñas y a los límites del Parque del Archipiélago de Cabrera. Las dos mallas de detalle y de menor tamaño se han generado para una representación óptima del fondo y bajos que pudieran afectar a la propagación, e incluyen: el archipiélago de Cabrera y el muelle del puerto de la Colònia

de Sant Jordi (Mallorca) (Tabla 4.1) (Fig. 4.2) (Fig. 4.3). La profundidad máxima del mar para los tres casos ha sido: malla general 2612.6 m, malla de detalle I 110.1997 m y malla de detalle II 35.7201 m (ANEXO IV).

Las mallas se han obtenido interpolando la batimetría a la resolución espacial (Fig. 4.4). Los valores y dimensiones se han sintetizado en la Tabla 4.2, donde se muestra la longitud, latitud, profundidad y dimensiones (Tabla 4.2). La malla del puerto de Sant Jordi se ha rectificado manualmente debido a errores de lectura de zonas de tierra por zonas de mar. La modificación se ha realizado en los puntos de la línea de costa que han presentado conflictos, considerando el valor más próximo para la sustitución de los puntos leídos como tierra en lugar de agua.

Tabla 4.1 – Características generales de las tres mallas empleadas

	Resolución	Perímetro	Área
Malla general	0.005 (500 m)	296.5 km	5371.0 km <sup>2</sup>
Malla detalle I (Cabrera)	0.0005 (50 m)	37.7 km	81.3 km <sup>2</sup>
Malla detalle II (puerto)	0.0005 (50 m)	13.4 km	11.0 km <sup>2</sup>

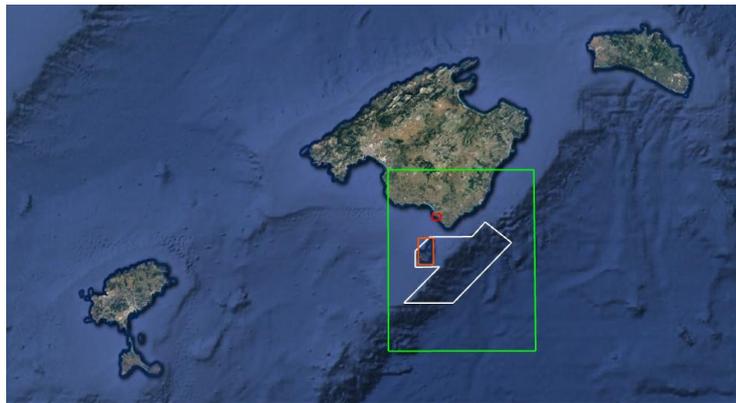
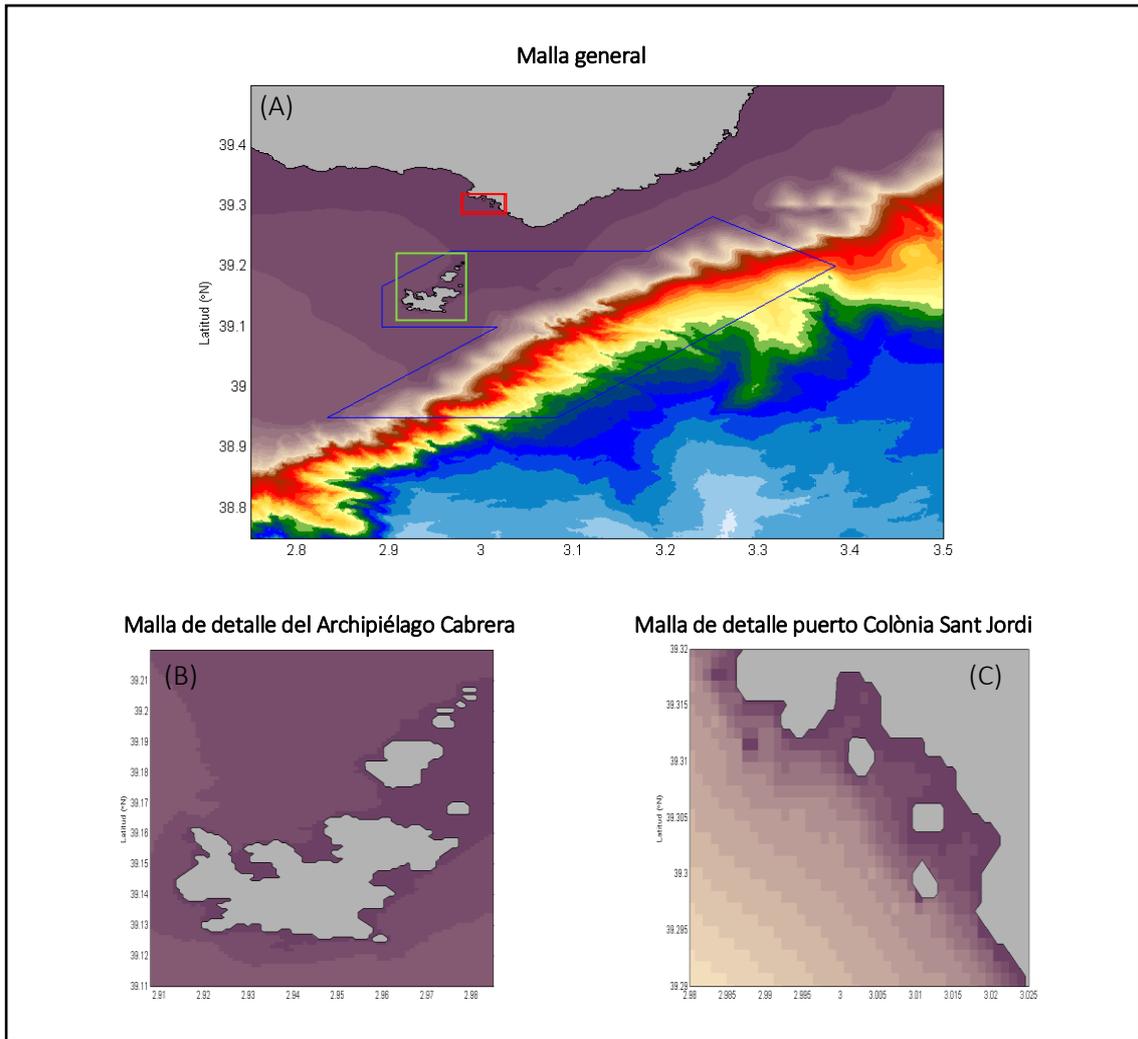


Fig. 4.2 – Imagen de las islas Baleares en la que se incluye: malla general (rectángulo verde), límites del Parque de Cabrera (polígono blanco), límite de la malla que contiene al archipiélago de Cabrera (rectángulo naranja) y límite de la malla del puerto de Sant Jordi (rectángulo rojo). Tomado de: Google Earth ®



**Fig. 4.3** – (A) Malla general no interpolada de la zona de estudio en la que se incluye: límite del Parque de Cabrera (polígono azul), límite de la malla que contiene al archipiélago de Cabrera (cuadrado verde) y límite de la malla del puerto de Sant Jordi (cuadrado rojo), (B) malla de detalle no interpolada del límite del Archipiélago de Cabrera y (C) malla de detalle no interpolada del puerto de Sant Jordi y alrededores.

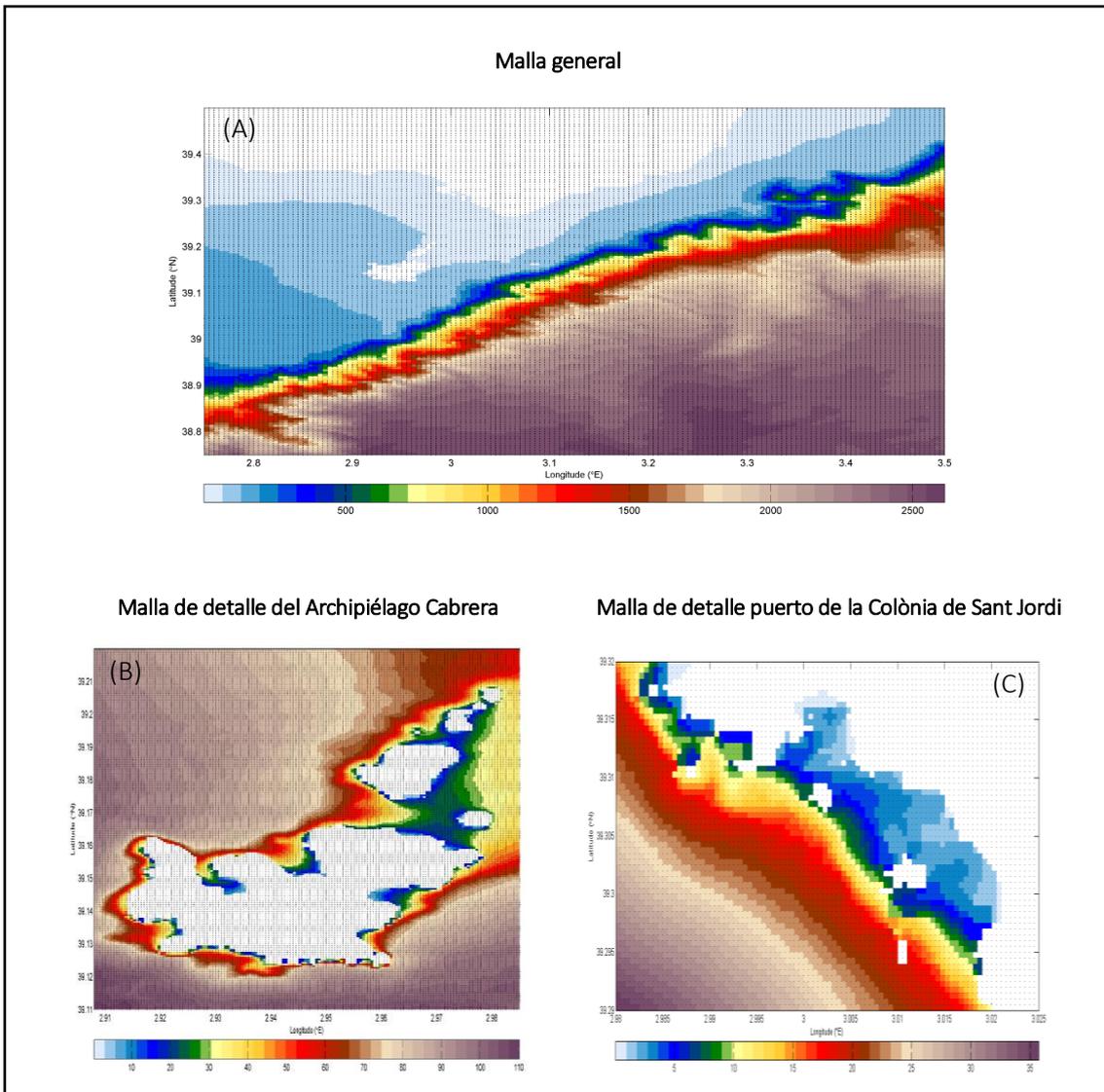


Fig. 4.4 – (A) Malla general no interpolada de la zona de estudio en la que se incluye: límite del Parque de Cabrera (polígono azul), límite de la malla que contiene al archipiélago de Cabrera (cuadrado verde) y límite de la malla del puerto de Sant Jordi (cuadrado rojo), (B) malla de detalle no interpolada del límite del Archipiélago de Cabrera y (C) malla de detalle no interpolada del puerto de Sant Jordi y alrededores.

Tabla 4.2 – Características generales de las tres mallas empleadas

	Malla general			Malla detalle I (Cabrera)			Malla detalle II (puerto)		
	Valor	Min.	Max.	Valor	Min.	Max.	Valor	Min.	Max.
Longitud	1x151	2.7500	3.5000	1x155	2.9080	2.9850	1x91	2.9800	3.0250
Latitud	1x151	38.7500	39.5000	1x221	39.1100	39.2200	1x61	39.2900	39.3200
X	151x151	2.7500	3.5000	221x155	2.9080	2.9850	61x91	2.9800	3.0250
Y	151x151	38.7500	39.5000	221x155	39.1100	39.2200	61x91	39.2900	39.3200
Z	151x151	0	2612.6	221x155	0	110.1997	61x91	0	35.7201

#### 4.1.2. Selección de estados de mar estadísticamente representativos

##### 4.1.2.1. Análisis de Componentes Principales (PCA)

Se han seleccionado 5 variables: altura de ola significativa, periodo medio, dirección media del oleaje, viento u y viento v, ubicadas a lo largo del contorno de la malla general y en el interior de esta. Se han empleado 9 nodos de oleaje y 5 de viento. Dichos valores se han normalizado restándole la media y dividiendo por la desviación típica, y posteriormente se ha aplicado la técnica estadística basada en el análisis de componentes principales (Principal Component Analysis - PCA) para reducir la dimensionalidad y obtener las componentes principales (PC<sub>s</sub>). De estas PC<sub>s</sub>, se han seleccionado aquellas que explican el 99% de la varianza de los datos.

La técnica estadística de regresión PCA se ha aplicado a la serie temporal de los espectros del oleaje, en este caso de 40 años, en una posición determinada de aguas indefinidas. El PCA reduce la información de los datos multidimensionales y permite determinar el número óptimo de componentes principales (Camus, 2009).

#### 4.1.2.2. Algoritmo de Máxima Disimilitud (Max-Diss)

A las componentes principales del paso anterior, se le ha aplicado el algoritmo de Máxima Disimilitud (Max-Diss), para reducir las dimensiones de las cinco variables de estudio y seleccionar los casos a simular para la propagación del oleaje. El número total de casos seleccionados para la propagación del oleaje ha sido de 200.

#### 4.1.3. Propagación del oleaje con el modelo SWAN

Se han propagado 200 estados de mar desde aguas profundas hasta la zona costera de estudio, seleccionados con el algoritmo Max-Diss. SWAN se ha alimentado con datos horarios de oleaje (altura de ola significativa, periodo medio y dirección del oleaje) y con los datos de viento interpolados directamente a la malla interna.

Simulating WAVes Nearshore (SWAN) es un modelo hidrodinámico aplicado a la propagación de oleaje desde aguas profundas a reducidas, que permite obtener estimaciones realistas de los parámetros de las olas (altura de ola, periodo y dirección del oleaje) en zonas costeras, según una configuración batimétrica específica y unas condiciones dadas de viento y corrientes (GIOC). Es un modelo espectral basado en el modelo de onda de energía (Ris *et al.*, 1999). El modelo fue desarrollado por Delft University of Technology, habiendo empleado para este trabajo el modelo SWAN Cycle III versión 41.10, que introduce mejoras espectrales.

Este modelo simula la energía de las ondas en su propagación desde el océano hacia zonas costeras. De entre los procesos que considera este modelo, algunos ejemplos son: asomeramiento, refracción, rotura, disipación por decrestamiento... No obstante, el modelo presenta una serie de limitaciones, entre algunas de ellas, es que no tiene en cuenta la reflexión y no calcula corrientes inducidas por el oleaje. Por tanto, este modelo presenta gran fiabilidad para zonas en las que no haya grandes obstáculos, cambios bruscos de profundidad o contenga una zona muy amplia.

Se ha trabajado con un nivel del nivel del mar de 0.163 m, el más bajo de la zona medido en la bajamar. El modelo empleado se ha ejecutado en modo estacionario y utilizando coordenadas esféricas.

La frecuencia discreta más baja y más alta utilizadas han sido de 0.0373 Hz y 0.7159 Hz respectivamente. Por tanto, los valores más altos y bajos de periodo han sido de 26.81 s y de 1.39 s, respectivamente. Tras la ejecución de los 200 casos con el modelo SWAN, 16 casos de ellos que han mostrado valores muy bajos de  $H_s$  y  $T_m$ , han dado resultados erróneos, por lo que se ha aumentado la frecuencia más alta usada para disminuir el periodo, y aumentar la discretización frecuencial a 40 y 50, dependiendo del caso de estudio. De los 16 casos, 11 se han corregido con valor de frecuencia igual a 1 Hz (periodo igual a 1 s) y valor de discretización igual a 40, y los 5 restantes, con valores de frecuencia de 1.5 Hz (periodo igual a 0.66 s) y valor de discretización igual a 50.

Las 8 coordenadas de los espectros del límite de la cuadrícula general han sido las siguientes: 2.75° E - 38.75°N, 2.75° E - 39.0°N, 2.75° E - 39.25°N, 3.0° E - 38.75°N, 3.25° E - 38.75°N, 3.5° E - 39.0°N, 3.5° E - 39.25°N y 3.25° E - 39.5°N (Fig. 4.5). Los espectros de oleaje variaban a lo largo del segmento definido por los límites del dominio. Debido a que los espectros eran trihorarios, se ha realizado una interpolación temporal de los espectros, empleando un algoritmo lineal entre el tiempo inferior y el superior (ANEXO V).

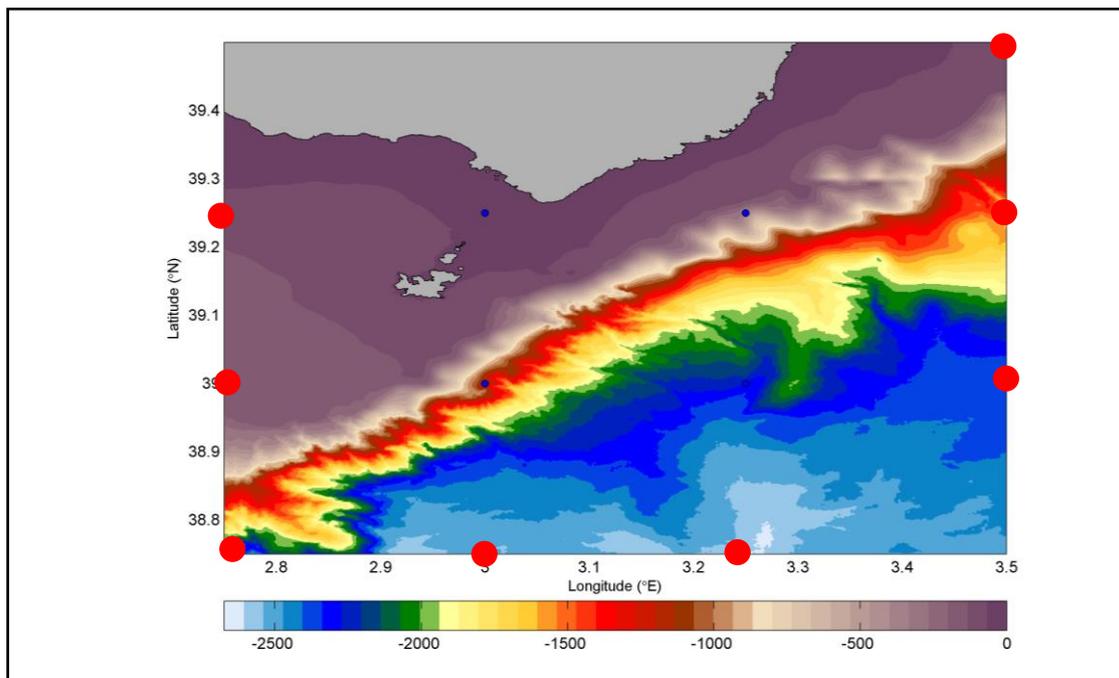


Fig. 4.5 – Localización de los espectros de oleaje empleados en los controneros

El modelo se ha ejecutado en modo de tercera generación, considerando el fenómeno de *whitcapping*, y la disipación por rotura del oleaje, por fricción y por profundidad.

Los *outputs* seleccionados han sido: **altura de ola significativa** (en metros), altura de ola del oleaje tipo *swell* (en metros), **dirección media del oleaje**, dirección máxima del oleaje (en grados), periodo medio absoluto (en segundos), periodo pico (en segundos) del espectro de densidad de varianza (espectro de frecuencia relativa), periodo pico “suavizado” (en segundos), periodo medio absoluto (en segundos), **periodo medio de cruce por cero absoluto** (en segundos), ancho normalizado del espectro de frecuencia, difusión direccional de las olas (en grados), velocidad del viento (vector), transporte de energía (vector), fuerza inducida por las olas por unidad de superficie

(vector), coordenadas x y coordenadas y. Los parámetros de mar empleados posteriormente se han indicado en negrita en el listado anterior.

Los resultados obtenidos para cada estado de mar se han comprobado generando un mapa de altura de ola significativa, periodo medio y dirección media del oleaje, generando un total de 1200 mapas.

#### 4.1.4. Reconstrucción del oleaje en los puntos objetivo: RBF

Para la reconstrucción del oleaje en los puntos seleccionados de las zonas de actividades del Parque del Archipiélago de Cabrera, se ha empleado la técnica de interpolación por funciones de base radial (RBF). Las técnicas de interpolación tienen por objetivo obtener una función continua a partir de su valor para una serie dada de puntos, capaz de inferir dicho valor en cualquier otro punto objeto de estudio. La función de base radial (RBF) ha demostrado ser efectiva cuando se trata de un sistema multivariante, que permite obtener una función continua a partir de una serie de puntos y posteriormente inferir el valor de la función multivariante del espacio considerado (Hastie *et al.*, 2009). El algoritmo RBF para una ubicación específica, se aplica a los puntos en los cuales se van a reconstruir las diferentes series temporales.

El algoritmo localiza las PC<sub>s</sub> asociadas a los 200 casos simulados. Se genera una variable con las PC<sub>s</sub> de cada uno de los instantes, donde la primera dimensión es el instante tiempo y la segunda la PC asociada, para reconstruir las variables que definen un estado de mar ( $H_s$ ,  $T_m$  y  $Dir$ ). En función de la variable asociada a dichos casos seleccionados, y en función de las PC<sub>s</sub> asociadas a los casos seleccionados y las PC<sub>s</sub> asociadas a cada instante de tiempo, se reconstruye la serie aplicando el algoritmo RBF.

## 4.2. Usos del Parque y rutas de navegación: puntos objetivo y umbrales de operatividad

### Puntos objetivo

Con base en las zonas de uso definidas por el PRUG, se han escogido 35 puntos objetivo para las cuatro categorías de usos seleccionadas: buceo, fondeo, navegación y puerto. Los usos de fondeo y navegación se han subclasificado en: i) fondeo nocturno y fondeo diurno; y, ii) rutas de navegación transporte marítimo entre el Mallorca y Mahón (Menorca) y navegación empresas transporte colectivo de pasajeros entre el puerto de la Colònia de Sant Jordi y el Archipiélago de Cabrera. El número de puntos total ha sido: 6 para la zona de buceo, 12 para las zonas de fondeo, 16 para las zonas de navegación y 1 puerto (Tabla 4.3). Para cada uso, se han elaborado unas fichas en las que se muestran las coordenadas de los puntos de interés, una imagen con las zonas o rutas y una imagen con los puntos seleccionados (Figs. 4.6 a 4.11).

Los puntos de la ruta Mallorca-Menorca se han seleccionado de la malla general, el punto del puerto, de la malla de detalle del puerto, y los otros puntos de la malla de Cabrera (Fig. 4.12).

Tabla 4.3 – Número de puntos seleccionados para cada uso

Uso	Num. puntos
Buceo	6
Fondeo diurno	8
Fondeo nocturno	4
Navegación I (transporte marítimo)	5
Navegación II (ruta turística)	11
Puerto S. Jordi	1
<b>Total</b>	<b>35</b>

### Puntos de buceo

Los 6 puntos de buceo se han distribuido del siguiente modo entre las 4 zonas autorizadas: 1 y 2 entre Na Redonda y el norte de Cabrera, 3 en la Illa de ses Bledes, y 4, 5 y 6 en Cala Galiota.

Punto	Coordenadas geográficas	
	Latitud	Longitud
1	39° 10.0' 30.0" N	2° 57.0' 39.6" E
2	39° 10.0' 12.0" N	2° 57.0' 46.8" E
3	39° 8.0' 2.4" N	2° 57.0' 39.6" E
4	39° 8.0' 60.0" N	2° 55.0' 1.2" E
5	39° 9.0' 14.4" N	2° 55.0' 8.4" E
6	39° 9.0' 36.0" N	2° 54.0' 57.6" E

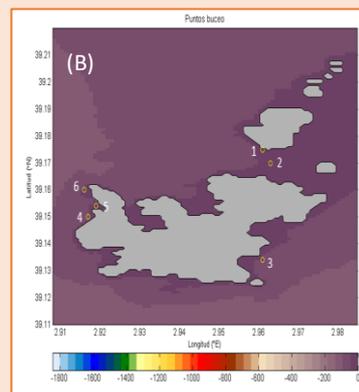
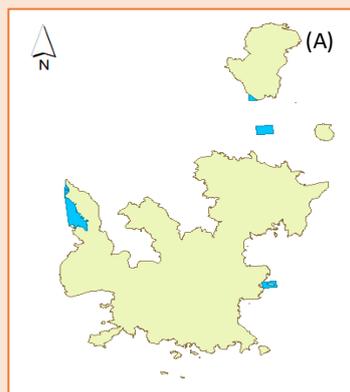
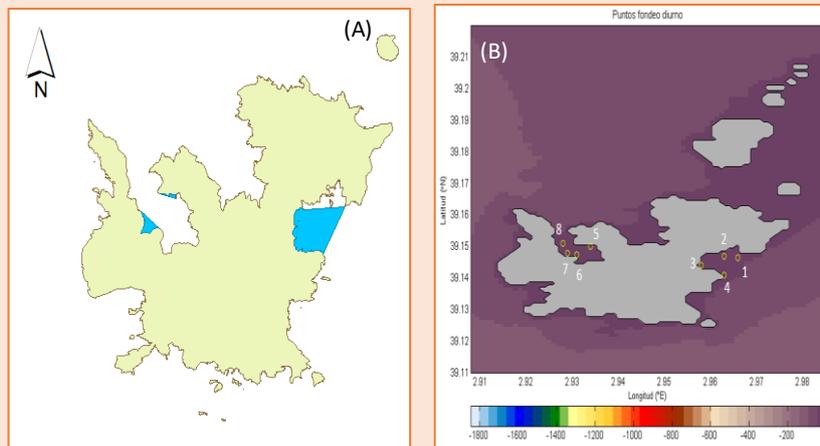


Fig. 4.6 – Ficha para los puntos de buceo donde se incluye: tabla con las coordenadas geográficas de los 6 puntos, (A) imagen de las 4 zonas autorizadas para el buceo, generada con ArcGIS y (B) imagen con los 6 puntos seleccionados, generada con MATLAB 2014 ®

### Puntos de fondeo diurno

Los 8 puntos de fondeo diurno se han repartido en dos zonas de la isla de Cabrera: puntos 1 a 4 en Es Burri, y puntos 6 a 8 en Es Port.

Punto	Coordenadas geográficas	
	Latitud	Longitud
1	39° 8.0' 47.4" N	2° 57.0' 57.6" E
2	39° 8.0' 49.2" N	2° 57.0' 46.8" E
3	39° 8.0' 38.4" N	2° 57.0' 28.8" E
4	39° 8.0' 27.6" N	2° 57.0' 46.8" E
5	39° 8.0' 60.0" N	2° 56.0' 2.4" E
6	39° 8.0' 51.0" N	2° 55.0' 51.6" E
7	39° 8.0' 52.8" N	2° 55.0' 44.4" E
8	39° 9.0' 3.6" N	2° 55.0' 40.8" E



**Fig. 4.7** – Ficha para los puntos de fondeo diurno donde se incluye: tabla con las coordenadas geográficas de los 8 puntos, (A) imagen de las 3 zonas autorizadas para el fondeo, generada con ArcGIS y (B) imagen con los 8 puntos seleccionados, generada con MATLAB 2014 ®

### Puntos de fondeo nocturno

Los 4 puntos de fondeo nocturno se han seleccionado de la zona autorizada de Es Port.

Punto	Coordenadas geográficas	
	Latitud	Longitud
1	39° 19.0' 48.0" N	2° 45.0' 43.2" E
2	39° 15.0' 36.0" N	2° 57.0' 57.6" E
3	39° 13.0' 4.8" N	3° 4.0' 1.2" E
4	39° 17.0' 24.0" N	3° 15.0' 0.0" E

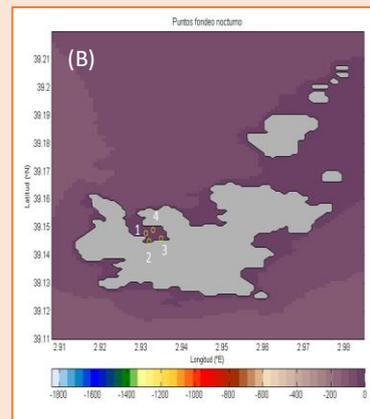
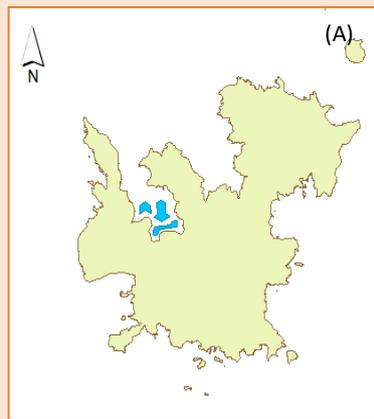


Fig. 4.8 – Ficha para los puntos de fondeo nocturno donde se incluye: tabla con las coordenadas geográficas de los 4 puntos, (A) imagen de la zona autorizadas para el fondeo, generada con ArcGIS y (B) imagen con los 4 puntos seleccionados, generada con MATLAB 2014 ®

## Puerto deportivo

Coordenadas geográficas	
Latitud	Longitud
39° 18.0' 57.6" N	3° 0.0' 0.36" E

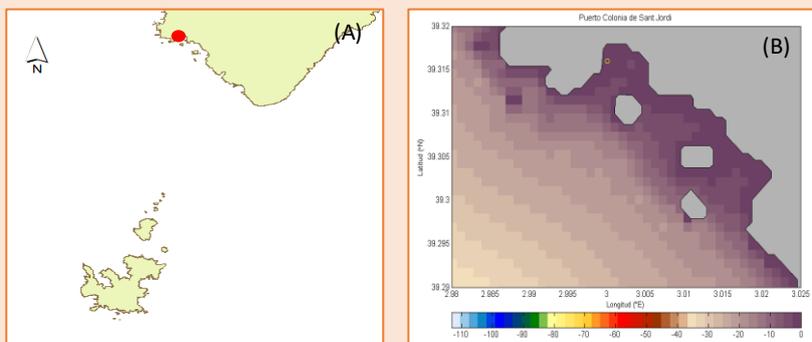


Fig. 4.9 – Ficha para el punto del puerto deportivo: tabla con las coordenadas geográficas del punto deleccionado, (A) imagen de la ubicación del puerto, generada con ArcGIS y (B) imagen con el punto seleccionado, generada con MATLAB 2014 ®

## Red transporte marítimo

Los 5 puntos de tráfico marítimo de Mallorca a Menorca se han seleccionado a lo largo de la red para tener muestras más alejadas entre sí.

Punto	Coordenada geográficas	
	Latitud	Longitud
1	39° 19.0' 48.0" N	2° 45.0' 43.2" E
2	39° 15.0' 36.0" N	2° 57.0' 57.6" E
3	39° 13.0' 4.8" N	3° 4.0' 1.2" E
4	39° 17.0' 24.0" N	3° 15.0' 0.0" E
5	39° 28.0' 48.0" N	3° 28.0' 51.6" E

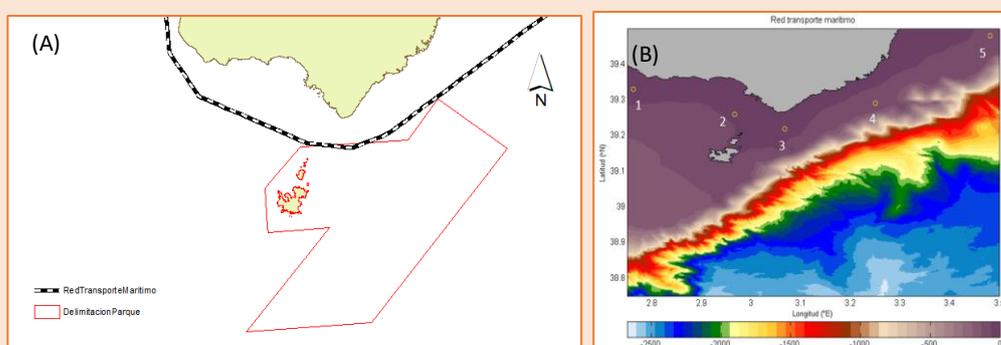


Fig. 4.10 – Ficha para los puntos de la red de transporte marítimo: tabla con las coordenadas geográficas de los 5 puntos, (A) imagen de ruta de navegación, generada con ArcGIS y (B) imagen con los 5 puntos seleccionados, generada con MATLAB 2014 ®

### Navegación empresas de transporte colectivo

Los 11 puntos del transporte de turistas se han distribuido en función de los puntos de interés de dicha ruta, estando los puntos 1 a 3 los situados en Na Rodonda, los puntos 4 a 8 al W de Cabrera, el punto 9 al S de Cabrera, y los puntos 10 y 11 al E de Cabrera.

Punto	Coordenada geográficas	
	Latitud	Longitud
1	39° 11.0' 24.0" N	2° 57.0' 39.6" E
2	39° 11.0' 9.6" N	2° 57.0' 36.0" E
3	39° 10.0' 40.8" N	2° 34.0' 12.0" E
4	39° 9.0' 25.2" N	2° 56.0' 42.0" E
5	39° 8.0' 58.2" N	2° 55.0' 48.0" E
6	39° 8.0' 42.0" N	2° 55.0' 53.4" E
7	39° 9.0' 36.0" N	2° 54.0' 57.6" E
8	39° 8.0' 9.6" N	2° 55.0' 21.0" E
9	39° 7.0' 15.6" N	2° 56.0' 31.2" E
10	39° 8.0' 43.8" N	2° 57.0' 30.6" E
11	39° 9.0' 16.2" N	2° 58.0' 48.0" E

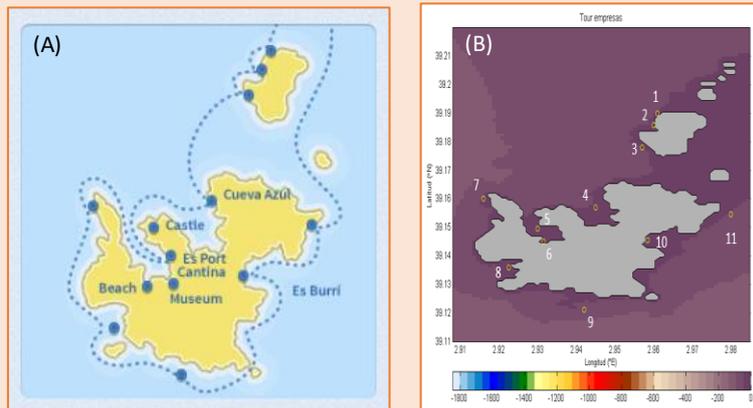


Fig. 4.11 – Ficha para los puntos de la red de transporte colectivo: tabla con las coordenadas geográficas de los 11 puntos, (A) imagen de ruta de navegación, tomada de: marcabrera.es y (B) imagen con los 11 puntos seleccionados, generada con MATLAB 2014 ®



Fig. 4.12 – Isla de Cabrera e islote de Na Redona, con los puntos de la malla 2. Tomado de: red2000.com

### Umbral de altura de ola

Para cada uso seleccionado, se ha seleccionado un valor de altura de ola significativo con base en diversos criterios (Tabla 4.4):

Tabla 4.4 – Valor de  $H_s$  para cada uso y criterio de selección

Uso	Valor $H_s$	Criterio
Buceo	1.5	“Criterio experto” por empresas buceo Mallorca
Fondeo diurno	2	Empleado el mismo para la red turística de navegación
Fondeo nocturno	2	Empleado el mismo para la red turística de navegación
Navegación I (transporte marítimo)	4	No existe. Se ha tomado el valor de embarcaciones de recreo categoría D
Navegación II (ruta turística)	2	Documentos técnico-formativos PER para embarcaciones de recreo categoría C
Puerto S. Jordi	2	Empleado el mismo para la red turística de navegación

### Operatividad

Tras aplicar el RBF, se han descartado los puntos cuyos valores de  $H_s$  máxima eran inferiores a los umbrales de  $H_s$  seleccionados. Posteriormente, se ha calculado la probabilidad de superación y no superación de  $H_s$  para los puntos seleccionados, en función de las horas totales del registro. Los puntos analizados para cada uso han sido: buceo puntos 1 a 6, fondeo diurno puntos 1 y 4, navegación marítima por Ferry puntos 1 a 5 y navegación empresas de transporte puntos 1 a 11. Los puntos de fondeo nocturno y puerto no se han analizado por tener valores inferiores de  $H_s$ . De estos usos, se ha seleccionado el punto con mayor número de horas para calcular la probabilidad de no superación de los eventos de la altura de ola seleccionado y los

valores medio de dicha altura de ola. Se ha seguido el esquema descrito por la ROM 1.0-0.9 para el cálculo de operatividad para obtener los valores anteriores.

