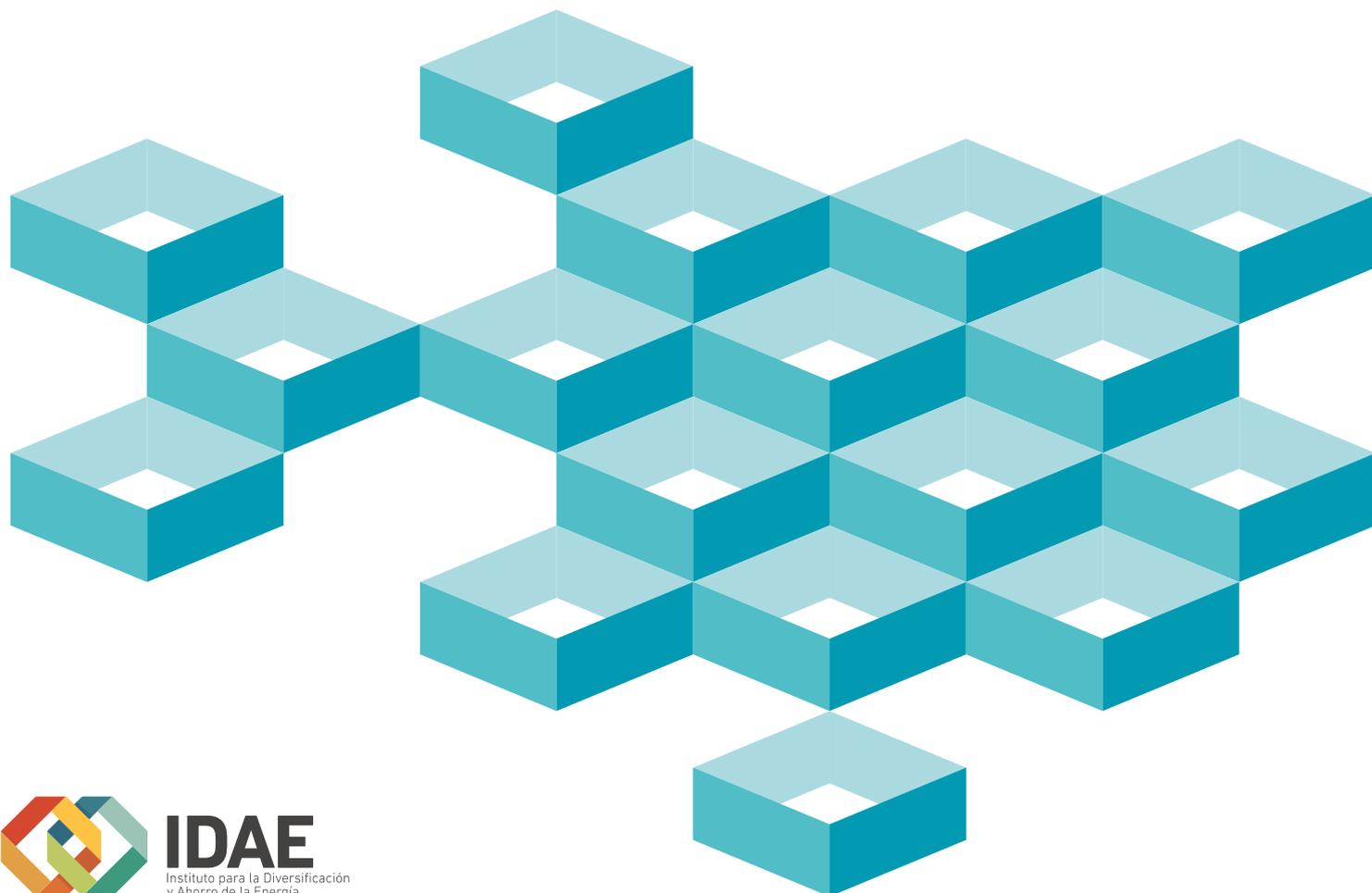


# EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LA ENERGÍA DE LAS OLAS

ESTUDIO TÉCNICO  
PER 2011-2020



**IDAIE**

Instituto para la Diversificación  
y Ahorro de la Energía



# EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LA ENERGÍA DE LAS OLAS

**Coordinador de la edición de Estudios Técnicos PER 2011-2020:**

Jaume Margarit i Roset, Director de Energías Renovables de IDAE

**Título:** Evaluación del potencial de la energía de las olas.  
Estudio Técnico PER 2011-2020

**Madrid, 2011**

**Autores:**

*INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL IH Cantabria:* Íñigo J. Losada Rodríguez, César Vidal Pascual, Fernando J. Méndez Incera, Roberto Mínguez Solana, Soledad Requejo Landeira, Paula Camus Braña, Antonio Tomás Sampedro, Melisa Menéndez García, Cristina Izaguirre Lasa, Antonio Espejo Hermosa, Borja González Reguero, Nabil Kakeh Burgada, Felipe Fernández Pérez, Felipe Maza

**Coordinación y revisión IDAE:** M<sup>a</sup> Carmen López Ocón, Carmen M<sup>a</sup> Roa Tortosa

El presente estudio ha sido promovido por el IDAE en el marco de la elaboración del Plan de Energías Renovables (PER) en España 2011-2020. Aunque el IDAE ha supervisado la realización de los trabajos y ha aportado sus conocimientos y experiencia para su elaboración, los contenidos de esta publicación son responsabilidad de sus autores y no representan necesariamente la opinión del IDAE sobre los temas que se tratan en ella.