## 5. Resultados

### 5.1. Propagación del oleaje con el modelo SWAN

Tras aplicar PCA y Max-Diss, se han seleccionado 200 casos para propagar el oleaje. Para cada año en el periodo de estudio de 1979 a 2019, el número de eventos a simular fue diferente (Fig. 5.1), siendo el mínimo número de casos 1, correspondiente para el año 1994, y el máximo número de casos 10, para los años 1980 y 2001.

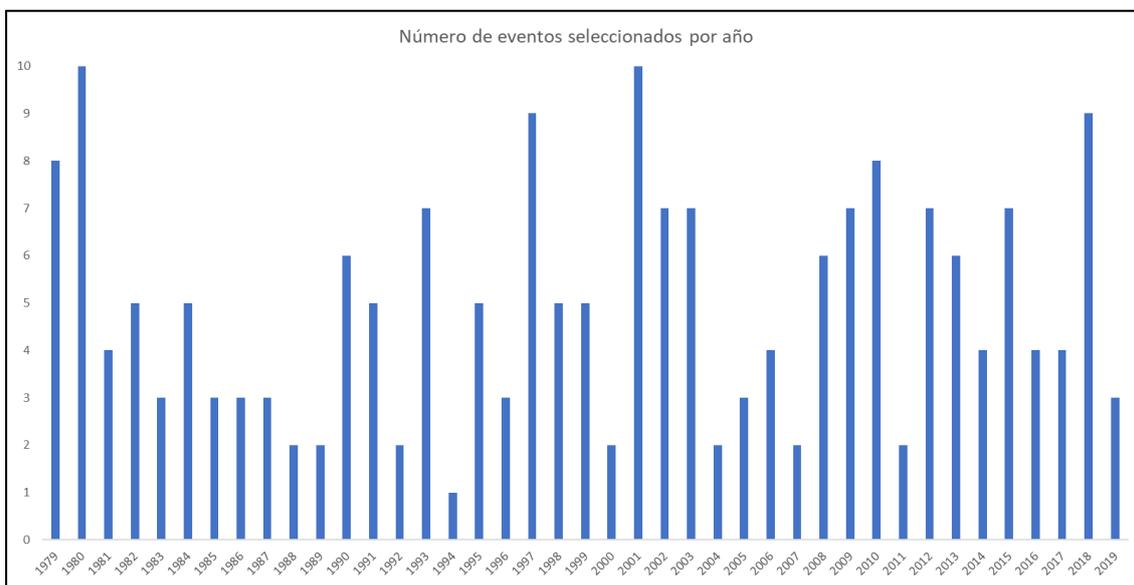


Fig. 5.1 – Número total de casos simulados para cada año de la base de datos histórica de 40 años

De todos los casos propagados, el mayor valor de altura de ola ha sido de 6.83 m para el mes de febrero del año 1989. De dichos casos, se han seleccionado para mostrar los resultados de la propagación del oleaje con el modelo SWAN tres casos que representan tres condiciones diferentes:

- Caso 1: altura de ola máxima del total de casos seleccionados, de 6.83 m, para el mes de febrero del año 1989 (Fig. 5.2).
- Caso 2: altura de ola máxima entre 2 y 4 m, escogiendo un caso al azar que corresponde a la fecha de enero del año 2004 (Fig. 5.3).
- Caso 3: altura de ola máxima inferior a 2 m, escogiendo un caso al azar correspondiente al mes de septiembre del año 2018 (Fig. 5.4).

En el caso 1, para la malla general se observa cómo la altura de ola alcanza su valor máximo en la dirección SE, y a medida que se propaga al norte, el valor de  $H_s$  disminuye y sufre un proceso de transformación por el contorno del Archipiélago de Cabrera y el fondo marino del SE de la isla

de Mallorca. El periodo medio analizado para dicho caso sigue el mismo patrón, alcanzando valores mayores en el contorno SW de la isla de Mallorca. Analizando la malla de detalle del Archipiélago de Cabrera, se aprecia una brusca disminución de la altura de ola por la batimetría de las islas e islotes, alcanzando los valores mínimos en la cara Este de dichas secciones de tierra. El  $T_m$  de dicha malla sigue el mismo patrón, pero aumentando en algunos puntos de los diferentes islotes. Para la malla del puerto de la Colònia de Sant Jordi, el valor de  $H_s$  presenta una bajada de aproximadamente 1 m debido a la configuración batimétrica de los islotes colindantes, siendo el valor de  $H_s$  inferior a 0.5 m en la región del puerto, zona a la que le corresponde un  $T_m$  de 11 s (Fig. 5.2).

Los resultados muestran un patrón similar en las tres mallas, con independencia de la dirección del oleaje: la configuración batimétrica y la presencia de islas e islotes producen que se reduzca la altura de ola, siendo especialmente relevante la disminución entre en sur de Mallorca y el norte del Archipiélago (Fig. 5.3 y 5.4), pues aunque no disminuya tanto como en el borde de las islas, sí se reduce en comparación con aguas abiertas, aspecto importante para la navegación de las embarcaciones que transportan pasajeros entre dichas islas. Otro comportamiento observado es que en el interior del puerto desde el que parten dichas embarcaciones, es que los valores de altura de ola han sido inferiores a 0.5 m.

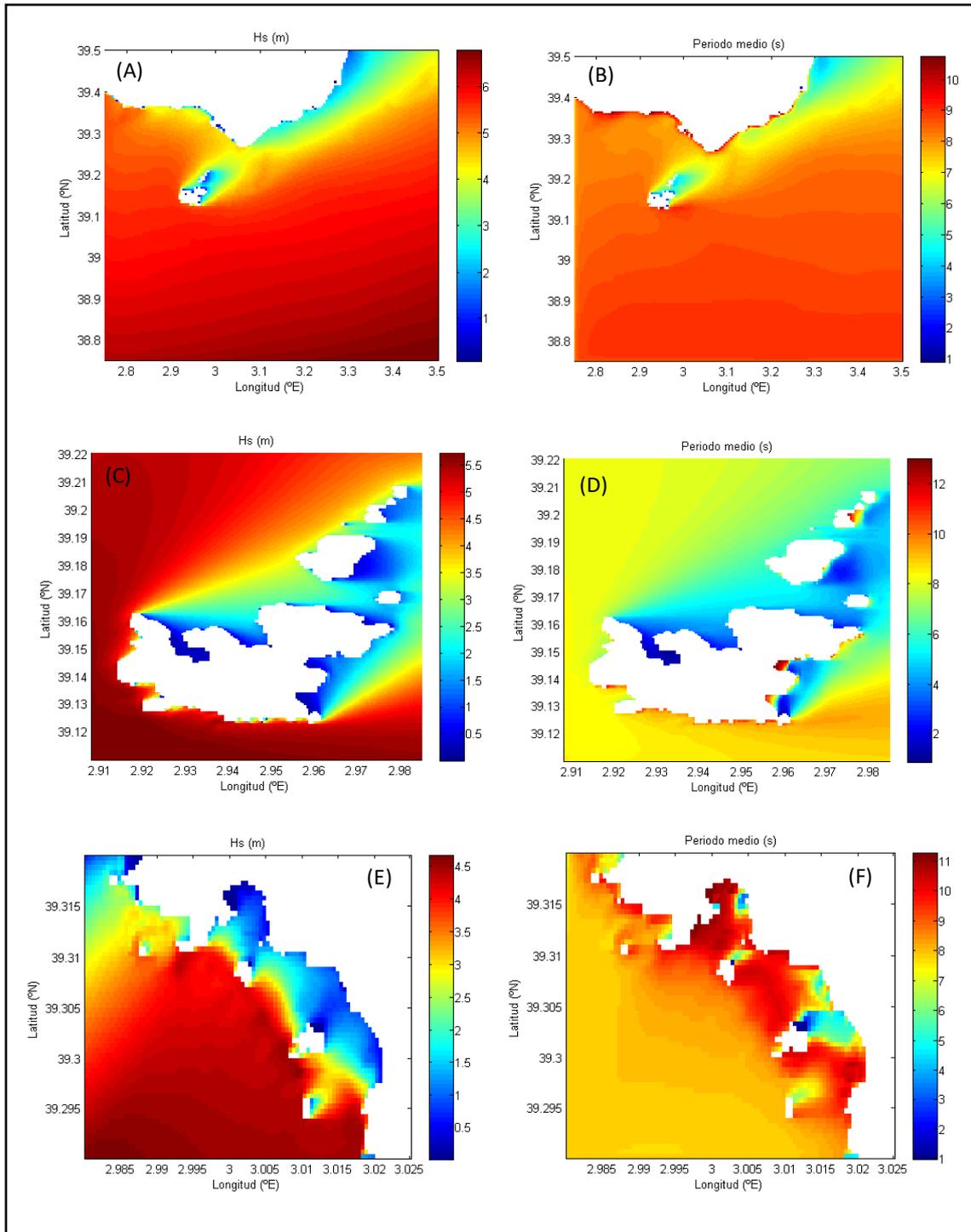


Fig. 5.2 – Representación de  $H_s$  y  $T_m$  para el mes de febrero del año 1989, en las tres mallas de estudio: (A)  $H_s$  para la malla general, (B)  $T_m$  para la malla general, (C)  $H_s$  para la malla de detalle del Archipiélago de Cabrera, (D)  $T_m$  para la malla de detalle del Archipiélago de Cabrera, (E)  $H_s$  para la malla de detalle del puerto y (F)  $T_m$  para la malla de detalle del puerto. Todos ellos se han elaborado con MATLAB 2014 ®

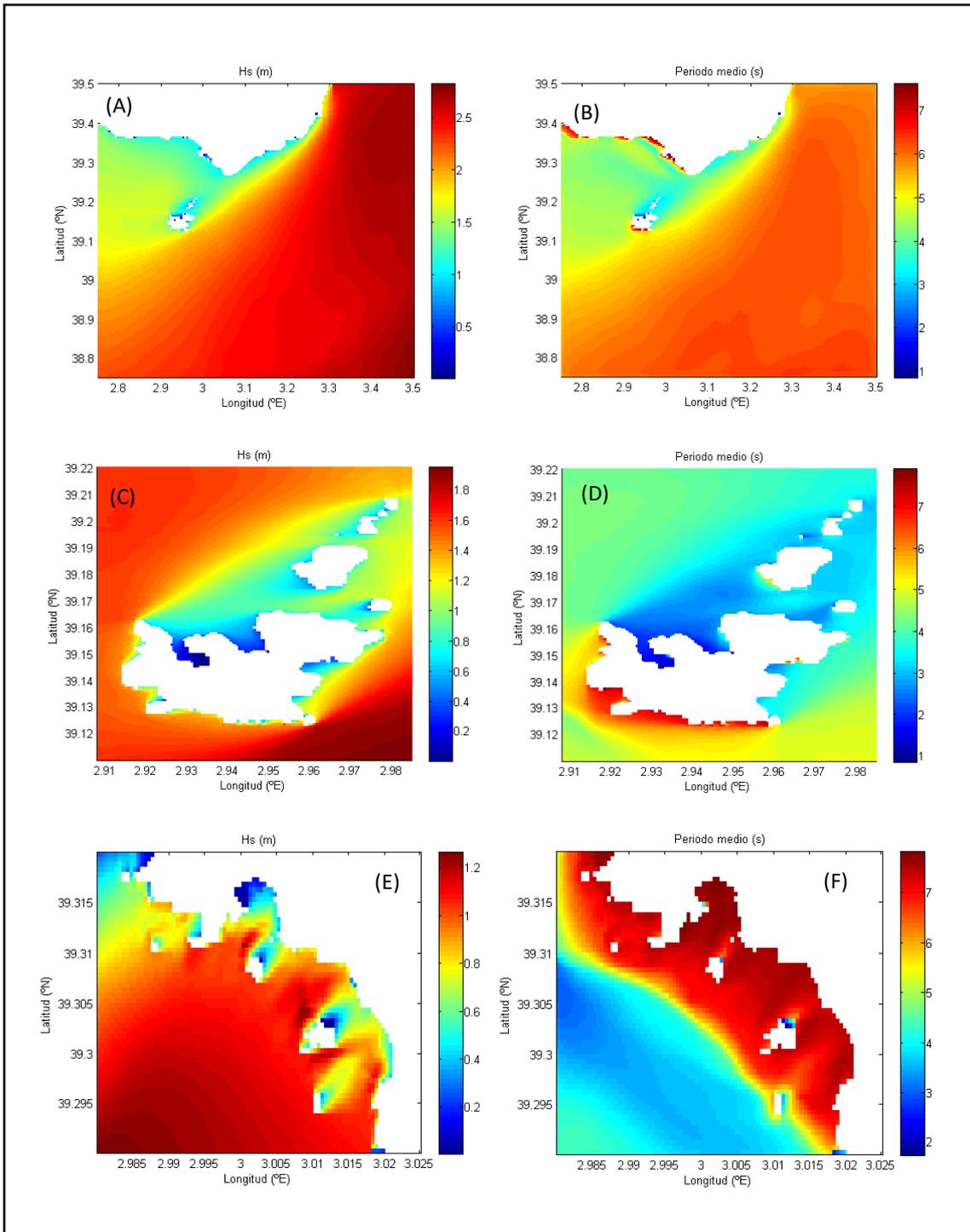


Fig. 5.3 – Representación de  $H_s$  y  $T_m$  para el mes de enero del año 2004, en las tres mallas de estudio: (A)  $H_s$  para la malla general, (B)  $T_m$  para la malla general, (C)  $H_s$  para la malla de detalle del Archipiélago de Cabrera, (D)  $T_m$  para la malla de detalle del Archipiélago de Cabrera, (E)  $H_s$  para la malla de detalle del puerto y (F)  $T_m$  para la malla de detalle del puerto. Todos ellos se han elaborado con MATLAB 2014 ®

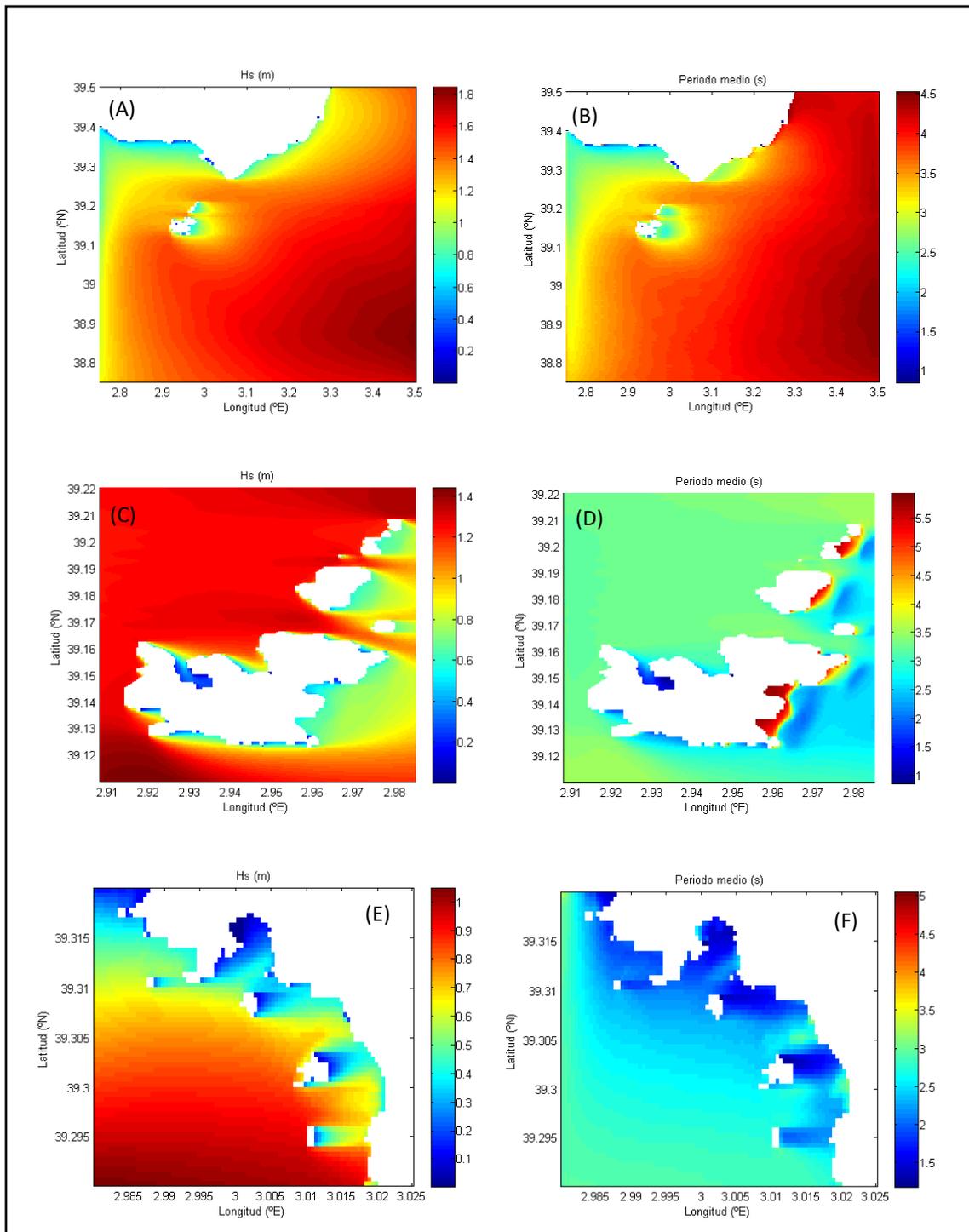


Fig. 5.4 – Representación de  $H_s$  y  $T_m$  para el mes de septiembre del año 2018, en las tres mallas de estudio: (A)  $H_s$  para la malla general, (B)  $T_m$  para la malla general, (C)  $H_s$  para la malla de detalle del Archipiélago de Cabrera, (D)  $T_m$  para la malla de detalle del Archipiélago de Cabrera, (E)  $H_s$  para la malla de detalle del puerto y (F)  $T_m$  para la malla de detalle del puerto. Todos ellos se han elaborado con MATLAB 2014 ®

## 5.2. Reconstrucción climática en los puntos de interés

De los 35 puntos, 15 de ellos tienen componente E en la dirección del oleaje, y el resto W, ambos con componentes del N y S en casi todos los casos. El mayor valor de altura de ola media

ha sido para la dirección de componente E, con 1.06 m. De las direcciones con componente E, en los puntos 1 y 2 de buceo, 1 a 4 de fondeo diurno, las 5 de tráfico marítimo, de la 9 a la 11 de las embarcaciones recreativas y el punto del puerto; la altura de ola media varía en función de la latitud y longitud de los puntos analizados, siendo el mayor valor medio en el punto 4 de transporte marítimo, situado al SE de Mallorca. De los situados en el Archipiélago de Cabrera, el mayor valor de altura de ola media se ha dado en el punto 9 del transporte de turistas a Cabrera, al Sur de la isla, con la componente predominante ESE (Tabla 5.1).

En relación a los 20 puntos restantes de componente W, el mayor valor de altura de ola media se ha dado en los puntos 6 de buceo y 7 de la red de transporte turística. El punto 6 de buceo se encuentra protegido en el interior de la zona Oeste autorizada para el fondeo de Cabrera, y el punto 7, es el situado en la extrema más Oeste de la isla. Este dato refleja que las características de contorno aparentemente no han influido en un espacio tan reducido de estudio, ya que, por otro lado, puntos situados en la misma zona (ANEXO VI) (Tabla 5.1).

#### **a) Buceo**

La representación de los datos reconstruidos muestra en todos los casos una marcada direccionalidad del oleaje, siendo la dirección predominante del oleaje WSW, salvo para los puntos 2 y 3, en que la predominante ha sido el E. Por otro lado, no se muestra tanta variabilidad en la dispersión de los valores como en la base de datos original, siendo en todos los casos, los valores asociados a  $H_s$  y  $T_m$  inferiores a GOW 2.0. De los seis puntos, el único que muestra un patrón con un comportamiento diferente en relación a la dirección del oleaje, es el punto 2, que cubre todo el intervalo de ángulos.

De los 6 puntos de buceo, el mayor valor de  $H_s$ , de 5.01 m, se ha dado para el punto 6, ubicado más al Oeste de la isla de Cabrera. El punto con menor altura de la mayor del registro ha sido el 5, en el interior de Cala Galiota, con un valor de 2.86 m. El mayor valor medio del registro de la altura de ola se ha dado en el punto 3, situado en el Este de Cabrera. Para los puntos 2 y 3, ubicados en el lado Este, la dirección predominante es del E, siendo en el resto de casos la componente WSW (Tabla 5.1) (ANEXO VI).

#### **b) FONDEO DIURNO Y NOCTURNO**

La representación de los datos reconstruidos frente a la base de datos GOW 2.0 muestra un patrón similar al descrito para el uso anterior de buceo. Se destaca al respecto, los bajo valores que toma la altura de ola para seis de los ocho puntos analizados en el fondeo diurno y todos los valores para el nocturno (ANEXO VI).

En el fondeo diurno, la dirección predominante para los puntos 1 a 4 es de componente E, y para los puntos 5 a 8, de componente N-NNW, coincidente con las dos zonas autorizadas en las que se han repartido los puntos. De los 8 puntos analizados, el mayor valor de altura de ola máxima se ha dado en el punto 1, situado en Sap de Carabasa, al este de Cabrera. El menor valor de la altura de ola máxima se ha dado en el punto 5, en el muelle del puerto de la zona autorizada al Oeste de Cabrera. De los valores medios del registro, el mayor valor de altura de ola se ha dado en el punto 4, con 0.71 m, al Sur de Sap Carabassa. En los puntos de la zona este, la dirección del oleaje predominante ha sido con componente E-SE, y en los puntos de la zona autorizada al Oeste de la isla, la dirección del oleaje predominante ha sido con la componente W-NW (Tabla 5.1).

De los 4 puntos de buceo nocturno, situados en la zona Oeste de Cabrera, la misma que para los puntos 5 a 8 del fondeo diurno, los mayores valores de altura de ola máxima para todos los

casos han sido inferiores a 0.65 m, con dirección predominante de oleaje NNW. En todos los casos, la media de la altura de ola ha sido de 0.55 m (ANEXO X).

### c) Navegación

De los 5 puntos de la red marítima, el mayor valor de altura de ola máxima se ha dado para el punto 5, situado más al Este de Mallorca, con 6.24 m, que también ha sido el mayor registro de todos los puntos analizados. El menor valor de altura de ola máxima se ha dado en el punto 4, con 3, 4.74 m, punto que también tiene el mayor valor de altura de ola media, con 1.08 m. En todos los casos se muestra la componente E, pero los puntos 1 a 3, que son los ubicados al SW de Mallorca con componente S, y los puntos 4 y 5, con componente N, y ubicados el SE de Mallorca (Tabla 5.1).

De los 11 puntos de las embarcaciones de pasajeros, ha sido el punto 9, al sur de la isla de Cabrera, el que mayor valor de altura de ola ha presentado, con 5.30 m, también con el mayor valor de altura de ola media, con 0.97 m. El menor valor de altura de ola máxima se ha dado en el punto 6, con 0.56 m, situado en la misma zona de autorización de fondeo nocturno, al Oeste de Cabrera. En los casos de los puntos 1 a 8 predomina la componente W, que son los puntos ubicados al W de las islas e islotes, y en los otros puntos de 9 a 11, la componente E, situándose el punto 9 al Sur de Cabrera, y los puntos 10 y 11 al E de esta (ANEXO VI) (Tabla 5.1).

### d) Puerto

En el puerto de la Colònia de Sant Jordi, el valor máximo de altura de ola registrada ha sido de 0.26 m y el medio de 0.04 m, con una dirección predominante de componente SSE. Junto al punto 5 de fondeo diurno, se ha obtenido el menor valor de  $H_s$  para toda la serie analizada de todos los puntos. La dirección predominante en este caso es del SSE (ANEXO VI) (Tabla 5.1).

**Tabla 5.1** – Valor de  $H_s$  máxima, medio y mínima y dirección de oleaje en los puntos de estudio, obtenidos con RBF. Se indica en la última columna la malla origen. B = buceo, FD = fondeo diurno, FN = fondeo nocturno, RM = ruta marítima, RP = ruta empresas turísticas y P = puerto

Uso	Punto	$H_s$ max (m)	$H_s$ med (m)	$H_s$ min (m)	Dirección	Malla
B	1	2.91	0.33	0.01	WSW	Detalle C.
B	2	3.83	0.67	0.01	E	Detalle C.
B	3	4.59	0.52	0.01	E	Detalle C.
B	4	4.42	0.52	0.01	WSW	Detalle C.
B	5	2.86	0.40	0.01	WSW	Detalle C.
B	6	5.01	0.64	0.01	WSW	Detalle C.
FD	1	3.71	0.64	0.01	ESE	Detalle C.
FD	2	1.38	0.39	0.01	SSE	Detalle C.
FD	3	1.38	0.39	0.01	E	Detalle C.
FD	4	3.50	0.71	0.01	E	Detalle C.
FD	5	0.26	0.02	0.01	W	Detalle C.
FD	6	0.87	0.08	0.01	NNW	Detalle C.
FD	7	1.18	0.10	0.01	NNW	Detalle C.
FD	8	1.51	0.14	0.01	N	Detalle C.
FN	1	0.64	0.05	0.01	NNW	Detalle C.
FN	2	0.64	0.05	0.01	NNW	Detalle C.
FN	3	0.55	0.05	0.01	NW	Detalle C.

FN	4	0.55	0.05	0.01	NW	Detalle C.
RM	1	5.30	0.81	0.01	SE	General
RM	2	4.85	0.91	0.01	SE	General
RM	3	4.74	1.03	0.01	ESE	General
RM	4	5.80	1.09	0.01	NE	General
RM	5	6.24	1.06	0.01	NNE	General
RP	1	4.00	0.57	0.01	W	Detalle C.
RP	2	3.77	0.42	0.01	WNW	Detalle C.
RP	3	3.71	0.42	0.01	WSW	Detalle C.
RP	4	3.22	0.3	0.01	NW	Detalle C.
RP	5	0.98	0.09	0.01	NNW	Detalle C.
RP	6	0.56	0.04	0.01	NNW	Detalle C.
RP	7	5.01	0.64	0.01	WSW	Detalle C.
RP	8	4.24	0.44	0.01	WSW	Detalle C.
RP	9	5.30	0.97	0.01	ESE	Detalle C.
RP	10	3.15	0.47	0.01	ESE	Detalle C.
RP	11	4.81	0.86	0.01	ESE	Detalle C.
P	1	0.26	0.04	0.01	SSE	Detalle P.

### 5.3. Operatividad de los usos de interés

#### 5.3.1. Buceo

De los 6 puntos analizados, el que mayor cantidad de número de horas con alturas de ola igual o superiores a 1.5 m ha sido el punto 6, al lado Oeste de Cabrera, con 36450 horas totales. De menor a mayor número de horas, los puntos han sido 1, 5, 2, 4, 3 y 6 (Fig. 5.5). En relación al total de horas de estudio, los resultados del punto 6 suponen un 10.40 % del total horas en las que se superan los valores de altura de ola de 1.5 m. Traducido en términos de probabilidad de que no se alcancen olas de dicha altura, ha sido un 0.90 (Tabla 5.2).

El año con mayor número de horas de todo el registro ha sido el 2013, y el año con menos número de horas, el 1983. No se aprecia ningún patrón de oscilación en el intervalo de años estudiado (Fig. 5.6). Por otro lado, se muestra un marcado patrón estacional, siendo mayor el número de horas en los meses de invierno (diciembre > enero > febrero) y menor en los meses de verano, siendo julio el mes con el menor número de horas, seguido de agosto y junio (Fig. 5.7).

Tabla 5.2 – Horas de superación para cada punto de buceo y probabilidad de superación y no superación

Puntos buceo	Horas hs>1.5m	% superación	Probabilidad hs>1.5m	% no superación	Probabilidad Hs<1.5m
Punto 1	2615	0.75	0.0075	99.24	0.99
Punto 2	9846	2.82	0.03	97.18	0.97
Punto 3	27323	7.79	0.07	92.21	0.92
Punto 4	27160	7.75	0.08	92.24	0.92
Punto 5	5131	1.56	0.016	98.44	0.98
Punto 6	36450	10.40	0.10	89.60	0.90

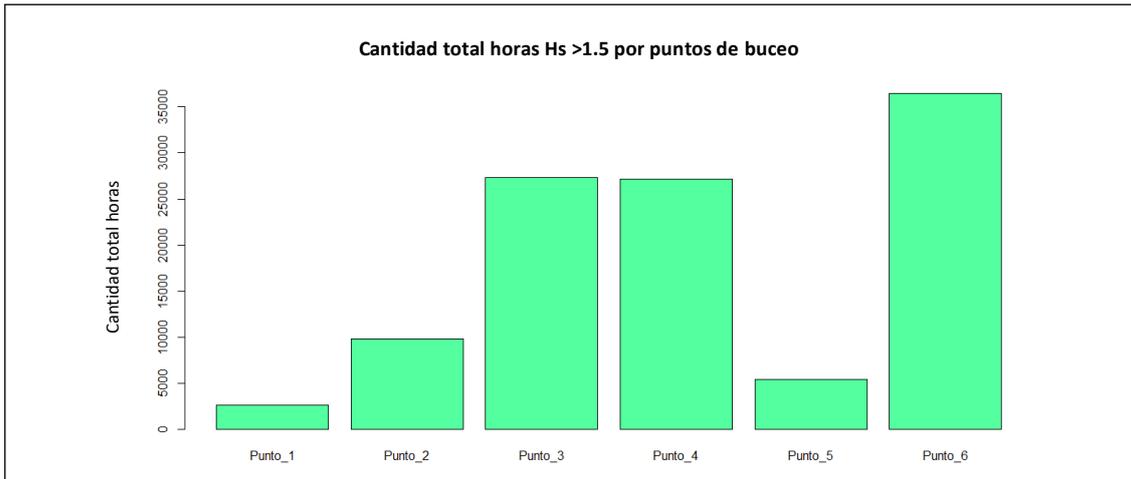


Fig. 5.5 – Gráfico de barras con el número de horas de alturas de ola > 1.5 m para cada punto analizado de buceo

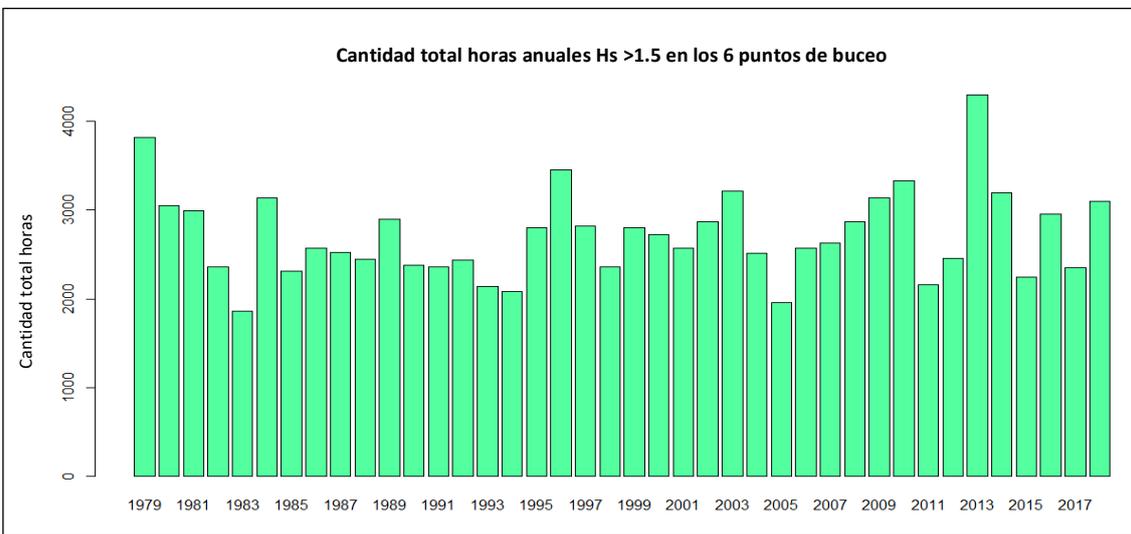


Fig. 5.6 – Gráfico de barras con el número de horas de alturas de ola > 1.5 m para cada año en los seis puntos

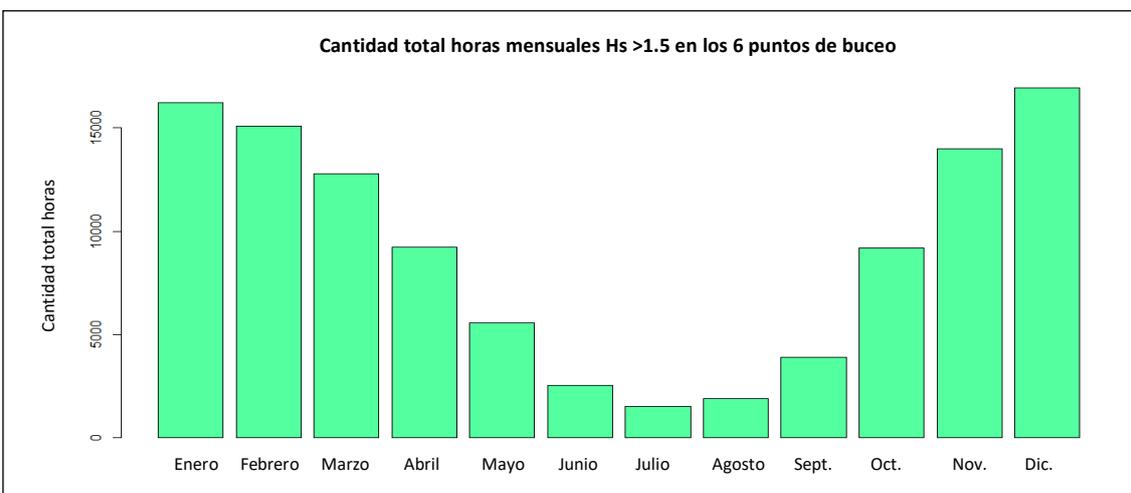


Fig. 5.7 – Gráfico de barras con el número de horas de alturas de ola > 1.5 m para cada mes en los seis puntos

### 5.3.2. Fondeo

De los 2 puntos analizados, el punto con mayor número de horas con alturas de ola igual o superiores a 2 m ha sido el punto 4, al lado Oeste de Cabrera, con 1133 horas totales. En relación al total de horas de estudio, supone un 0.32 % del total horas en las que se superan los valores de altura de ola de 2 m. Traducido en términos de probabilidad de que no se alcancen olas de dicha altura, ha sido un 0.9968 (Tabla 5.3) (Fig. 5.8)

De la serie de años analizada, ha sido el año 1980 en conjunto para dicha actividad el que mayor cantidad de horas de superación de alturas de ola igual o superiores a 2 m ha presentado, y el año 1985 el que menos ha presentado, pero no se ha mostrado un patrón claro en los resultados en conjunto (Fig. 5.9). En relación al registro mensual del conjunto de datos, ha sido el mes de marzo el que mayor cantidad de horas con alturas de ola superiores a 2 m ha presentado, seguido de abril y febrero. Los meses con menor número de horas han sido los de verano, siendo el mes con menor cantidad de horas, el mes de julio. Por otro lado, el mes de septiembre no ha tenido registro de ninguna hora para olas de dicha altura (Fig. 5.10).

Tabla 5.3 – Horas de superación para cada punto de fondeo y probabilidad de superación y no superación

Puntos fondeo	Horas hs>2m	% superación tiempo	Probabilidad hs>2m	% no superación tiempo	Probabilidad Hs<2m
Punto 1	926	0.26	0.0026	99.73	0.9974
Punto 4	1133	0.32	0.0032	99.68	0.9968

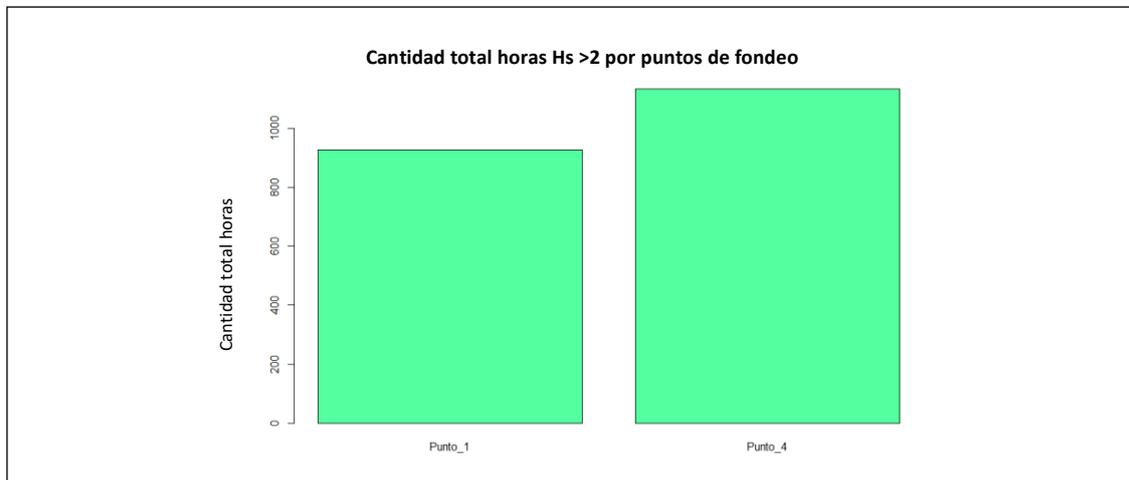


Fig. 5.8 – Gráfico de barras con el número de horas de alturas de ola > 2 m para cada punto analizado de fondeo

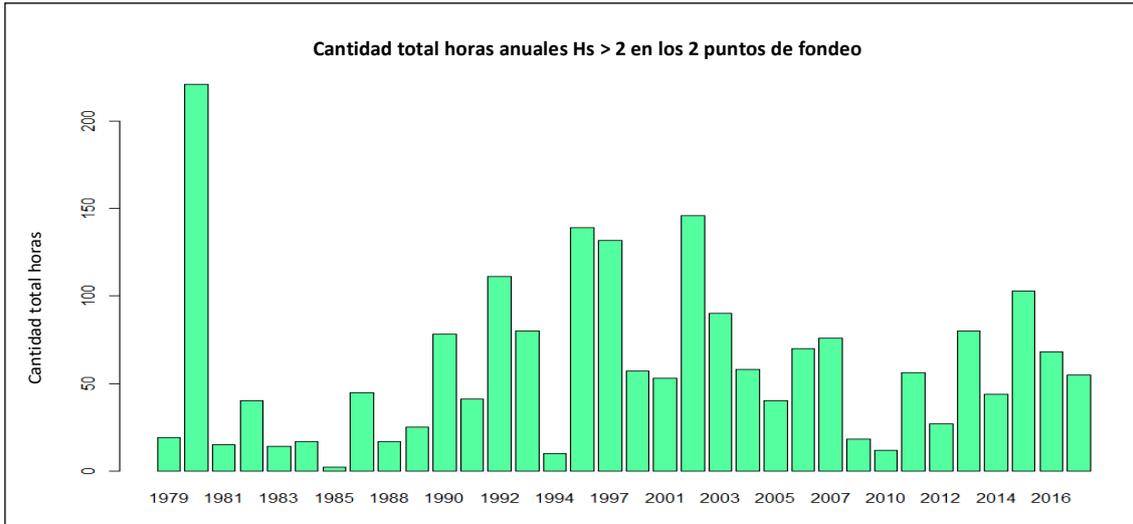


Fig. 5.9– Gráfico de barras con el número de horas de alturas de ola > 2 m para cada año en los dos puntos

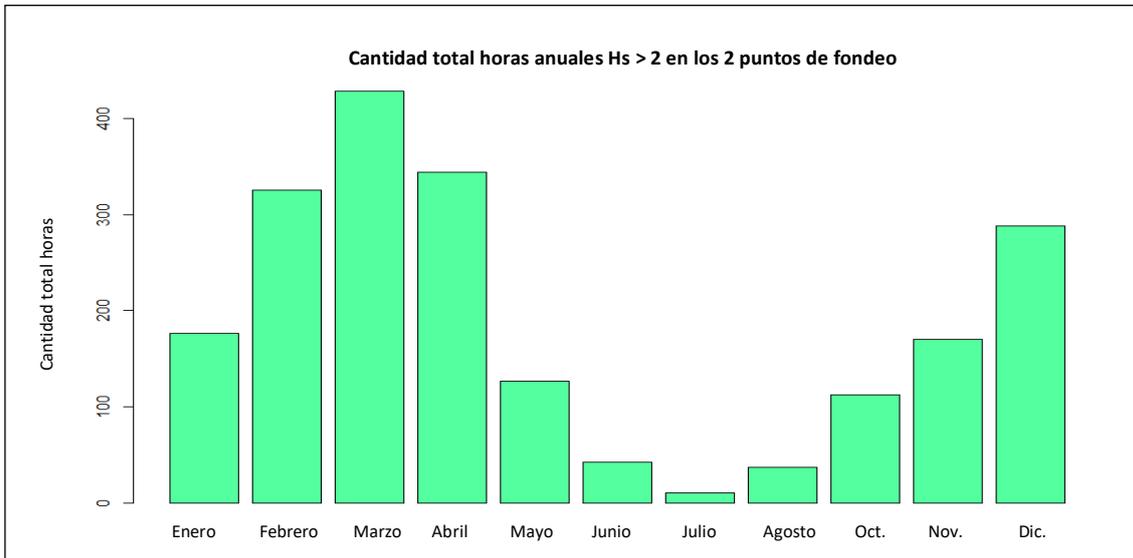


Fig. 5.10 – Gráfico de barras con el número de horas de alturas de ola > 2 m para cada mes en los dos puntos

### 5.3.3. Navegación

#### 5.3.3.1. Ruta de tráfico marítimo entre Mallorca y Menorca

De los cinco puntos analizados, el que mayor cantidad de número de horas con alturas de ola igual o superiores a 4 m ha presentado, ha sido el punto 5, al lado E de la isla de Mallorca, con 703 horas totales. En relación al total de horas de estudio, supone un 0.20 % del total horas en las que se superan los valores de altura de ola de 4 m. Traducido en términos de probabilidad de que no se alcancen olas de dicha altura, ha sido un 0.9980. De menor a mayor número de horas, el orden de los puntos ha sido el siguiente: 2, 1, 3, 4 y 5 (Tabla 5.4). La menor probabilidad de superación de dicho valor de altura de ola se ha dado para el punto 2, al SW de Mallorca, con una probabilidad de ocurrencia de 0.0001 (Fig. 5.11).

De la serie de años analizada, ha sido el año 1980 en conjunto para dicha actividad el que mayor cantidad de horas de superación de alturas de ola igual o superiores a 4 m ha presentado, y el año 1994 el que menos ha presentado, pero no se ha mostrado un patrón claro en los resultados en conjunto (Fig. 5.12). En relación al registro mensual del conjunto de datos, en los meses de mayo a septiembre no se han registrado alturas de ola superiores a 4 m, coincidente con el intervalo temporal de final de primavera a principios de otoño, siendo el mes con mayor cantidad de horas registradas, el mes de diciembre (Fig. 5.13).

Tabla 5.4 – Horas de superación para cada punto de ruta marítima y probabilidad de superación y no superación

Puntos navegación	Horas hs>4m	% superación tiempo	Probabilidad hs>4m	% no superación tiempo	Probabilidad Hs<4m
Punto 1	72	0.02	0.0001	99.98	0.9998
Punto 2	44	0.01	0.0001	99.99	0.9999
Punto 3	86	0.02	0.0002	99.98	0.9998
Punto 4	213	0.06	0.0006	99.94	0.9994
Punto 5	703	0.20	0.0020	99.80	0.9980

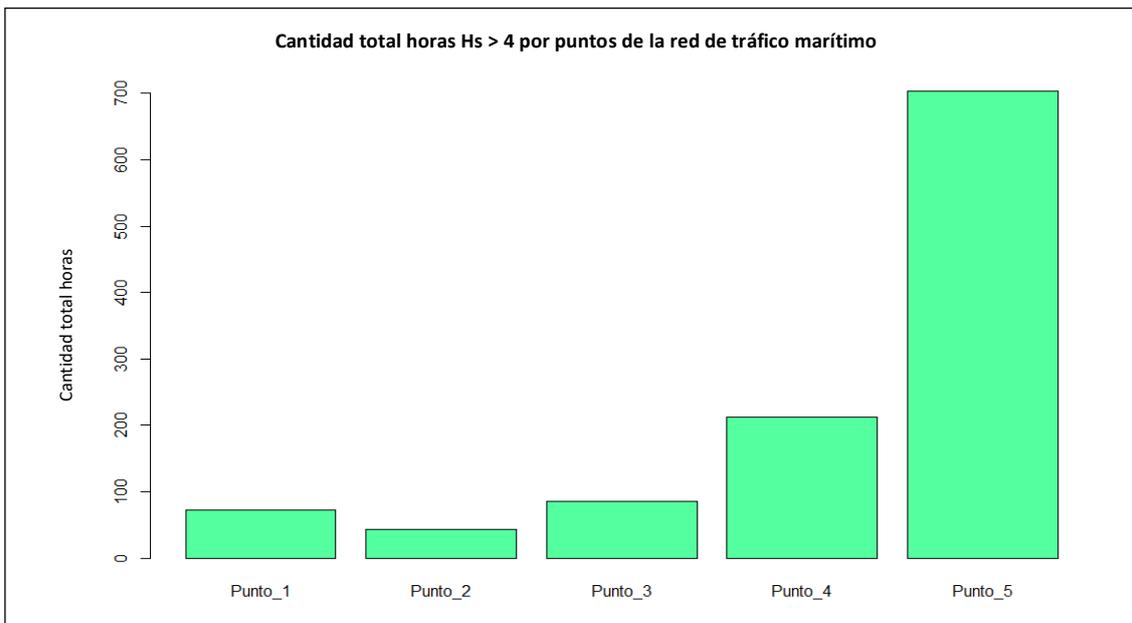


Fig. 5.11 – Gráfico de barras con el número de horas de alturas de ola > 4 m para cada punto analizado de la ruta de transporte marítimo

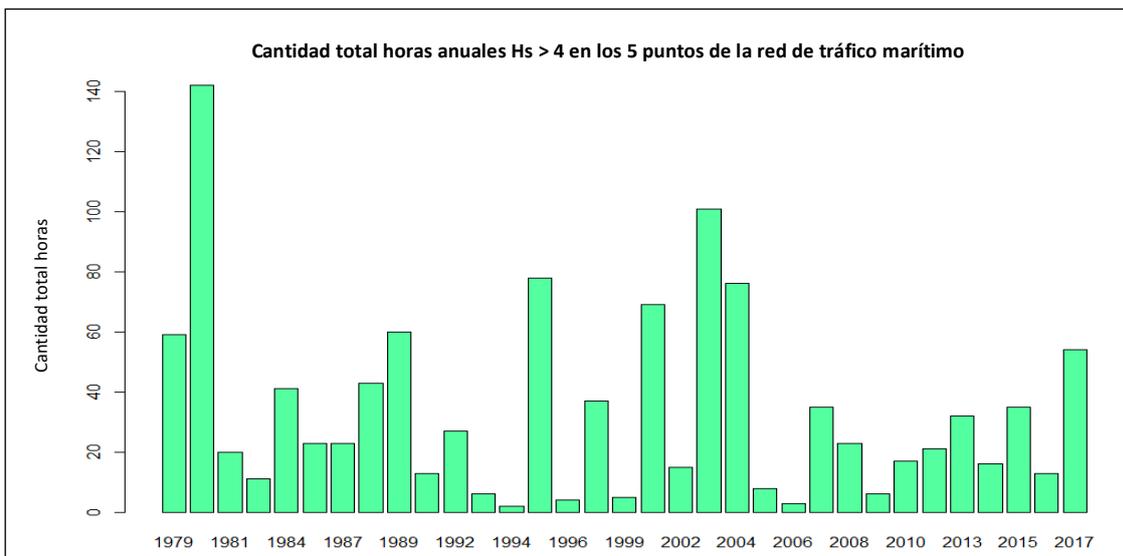


Fig. 5.12 – Gráfico de barras con el número de horas de alturas de ola > 4 m para cada año en los cinco puntos

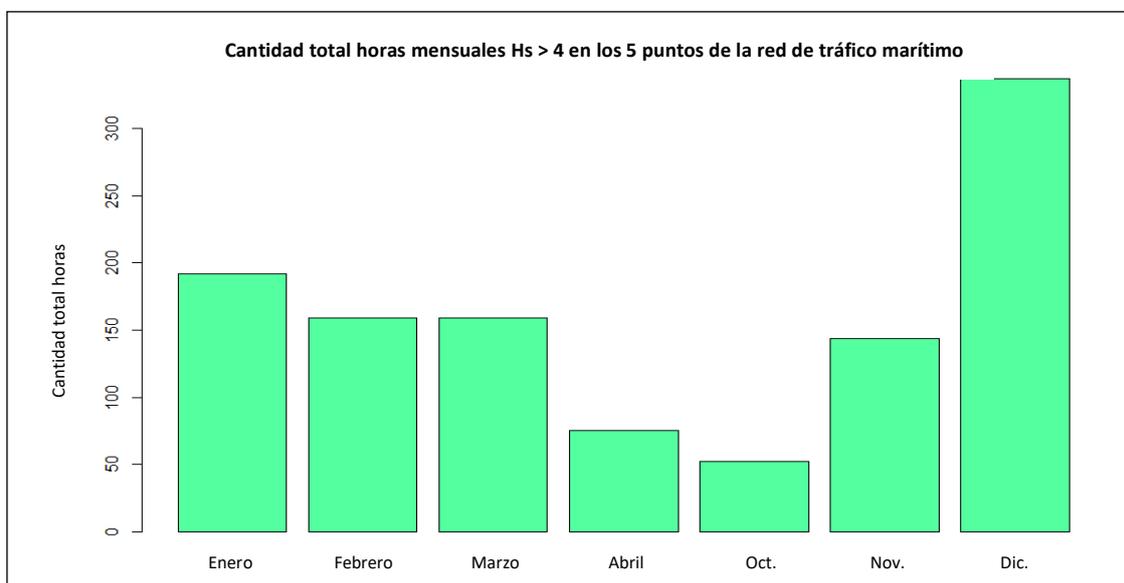


Fig. 5.13 – Gráfico de barras con el número de horas de alturas de ola > 4 m para cada mes en los cinco puntos

### 5.3.3.2. Ruta de transporte de turistas entre Mallorca y el Parque del Archipiélago de Cabrera

De los nueve puntos analizados para el transporte de turistas entre Mallorca y Cabrera, ha sido el punto 7, al lado W de la isla de Cabrera, el que mayor número de horas de altura de ola superior a 2 metros, ha presentado, con 13705 horas totales, y el punto 10, al W de Cabrera, el que menos horas ha obtenido (Fig. 5.14). El número de horas totales para el punto 7, supone un 3.92 % del total horas en las que se superan los valores de altura de ola de 2 m. Traducido en términos de probabilidad de que no se alcancen olas de dicha altura, ha sido un 0.96. La menor probabilidad de superación de dicho valor de altura de ola para el punto 10 ha sido de 0.0011 (Tabla 5.5).

De la serie de años analizada, ha sido el año 2013 en conjunto para dicha actividad el que mayor cantidad de horas de superación de alturas de ola igual o superiores a 2 m ha presentado, y el año 1998 el que menos ha presentado, pero no se ha mostrado un patrón claro en los

resultados en conjunto (Fig. 5.15). En relación al registro mensual del conjunto de datos, se muestra un claro patrón estacional, siendo los meses de mayor cantidad de horas, diciembre y enero, y los que menos, julio y agosto (Fig. 5.16).

Tabla 5.5 – Horas de superación para cada punto de transporte turístico y probabilidad de superación y no superación

Puntos Tr. Col.	Horas hs>2m	% superación tiempo	Probabilidad hs>2m	% no superación tiempo	Probabilidad Hs<2m
Punto 1	3877	0.11	0.0011	99.89	0.9989
Punto 2	2283	0.66	0.0066	99.34	0.9934
Punto 3	1934	0.56	0.0056	99.44	0.9944
Punto 4	164	0.05	0.0005	99.95	0.9995
Punto 7	13705	3.92	0.04	96.07	0.96
Punto 8	3510	1.01	0.01	98.99	0.99
Punto 9	16285	4.63	0.046	95.36	0.957
Punto 10	105	0.03	0.0001	99.97	0.9997
Punto 11	6691	1.90	0.02	98.10	0.98

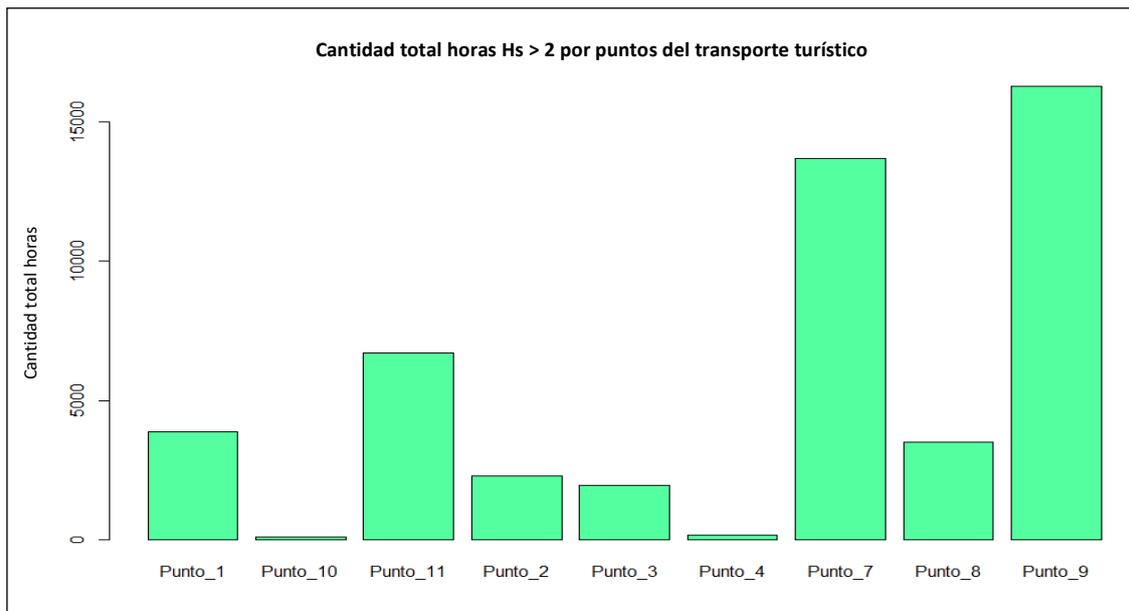


Fig. 5.14 – Gráfico de barras con el número de horas de alturas de ola > 2 m para cada punto analizado de transporte turístico

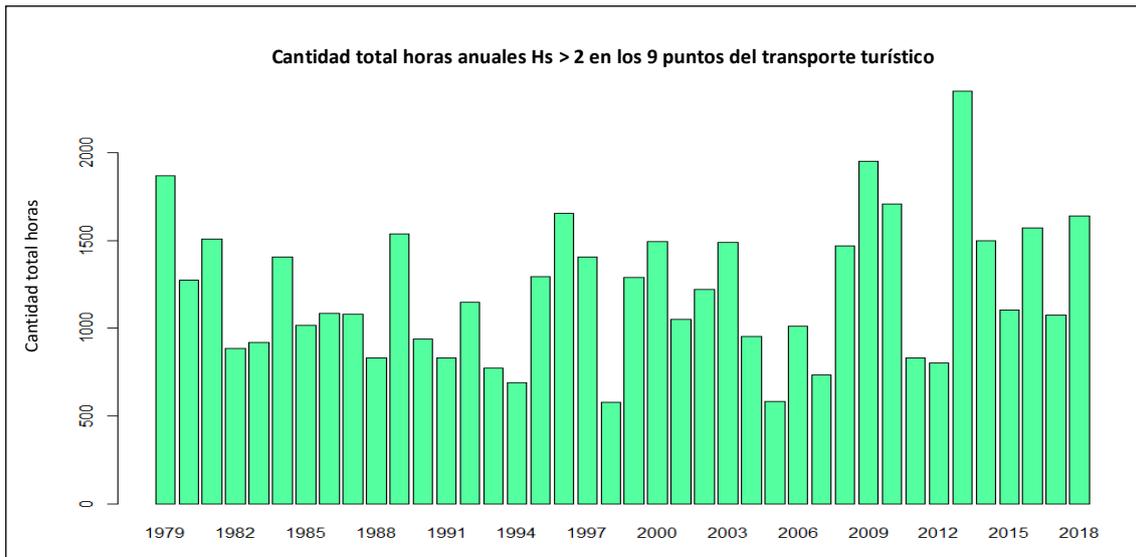


Fig. 5.15 – Gráfico de barras con el número de horas de alturas de ola > 2 m para cada punto analizado de transporte turístico

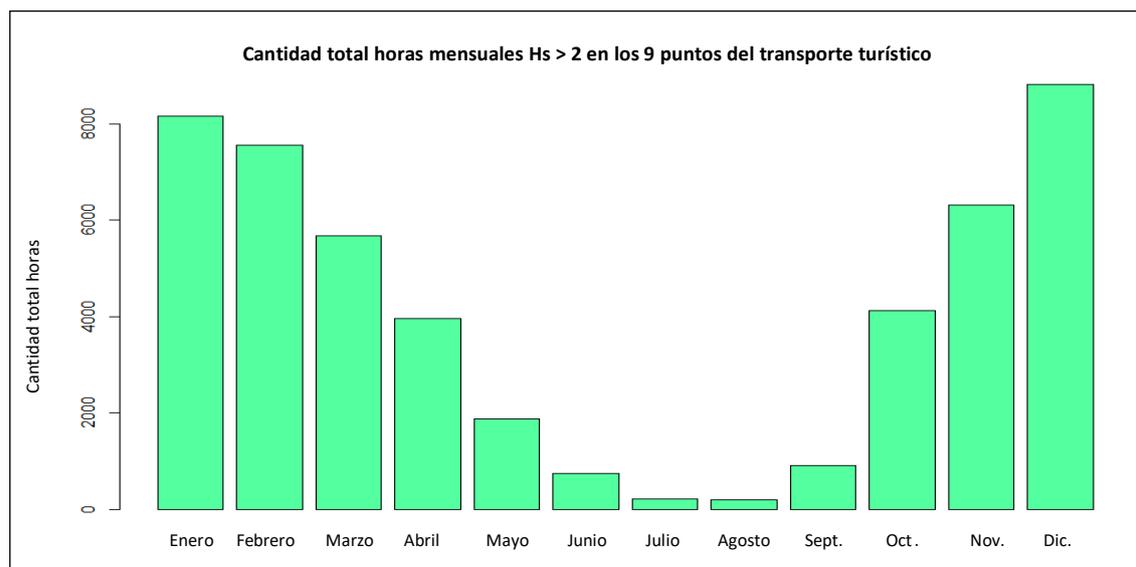


Fig. 5.16 – Gráfico de barras con el número de horas de alturas de ola > 2 m para cada punto analizado de transporte turístico

### 5.3.4. Análisis de los puntos con mayor número de horas registradas

El análisis de los cuatro puntos muestra el intervalo de horas en las que se han superado los valores de la altura descritos en el apartado anterior. Se ha generado un intervalo de dichas alturas de ola, tomando como el valor inferior el correspondiente, y como valor superior, el máximo del registro. El intervalo se ha dividido en aumentos de altura de ola de 0.5 metros.

#### 5.3.4.1. Punto 6 de buceo

El registro anual total de horas de superación ha mostrado que el mayor año con registro del intervalo 1.5 a > 5 m, ha sido el año 2013, pero ha sido el año 1989 el que ha tenido la mayor altura de ola de registro, con un valor superior a 5 m, siendo el único año en el que se han mostrado horas de dicho valor de altura de ola. Esto coincide con los resultados obtenidos tras las simulaciones de SWAN, en el que el mes de febrero de dicho año se dieron los mayores valores de altura de ola. Por otro lado, en se muestra un patrón concreto en el registro de años (Fig. 5.17).

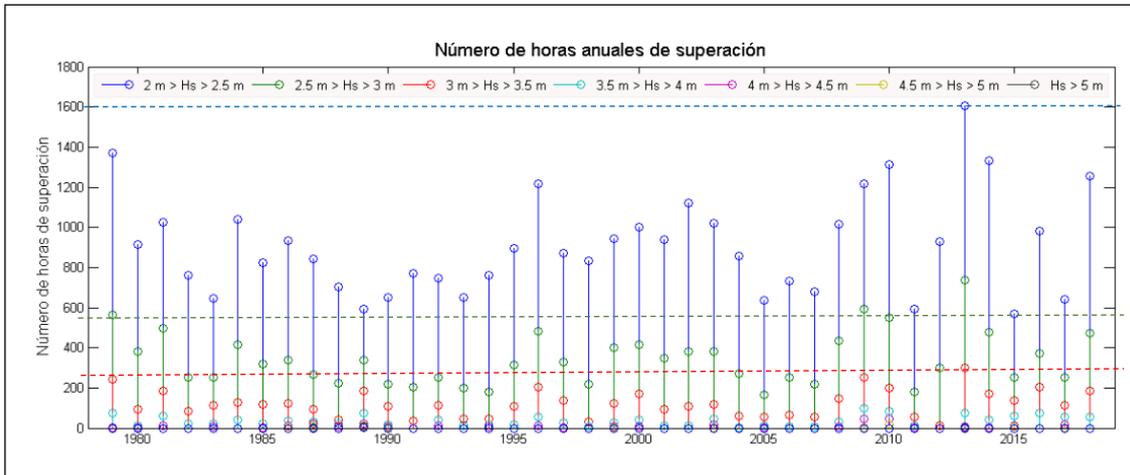


Fig. 5.17 –Gráfico de líneas con el número total de horas de alturas de ola > 1.5 m clasificadas en el intervalo de 1.5 a > 5 m, cada 0.5 m. Las líneas punteadas indican el valor máximo del número de olas de cada intervalo.

El porcentaje de no superación de cada intervalo de altura de ola sigue un patrón creciente, donde el menor porcentaje de no superación se da para el valor de 1.5 m, porcentaje que aumenta al aumentar la altura de ola (Fig. 5.18A). El patrón de la media de número de horas de superación para cada intervalo de alturas de ola, muestra el patrón inverso al de porcentaje: el valor mayor de horas es para el valor de 1.5 m de altura de ola, con una media de 889 horas registradas, y va disminuyendo según se incrementa el valor de la altura de ola (Fig. 5.18B).

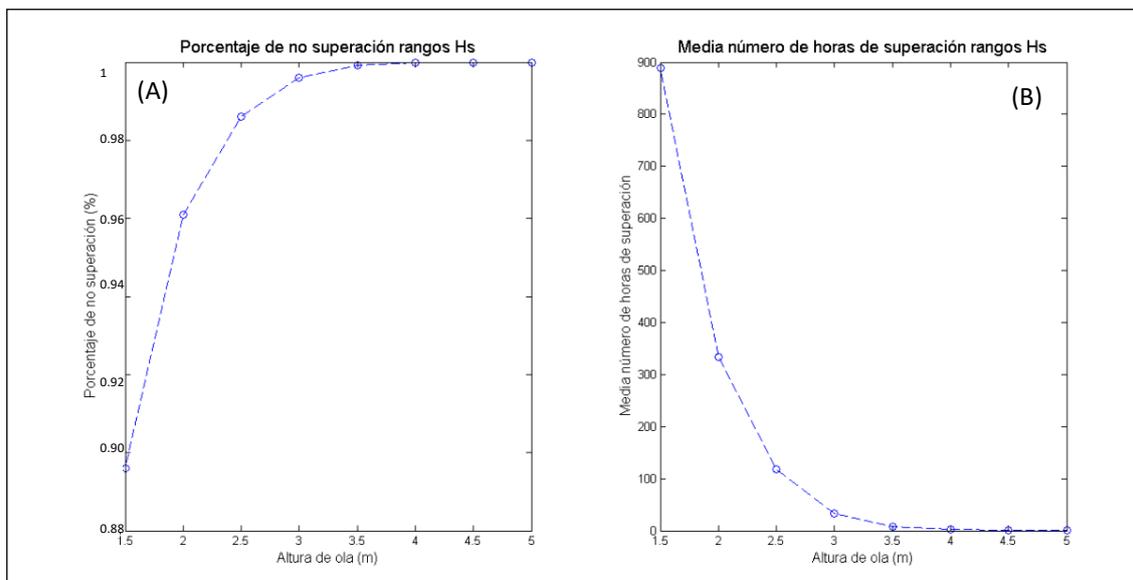


Fig. 5.18 – (A) Porcentaje de no superación de horas de los valores de altura de ola entre 1.5 y 5 m y (B) media del número de horas de superación de dichos valores de altura de ola

#### 5.4.4.2. Punto 4 de fondeo

El registro anual total de horas de superación ha mostrado que el mayor año con registro del intervalo 2 a > 3 m, ha sido el año 1980. Se muestra un patrón heterogéneo en el conjunto de años analizados: no en todos los años se ha superado el valor de altura de ola de 2 metros, y en relación a las alturas de ola entre 2.5 y 3 m, se han registrado en ocho años del total, y solamente en dos años, se han registrado olas con más de 3 m de altura (Fig. 5.19).

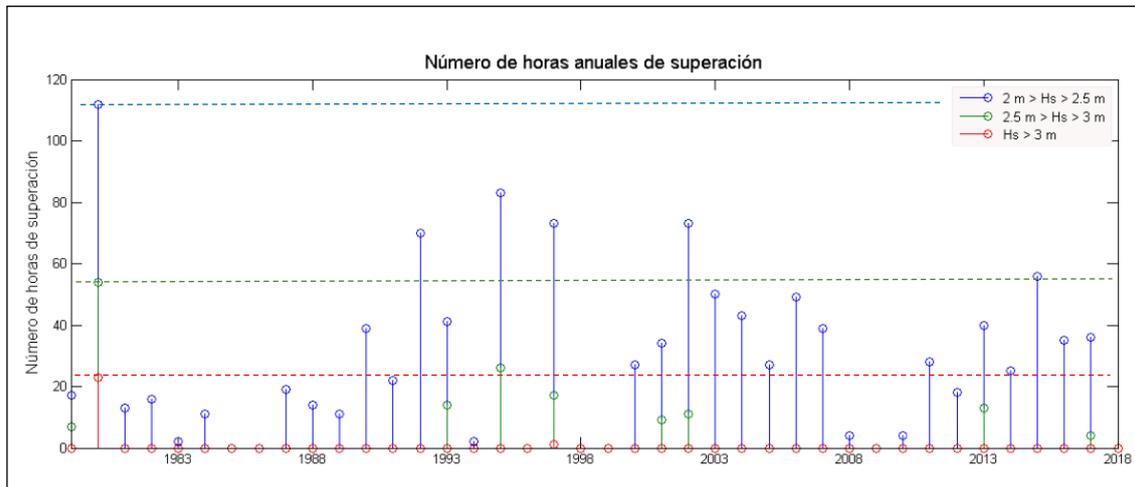


Fig. 5.19 – Gráfico de líneas con el número total de horas de alturas de ola > 2 m clasificadas en el intervalo de 2 a > 3 m, cada 0.5 m. Las líneas punteadas indican el valor máximo del número de olas de cada intervalo

El porcentaje de no superación de cada intervalo de altura de ola sigue un patrón creciente, donde el menor porcentaje de no superación se da para el valor de 2 m, porcentaje que aumenta al aumentar la altura de ola (Fig. 5.20A). El patrón de la media de número de horas de superación para cada intervalo de alturas de ola, muestra el patrón inverso al de porcentaje: el valor mayor de horas es para el valor de 2 m de altura de ola, con una media de 28 horas registradas, y va disminuyendo según se incrementa el valor de la altura de ola (Fig. 5.20B).

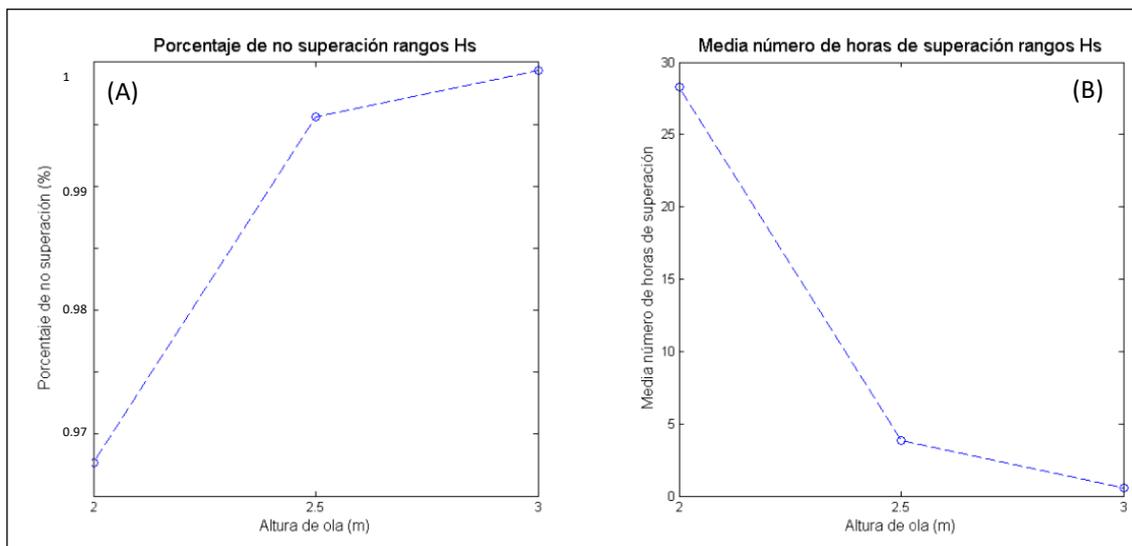


Fig. 5.20 – (A) Porcentaje de no superación de horas de los valores de altura de ola entre 2 y 3 m y (B) media del número de horas de superación de dichos valores de altura de ola

### 5.4.4.3. Punto 5 de la ruta de tráfico marítimo

El registro anual total de horas de superación ha mostrado que el mayor año con registro del intervalo 4 a > 6 m, ha sido el año 2004. Se muestra un patrón heterogéneo en el conjunto de años analizados: no en todos los años se ha superado el valor de altura de ola de 4 metros. Solo el año 1979 muestra alturas de ola de más de 6 metros (Fig. 5.21).

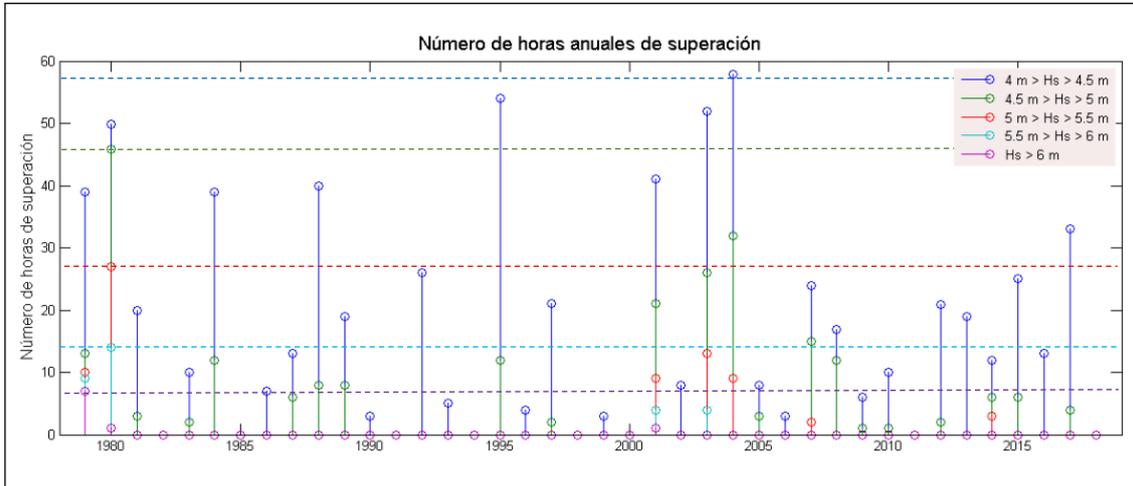


Fig. 5.21 – Gráfico de líneas con el número total de horas de alturas de ola > 4 m clasificadas en el intervalo de 2 a > 6 m, cada 0.5 m. Las líneas punteadas indican el valor máximo del número de olas de cada intervalo

El porcentaje de no superación de cada intervalo de altura de ola sigue un patrón creciente, donde el menor porcentaje de no superación se da para el valor de 4 m, porcentaje que aumenta al aumentar la altura de ola (Fig. 5.22A). El patrón de la media del número de horas de superación para cada intervalo de alturas de ola, muestra el patrón inverso al de porcentaje: el valor mayor de horas es para el valor de 4 m de altura de ola, con una media de 17 horas registradas, y va disminuyendo según se incrementa el valor de la altura de ola (Fig. 5.22B).