# ÍNDICE

<b>4</b>	Antecedentes
<b>6</b>	Resumen ejecutivo
<b>15</b>	Introducción
<b>17</b>	Metodología para el estudio del recurso de energía de oleaje en el litoral español
<b>33</b>	Bases de datos utilizadas
<b>55</b>	Calibración de las bases de datos de oleaje
<b>63</b>	Transferencia de las dinámicas a aguas costeras
<b>86</b>	Obtención del recurso de energía de oleaje
<b>124</b>	Anexo 1. Validación series temporales
<b>152</b>	Anexo 2. Validación recurso energético
<b>180</b>	Anexo 3. Mapas de la potencia media del oleaje a lo largo del litoral español
<b>220</b>	Anexo 4. Fichas de validación recurso energético

# Antecedentes

Con fecha de 23 de noviembre de 2009, El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria firman un Convenio para la **“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA DE LAS OLAS EN ESPAÑA PARA LA ELABORACIÓN DEL PLAN DE ENERGÍAS RENOVABLES 2011-2020”**. En este documento se resumen los trabajos, metodologías y resultados obtenidos de caracterización de la energía undimotriz a lo largo del litoral español. Este informe ha sido desarrollado por los siguientes investigadores y técnicos del Instituto de Hidráulica Ambiental “IH Cantabria”:

- Íñigo J. Losada Rodríguez, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Catedrático del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria.
- César Vidal Pascual, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Catedrático del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria.
- Fernando J. Méndez Incera, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Profesor Titular de la Universidad de Cantabria.
- Roberto Mínguez Solana, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Investigador Ramón y Cajal.
- Soledad Requejo Landeira, Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos.
- Paula Camus Braña, Dra. por la Universidad de Cantabria, Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos.
- Antonio Tomás Sampedro, Dr. por la Universidad de Cantabria, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
- Melisa Menéndez García, Dra. por la Universidad de Cantabria, Licenciada en Ciencias del Mar.
- Cristina Izaguirre Lasa, Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos.
- Antonio Espejo Hermosa, Licenciado en Ciencias Ambientales.
- Borja González Reguero, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
- Nabil Kakeh Burgada, Licenciado en Ciencias Físicas.
- Felipe Fernández Pérez, Experto en Sistemas de Información Geográfica.
- Felipe Maza, Técnico Informático.

Santander, abril de 2010

Fdo.: Íñigo J. Losada Rodríguez  
*Investigador Principal*

# Resumen ejecutivo

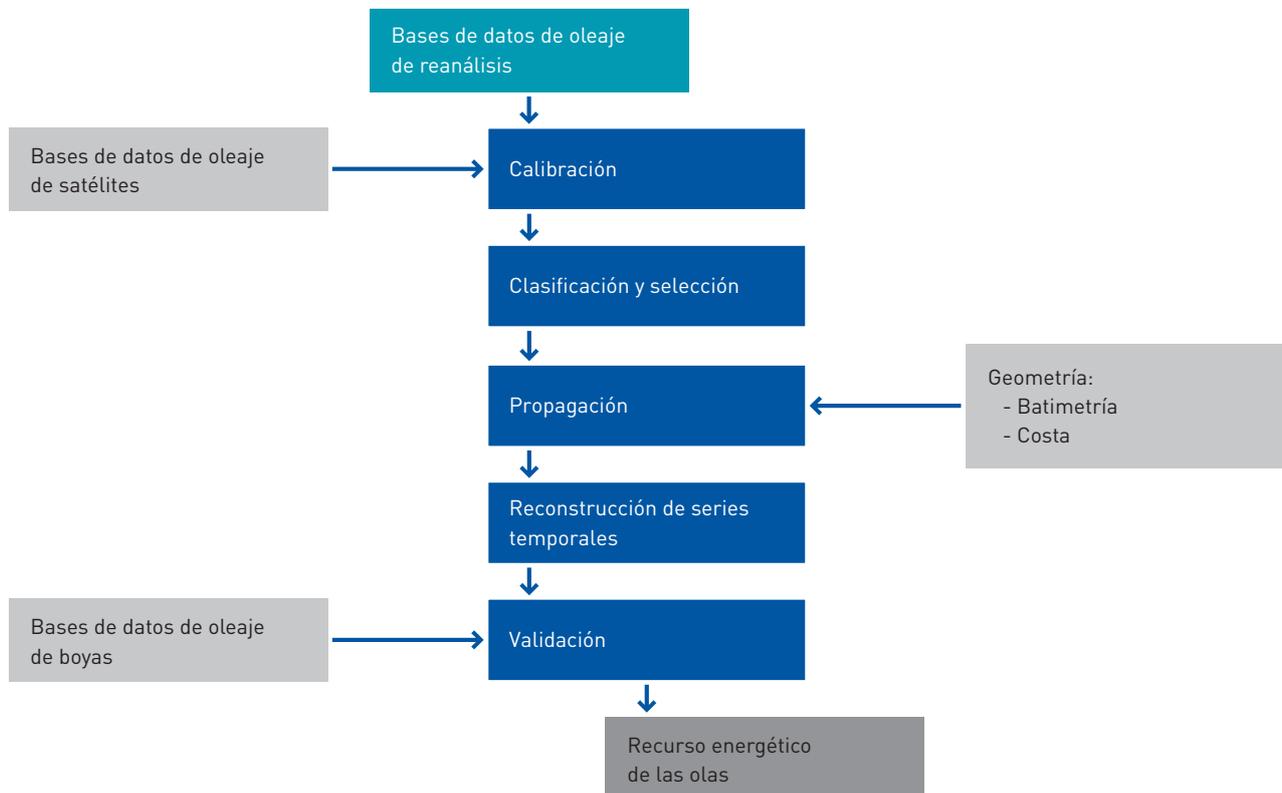
## OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo de este estudio es elaborar un atlas del potencial del recurso energía del oleaje para el litoral español incluida la península, archipiélago canario y balear para su integración en el Plan de Energías Renovables 2011-2020. Dicho atlas incluye la caracterización espacial del flujo medio de energía (magnitud y dirección) desde profundidades indefinidas hasta la costa con una alta resolución y teniendo en cuenta su variabilidad temporal a distintas escalas (mensual, estacional, anual e interanual).

## METODOLOGÍA

La metodología integral que se ha aplicado en este trabajo comprende los siguientes pasos (ver Figura 1): a) análisis de las bases de datos de oleaje disponibles; b) calibración de los datos de reanálisis en indefinidas utilizando datos de satélite; c) clasificación de los estados de mar a propagar; d) propagación de los estados de mar seleccionados; e) reconstrucción de la serie temporal en el punto objetivo; f) validación con boyas y g) caracterización del recurso energético mediante la aplicación de modelos estadísticos.