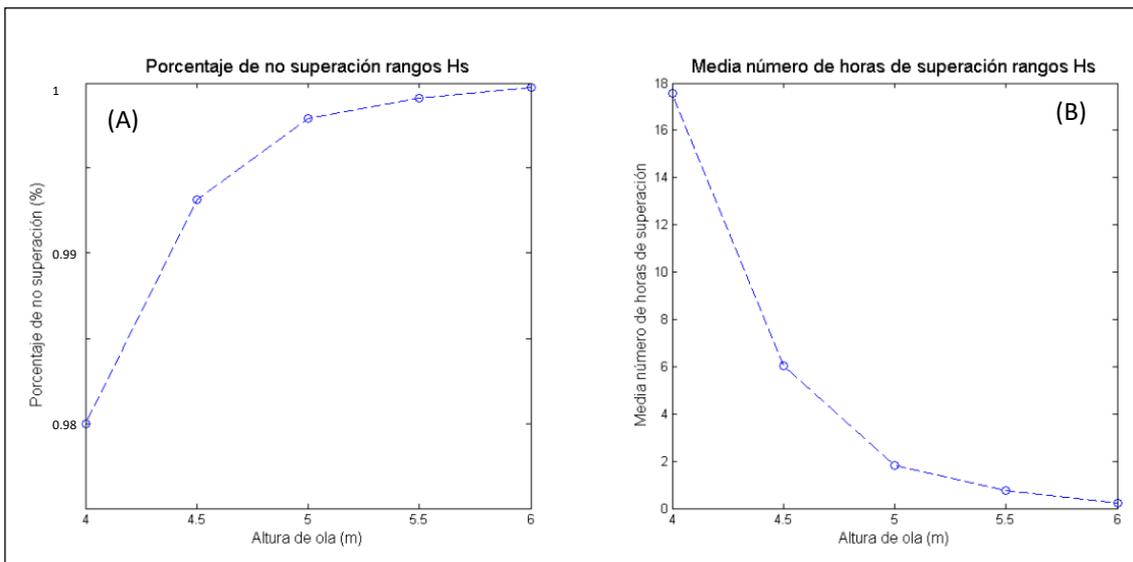


Fig. 5.22– (A) Porcentaje de no superación de horas de los valores de altura de ola entre 4 y 6 m y (B) media del número de horas de superación de dichos valores de altura de ola

#### 5.4.4.4. Punto 7 de la ruta de transporte de pasajeros

El registro anual total de horas de superación ha mostrado que el mayor año con registro del intervalo 2 a > 3 m, ha sido el año 2013. Se muestra un patrón heterogéneo en el conjunto de años analizados, habiéndose superado en todos los años el valor de altura de ola de 2 metros (Fig. 5.23).

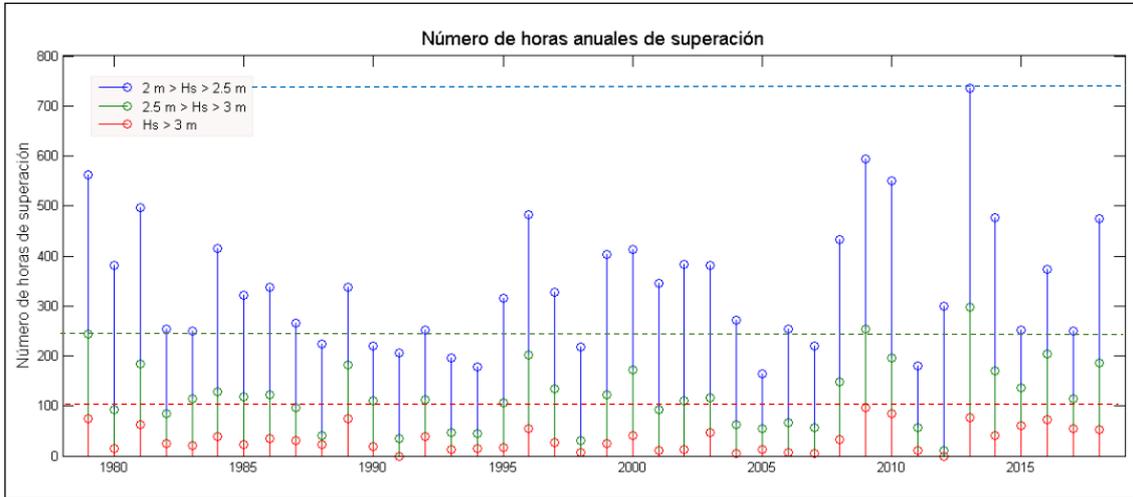


Fig. 5.23 – Gráfico de líneas con el número total de horas de alturas de ola > 2 m clasificadas en el intervalo de 2 a > 3 m, cada 0.5 m. Las líneas punteadas indican el valor máximo del número de olas de cada intervalo

El porcentaje de no superación de cada intervalo de altura de ola sigue un patrón creciente, donde el menor porcentaje de no superación se da para el valor de 2 m, porcentaje que aumenta al aumentar la altura de ola (Fig. 5.24A). El patrón de la media del número de horas de superación para cada intervalo de alturas de ola, muestra el patrón inverso al de porcentaje: el valor mayor de horas es para el valor de 2 m de altura de ola, con una media de 342 horas registradas, y va disminuyendo según se incrementa el valor de la altura de ola (Fig. 5.24B).

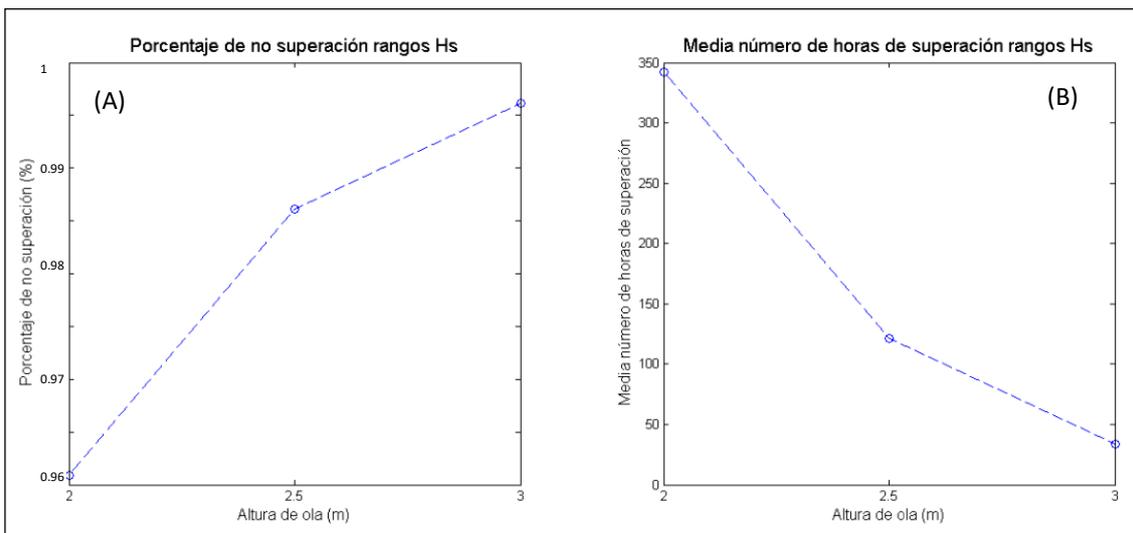


Fig. 5.24 – (A) Porcentaje de no superación de horas de los valores de altura de ola entre 2 y 3 m y (B) media del número de horas de superación de dichos valores de altura de ola

## 6. Discusión

### 6.1. Modelo hidrodinámico SWAN

Las zonas costeras son unas de las más dinámicas del planeta, debido a que están en continuo cambio, ya que están expuestas a las dinámicas tanto continentales como marítimas (Winckler, 2017). Este hecho hace que los estudios en dichos lugares tengan mayor dificultad que para zonas con menores variaciones. Conocer los procesos en toda su magnitud es inviable a días de hoy, pero es posible inferir determinadas condiciones empleando las herramientas adecuadas.

Una de las herramientas empleadas en la actualidad es el uso de técnicas mixtas para la reconstrucción climática en zonas puntuales, que ha supuesto una mejora computacional desde hace de décadas (Rueda, 2016). En ese sentido, el uso del modelo hidrodinámico SWAN, ha resultado ser favorable para el estudio de diferentes estados de mar. No obstante, ha presentado una serie de limitaciones, de las cuales se destacan las cuatro más relevantes.

La primera limitación encontrada a la hora de ejecutar los 200 casos de propagación del oleaje ha sido el coste de tiempo, debido a que, de media, cada caso propagado tardaba 30 minutos cada uno computacionalmente. Aunque se recomiende un número mayor de casos a simular (de más de 500 según Camus, 2009, el tiempo computacional requerido para la propagación de cada caso, no ha permitido una selección de mayor número de estos.

El segundo aspecto está relacionado con el valor de frecuencia empleada (SWAN User Manual), puesto que no ha reproducido todos los casos correctamente. 16 casos, que suponen un 8% del total, han dado errores en la propagación debido a los bajos valores de altura de ola y periodo, los cuales se han corregido aumentando la frecuencia máxima. Los errores durante la ejecución de los modelos son muy comunes, y para su solución es conveniente ser precavidos con todos los aspectos (López, 2013), para no achacar en un primer momento errores a fallos en el preproceso del estudio.

El tercer aspecto para destacar, es que la zona de estudio de Cabrera no muestra variaciones batimétricas bruscas, pero sí está configurada por un número relevante de islas. Esto no supone un problema al hecho de que el modelo no resuelva convenientemente los procesos de transformación de oleaje de difracción y reflexión producidos por accidentes geográficos abruptos e instalaciones marítimas (Winckler, 2017), pero sí ha supuesto una limitación en la generación de las mallas en la parte del preproceso, ya que muchas zonas consideradas tierra, debido al bajo nivel del mar de la zona de estudio, se han considerado zonas emergidas en lugar de sumergidas.

Por último, debido al tiempo computacional, no ha sido posible realizar una validación de los resultados. Este aspecto es de gran importancia para poder determinar posibles deficiencias en los resultados obtenidos.

### 6.2. Operatividad de los usos de interés

Los criterios de elección considerados para el umbral de las alturas de ola para cada uso, se han tenido en cuenta por diversas vías: experiencia de personal dedicado a actividades recreativas, bibliografía y recomendaciones de cursos de formación de navegación recreativa. Para el buceo se ha considerado un valor de 1.5, obtenido a través de empresas de buceo del

Parque de Cabrera. No obstante, se debe considerar que dichas empresas dependen de las embarcaciones para llegar al Parque, a las cuales se les ha dado una cifra de 2 m, considerando a estas dentro de la categoría de diseño C de las embarcaciones de recreo, que son las autorizadas a navegar en aguas costeras con una altura de ola máxima de 2 m, siempre y cuando cumplan otra serie de requisitos, como la estabilidad o maniobrabilidad.

Las embarcaciones de dicha categoría pueden navegar hasta 12 millas de costa. El valor de la altura de ola para el uso de fondeo, pese a que autores como Balaguer *et al*, 2009 dieran un valor de 0.5 m (Balaguer *et al*, 2009), la realidad es que los barcos fondeados siguen siendo funcionales con mayores valores de altura de ola, por lo que se les ha ofrecido el valor de 2 m, el mismo que para las embarcaciones autorizadas a ir a dicha zona a fondear. Por último, para el valor para el ferry que marca la ruta de Mallorca a Menorca, al depender de las decisiones de la Autoridad Portuaria, se ha establecido el valor de más 4 m en función de las categorías de las embarcaciones de recreo.

Se debe considerar que las decisiones para la navegación no solo dependen del valor de altura de ola que se pueda dar en un momento. Para navegar se debe considerar que variables como la velocidad del viento o mar de fondo, condicionan las decisiones para ello. Al haber analizado dichos usos solo con el valor de la altura de ola, se plantea que este estudio puede ser ampliado considerando la intensidad del viento y la presencia de corrientes.

### 6.3. Implicaciones en la ordenación de los usos: frecuentación y cambio climático

El aumento de visitantes en los meses primaverales, en los cuales coinciden festividades, conduce a pensar en una posible estabilización del aumento de las temperaturas debido a la crisis climática. A modo de ejemplo, en el mes de abril del año 2012, el Parque recibió 363 visitantes, y en el año 2017, recibió 2290. Pese a estar acotado el número de visitantes por uso, el patrón de uso de los meses considerados no temporada alta, puede conllevar que debido a las condiciones de “buen tiempo”, muestren un aumento general de visitantes al Parque.

En función de la estacionalidad mostrada en los resultados anteriores, coincide que los meses en los que está habiendo aumento de visitantes que no son los meses de verano, el número de horas con las alturas de ola evaluadas, son inferiores a los meses de menos frecuentación. En relación a esto, se abre la posibilidad de ampliar estudios similares considerando el número de visitantes como una variable más de análisis. En este sentido, el número de visitantes por fondeo y navegación se realizan desde servicios de administración del PNMTAC a través de estimaciones medias, por lo que el error de la incertidumbre del número total también debería ser considerado.

Considerar que el aumento de visitantes es debido a una posible estabilización al alza de las temperaturas, supone aventurarse a la incertidumbre que acompaña al cambio climático, pero aceptando esta posibilidad, es posible que el número de visitantes siga aumentando anualmente en los meses que no son considerados temporada alta, y pese a que la normativa restrinja en número de visitantes, se deben considerar posibles zonas muertas sin vigilancia donde puedan aumentar los fondeos ilegales y navegaciones sin permiso. En relación a esto, los servicios de vigilancia del Parque han mostrado un menor número de fondeos ilegales que en años anteriores: los datos oficiales de la Conselleria de Medi Ambient i Territori de les Illes Balears del año 2018, han mostrado que, del total de fondeos revisados, el 9.8% se ha producido de manera incorrecta,

un 7% menos que en el año anterior. No obstante, si el número de frecuentación aumenta, y debido a que las condiciones de oleaje han mostrado ser óptimas, se abre la posibilidad de que tal vez sea posible aumentar la vigilancia marítima para los meses donde actualmente están en aumento. Este aspecto es de vital importancia, ya que el fondeo sobre determinados ecosistemas puede degradar zonas naturales, como sucede con los fondeos sobre praderas de *Posidonia oceanica* (Roig-Munar, 2003), la cual se encuentra actualmente en regresión.

A largo plazo, si se asume la hipótesis de que con el cambio climático aumentará el nivel del mar, debido a las condiciones batimétricas del PNMTAC, determinadas actividades y usos pueden verse gravemente perjudicadas. Se plantea la posibilidad de realizar este análisis infiriendo los parámetros de estado de mar en función de las cuatro proyecciones actuales del cambio climático. Dicho análisis podría servir de preámbulo para una posible ordenación de los usos en el PNMTAC.

Las variaciones derivadas del cambio climático se pueden entender como un arma de doble filo en la gestión y uso a largo plazo, en el que muchos territorios se verán severamente perjudicados por eventos extremos y por subidas del nivel del mar, lo cual, ligado al aumento de temperaturas, puede generar a su vez mayores pérdidas económicas, tanto por pérdida de territorio como por pérdida de visitantes. Al igual que sucede con el turismo masivo de sol y playa en las costas del Mediterráneo (Megías-Baños, 2019), el posible problema futuro, debe ser acompañado de una gestión para la adaptación a las variaciones que puedan suponer un perjuicio a los diferentes elementos considerados vulnerables.

Para la gestión de las zonas litorales, es fundamental el conocimiento en la propagación de las condiciones de oleaje, definidas estas por altura de ola significativa, periodo medio y dirección media del oleaje. No obstante, cuando en la gestión se introducen factores antrópicos o bióticos de diversa índole, se deben considerar otras variaciones que definen la meteorología de la zona de estudio, como puedan ser las precipitaciones o la temperatura. Generar sinergia entre las variables oceanográficas y las variables climáticas, no solo las que definen estados de mar característicos, puede conllevar a una mejor gestión del litoral a nivel local.

Si bien las rutas de navegación en un mar como el Mediterráneo pueden no verse drásticamente afectadas a una escala media de tiempo, otro factor de vital importancia en la región de Cabrera, parte de su propia geomorfología: la altitud máxima del Parque no llega a los 200 metros, lo que ligado a lo anterior, puede ser el riesgo real que ponga en peligro el propio terreno el derivado exclusivamente de la subida del nivel del mar, siendo en este sentido, la componente de marea meteorológica la que requiere especial atención de estudios futuros, a diferencia de costas meso o macromareales, en las que la componente astronómica tiene mayor peso a la hora de analizar los posibles aumentos en vertical del nivel del mar (Bardaji *et al.*, 2009).

La necesidad de seguimiento para la protección implica mencionar el único uso extractivo permitido en el Parque, la pesca artesanal, no analizada a lo largo de este estudio. La protección de los recursos marinos vivos supone mayor dificultad en mar que en tierra, por simple logística. Sería necesario un desarrollo paralelo a este trabajo para definir cómo se gestionan los recursos marinos vivos.

## 7. Conclusiones

A continuación, se resumen las principales conclusiones del estudio:

- a) Se ha realizado una regionalización híbrida del oleaje en el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera, empleando una regionalización combinada estadística y dinámica. El downscaling estadístico se ha basado en la metodología DOW (Camus *et al.*, 2011) pero incorpora aspectos técnicos mejorados, como la utilización de los espectros en los contornos, bases de datos de hindcast y reanálisis actuales y una versión y configuración del modelo SWAN más avanzada.
- b) La caracterización climática del Parque de Cabrera empleando la técnica de regionalización híbrida, ha resultado ser apropiada para el análisis de determinados puntos geográficos en los que se realizan actividades analizadas.
- c) Con los resultados obtenidos, se ha inferido que las condiciones generales de la zona, son óptimas entre un 90% y un 99% del tiempo. Durante los meses de verano, es cuando las condiciones son más favorables, coincidente con la mayor frecuentación de turistas al Parque.

## 8. Referencias

- Acosta, J. (2006). Mapa topobatimétrico en relieve de Baleares y el Golfo de Valencia: cómo es el fondo marino y su geología en las Islas Baleares y el Golfo de Valencia. Instituto Español de Oceanografía (IEO).
- Balaguer, P., Diedrich, A. Sardá, R. Fuster, M., Cañellas, B. and Tintoré, J. (2011). Spatial analysis of recreational boating as a first key step for marine spatial planning in Mallorca (Balearic Islands, Spain). *Ocean & Coastal Management* 54: 241-249.
- Bardaji, T., Zazo, C., Cabero, A., DAbrio, C.J., Goy, J.L., Lario, J. y Silva, P. G. (2009). Impacto del cambio climático en el litoral. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra (17.2): 141-154.
- Camus, P. (2009). Metodologías para la definición del clima marítimo en aguas profundas y someras. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria.
- Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., (2011). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering* 58 (9): 851–862.
- Camus P., Mendez, F., Medina, R., Tomas A., Izaguirre C. (2013). High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. *Coastal Engineering*, 72. pp 56–68
- Dodds R, Kelman I (2008). How climate change is considered in sustainable tourism policies: a case of the Mediterranean islands of Malta and Mallorca. *Tourism Review International* 12(1):57–70.
- García, A., Ondiviela, B., Fernández, M. and Juanes, J. A. (2017). Atlas of susceptibility to pollution in marinas. Application to the Spanish coast. *Marine Pollution Bulletin* 114(1): 239-246.
- Garcias-Gomila, D. (1999). Uso recreativo en los espacios naturales de Mallorca: el Área Natural de Especial Interés (ANEI) de Es Carnatge d'Es Coll Den Rabassa. *Papeles de Geografía* 30: 47-65.
- Hastie, T., Tibshirani, R. and Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning*. 2nd edition.

- Izaguirre, C. (2010). Estudio de la variabilidad climática de valores extremos de oleaje. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria.
- López, A. (2013). Propagación del oleaje con SWAN. Grado en Ingeniería Civil.
- Megías-Baños, C. (2019). Informe Banderas Negras 2019. Ecologistas en Acción.
- Mollá Ruiz-Gómez, M. (2015). Las políticas de parques nacionales en España. *Ería: Revista Cuatrimestral de Geografía* (97): 157-171.
- Memoria anual de actuaciones en el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera (2017). Conselleria Medi Ambient, Agricultura i Pesca.
- Memoria anual de actuaciones en el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera (2018). Conselleria Medi Ambient, Agricultura i Pesca.
- Moreno, J. y Pino, J. (2004). El Parque Nacional Marítimo Terrestre del Archipiélago de Cabrera. Guía de visita.
- Pérez J., Menendez M. and Losada I. J. (2017). GOW2: A global wave hindcast for coastal applications. *Coastal Engineering* 124: 1-11.
- Recomendaciones para obras marítimas, serie I. ROM 1.0-09 (2009). Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (Parte 1ª. Bases y Factores para el proyecto. Agentes climáticos).
- Ris, R.C., Holthuijsen, L. and Booij, N. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, part ii: verification. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 104 (4): 7667–7681.
- Roig-Munar, F.X. (2003). Análisis de frecuentación del turismo náutico-recreativo del medio marino de la isla de Menorca. Consecuencias ambientales de su falta de regulación. *Cuadernos Geográficos* 33: 61-73.
- Rueda, A.C. (2016). Metodologías para el análisis de riesgo de inundación en zonas costeras. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria.
- Ruiz J.M., Ramos, A. y Tello, O. (2015). Las praderas marinas de España: una visión general. Ecología y extensión de las praderas marinas, DSDP Leg A964-2015; *en Atlas de las praderas marinas de España* (Ruiz, J.M., Guillén, J.E. et al., eds.). IEO/IEL/UICN, Murcia-Alicante-Málaga, 54-63.
- Simeone, S. and De Falco, G. (2013). *Posidonia oceanica* banquette removal: sedimentological, geomorphological and ecological implications. *Journal of Coastal Research, Special Issue* 65: 1045-1050.
- SWAN user manual- SWAN Cycle III versión 41.10 (2016). Delft University of Technology.
- UNWTO, World Tourism Organization. Tourism Highlights. 2018 Edition.
- Williams, A.T., and Micallef. A. (2009) Beach management. Principles and practice. Earthscan, London 480 pp.
- Wincler, P. (2017). Modelado de procesos costeros (2017). Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, Chile

## Referencias web

- EMODnet – The European Marine Observation and Data Network  
<https://www.emodnet-bathymetry.eu/>
- ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts  
<https://www.ecmwf.int>
- GIOC – Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas UniCan

GOIB - Conselleria de Medi Ambient i Territori : Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera

[http://www.caib.es/sites/espaisnaturalsprotegits/es/parque\\_nacional\\_maritimo-terrestre\\_del\\_archipelago\\_de\\_cabrera-21479/](http://www.caib.es/sites/espaisnaturalsprotegits/es/parque_nacional_maritimo-terrestre_del_archipelago_de_cabrera-21479/)

Institut Balear de la Natura (IBANAT)

[http://es.balearsnatura.com/parque\\_natural/parque-nacional-maritimo-terrestre-del-archipelago-de-cabrera/#quevernaturaleza](http://es.balearsnatura.com/parque_natural/parque-nacional-maritimo-terrestre-del-archipelago-de-cabrera/#quevernaturaleza)

MITECO - Ministerio para la Transición Ecológica (Red de Parques Naturales)

<https://www.miteco.gob.es/es/red-parques-nacionales/la-red/caracteristicas.aspx>

MITECO - Ministerio para la Transición Ecológica (Parques Marítimos)

[https://www.miteco.gob.es/es/red-parques-nacionales/nuestros-parques/cabrera/?fbclid=IwAR0iq0K4VxUoACcbGk92YHKhCuFY60F\\_uj3SzVfNLXvpxuuR4XAiWgLm-qE](https://www.miteco.gob.es/es/red-parques-nacionales/nuestros-parques/cabrera/?fbclid=IwAR0iq0K4VxUoACcbGk92YHKhCuFY60F_uj3SzVfNLXvpxuuR4XAiWgLm-qE)

MITECO - Ministerio para la Transición Ecológica (ZEPA)

<https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/actuaciones-proteccion-costa/illes-balears/ZEPA-ES0000518-Sur-Mallorca-Cabrera.aspx>

OCEANA

<https://eu.oceana.org/es/blog/el-escarpe-de-emile-baudot#>

## Wikipedia

Parque nacional marítimo-terrestre del Archipiélago de Cabrera:

[https://es.wikipedia.org/wiki/Parque\\_nacional\\_mar%C3%ADtimo-terrestre\\_del\\_Archipi%C3%A9lago\\_de\\_Cabrera](https://es.wikipedia.org/wiki/Parque_nacional_mar%C3%ADtimo-terrestre_del_Archipi%C3%A9lago_de_Cabrera)

Sistema de Identificación Automática:

[https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_de\\_Identificaci%C3%B3n\\_Autom%C3%A1tica](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_Identificaci%C3%B3n_Autom%C3%A1tica)

Zona Económica Exclusiva:

[https://es.wikipedia.org/wiki/Zona\\_econ%C3%B3mica\\_exclusiva](https://es.wikipedia.org/wiki/Zona_econ%C3%B3mica_exclusiva)

## Reglamentos y Normativas

Decreto 58 de 1 de julio de 2006, por el cual se aprueba el Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera, para el periodo 2006-2012.

Ley 14/1991, de 29 de abril, de creación del Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera. *BOE*, núm. 103, de 30 de abril de 1991.

Real Decreto 1043/2009, de 29 de junio, de ampliación de las funciones y servicios de la Administración del Estado traspasados a la Comunidad Autónoma de las Illes Balears, en materia de conservación de la naturaleza (Parque Nacional Marítimo-Terrestre del archipiélago de Cabrera). *BOE* núm. 157, de 30 de junio de 2009.

Real decreto 1431/1992, de 27 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Rector de los Recursos Naturales del Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera. *BOE*, núm. 42, de 18 de febrero de 1993.

Imagen de la zonificación marina establecida por el PRUG (Fig. 1).

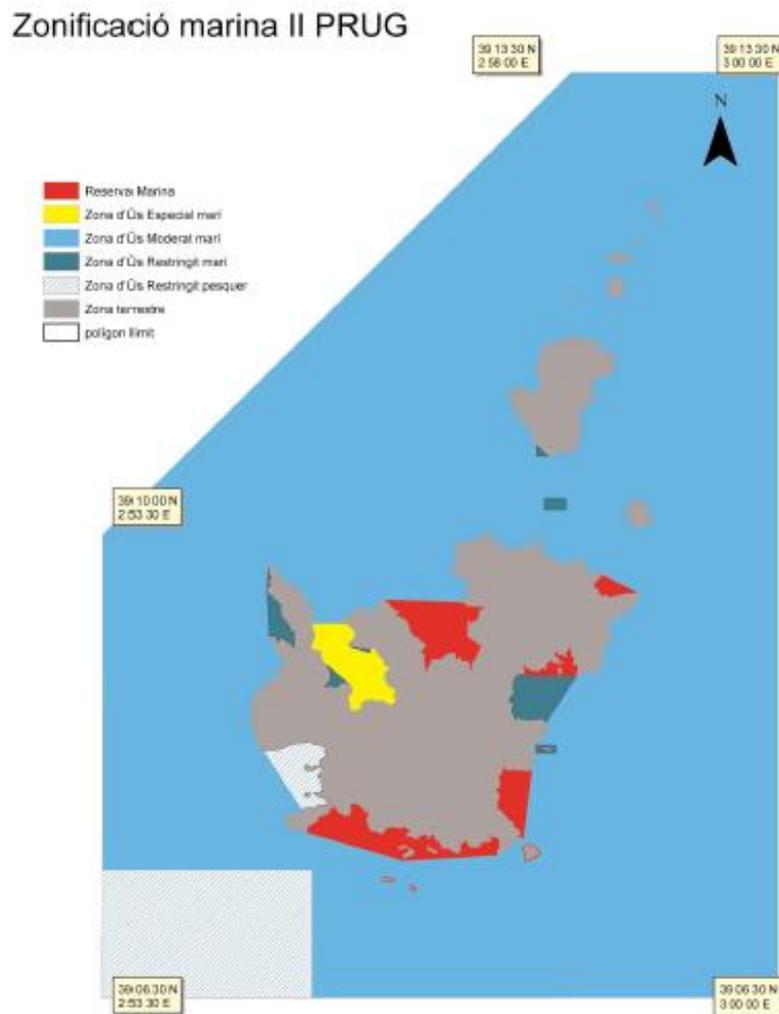


Fig. 1 – Límites de zonificación marina del PRUG

Información de la evolución mensual de visitantes por clase de autorización en 2018. Tomado de la Memoria Anual de Actuaciones 2018 (GOIB) (Tabla 1).

Tabla 1 – Evolución mensual de visitantes por clase de autorización en 2018.  
Tomado de la Memoria Anual de Actuaciones 2018

Mes	Fondeo	Buceo	Navegación	Transporte colectivo	Total
Enero	94	0	79	0	173
Febrero	168	0	250	32	450
Marzo	504	0	275	164	943
Abril	1927	47	684	1317	3975
Mayo	3992	94	1526	3177	8789
Junio	6378	181	2581	5205	14345
Julio	7479	404	3962	9176	21021
Agosto	7603	521	3282	13614	25020
Septiembre	6575	257	855	4545	12232
Octubre	4599	129	334	2230	7292
Noviembre	538	6	75	210	829
Diciembre	385	12	138	0	535
<b>Total</b>	<b>40242</b>	<b>1651</b>	<b>14041</b>	<b>39670</b>	<b>95604</b>

Evolución mensual de visitantes por transporte colectivo entre los años 2012 y 2018. Tomado de la Memoria Anual de Actuaciones 2018 (Tabla 2).

Tabla 2 – Evolución mensual de visitantes por transporte colectivo entre los años 2012 y 2018.  
Tomado de la Memoria Anual de Actuaciones 2018

Mes	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Enero	0	0	0	0	0	0	0
Febrero	24	0	43	72	9	6	32
Marzo	169	119	330	894	449	194	164
Abril	363	839	1648	1907	1106	2290	1317
Mayo	869	1763	2559	2997	3362	3543	3177
Junio	3528	3857	5237	4941	5244	5778	5205
Julio	4858	6073	6239	8969	9232	9469	9176
Agosto	8006	8664	10630	12178	13000	14556	13614
Septiembre	2550	4172	4776	4182	5588	4871	4545
Octubre	905	785	2866	2220	2736	2.697	2230
Noviembre	0	0	176	29	57	24	210
Diciembre	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>21272</b>	<b>26272</b>	<b>34504</b>	<b>38389</b>	<b>40783</b>	<b>43428</b>	<b>39670</b>

Mallas empleadas en el desarrollo del trabajo y sus coordenadas correspondientes (Figs. 2 a 5)

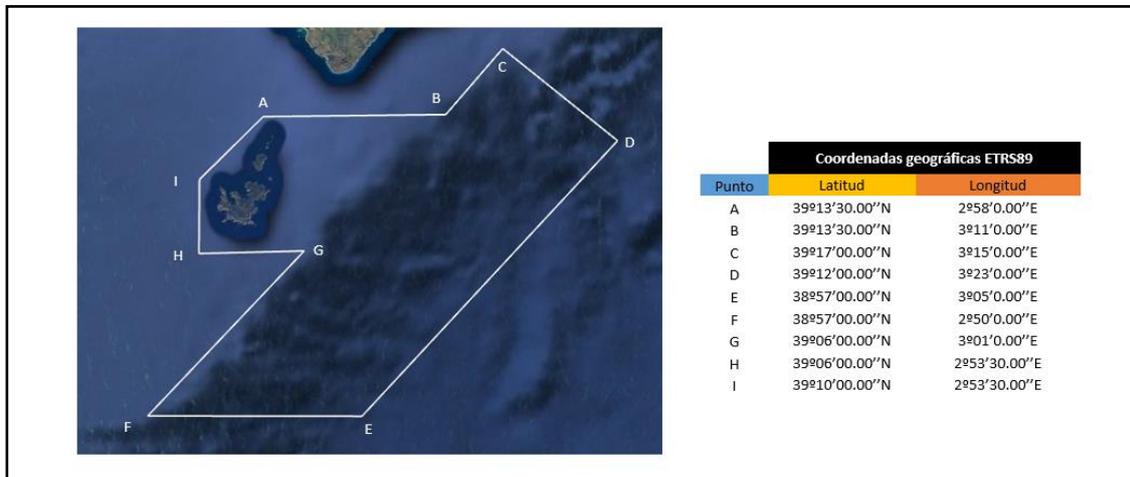


Fig. 2 – Límites y coordenadas del PNMTAC

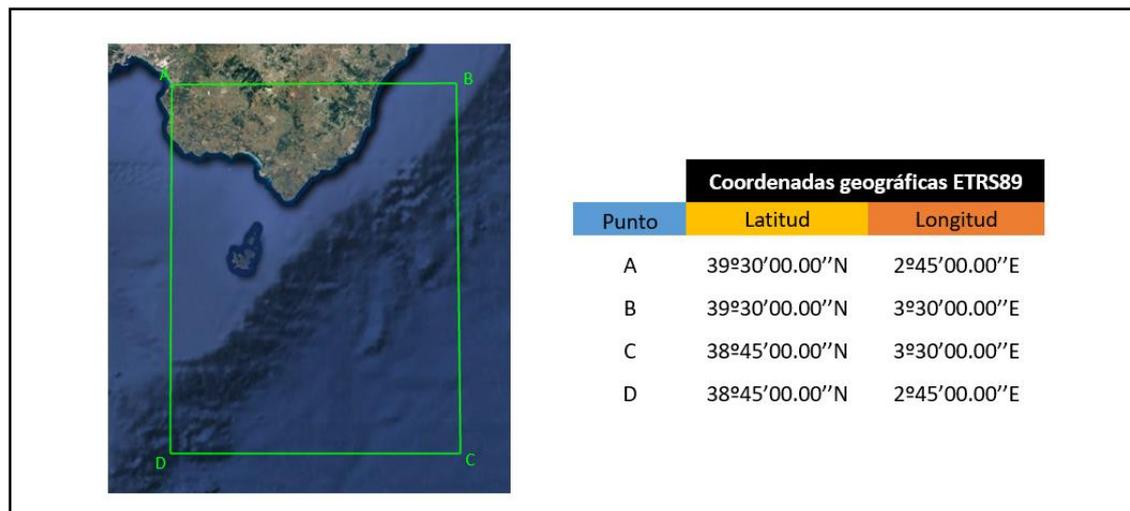


Fig. 3 – Límites y coordenadas de la malla general

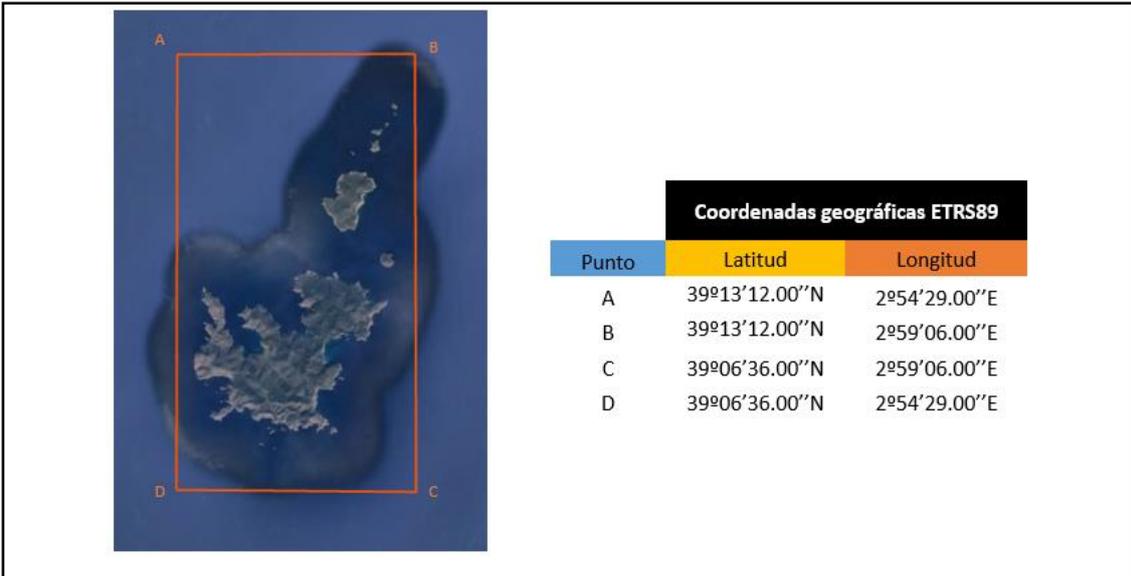


Fig. 4 – Límites y coordenadas de la malla de detalle de Cabrera

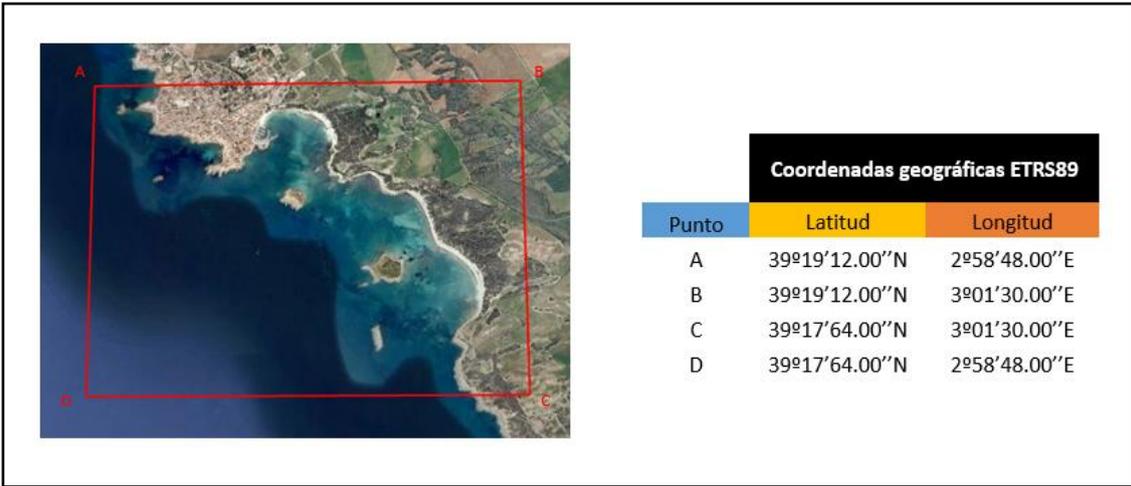


Fig. 5 – Límites y coordenadas de la malla de detalle del puerto de la Colònia de Sant Jordi

**Comandos empleados en SWAN y desarrollo metodológico**

Se ha considerado explicar a través de los comandos empleados para el modelo SWAN, la metodología y las condiciones para la ejecución del mismo (Fig. 6) (USER MANUAL SWAN Cycle III version 41.10). Se ha generado una tabla detallada de cada tipología de clasificaciones de los diferentes comandos (Tablas 3 a 13).