**Figura 1. Procedimiento general de IH Cantabria para caracterizar los recursos energéticos en una determinada zona en profundidades intermedias o reducidas**

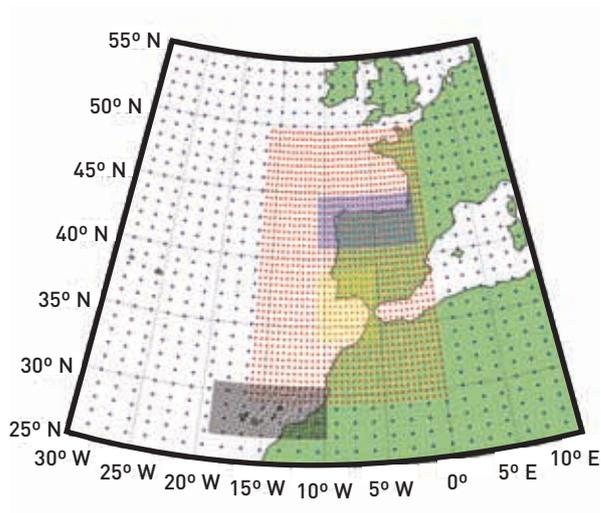


## BASES DE DATOS Y VALIDACIÓN

En este estudio se han utilizado las bases de datos disponibles de:

- Batimetría (GEBCO, cartas náuticas del *BACO-SMC*).
- Series horarias instrumentales de oleaje y nivel del mar (red de boyas y mareógrafos de OPPE, XIOM y una boya de AZTI, observaciones de satélite).
- Reanálisis de oleaje realizados por IH Cantabria que cubren el litoral español: GOW –*Global Ocean Waves*– 1.0 (1948-2008) para el Cantábrico, Galicia y Canarias (Figura 2) y GOW 2.1 (1989-2008) para el Mediterráneo. La resolución espacial, entre 0.1 y 0.12°, y temporal (1 hora) permite obtener series de parámetros espectrales y espectros direccionales en aguas profundas. Dichos reanálisis de oleaje han sido calibrados direccionalmente con datos de satélite utilizando un modelo de regresión circular no lineal.
- Librería de propagaciones de oleaje a lo largo del litoral español con resolución espacial de 200 m (*DOW, Downscaled Ocean Waves* de IH Cantabria), las cuales abarcan los diferentes tipos de oleaje que recibe la costa.

**Figura 2. Rejillas del litoral español del reanálisis GOW 1.0 Malla. Malla Global 1.5° x 1.0°, Malla Iberia 0.5° y Mallas Cantábrico, Cádiz y Canarias 0.1° (representación de la figura en proyección Mercator)**



En lo que se refiere a la validación, se ha realizado en las posiciones de las boyas (ver Figura 3) una exhaustiva validación de las series temporales horarias (Figura 4) y de las distribuciones estadísticas anuales, mensuales y direccionales de la potencia horaria de oleaje (Figura 5).

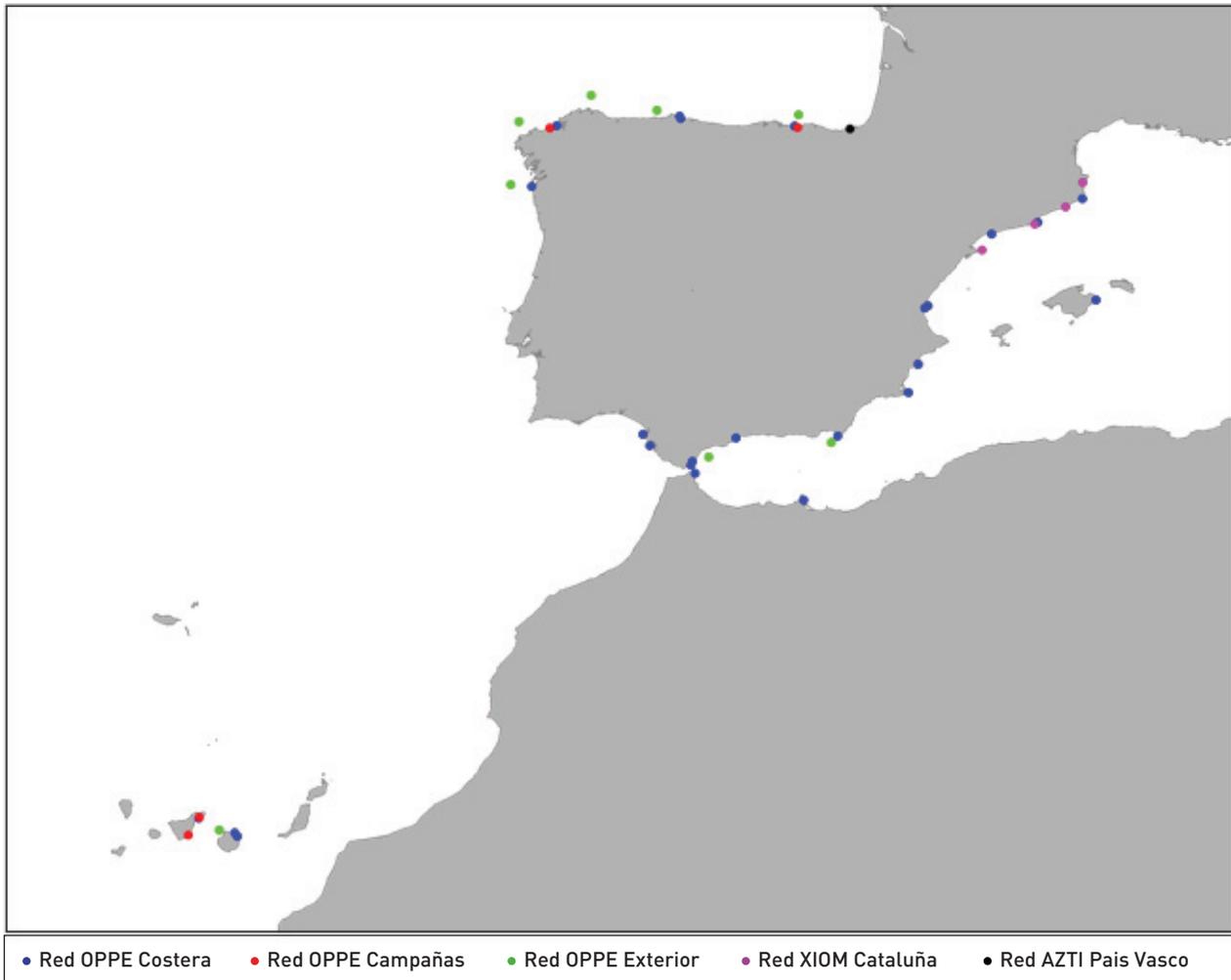
**Figura 3. Localización de las boyas utilizadas en la validación**

Figura 4. Ejemplo de validación de series temporales horarias

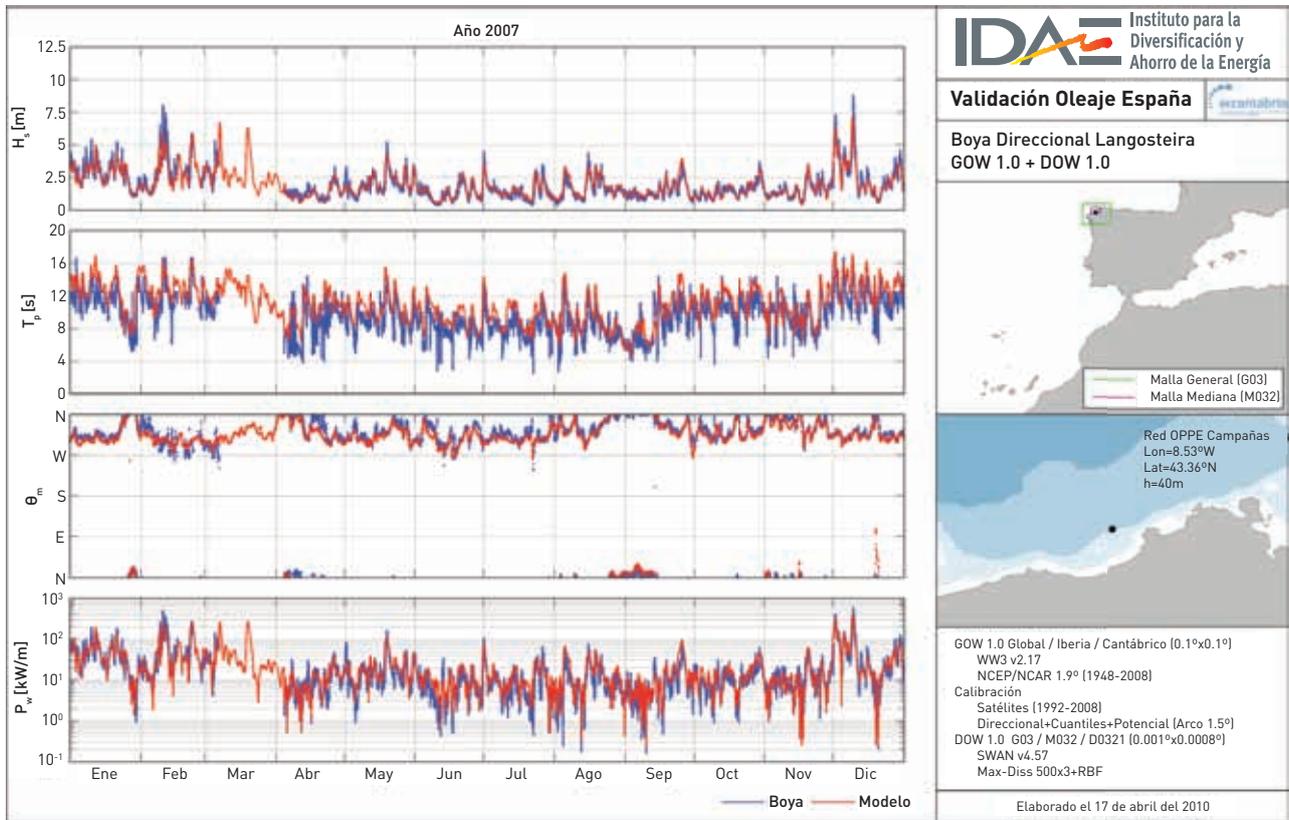
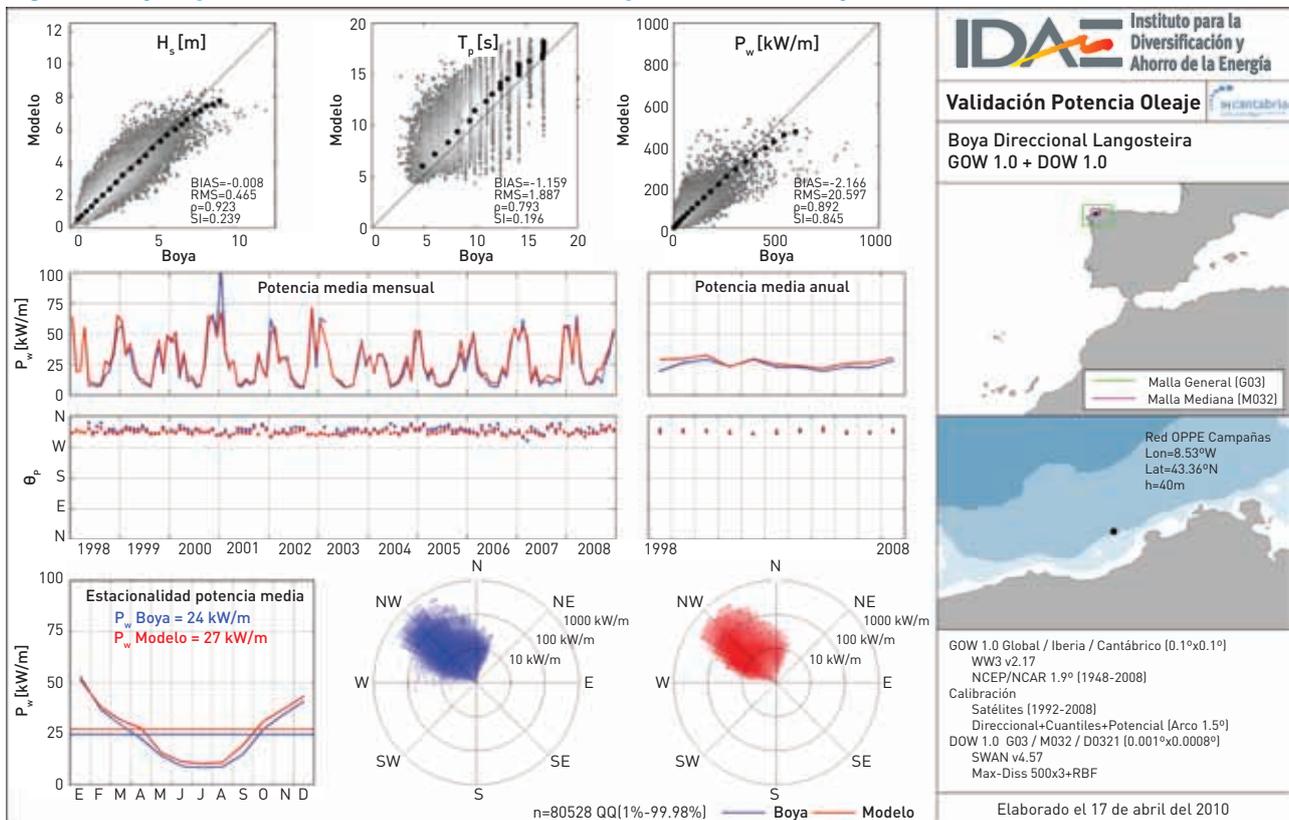
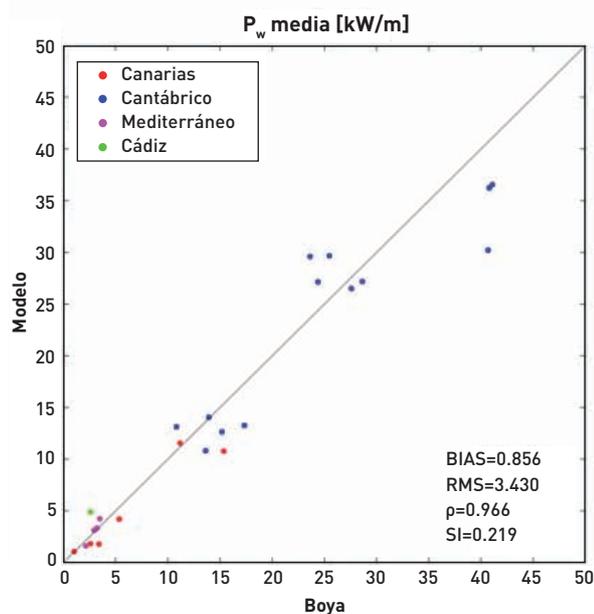