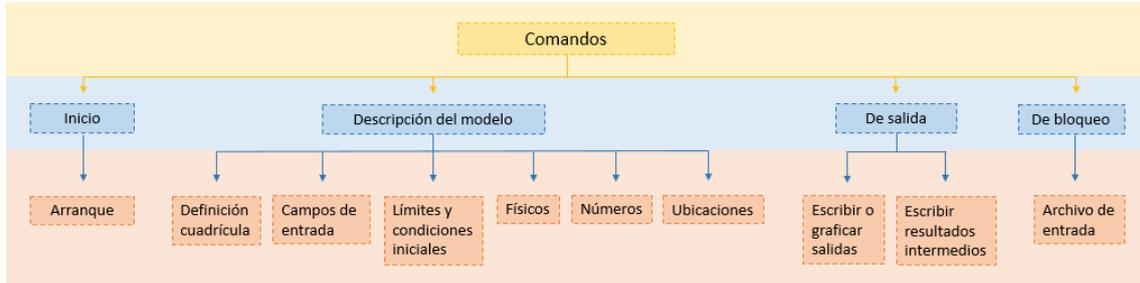


Fig. 6 – Mapa conceptual en el que se resumen los comandos empleados para la ejecución de SWAN

**a) Comandos de inicio**

Tabla 3 – Comandos de inicio del modelo SWAN

Comandos de arranque		
Comando	Descripción	Uso / valor
PROJ 'name' 'nr'	título del proyecto nombre proyecto identificador	'name' = 'EOLIENNES' 'nr' = 'G01' *
SET [level] NAUTICAL	valores de ciertos parámetros generales nivel del mar uso de la convención náutica para la dirección del viento y olas, en lugar de cartesiana	[level]=0.163 NAUTICAL
MODE STAT	estacionario / no estacionario modo 1D / 2D modo estacionario	STAT
COORD SPHERICAL CCM	coordenadas cartesianas o esféricas las coordenadas y tamaños de las cuadrículas se dan en grados método de proyección para coordenadas esféricas	SPHERICAL CCM

\* El identificador [nr] para cada malla ha sido: G01 malla general, M01 malla de detalle 1 y M02 malla de detalle 2.

b) Comandos de descripción del modelo

Tabla 4 – Comandos de definición de cuadrícula

Comandos definición cuadrícula		
Comando	Descripción	Uso / valor
<b>CGRID</b>	dimensiones de la cuadrícula computacional	*
<b>EXCEPT</b>	no considera ciertos puntos de la cuadrícula (ej. puntos de tierra)	READGRID COOR 1 EXCEPT 0.0 0.0
<b>CIR</b>	direcciones espectrales cubren círculo completo	CIR
<b>[mdc]</b>	número de subdivisiones de 360° ( $\theta = 360^\circ/\text{mdc}$ es la resolución del espectro direccional)	48
<b>[flow]</b>	frecuencia discreta más baja que se utiliza (en Hz)	0.0373
<b>[fhigh]</b>	frecuencia discreta más alta que se utiliza (en Hz)	0.7159 **
<b>[msc]</b>	número de frecuencia (resolución en el espacio)	31 ** Resolution in sigma-space: df/f = 0.1000
<b>READ(GRID)</b>	lee una cuadrícula curvilínea o no estructurada	
<b>COOR</b>	lectura coordenadas puntos cuadrícula	'G01scoord' 4 0 1 ***
<b>FREE</b>	los archivos se leen con formato libre	FREE

\* Valores para las tres mallas empleadas: malla general (G01) = 150 150, malla detalle 1 (M01) = 154 220 y malla detalle 2 (M02) = 90 60.

\*\* Tras la ejecución de los 200 casos con SWAN, 16 casos de ellos con valores muy bajos de  $H_s$  y  $T_m$ , por lo que se debió aumentar la frecuencia [fhigh] y la discretización frecuencial [msc]. De los 16 casos, 11 se corrigieron con valor de frecuencia igual a 1 y valor de discretización igual a 40, y los 5 restantes, con valores de 1.5 y 50 respectivamente.

\*\*\* Lectura puntos cuadrícula: malla general 'G01scoord', malla detalle 1 'M01scoord' y malla detalle 2 'M02scoord'.

Tabla 5 – Comandos para los campos de entrada

Comandos para campos de entrada		
Comando	Descripción	Uso / valor
<b>INPGRID</b>	dimensiones de las rejillas	0. 0. 150 150 *
<b>BOTTOM</b>	define la cuadrícula de entrada del nivel inferior	BOTTOM
<b>CURV</b>	cuadrícula de entrada curvilínea	CURV
<b>READINP</b>	lee campos de entrada	1.0 'dep_G01.dat' 4 0 **
<b>BOTTOM</b>	los niveles inferiores se leen del archivo	
<b>FREE</b>	los archivos se leen con formato libre (estándar del lenguaje de programación)	FREE

\* Valores malla general, 0. 0. 150 150; valores malla detalle 1, 0. 0. 154 220 y valores malla detalle 2, 0. 0. 90 60.

\*\* Lectura campos de entrada: malla general, 'dep\_G01.dat'; malla detalle 1, dep\_M01.dat'y malla detalle 'dep\_M02.dat'.

Tabla 6 – Comandos de límites y condiciones de contorno

Comandos de límites y condiciones iniciales		
Comando	Descripción	Uso / valor
<b>BOUNDSPEC</b>	define espectros paramétricos en el límite de la cuadrícula geográfica	BOUNDSPEC *
<b>SEGMENT</b>	indica si el segmento límite va alrededor de la esquina o es parte de un lado de la cuadrícula	SEGMENT
<b>XY</b>	puntos que definen el segmento	XY 2.75 39.5 3.5 39.5 **
<b>VARIABLE</b>	indica que los espectros de onda pueden variar a lo largo del segmento	VARIABLE
<b>FILE</b>	los datos de onda entrantes se leen desde un archivo	FILE
<b>[len]</b>	distancia desde el primer punto del segmento a lo largo de este para el que se introduce el espectro de onda incidente	**
<b>[fname]</b>	nombre del archivo *** con la condición de contorno	**
<b>[seq]</b>	número de secuencia de ubicación geográfica en el archivo	**
<b>BOUND</b>	ejecución anidada con las condiciones de contorno obtenidas con la cuadrícula general	BOUND
<b>NEST</b>	las condiciones de contorno de los cuatro lados de la cuadrícula se recuperan de un archivo creado con anterioridad	NEST
<b>OPEN</b>	el límite representado en el archivo no es un rectángulo cerrado	OPEN

\* BOUNDSPECT para la malla general. Para las mallas de detalle se ha empleado BOUND NEST.

\*\* Valores empleados

Tabla 7 – Valores de posición de los espectros

	XY	[len]	[seq]	fname
<b>1</b>	2.75 39.5 3.5 39.5	len=0.75	seq=8	'Bound_sp_1'
<b>2</b>	3.5 38.75 3.5 39.5	len=0.25 len=0.5 len=0.75	seq=6 seq=7 seq=8	'Bound_sp_2'
<b>3</b>	2.75 38.75 3.5 38.75	len=0 len=0.25 len=0.75	seq=1 seq=4 seq=5	'Bound_sp_3'
<b>4</b>	2.75 38.75 2.75 39.5	len=0 len=0.25 len=0.75	seq=1 seq=2 seq=3	'Bound_sp_4'

\*\*\* Los cuatro archivos con las condiciones de contorno contienen la siguiente información:

**LONLAT:** descripción ubicaciones coordenadas esféricas. Se indica en número de ubicaciones (8) y el valor de la coordenada para cada ubicación.

**AFREQ:** datos de frecuencia absoluta. Se indica el número de frecuencias (32) y los valores de estas en Hz.

**NDIR:** datos de dirección náutica de los espectros. Se indica el número de direcciones (24) y las direcciones en grados.  
**QUANT:** describe las cantidades en las tablas del archivo, siendo el valor de 1 para los espectros 2D (VaDens - m<sup>2</sup>/Hz/deg, referido a varianza de densidades de energía, siendo el valor de -99.00).  
**FACTOR:** fecha y tiempo para cada localización

Tabla 8 – Comandos físicos

Comandos físicos		
Comando	Descripción	Uso / valor
GEN3	se ejecuta en modo de tercera generación	SÍ
WCAP	controla whitecapping	SÍ
QUAD	controla el cálculo de los cuádruplets	SÍ
BREAKING	activa la disipación al romper la onda inducida por la profundidad	BREAKING
CON [alpha]	uso de un índice interruptor constante coeficiente de proporcionalidad del ratio de disipación. Valor predeterminado.	CONstant 1.00
[gamma]	Índice del interruptor. Valor predeterminado.	0.73
FRICION JON	activa la disipación por fricción inferior coeficiente de fricción constante para disipación de fricción inferior	0.038 para fondos arenosos
BREA	activa la disipación por ruptura de onda inducida por la profundidad	SÍ

Tabla 9 – Comandos numéricos

Comandos para números		
Comando	Descripción	Uso / valor
PROP	para elegir el esquema de propagación numérico	
BSBT	esquema BSBT usado en los cálculos	BSBT

### c) Comandos de salida

Tabla 10 – Comandos para ubicaciones de salida

Comandos para ubicaciones de salida		
Comando	Descripción	Uso / valor
POINTS *	define un conjunto de puntos de salida individuales	'NGRID002' y 'NGRID003'
FILE	lee coordenadas de archivo	'M01scont' y 'M02scont'

\* POINTS solamente usado para la malla general (G01)

Tabla 11 – Comandos de escritura y graficado de salidas

Comandos para escribir o graficar salidas		
Comando	Descripción	Uso / valor
<b>BLOCK</b> <b>NOHEAD</b> <b>LAY</b> <b>[idla]</b>	<p>escribe distribuciones espaciales</p> <p>la salida debe escribirse en un archivo sin líneas de encabezado</p> <p>prescribir el diseño de la salida para archivar con el valor de [idla]</p>	<p>Ejemplo: 'G01_19790301T1400.mat'</p> <p>3 para archivo binario</p>
<b>SPECOUT</b> <b>SPEC2D</b> <b>ABS</b>	<p>solicita una salida espectral</p> <p>escritura archivo espectros 2D (frecuencia-dirección)</p> <p>los espectros se calculan en función de la frecuencia absoluta (medida en un punto fijo)</p>	<p>'NGRID002' y 'NGRID003'</p> <p>Ejemplo: 'M01_19790301T1400_nest'</p>

Tabla 12 – Comandos de escritura de resultados intermedios

Comandos para escribir resultados intermedios		
Comando	Descripción	Uso / valor
<b>TEST</b>	solicita una salida de resultados intermedios para fines de prueba	0,0

#### d) Comandos de bloqueo

Tabla 13 – Comandos de bloqueo del archivo de entrada

Comandos para bloquear el archivo de entrada		
Comando	Descripción	Uso / valor
<b>COMPUTE</b>	comienza un cálculo	SÍ
<b>STOP</b>	final de la entrada del usuario	SÍ

Resultados del oleaje en los 35 puntos de estudio, donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW 2.0 y serie reconstruida  $H_s$  vs  $T_m$  y  $H_s$  vs  $Dir$ , y en la fila de abajo: gráficos  $H_s$ ,  $T_m$  y  $Dir$  comparando dato GOW 2.0 frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de  $H_s$  donde la línea roja es la media y cruces los *outliers* (Figs. 7 a 41).

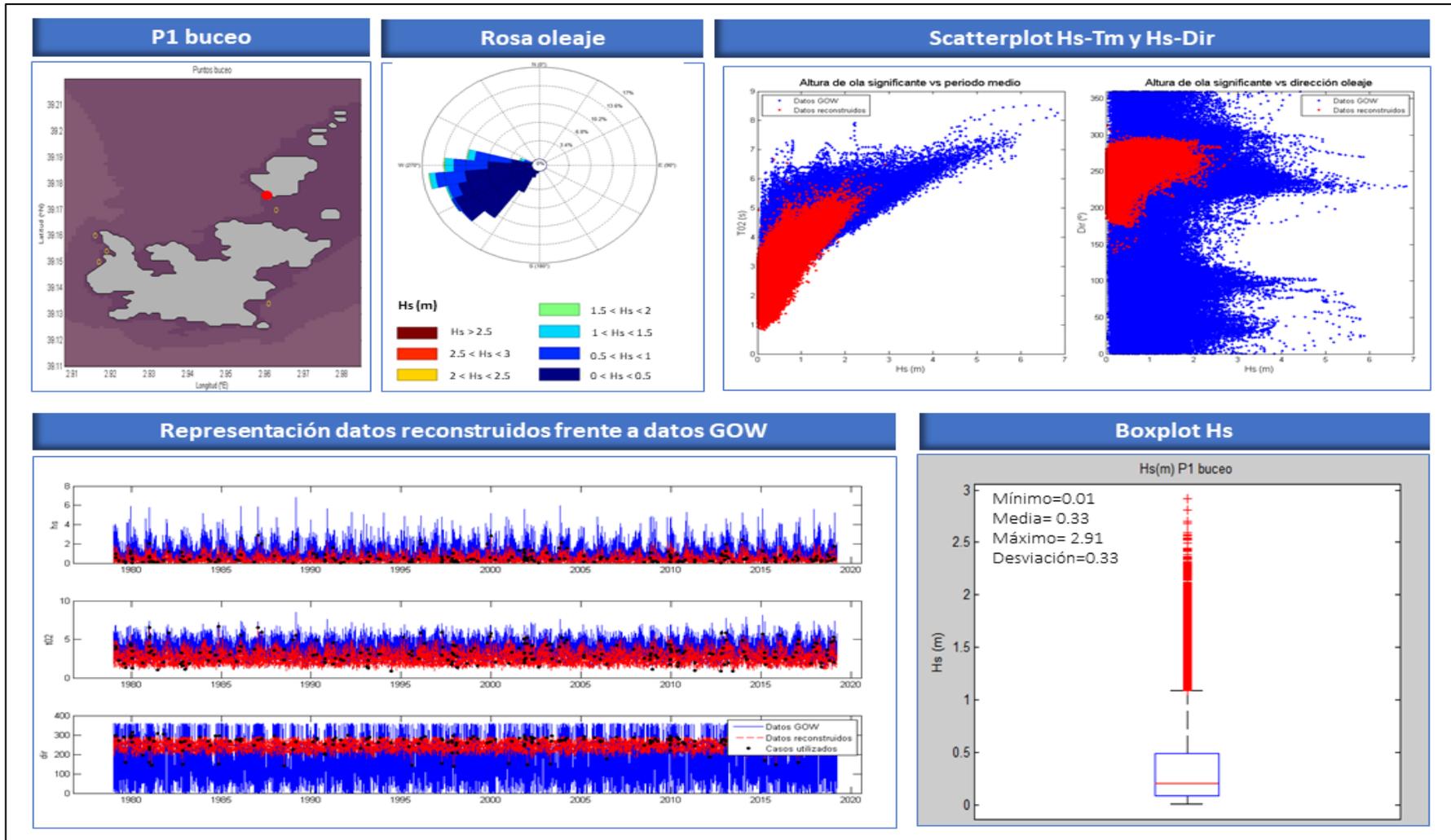


Fig. 7 – Reconstrucción oleaje P1 buceo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los *outliers*

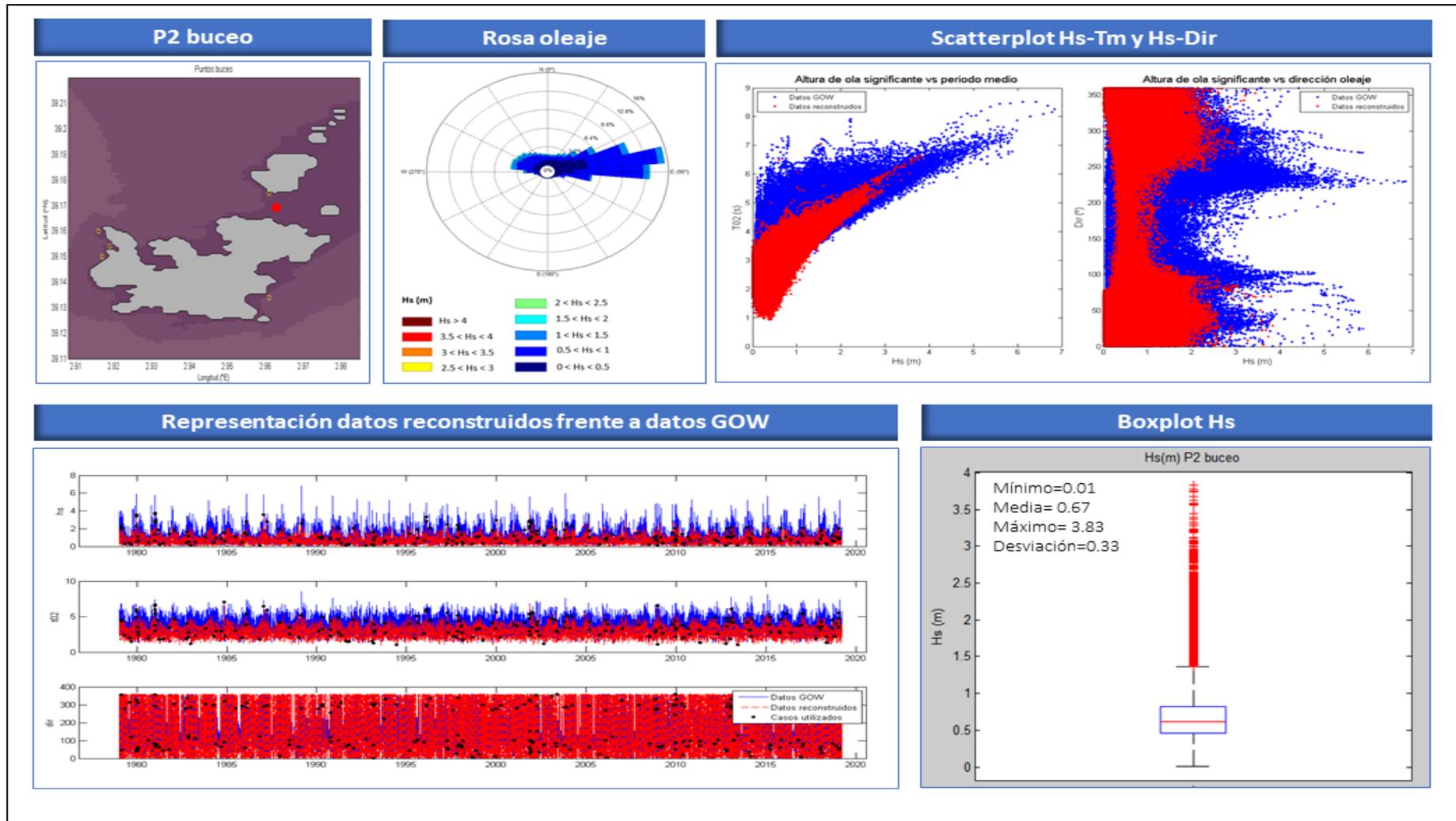


Fig. 8 – Reconstrucción oleaje P2 buceo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

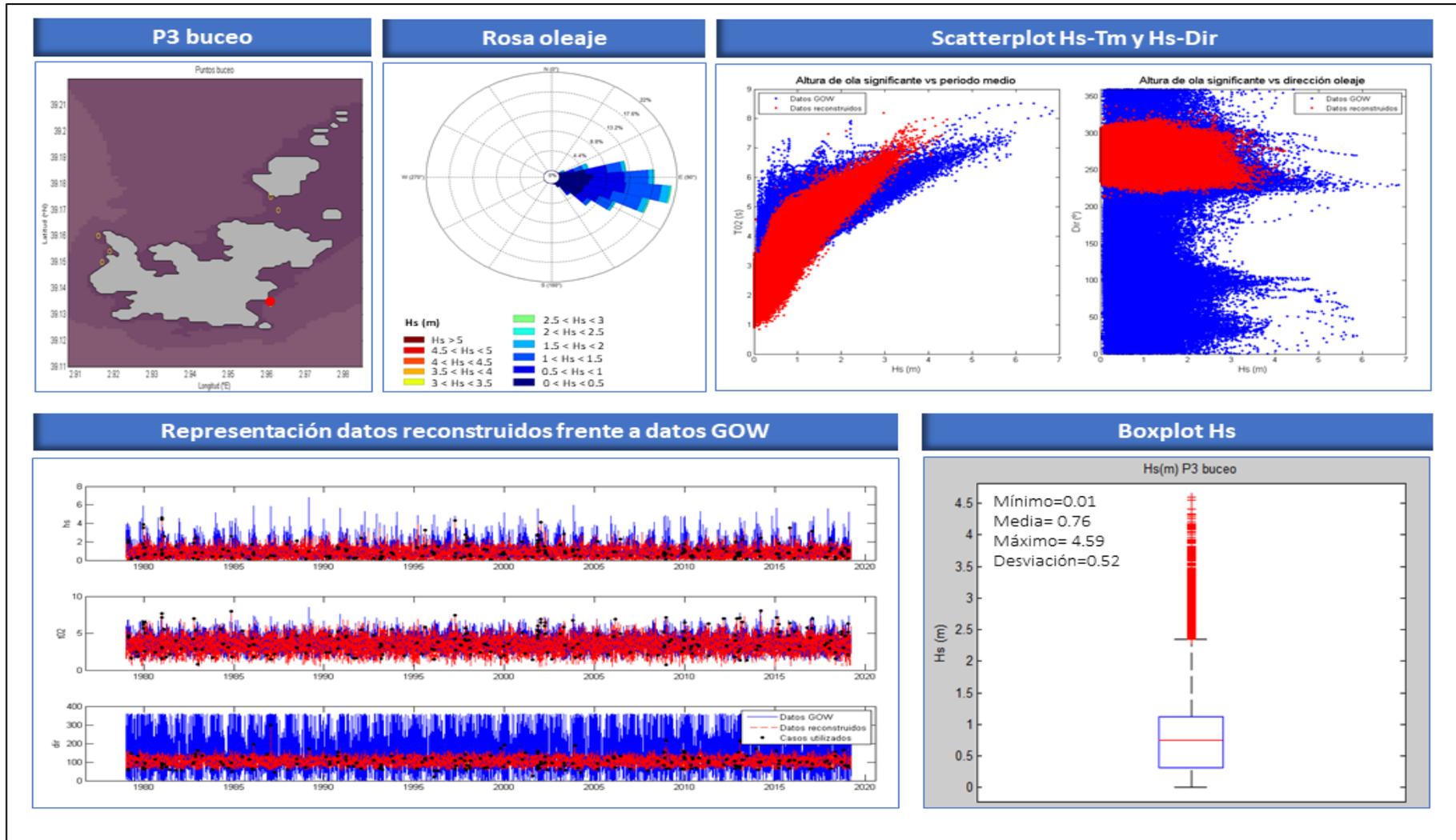


Fig. 9 – Reconstrucción oleaje P3 buceo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida  $H_s$  vs  $T_m$  y  $H_s$  vs  $Dir$ , y en la fila de abajo: gráficos  $H_s$ ,  $T_m$  y  $Dir$  comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de  $H_s$  donde la línea roja es la media y cruces los outliers

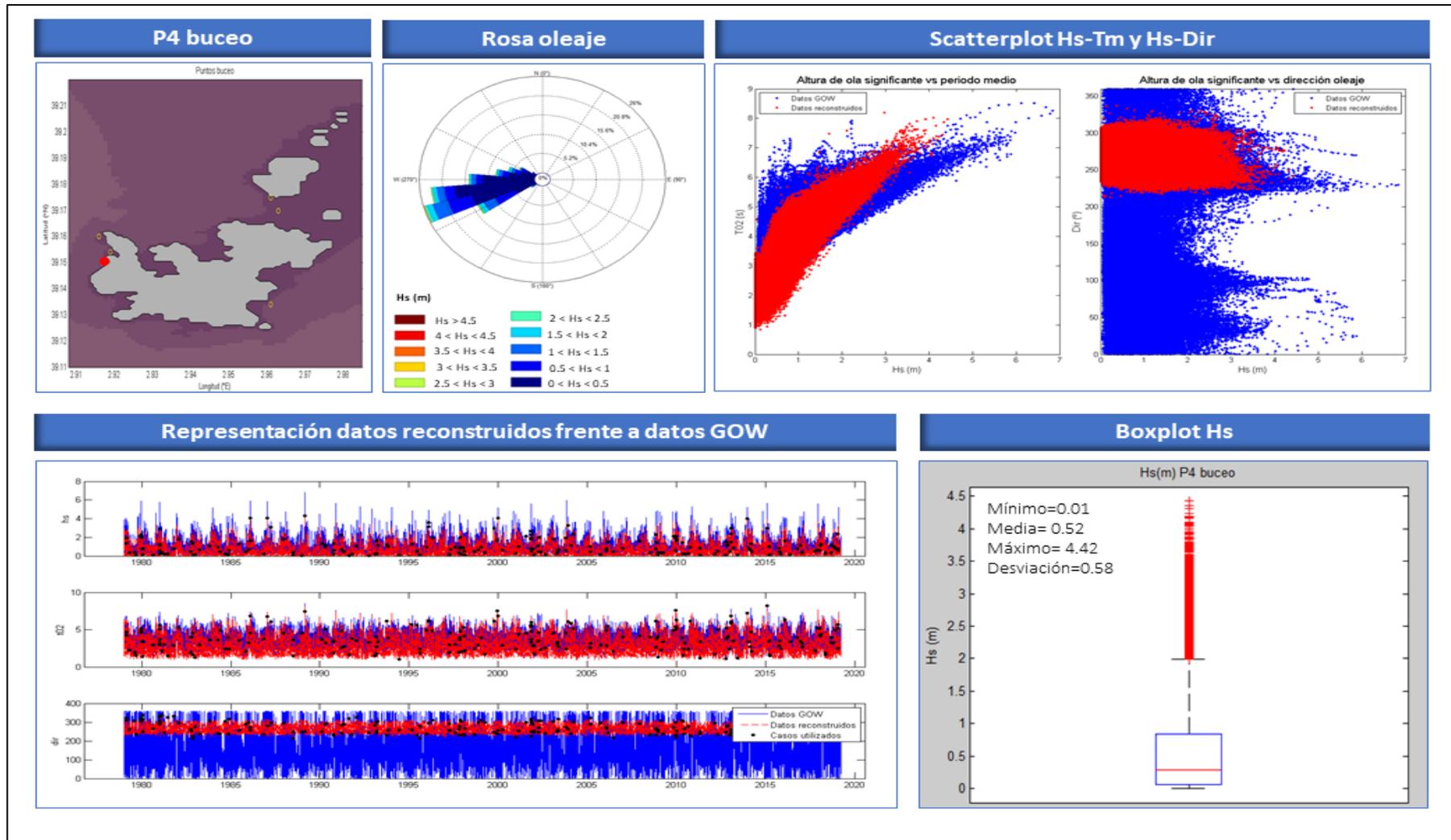


Fig. 10 – Reconstrucción oleaje P4 buceo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

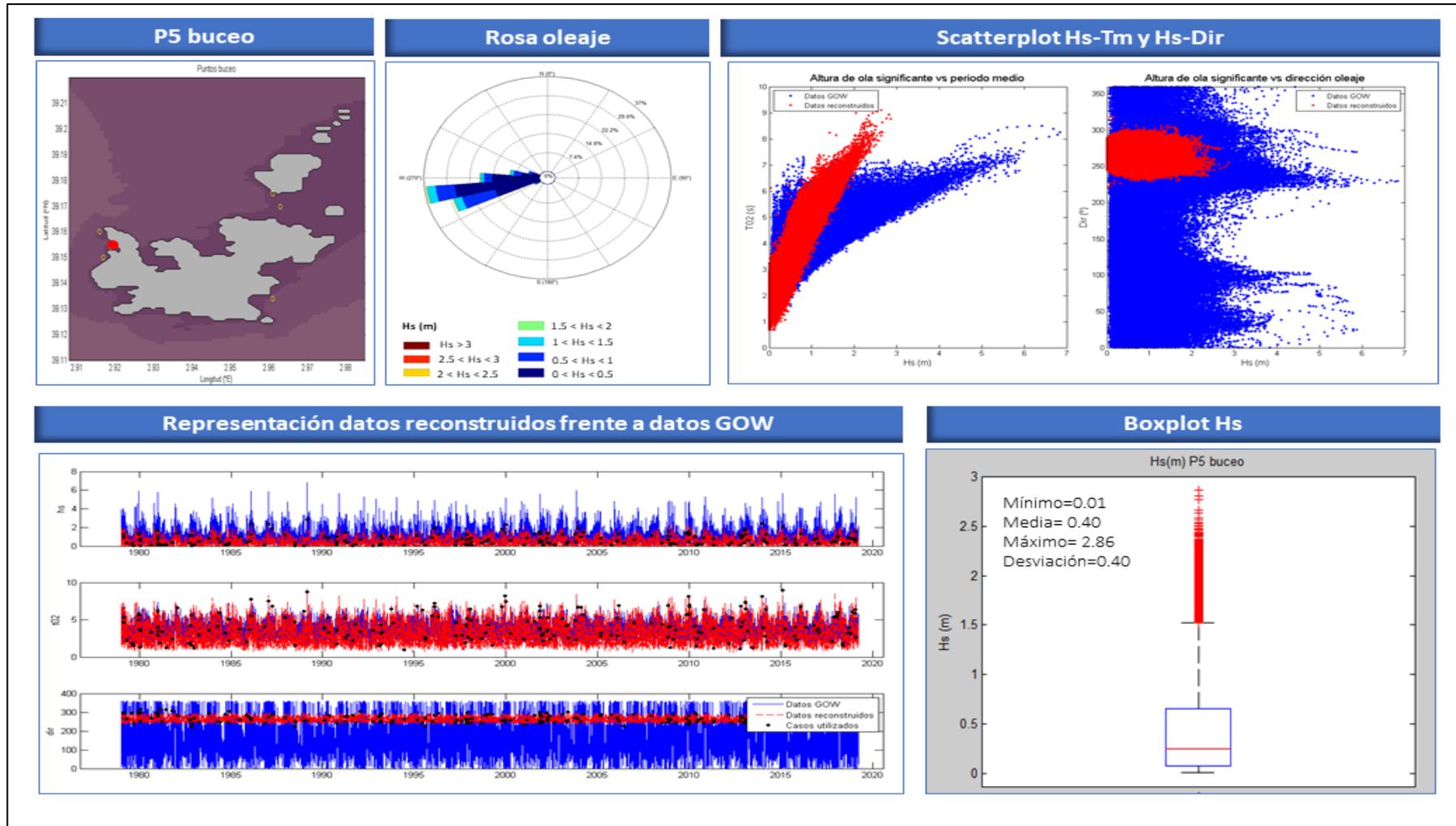


Fig. 11 – Reconstrucción oleaje P5 buceo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

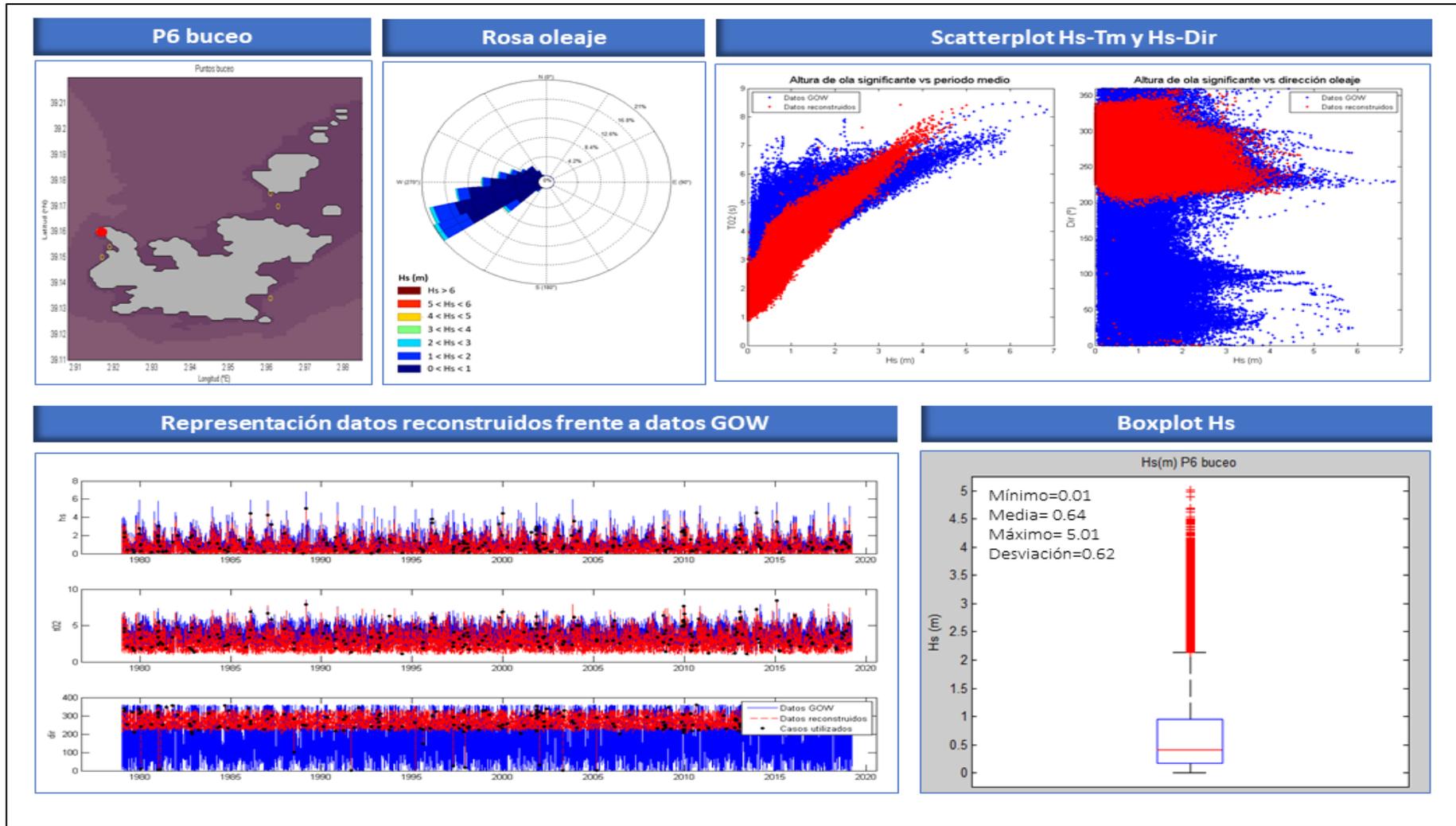


Fig. 12 – Reconstrucción oleaje P6 buceo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida  $H_s$  vs  $T_m$  y  $H_s$  vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos  $H_s$ ,  $T_m$  y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de  $H_s$  donde la línea roja es la media y cruces los outliers

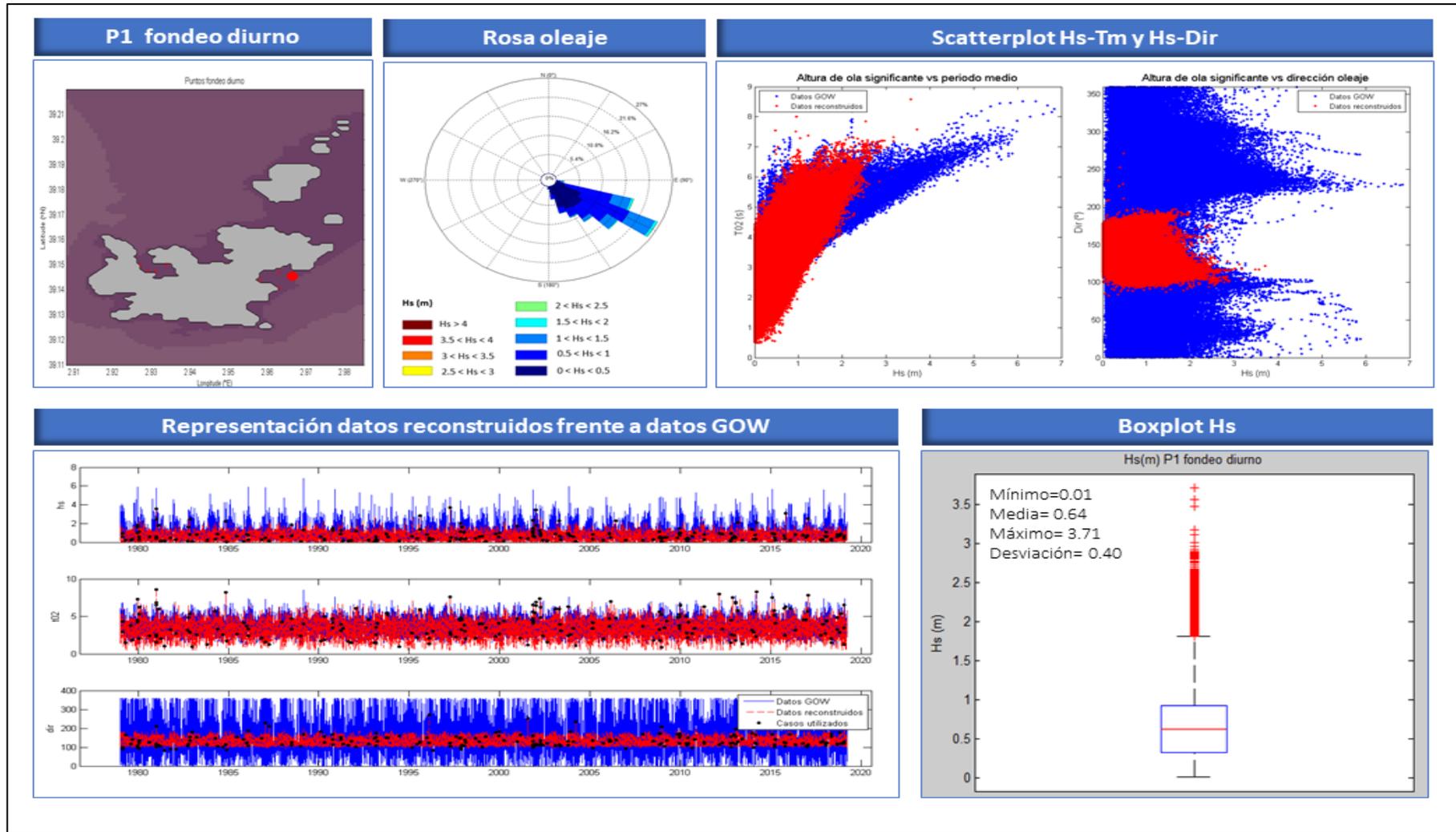


Fig. 13 – Reconstrucción oleaje P1 fondeo diurno donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

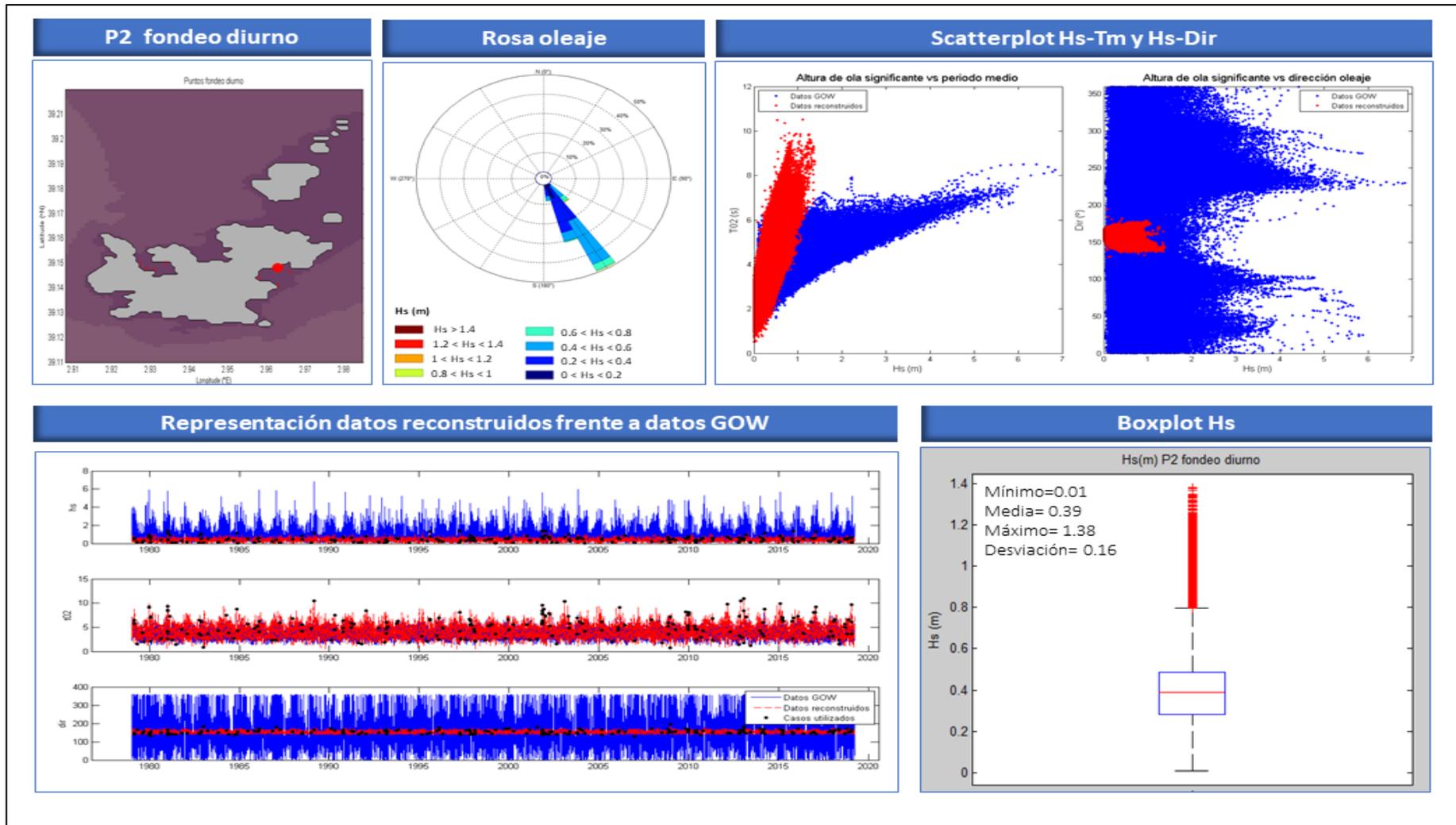


Fig. 14 – Reconstrucción oleaje P2 fondeo diurno donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

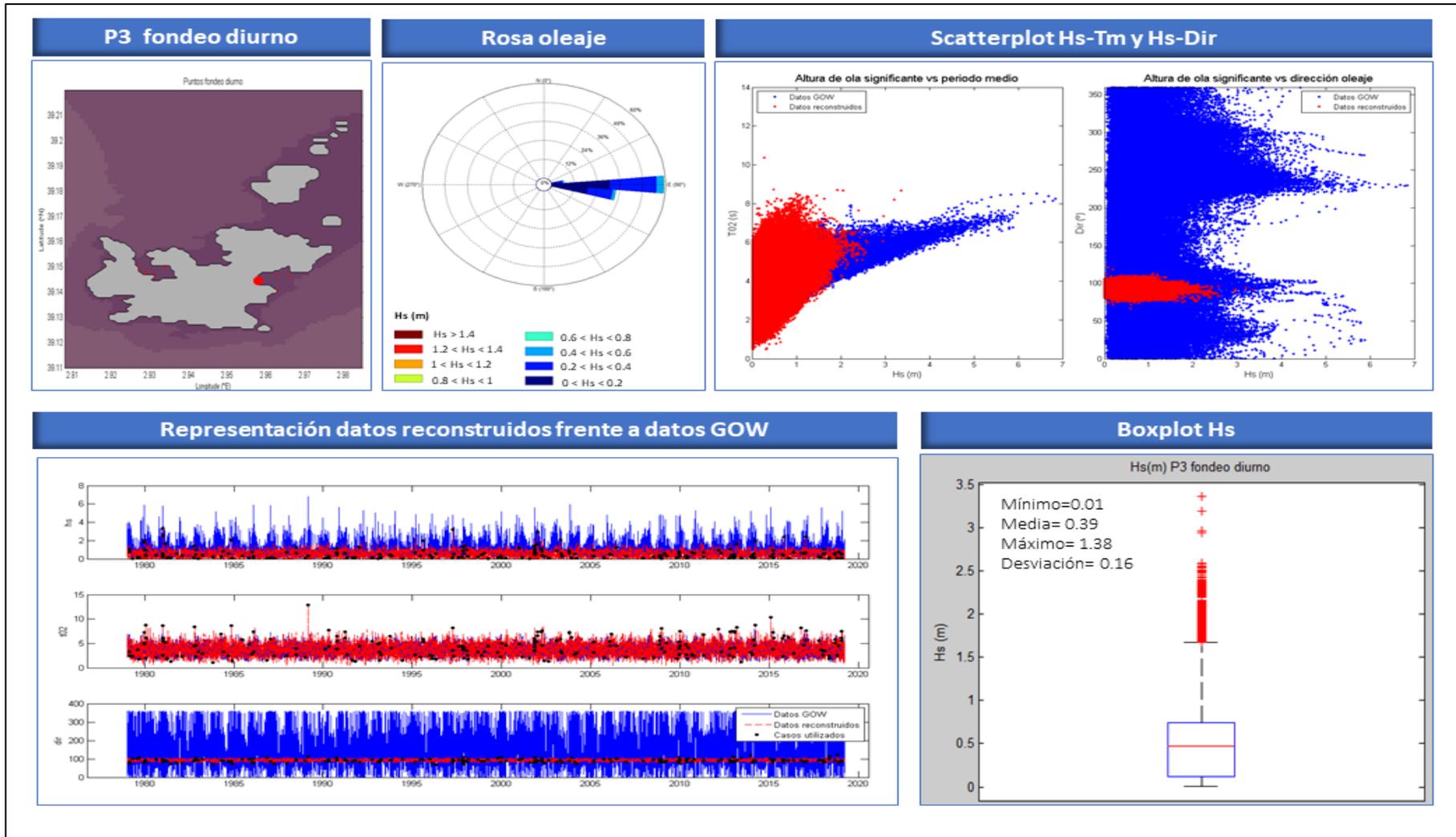


Fig. 15 – Reconstrucción oleaje P3 fondeo diurno donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

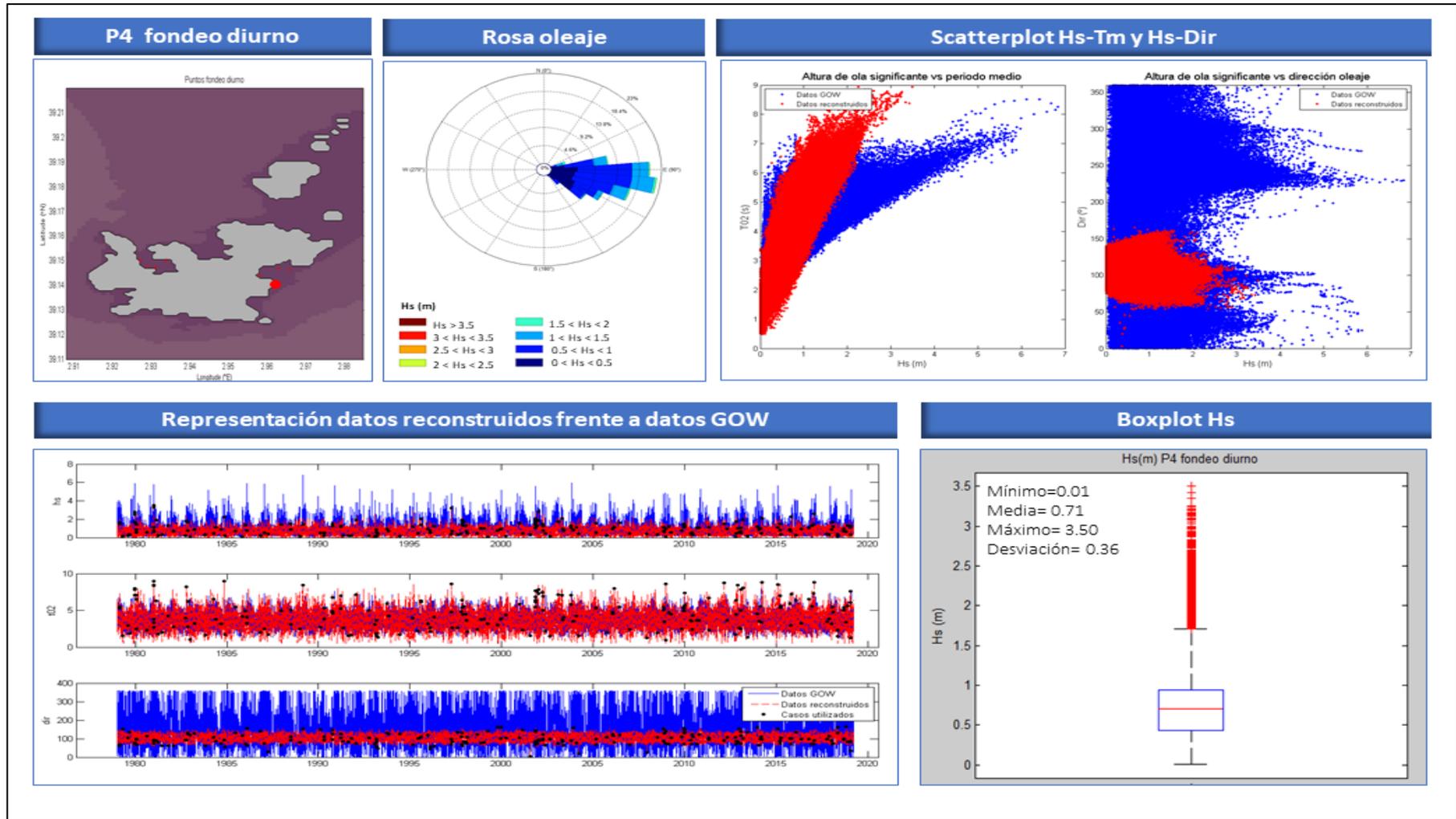


Fig. 16 – Reconstrucción oleaje P4 fondeo diurno donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los *outliers*

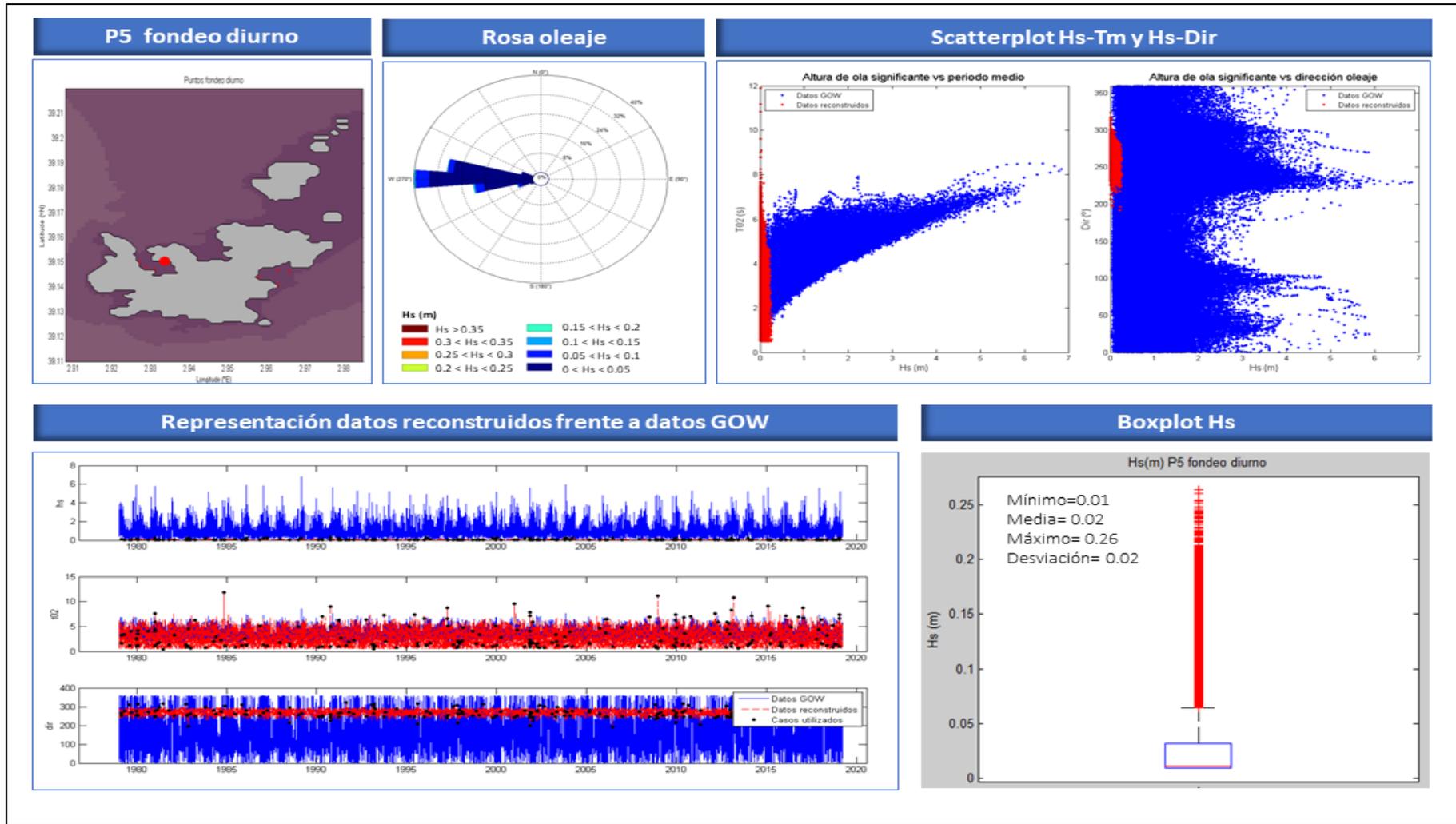


Fig. 17 – Reconstrucción oleaje P5 fondeo diario donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

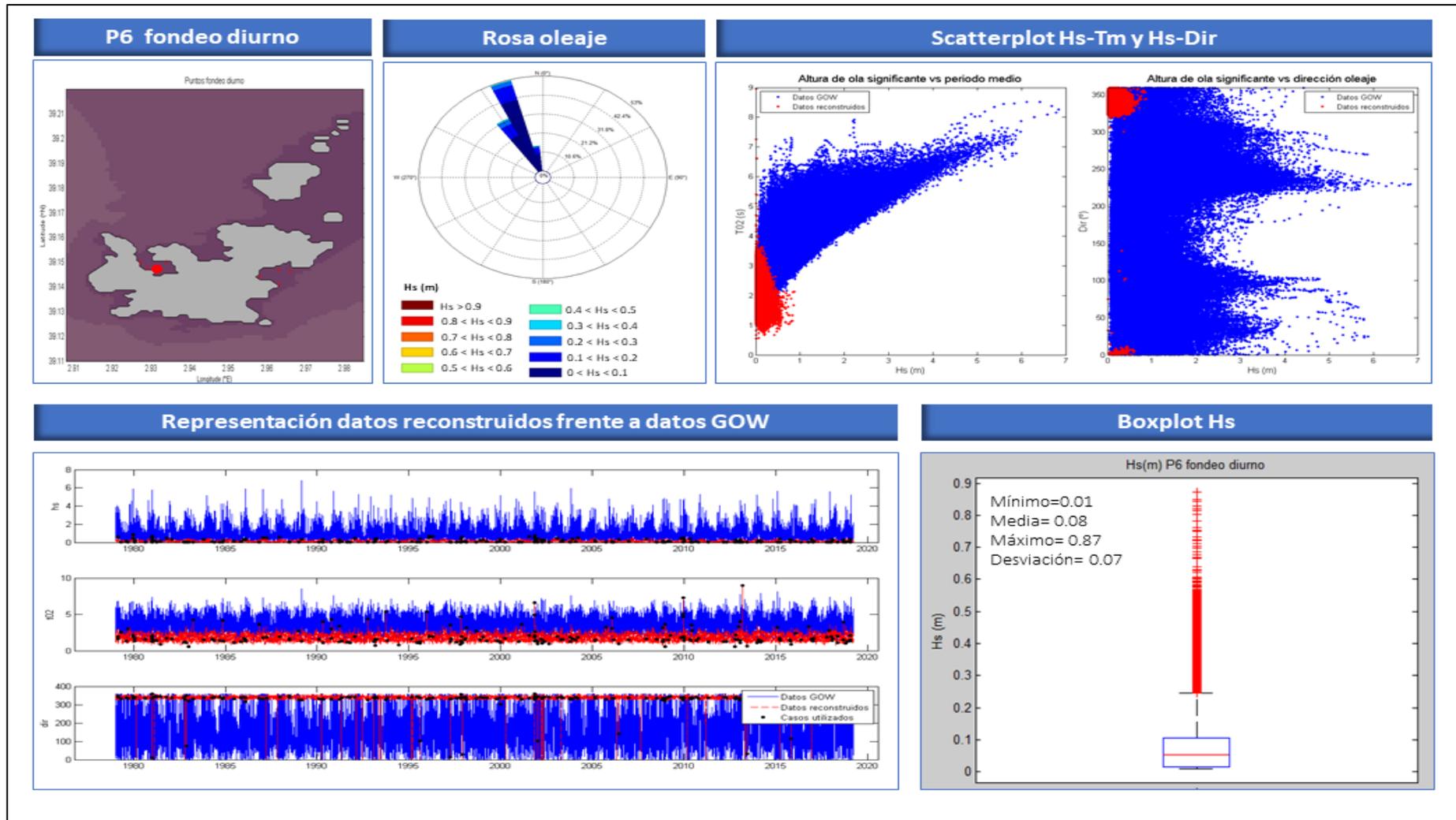


Fig. 18 – Reconstrucción oleaje P6 fondeo diurno donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

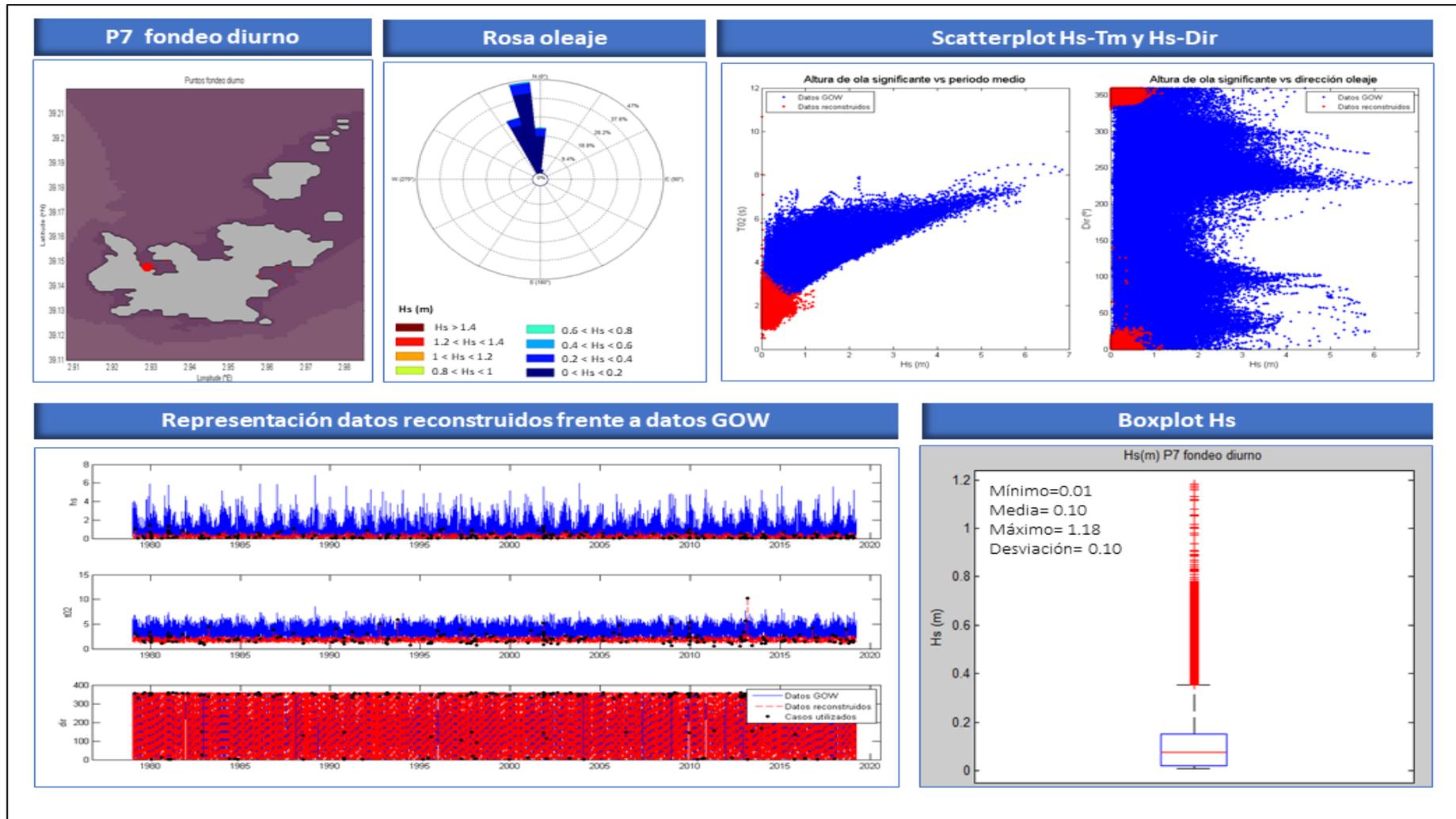


Fig. 19 – Reconstrucción oleaje P7 fondeo diurno donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

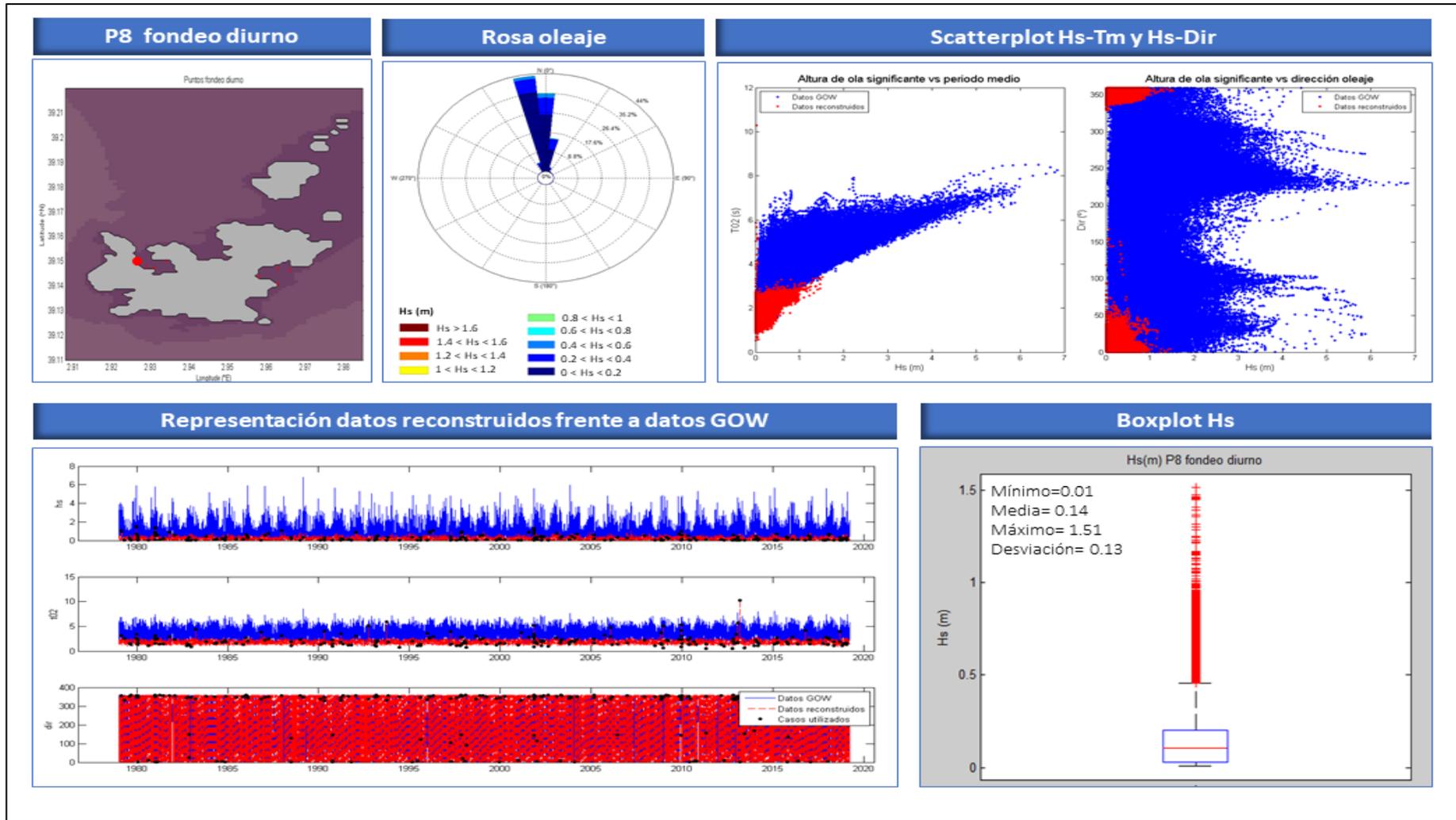


Fig. 20 – Reconstrucción oleaje P8 fondeo diurno donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

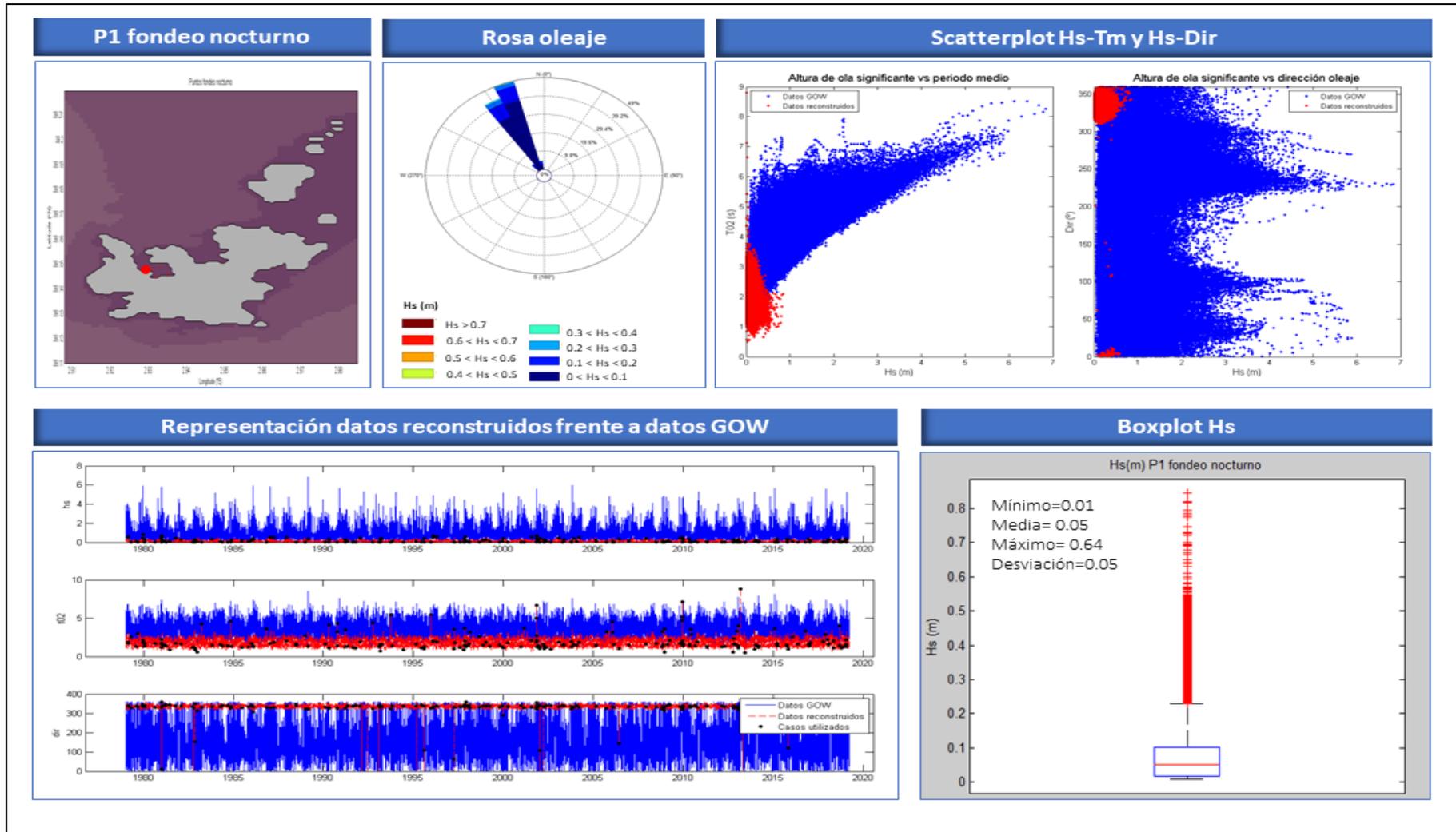


Fig. 21 – Reconstrucción oleaje P1 fondeo nocturno donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

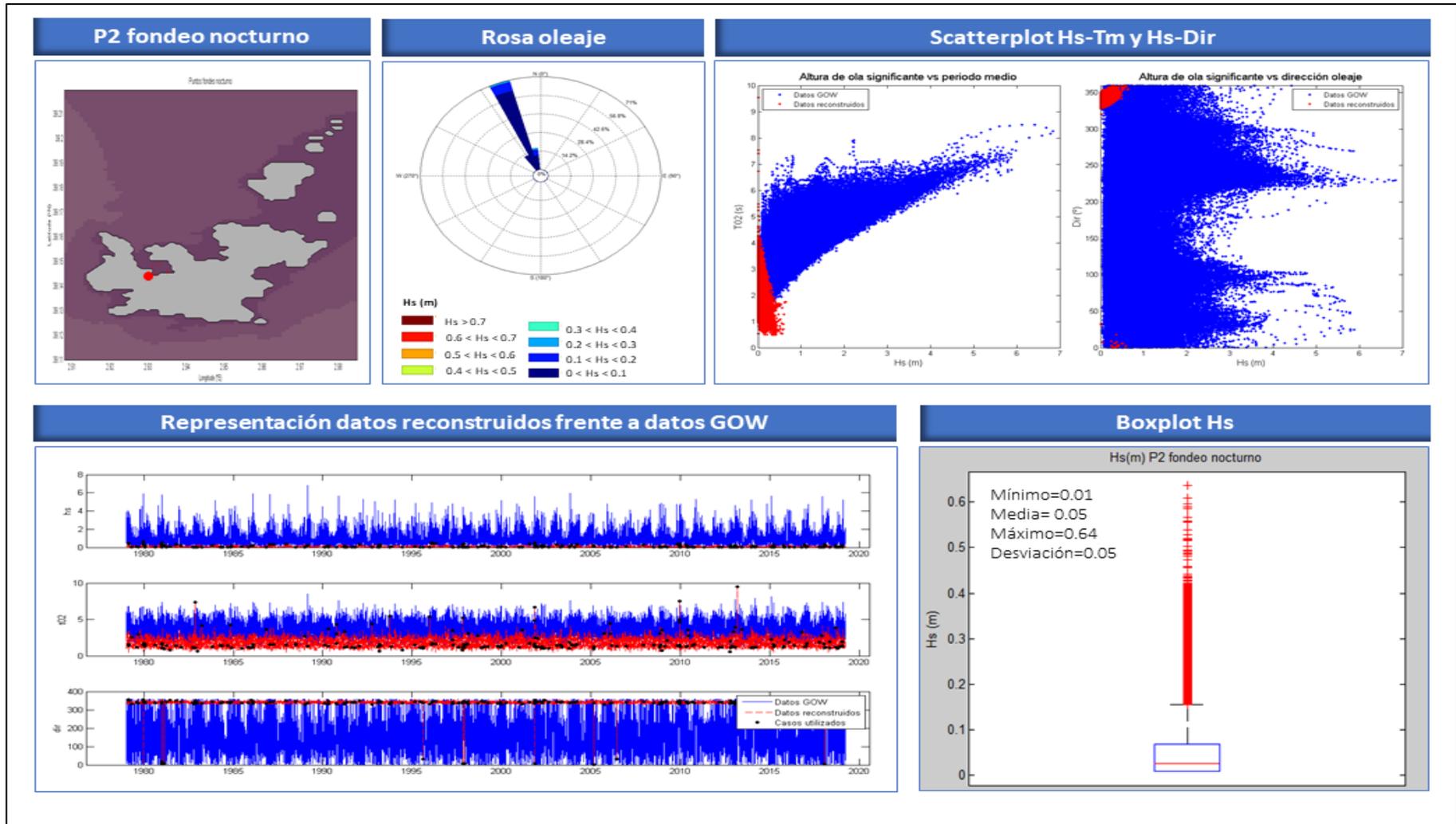


Fig. 22 – Reconstrucción oleaje P2 fondeo nocturno donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