Figura 5. Ejemplo de validación del recurso de potencia de oleaje



En la Figura 6 se muestra un resumen de la validación en todas las boyas utilizadas. Como se puede apreciar, la metodología utilizada es capaz de evaluar el potencial energético de una manera adecuada, tanto a escala anual como a escala mensual.

**Figura 6. Validación potencia media en las boyas disponibles a lo largo del litoral español**



## RESULTADOS

Los resultados se presentan en forma de:

- Mapas a lo largo de todo el litoral.
- Mapas por mallas de cálculo.
- Fichas resumen en más de 1.000 puntos a lo largo de la costa, a 20, 50, 100 m de calado y en profundidades indefinidas.

## Mapas de potencia

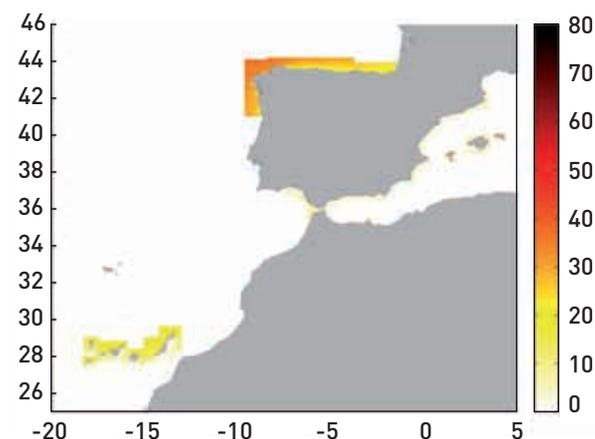
En las Figuras 7 y 8 se muestra la potencia media anual y estacional en el litoral español. A la vista de los resultados obtenidos, se puede comentar lo siguiente:

- Galicia presenta los valores de potencial de energía más elevados, con potencias medias en profundidades indefinidas entre 40-45 kW/m.
- El Mar Cantábrico es en segundo lugar, la siguiente zona del litoral en cuanto a recurso

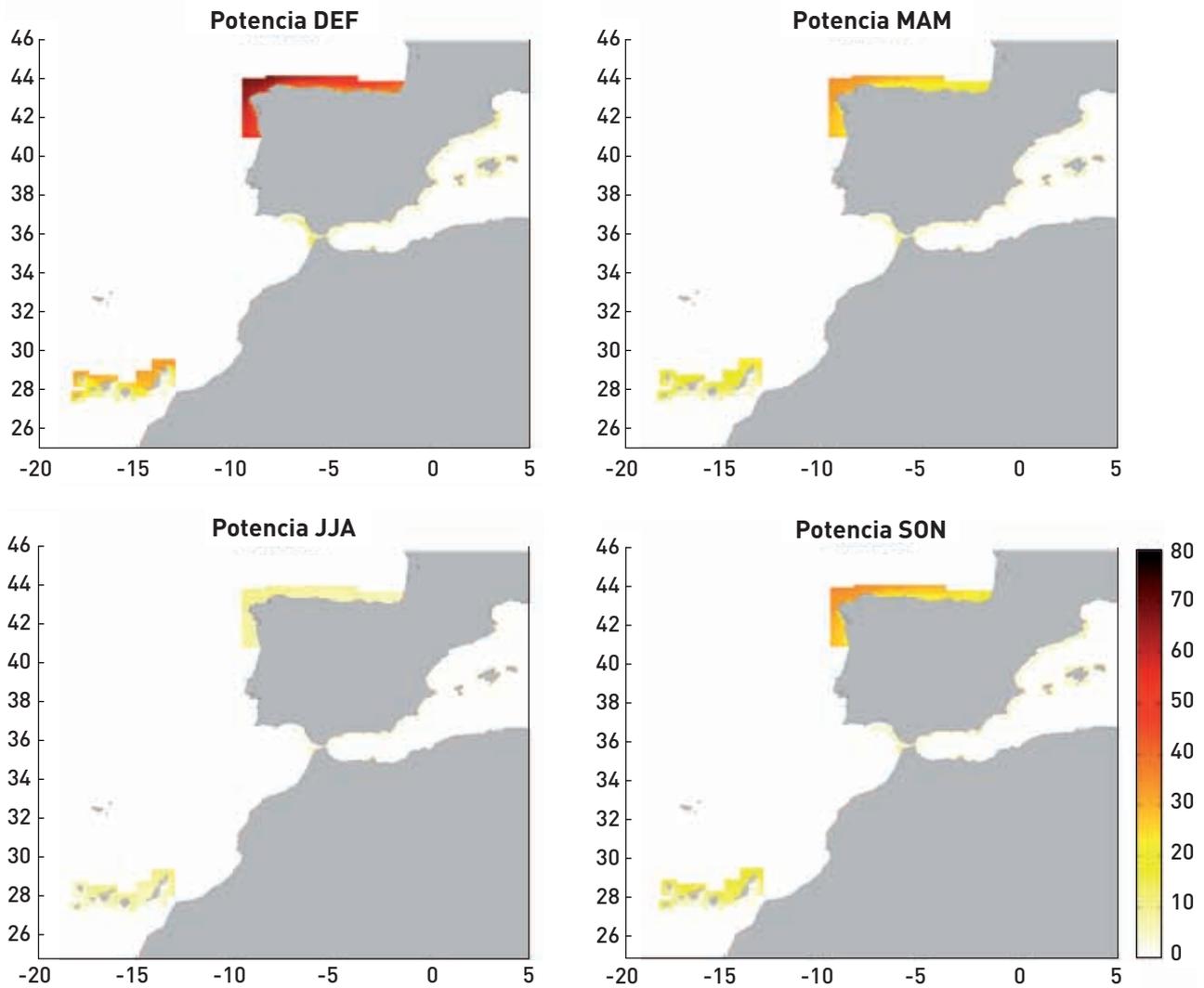
(alrededor de 30 kW/m disminuyendo de Oeste a Este).