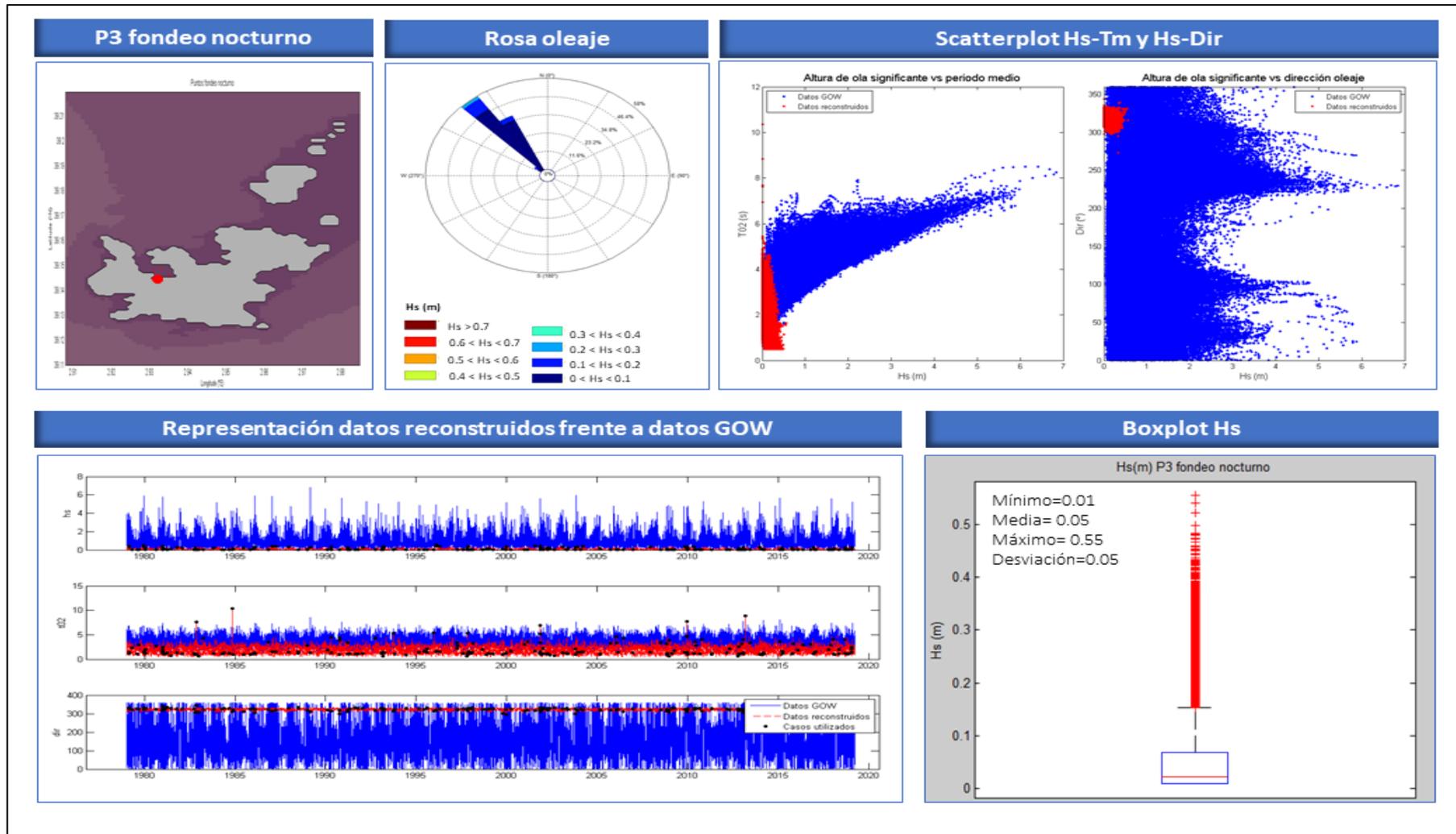


Fig. 23 – Reconstrucción oleaje P3 fondeo nocturno donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida  $H_s$  vs  $T_m$  y  $H_s$  vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos  $H_s$ ,  $T_m$  y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de  $H_s$  donde la línea roja es la media y cruces los outliers

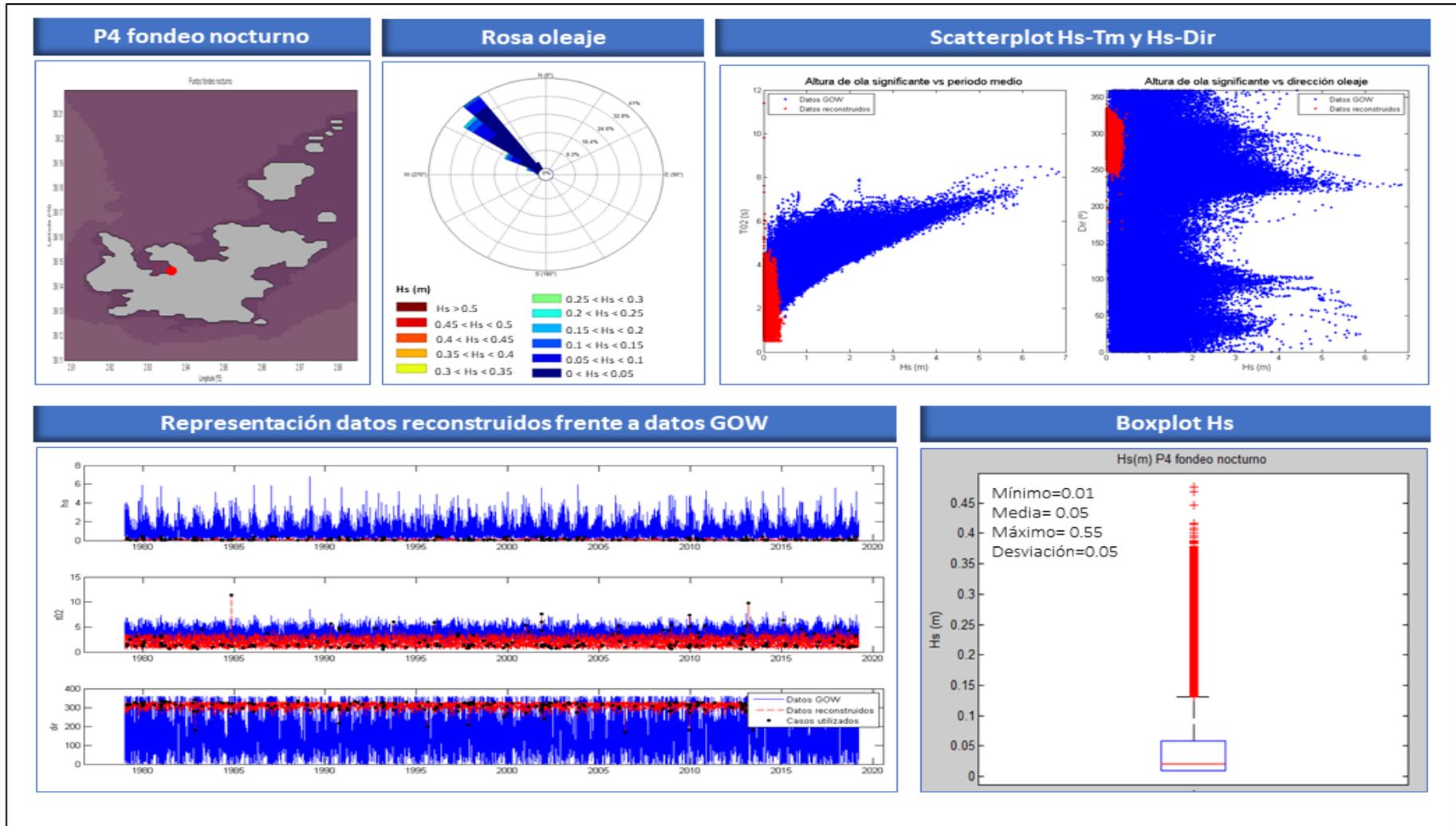


Fig. 24 – Reconstrucción oleaje P4 fondeo nocturno donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

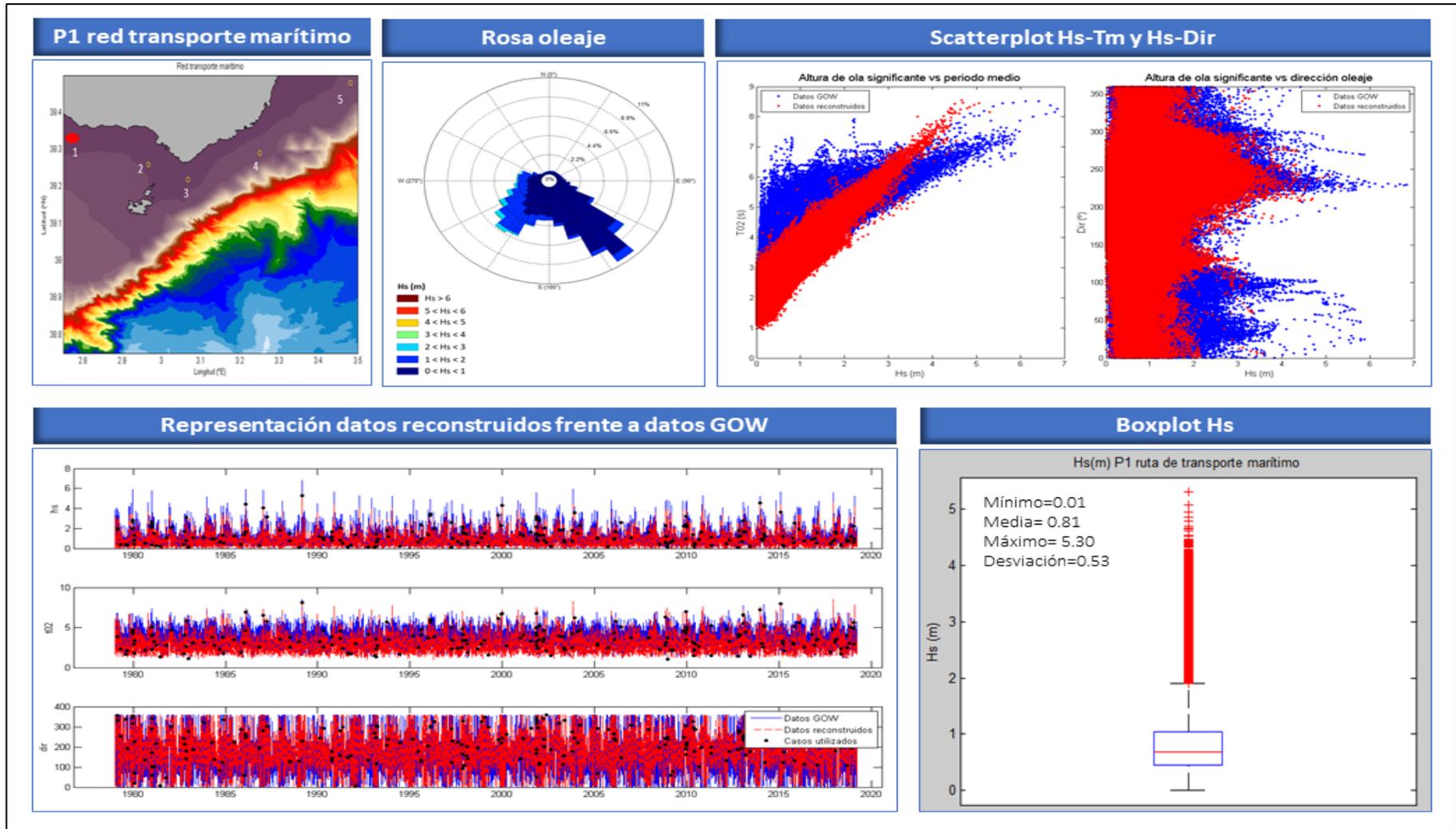


Fig. 25 – Reconstrucción oleaje P1 transporte marítimo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

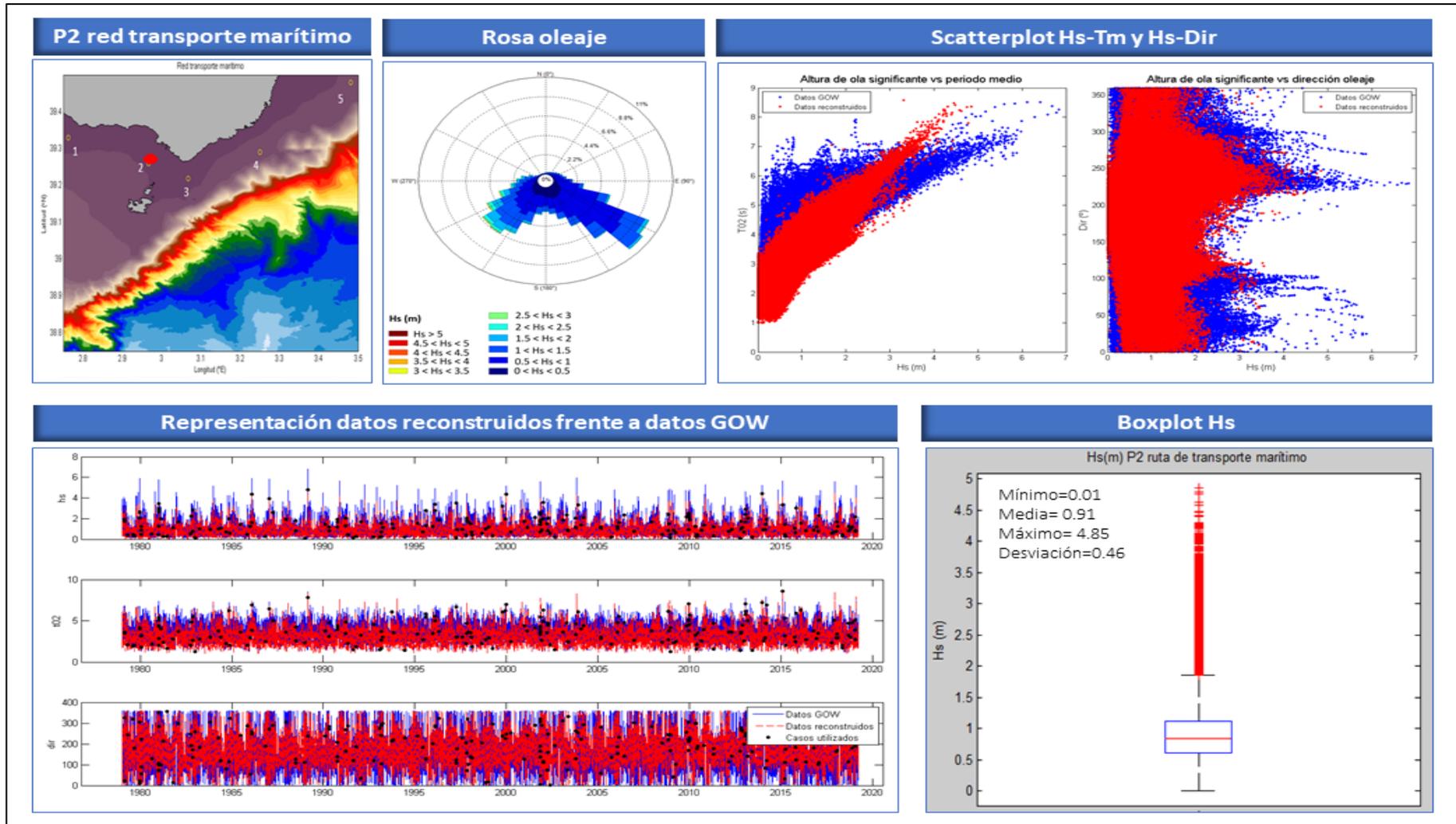


Fig. 26 – Reconstrucción oleaje P2 transporte marítimo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

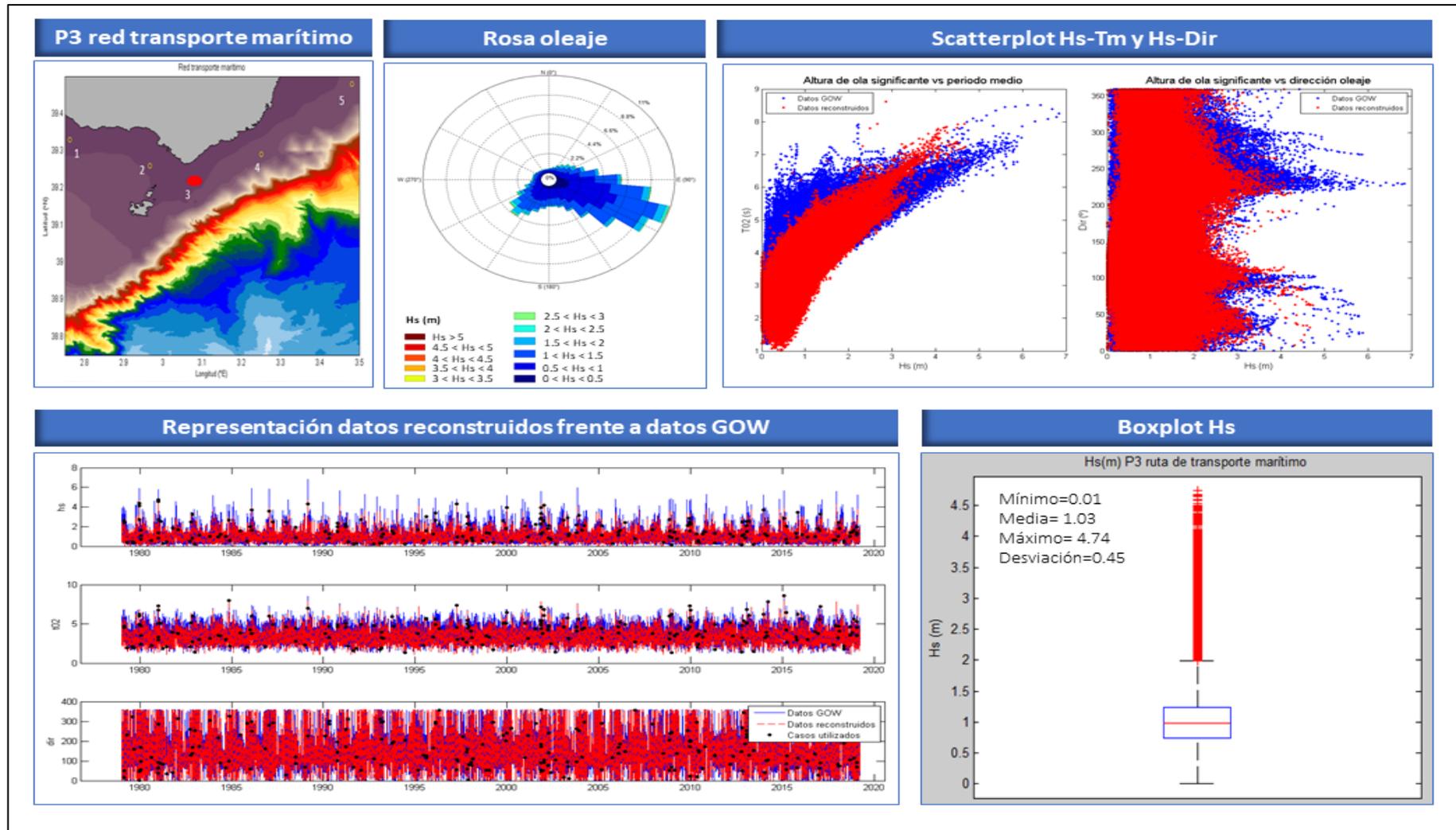


Fig. 27 – Reconstrucción oleaje P3 transporte marítimo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

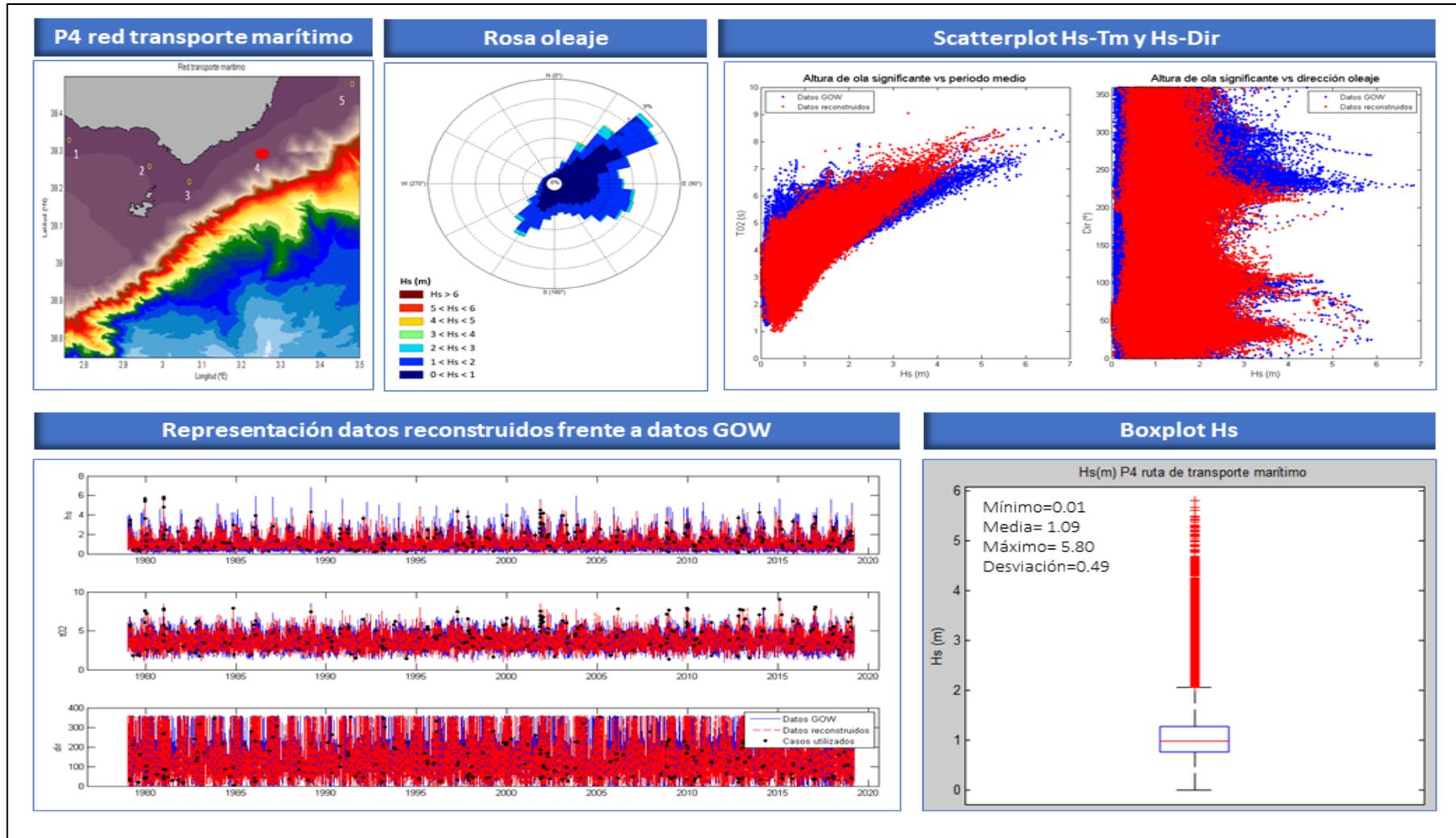


Fig. 28 – Reconstrucción oleaje P4 transporte marítimo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

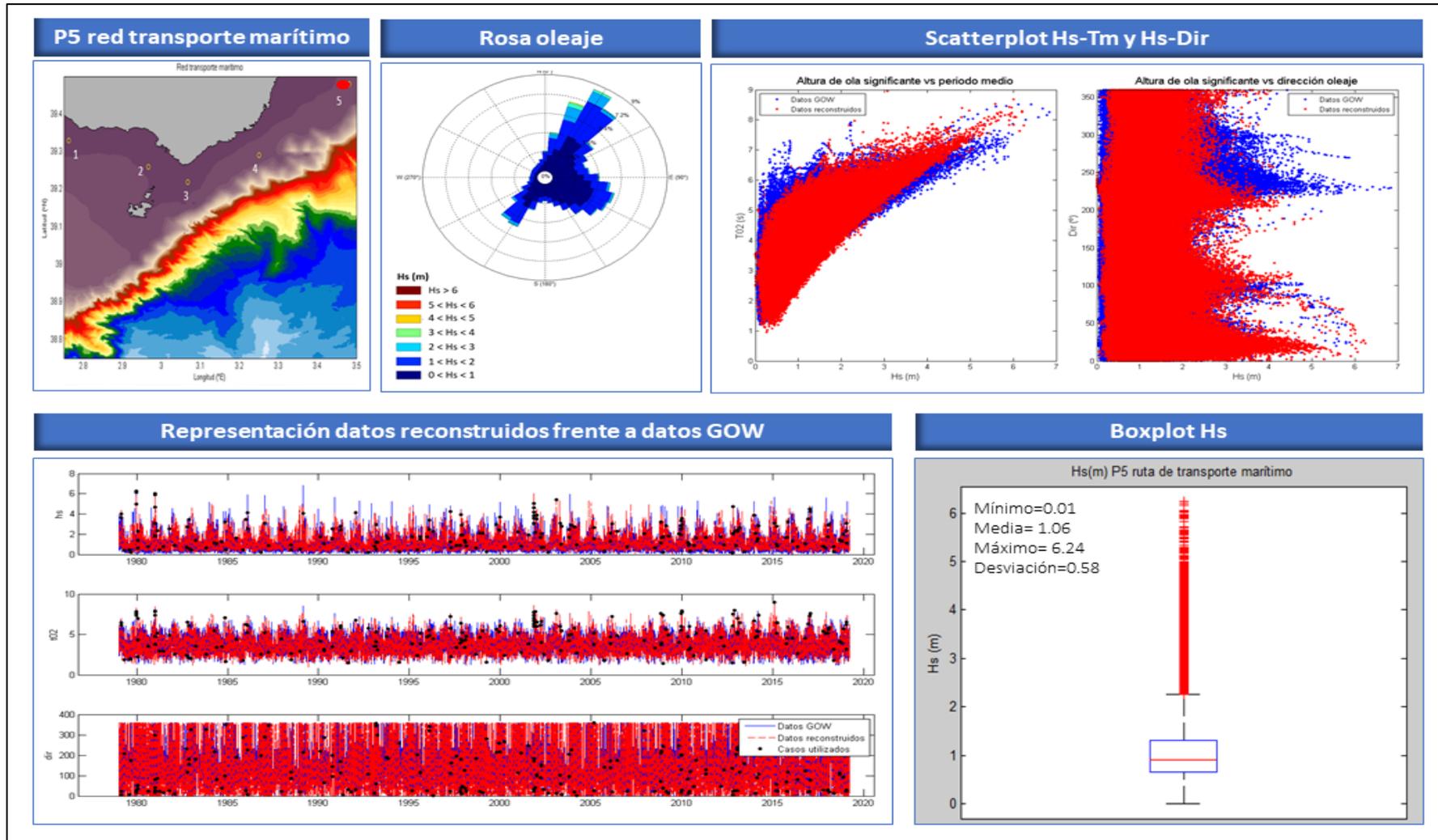


Fig. 29 – Reconstrucción oleaje P5 transporte marítimo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

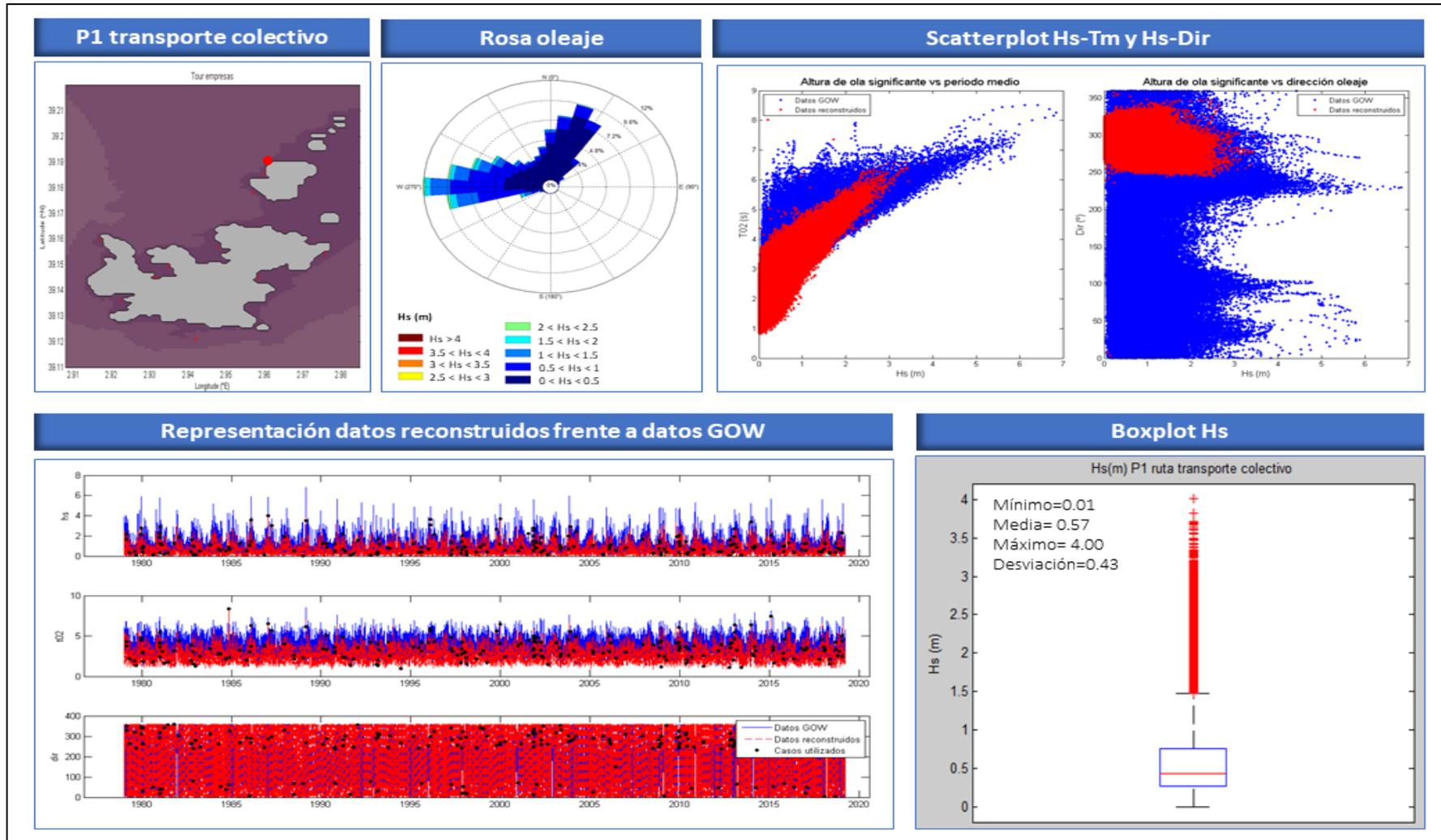


Fig. 30 – Reconstrucción oleaje P1 transporte colectivo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los *outliers*

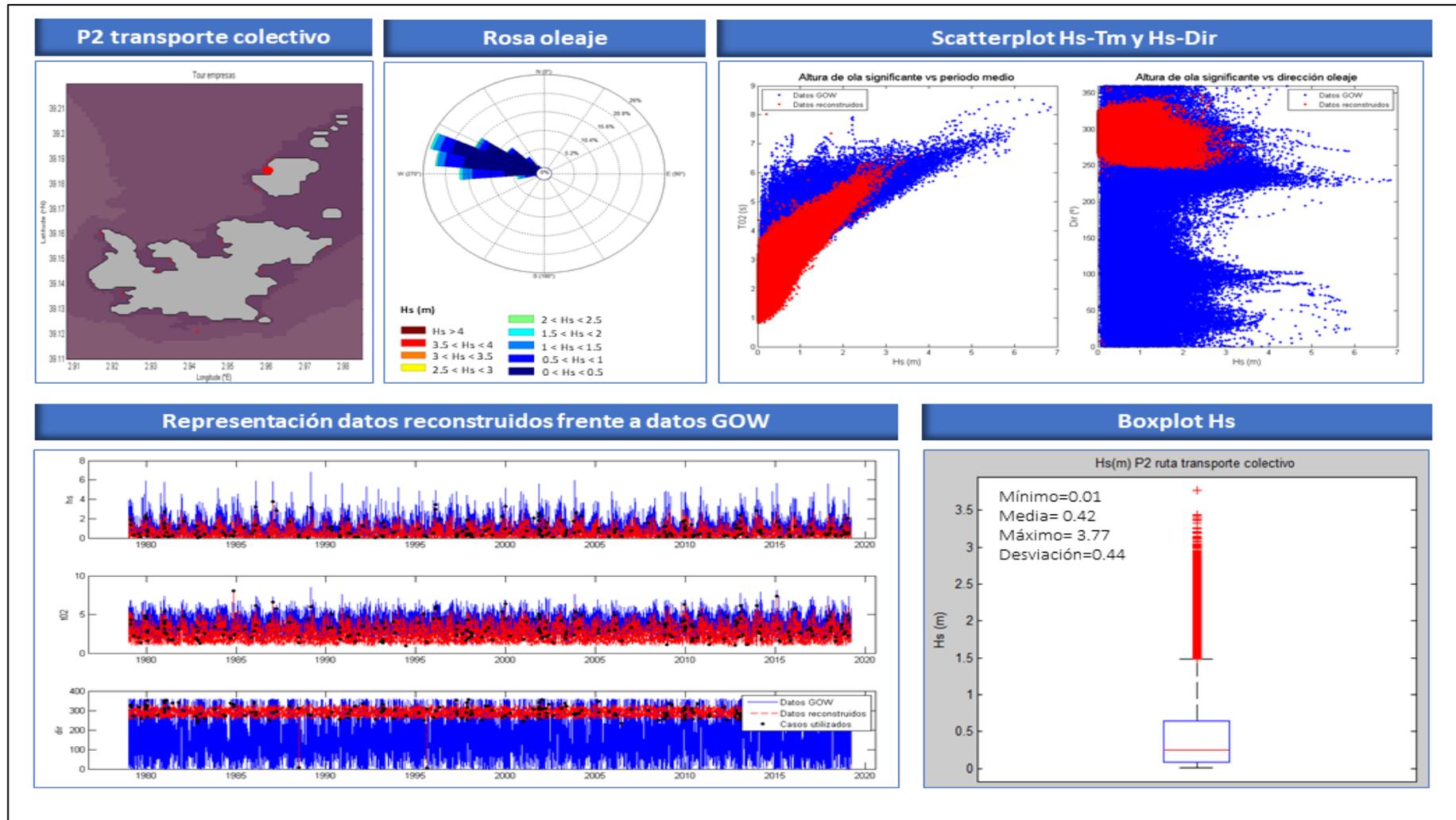


Fig. 31 – Reconstrucción oleaje P2 transporte colectivo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

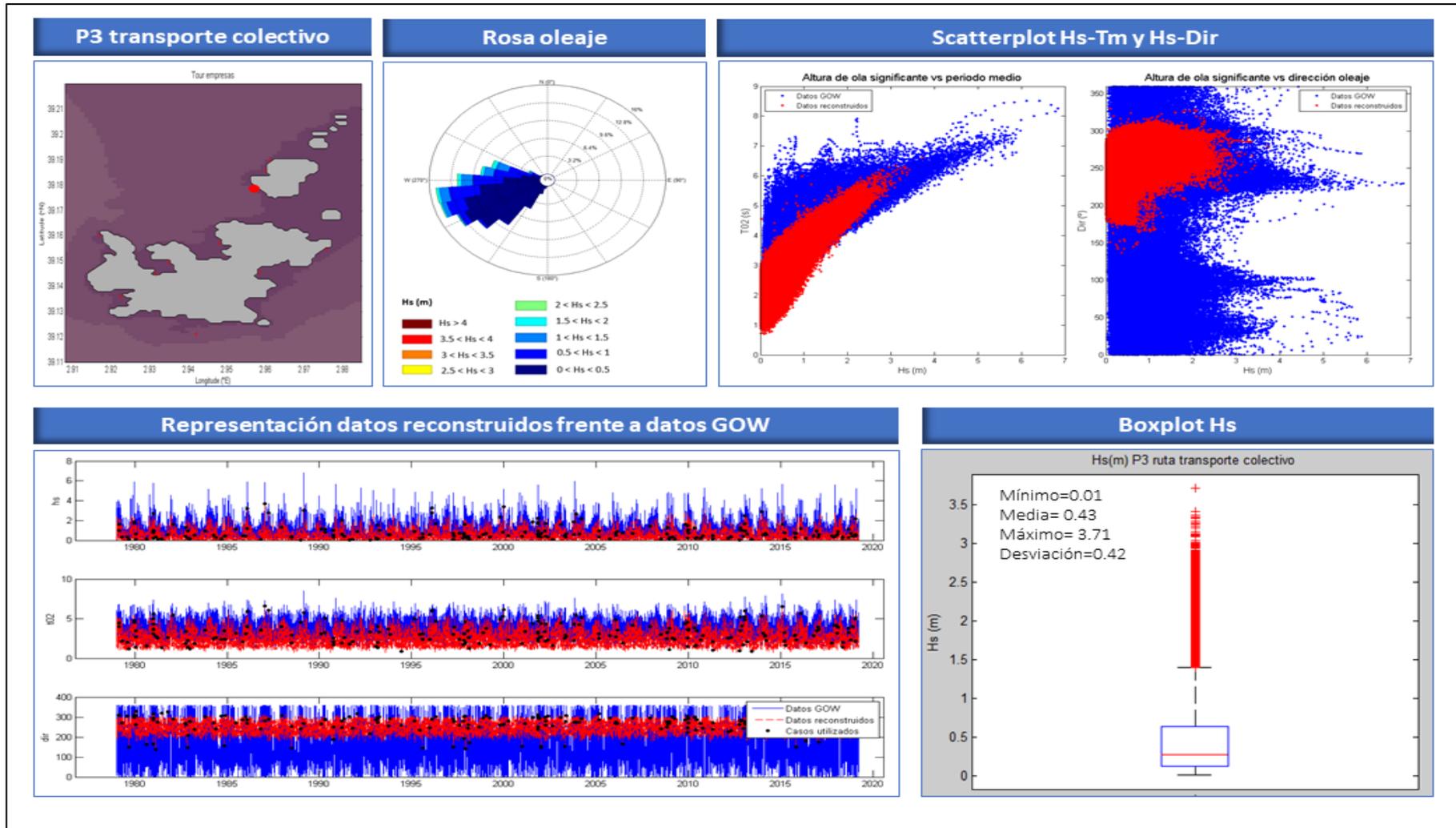


Fig. 32 – Reconstrucción oleaje P3 transporte colectivo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

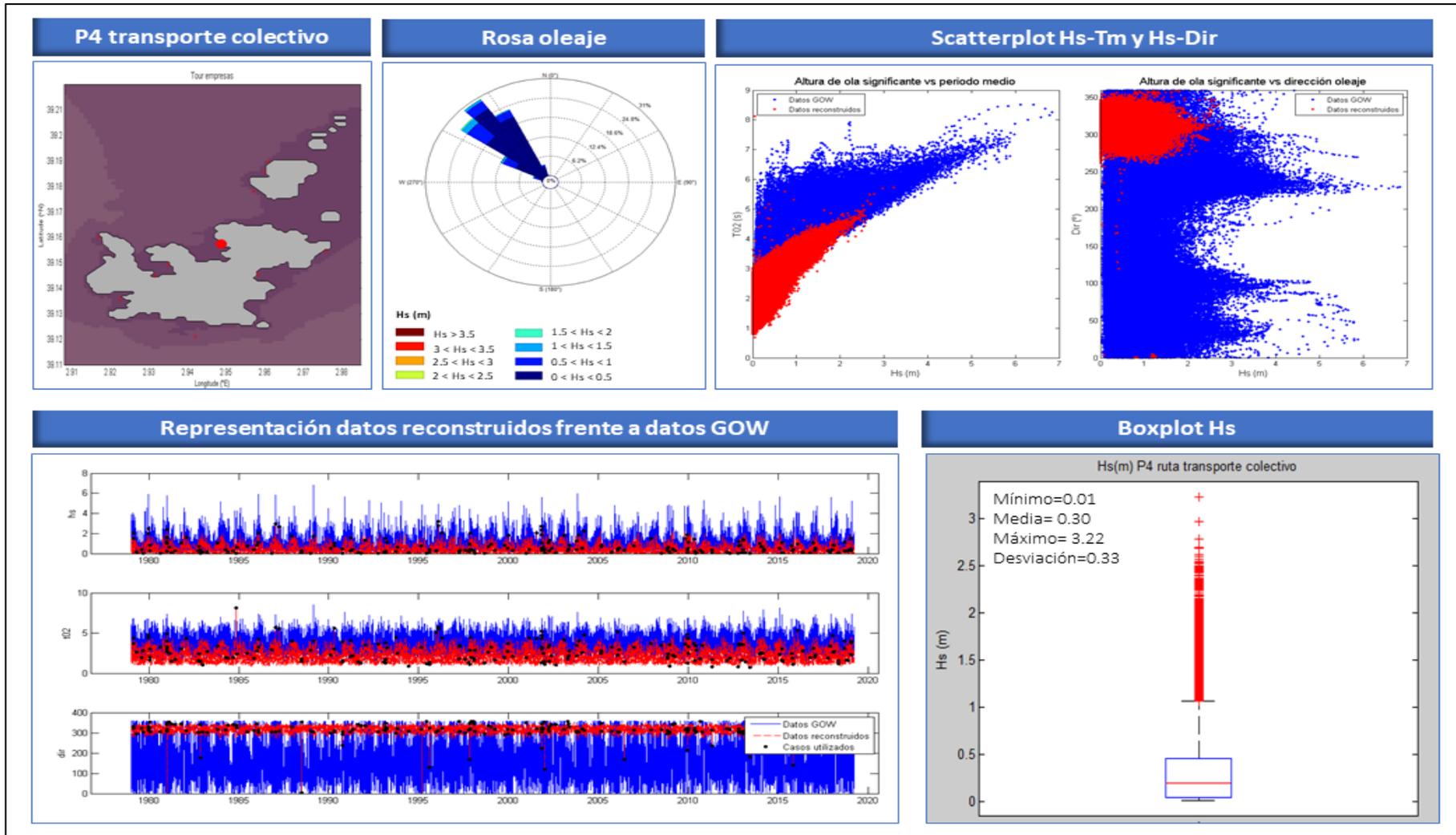


Fig. 33 – Reconstrucción oleaje P4 transporte colectivo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

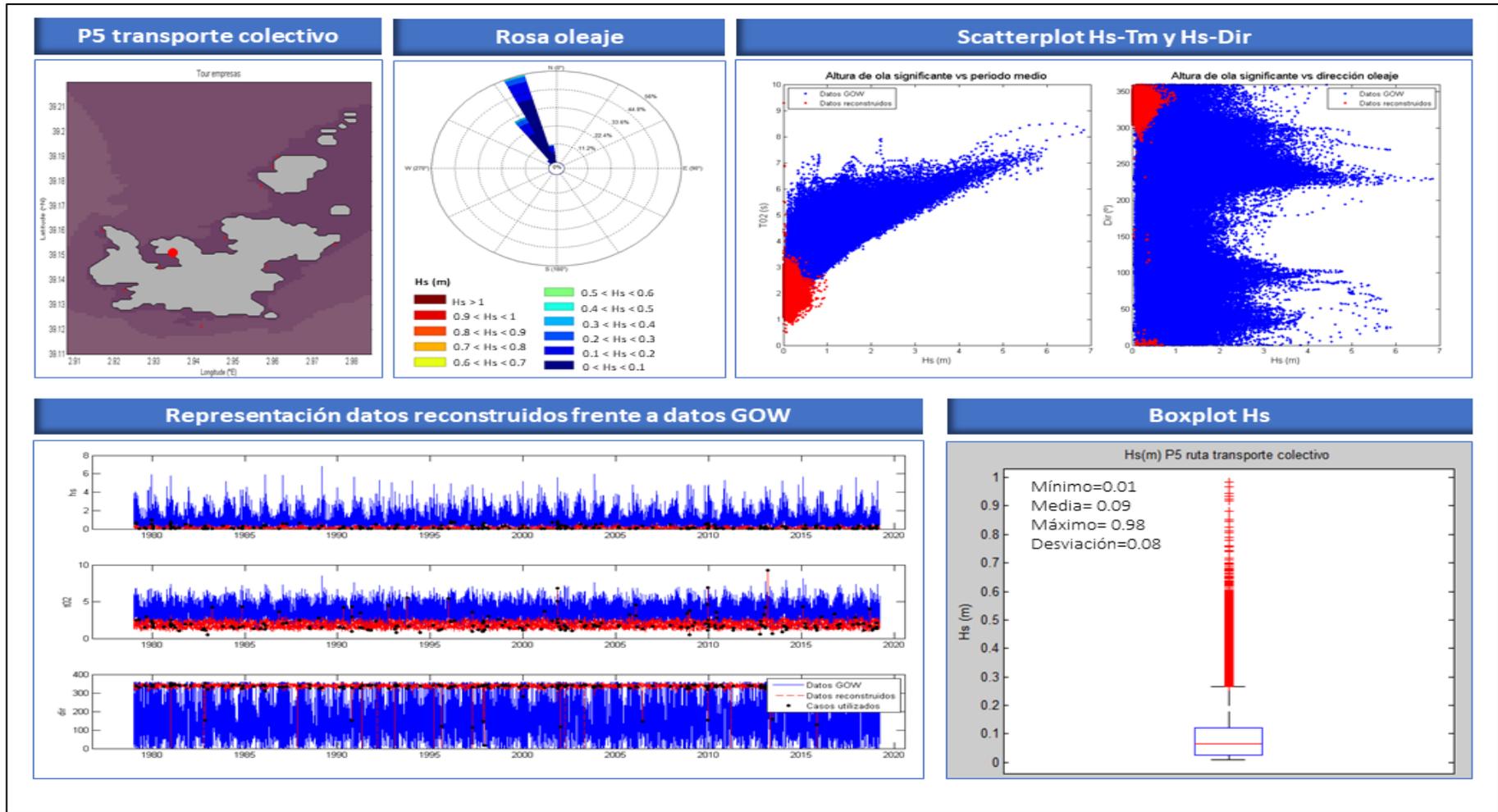


Fig. 34 – Reconstrucción oleaje P5 transporte colectivo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

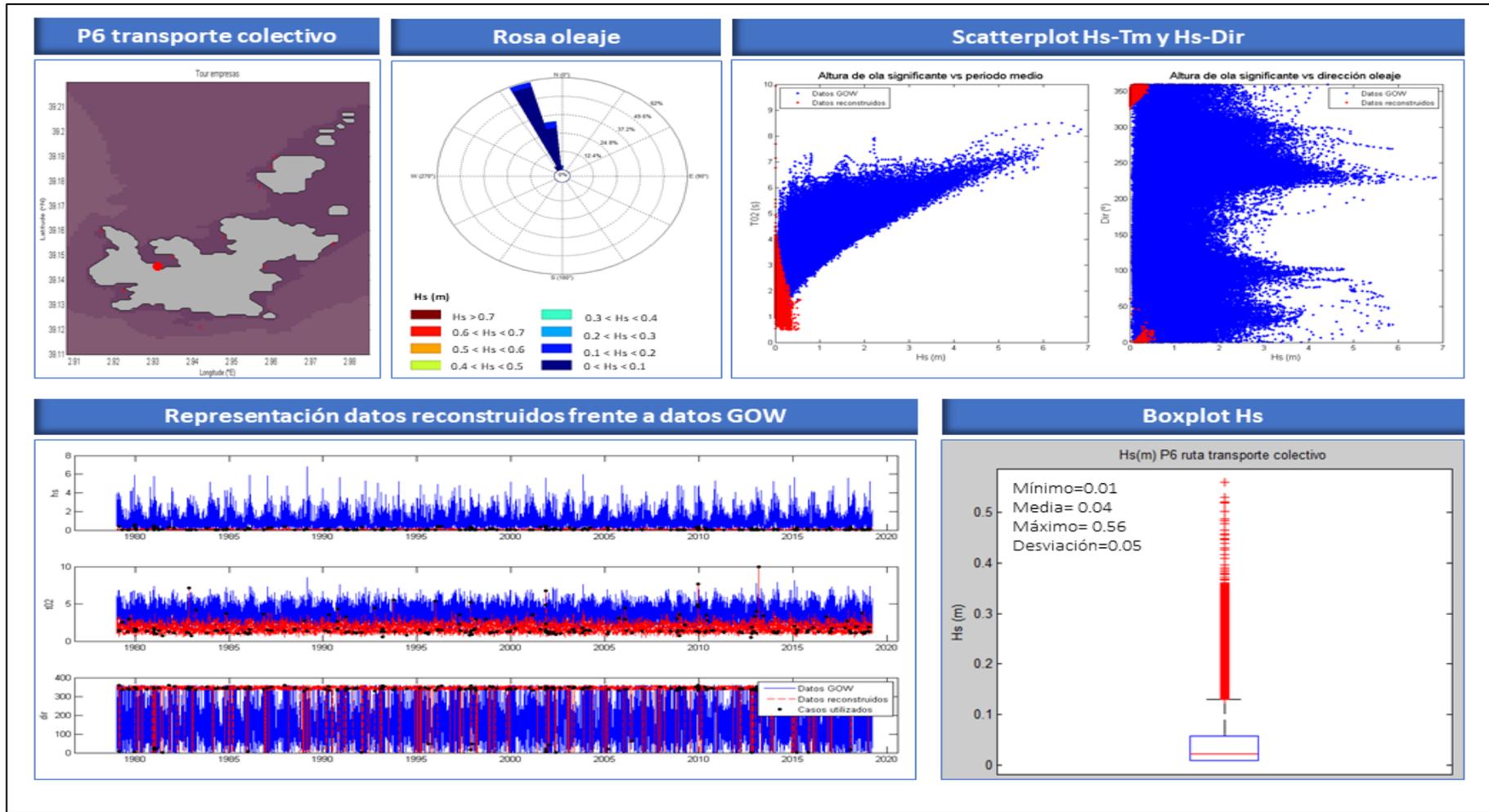


Fig. 35 – Reconstrucción oleaje P6 transporte colectivo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

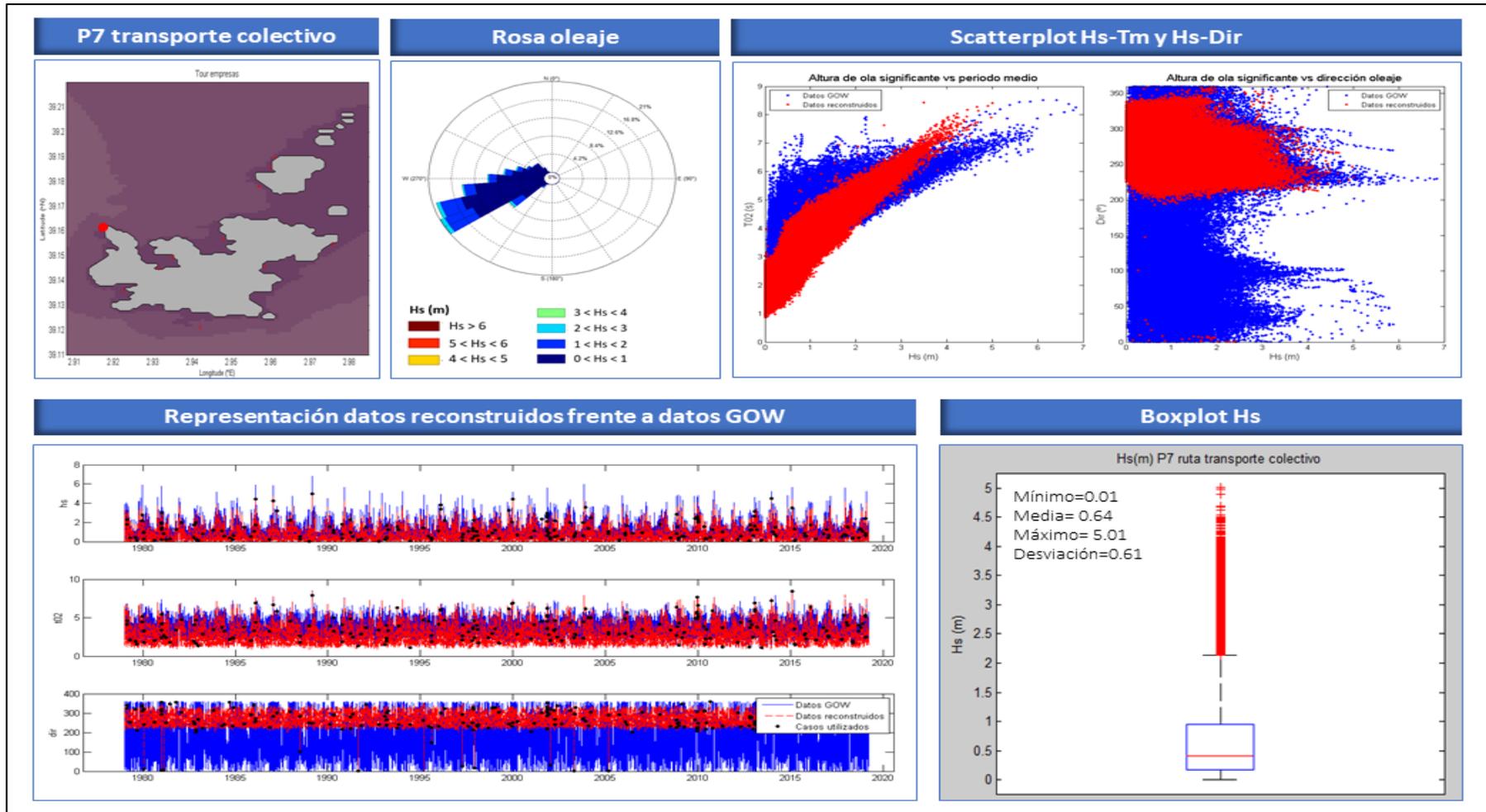


Fig. 36 – Reconstrucción oleaje P7 transporte colectivo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

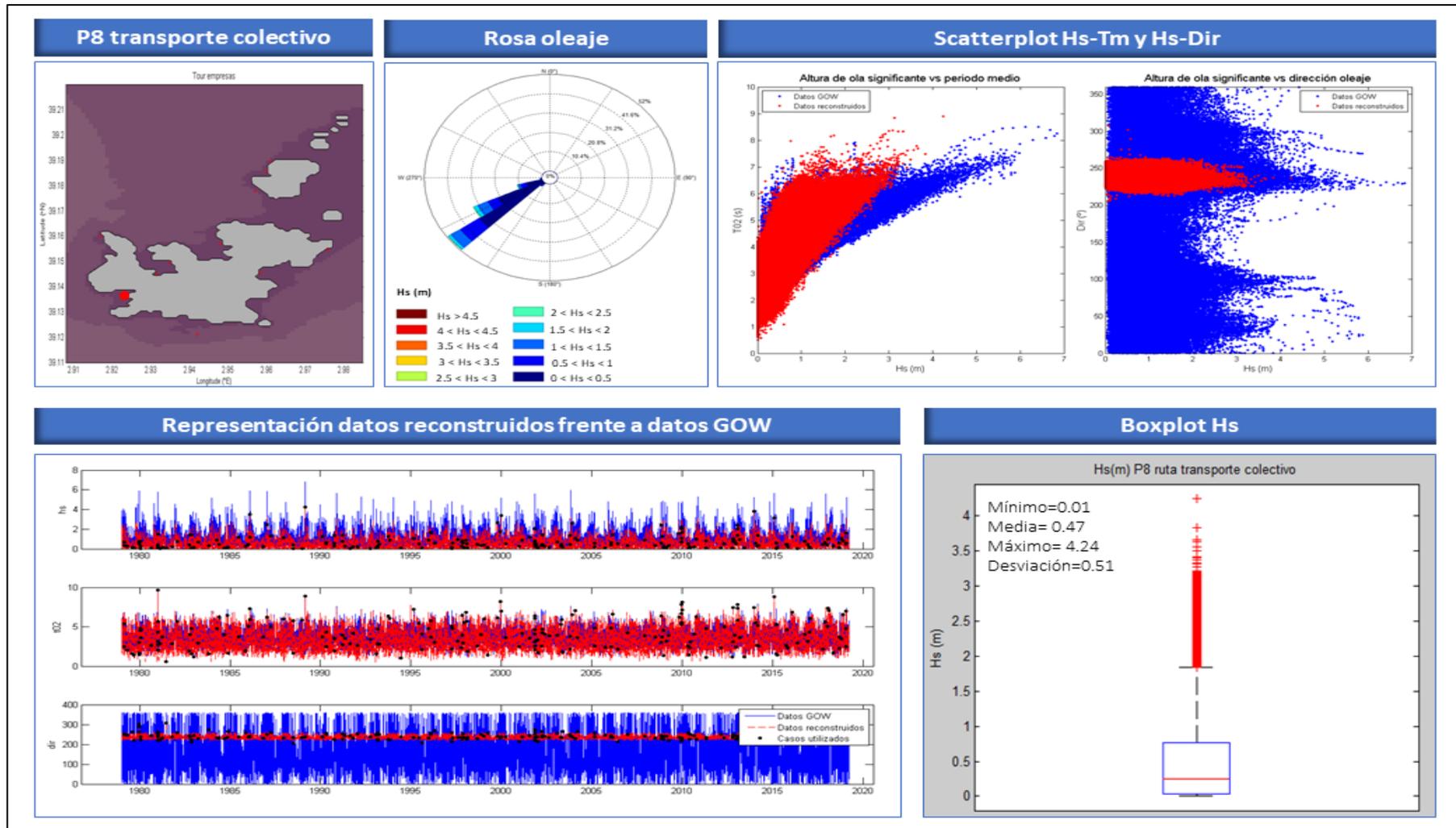


Fig. 37 – Reconstrucción oleaje P8 transporte colectivo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

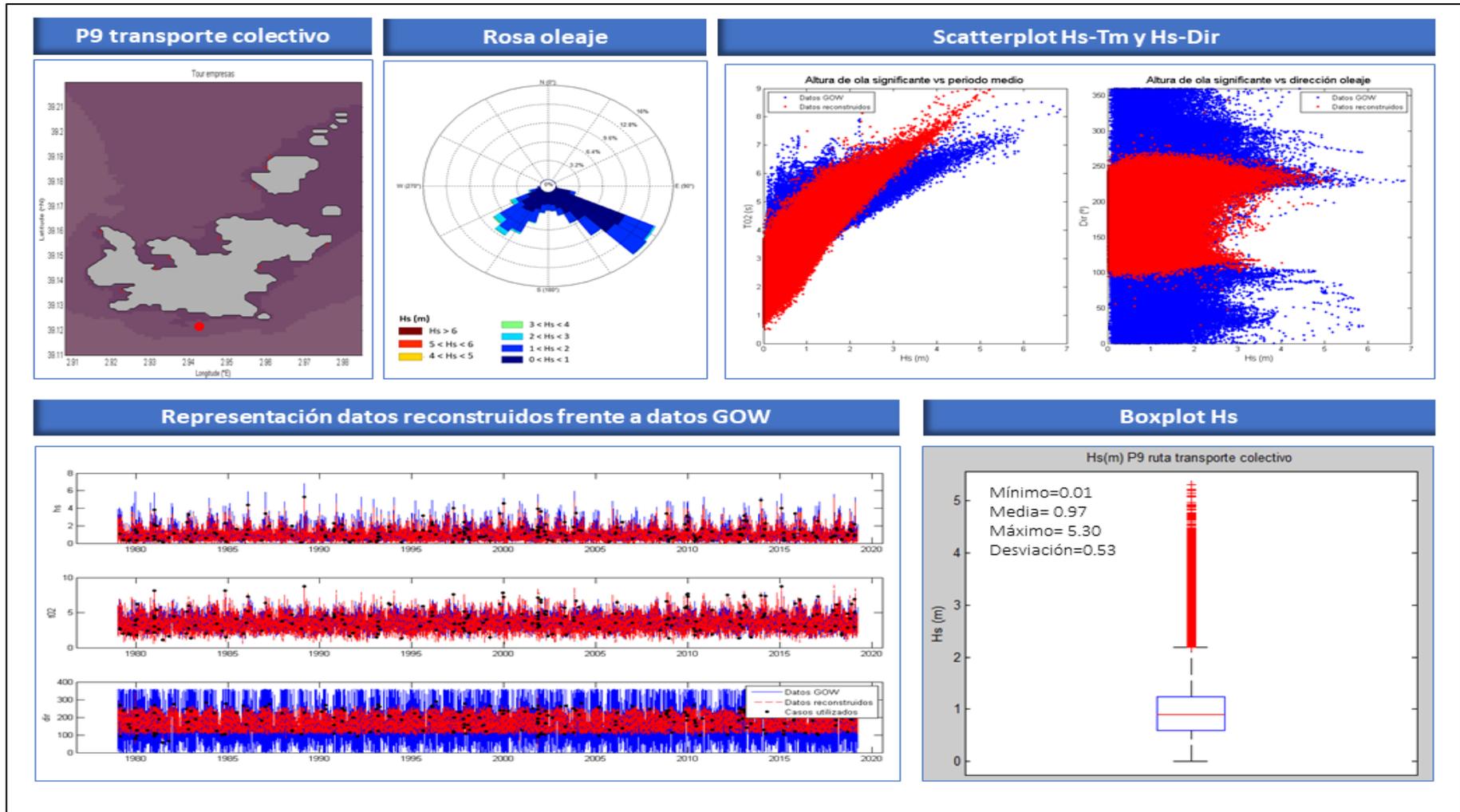


Fig. 38 – Reconstrucción oleaje P9 transporte colectivo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

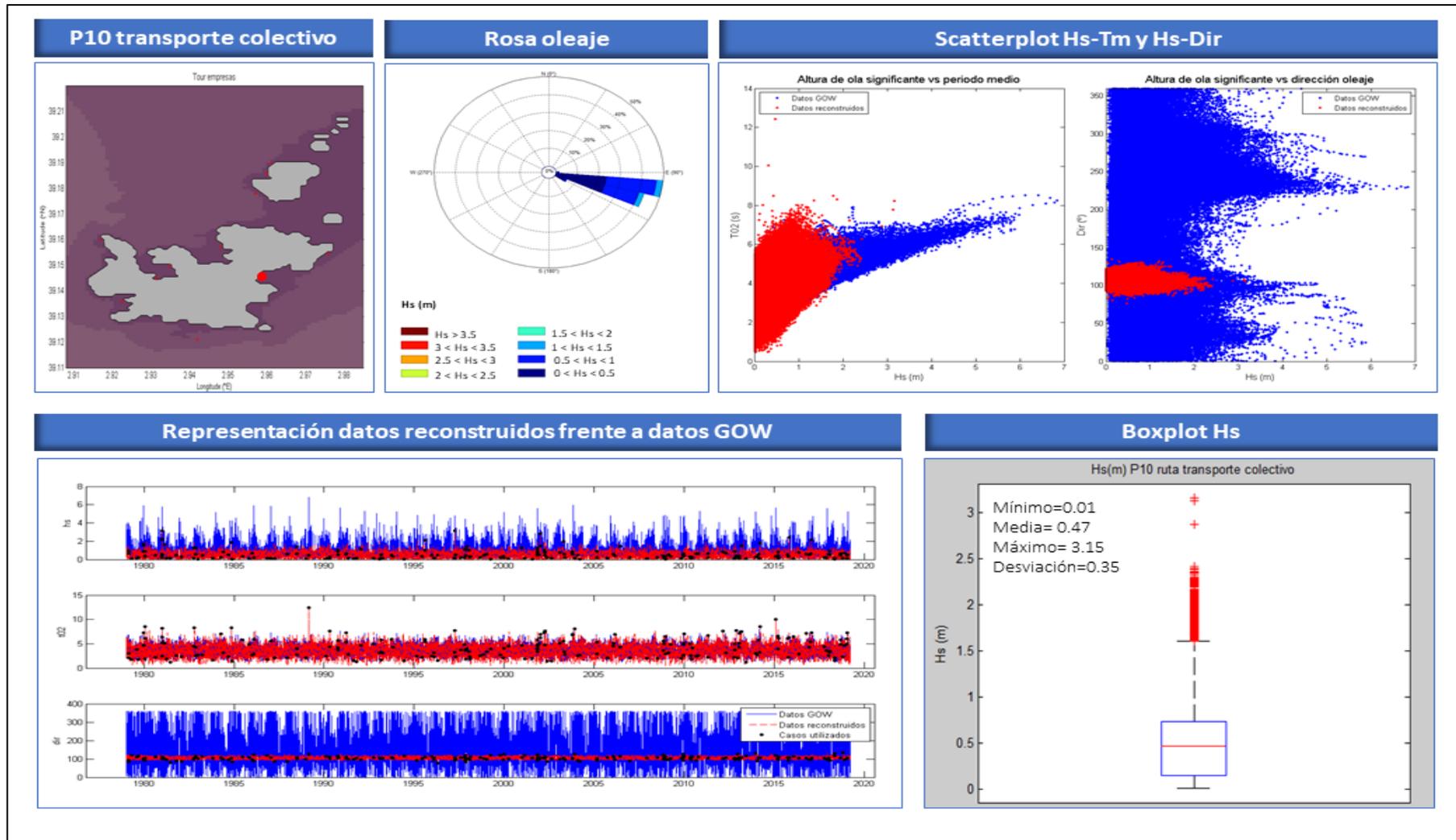


Fig. 39 – Reconstrucción oleaje P10 transporte colectivo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

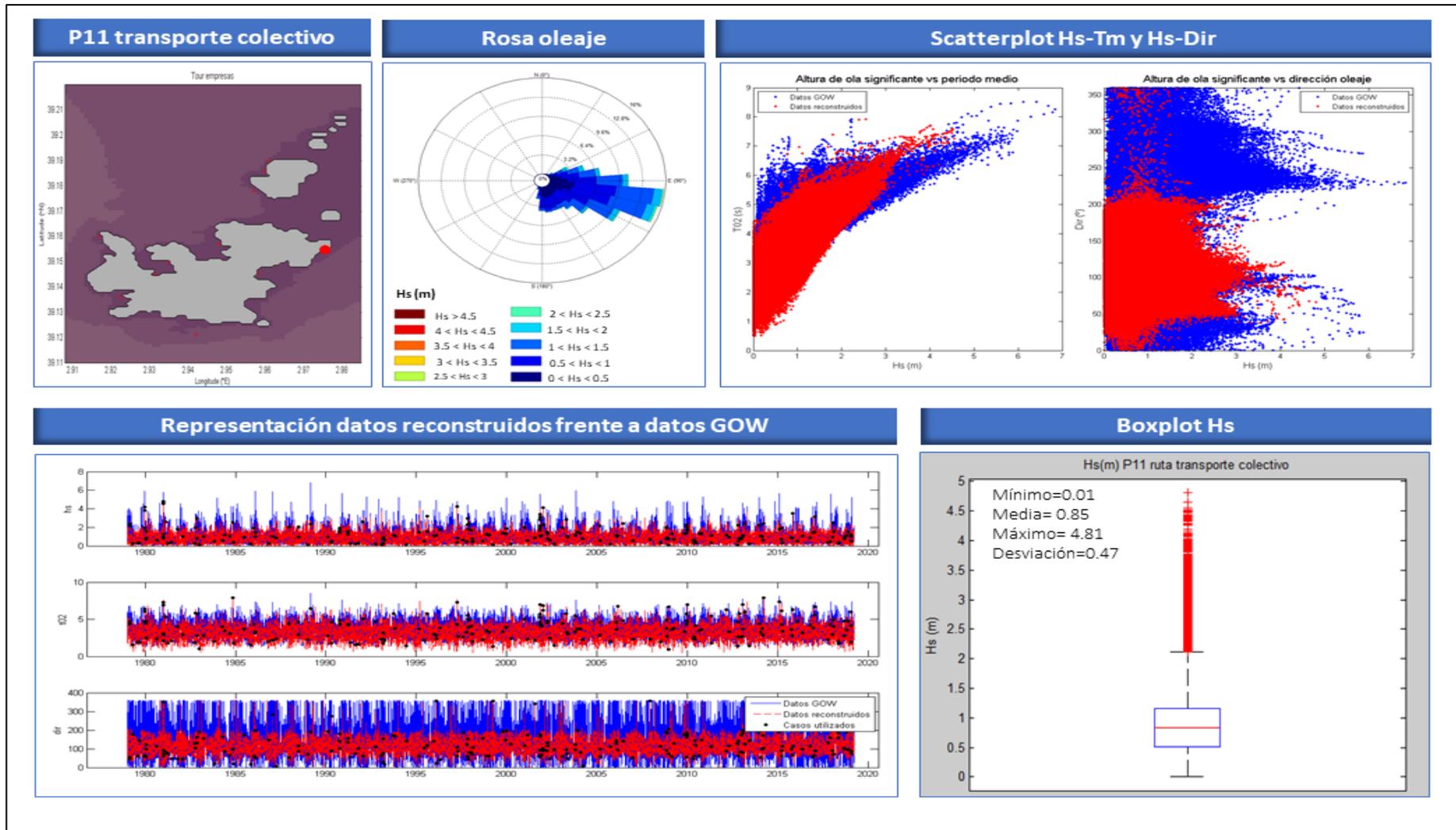


Fig. 40 – Reconstrucción oleaje P11 transporte colectivo donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

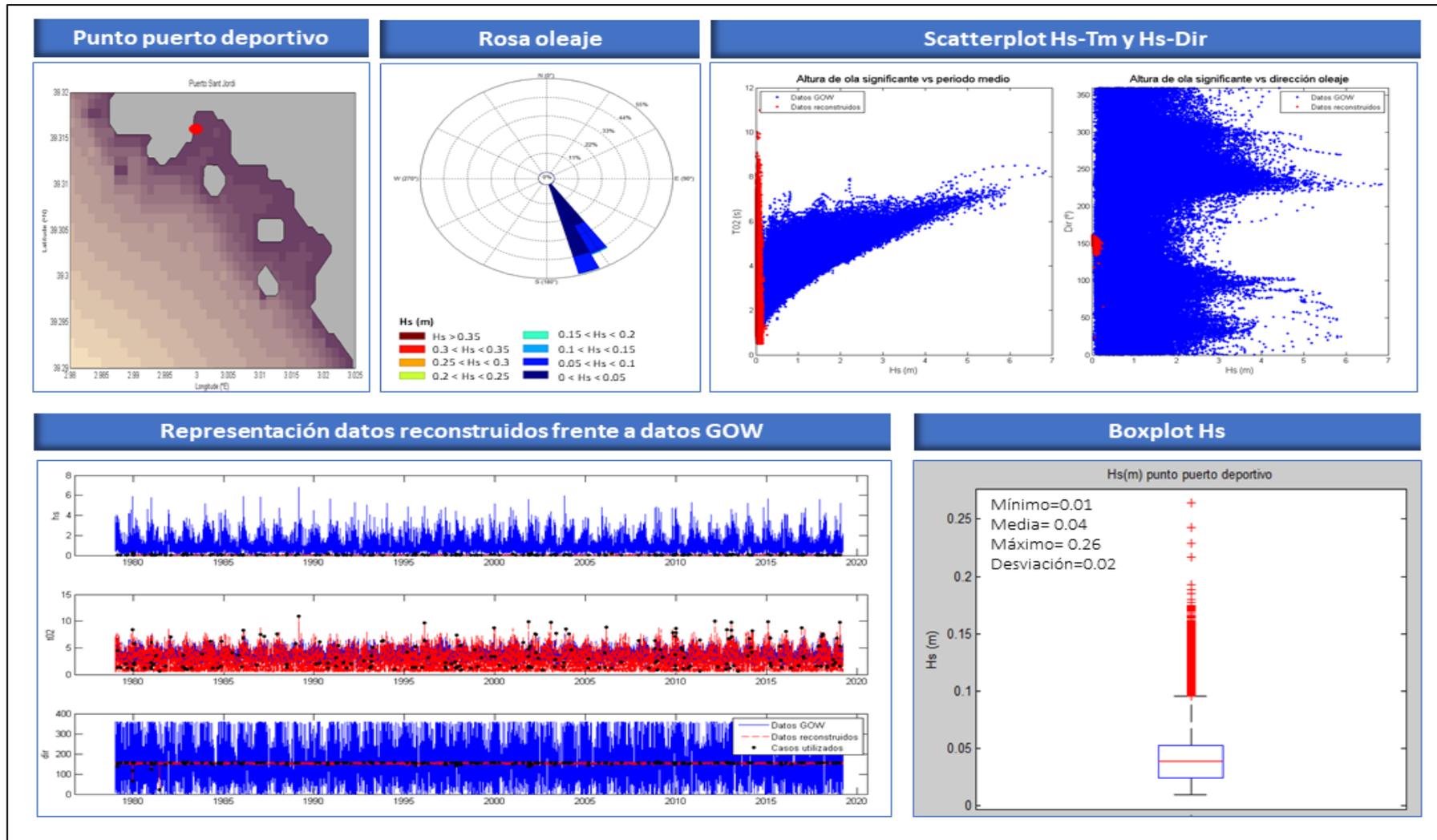


Fig. 41 – Reconstrucción oleaje punto del puerto donde se muestra en la fila de arriba: ubicación punto, rosa de oleaje y scatterplot serie GOW y serie reconstruida Hs vs Tm y Hs vs Dir, y en la fila de abajo: gráficos Hs, Tm y Dir comparando dato GOW frente a reconstruidos e indicando los 200 casos utilizados, y boxplot de Hs donde la línea roja es la media y cruces los outliers