- En tercer lugar, la fachada norte de las Islas Canarias (con 20 kW/m).
- La fachada sur de las Islas Canarias, junto con el Mediterráneo español y el Golfo de Cádiz presentan valores medios anuales menores a 10 kW/m.
- Los resultados obtenidos en profundidades indefinidas van disminuyendo progresivamente a medida que el calado disminuye aunque en algunas áreas se producen concentraciones locales motivadas por la configuración de la costa y de la batimetría.
- Existe una fuerte estacionalidad en la potencia media, pudiendo presentarse en invierno potencias medias de 75 kW/m (Galicia), 50 kW/m (Cantábrico) y 35 kW/m (Norte de Canarias).

**Figura 7. Potencia media (kW/m) anual en el litoral español**

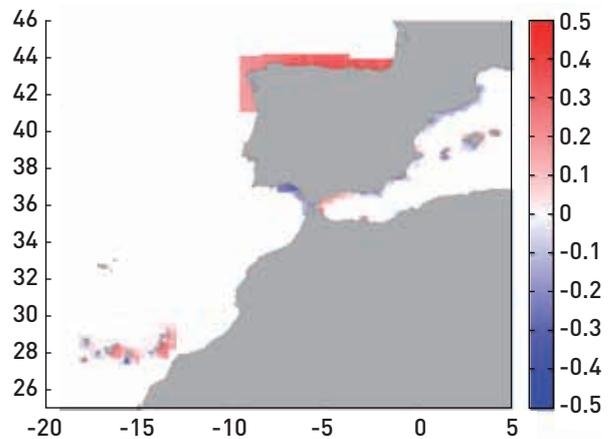


**Figura 8. Potencia media (kW/m) estacional en el litoral español**



Por otro lado, existe una fuerte correlación de la potencia media mensual con los patrones climáticos de escala oceánica: Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y Patrón del Atlántico Este (EA). En la Figura 9 se muestra la correlación de la potencia media mensual con un índice mensual del patrón de la oscilación del Atlántico Norte. Esta fuerte correlación es un indicador de la elevada variabilidad interanual de la potencia media mensual y también del posible uso de la información generada con fines predictivos [a escala de meses].

**Figura 9. Índice de correlación entre la potencia media mensual y la Oscilación del Atlántico Norte**

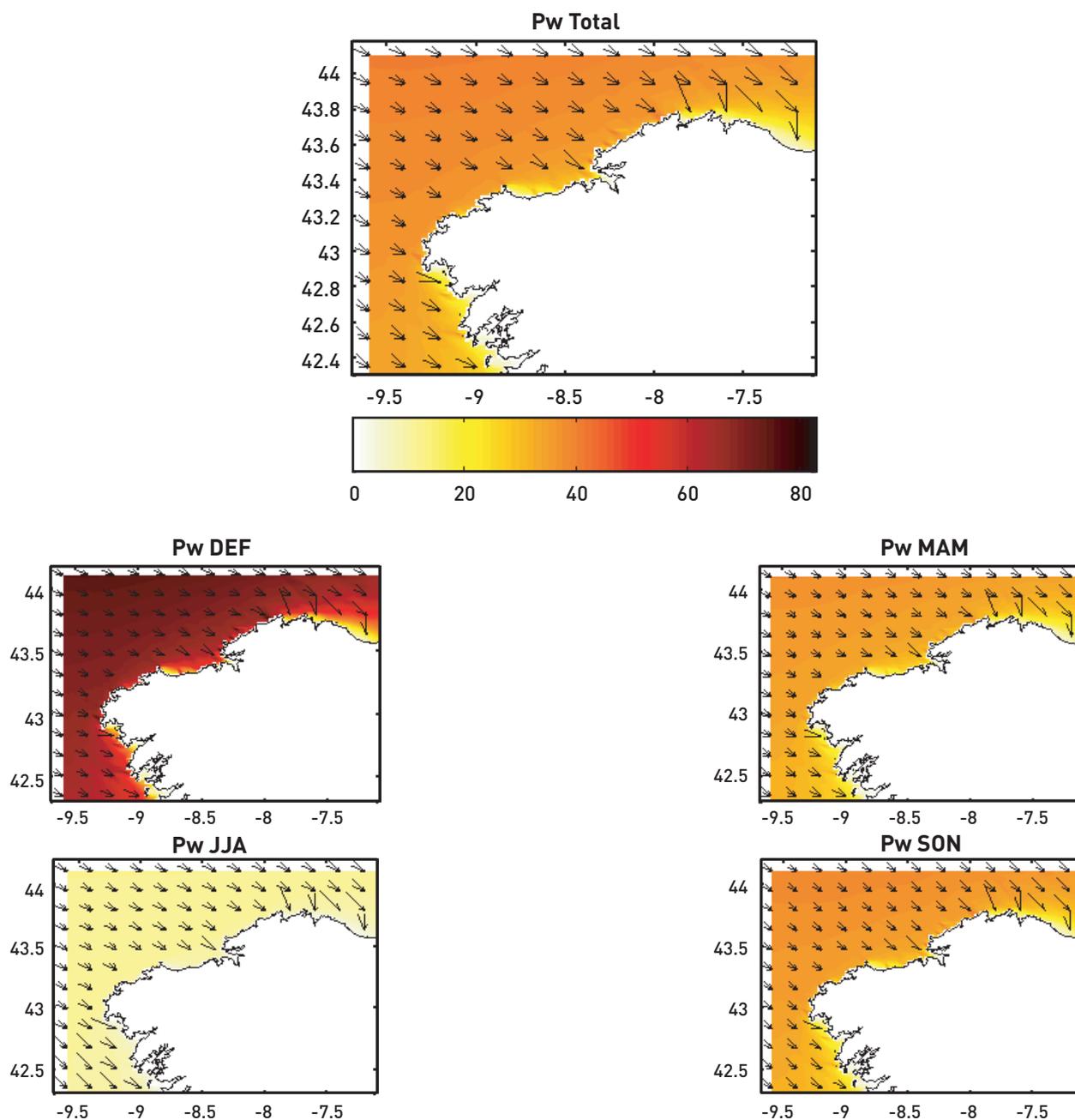


## Mapas obtenidos por malla

Los mapas a nivel de malla permiten visualizar con un mayor detalle las características del recurso energético, no sólo a nivel de la cantidad de potencia, sino también a su distribución direccional. En

la Figura 10 se muestra un ejemplo de la malla de la zona norte de Galicia, en donde se representa, además de la potencia media anual y estacional, los porcentajes por sectores direcciones de 45°. Nótese cómo la mayor cantidad de energía proviene de los sectores WNW y NW.

**Figura 10. Potencia media (kW/m) anual, estacional (DEF, MAM, JJA, SON) en Galicia. Se representa también la distribución porcentual por direcciones (sectores de 45°)**

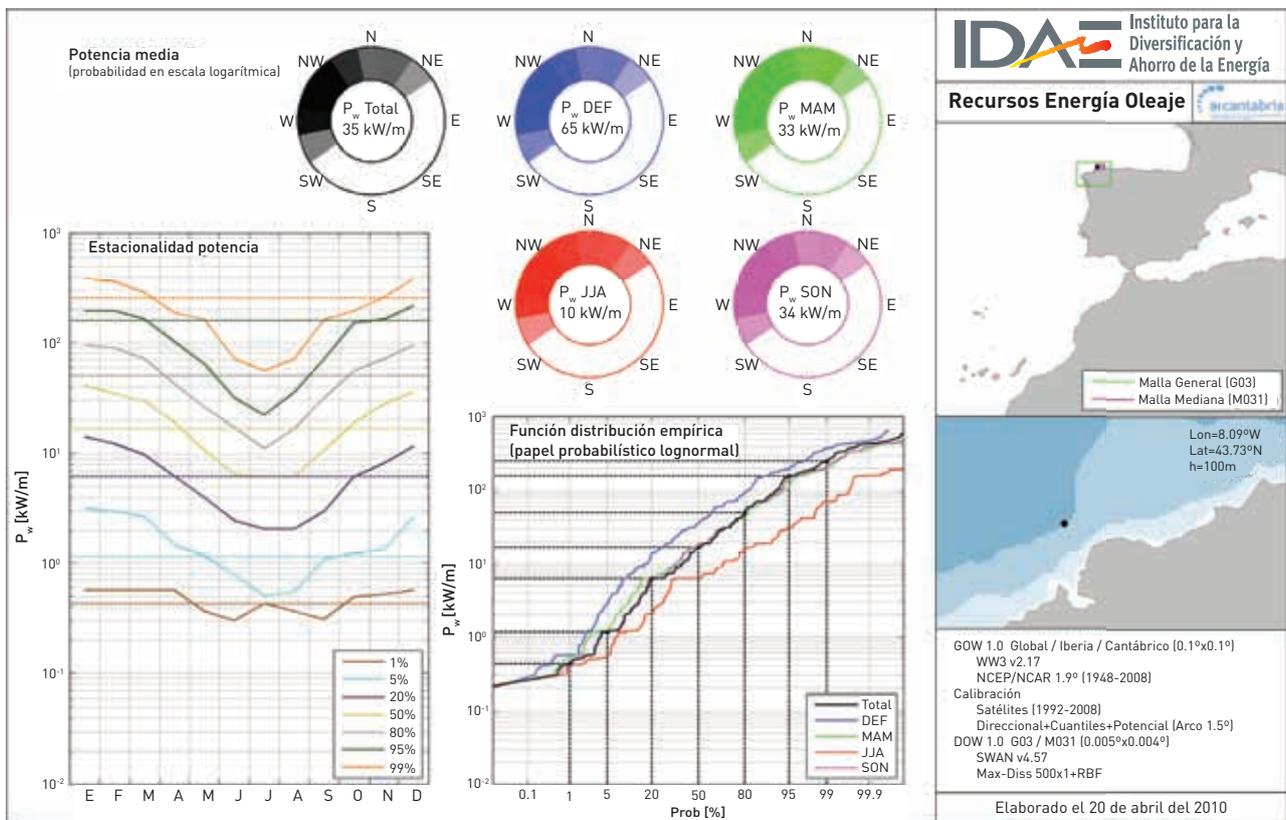


## Fichas resumen

Se ha obtenido la caracterización del recurso de energía a lo largo de la costa española con una resolución espacial de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  a 20, 50, 100 m de calado y en profundidades indefinidas. Esta información se ha almacenado en una ficha para cada punto de interés como la que se muestra en la Figura 11, correspondientes a la profundidad de 100 m. El recurso de energía del oleaje se caracteriza mediante

la potencia media y su distribución en sectores direccionales según la dirección media de la energía del oleaje, total y estacional, la función de distribución empírica de la potencia total y estacional, y la estacionalidad mensual de la potencia a partir de una serie de estadísticas. Además de las anteriores gráficas, se incluye la localización del punto con las características de datos de oleaje, modelos de propagación y metodología de transferencia aplicada para la obtención del recurso energético.

**Figura 11. Ficha con la caracterización de la potencia del oleaje en distintas escalas temporales (total, estacional y climatología mensual)**



# 1 Introducción

## 1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo de este estudio es analizar el potencial del recurso energía del oleaje para el litoral español incluida la península, archipiélago canario y balear para su integración en el Plan de Energías Renovables 2011-2020. Para ello, se elaborará un atlas del potencial del recurso energía del oleaje para el litoral español que incluya la caracterización espacial del flujo medio de energía (magnitud y dirección) desde profundidades indefinidas hasta la costa con una resolución de 200 m y teniendo en cuenta su variabilidad temporal a distintas escalas (mensual, estacional, anual e interanual).

El atlas obtenido se presenta en forma de mapas (potencia media y cuantil del 95% anual, estacional y mensual) y en forma de fichas por puntos separados 10 km a lo largo de la costa a 20 m, 50 m, 100 m de calado y en profundidades indefinidas.

## 1.2 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

A continuación se pasa a describir el contenido de los capítulos de este documento:

En el capítulo 2 se describe la Metodología para el estudio del recurso de energía de oleaje en el litoral español. Tras la definición de los condicionantes espaciales y temporales requeridos en la evaluación del recurso de energía de las olas, se pasa a describir el oleaje a corto plazo desde un punto de vista espectral y el oleaje a largo plazo o clima marítimo. Finalmente, se describe el organigrama de flujo de la metodología de trabajo.

El primer paso de la metodología es la selección de las bases de datos instrumentales y numéricas más adecuadas para la realización del estudio (capítulo 3). En cuanto a las bases de datos instrumentales, se han utilizado las bases de datos de boyas existentes en España, y una base de datos de observaciones de altura de ola por satélite adquirida por IH Cantabria. Las bases de datos de reanálisis numérico de oleaje GOW, del IH Cantabria (GOW 1.0 1948-2008 y GOW 2.1 1989-2008) son las utilizadas en el presente estudio.

Posteriormente, se presenta la metodología de calibración direccional de las bases de datos de oleaje GOW con datos de satélite (capítulo 4) y la validación con registros de las boyas.

En el capítulo 5 se presenta la metodología de transferencia de las dinámicas a aguas someras, la cual se basa en una combinación novedosa de modelos numéricos y matemático-estadísticos (*downscaling* híbrido, dinámico y estadístico).

Finalmente, en el capítulo 6 se presenta la metodología para la obtención del recurso de energía del oleaje a diversas escalas temporales, la validación en las posiciones de las boyas y los resultados obtenidos, tanto mapas del recurso como fichas en diversos puntos a lo largo del litoral.

La exhaustiva validación realizada de las series horarias y de las distribuciones estadísticas de la potencia y dirección a distintas escalas temporales se presenta en forma de fichas en los Anexos 1 y 2.

Los mapas de recurso de energía (potencia media, cuantil del 95%) a distintas escalas (anual, estacional) se presentan en el Anexo 3.

En el Anexo 4 se presenta la localización de los puntos en los que se ha obtenido una ficha resumen con la información generada del recurso de energía y varios ejemplos de las fichas obtenidas.

# **2 Metodología para el estudio del recurso de energía de oleaje en el litoral español**

## 2.1 CONDICIONANTES

Uno de los principales requerimientos de este trabajo es la determinación del recurso energético del oleaje con elevada resolución espacial (200 m desde profundidades indefinidas hasta la costa) y temporal (datos horarios durante al menos 20 años). Estos condicionantes hacen necesario el desarrollo de una metodología que combine las mejores bases de datos disponibles (tanto instrumentales como numéricas) y modelos numéricos de propagación de oleaje que sean capaces de reproducir los procesos de transformación del oleaje (refracción, asomeramiento, generación local, disipación) y sofisticadas herramientas matemático-estadísticas.

Otro importante requisito es la caracterización estadística de los valores medios y extremales del recurso así como evaluar la variabilidad interanual y la estacionalidad y las tendencias de largo plazo. Para poder llevar a cabo estos objetivos es necesario disponer de datos con suficiente cobertura espacial y temporal.

En España existen importantes redes de observación de oleaje (Puertos del Estado, XIOM, etc.) pero a pesar de estar formada por un considerable número de boyas, esta red de observaciones está dispersa en el espacio, no cubriendo todas las áreas del litoral. Además, la longitud de estas series es diferente en cada una de estas boyas, siendo pocas (en general las costeras) las que cuentan con registros superiores a los 15 años.

Por tanto, es necesario recurrir a las bases de datos de reanálisis del oleaje. Estos datos se generan a partir de modelos numéricos capaces de simular los procesos que dan lugar a la generación del oleaje a partir de forzamientos atmosféricos. De esta manera, se dispone de series históricas de los parámetros del oleaje de mucha más larga duración que los existentes en las bases instrumentales y de una mayor resolución espacial. Por tanto, esta información permite un análisis homogéneo del recurso y una caracterización estadística más fiable en diferentes escalas temporales (mensual, estacional y largo plazo).

En este trabajo se utilizan las bases de datos del reanálisis GOW (*Global Ocean Waves*) del Instituto de Hidráulica Ambiental "IH Cantabria" formada por 61 años de datos horarios de parámetros de oleaje (20 años en el Mediterráneo), en todos los

nodos de una malla de cálculo de alta definición de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  en las proximidades del litoral español. Esta base de datos presenta una serie de ventajas respecto a otras bases de datos de reanálisis. Además de una mayor cobertura espacial y temporal, se dispone de los espectros direccionales de oleaje en una serie de puntos a lo largo del litoral español cada  $0.1^\circ$ , lo cual nos permite definir más correctamente el oleaje cerca de la costa. Esta base de datos se describe con mayor detalle en el apartado 3.4.1 del capítulo 3 *Bases de datos utilizadas*.

Por otro lado, aunque estas bases de datos representan una aproximación a la realidad, al estar generadas numéricamente, requieren de una calibración con datos instrumentales. Además, estos datos de reanálisis caracterizan generalmente el oleaje en aguas profundas, siendo necesaria la propagación del mismo hasta costa para la caracterización del recurso energético en aguas intermedias o someras. Esta serie de condicionantes implican la aplicación de una metodología que sea capaz de determinar el recurso energético en las proximidades de la costa partiendo de estos datos de reanálisis en aguas profundas. En el apartado 2.4 de este capítulo se define el organigrama de la metodología.

A continuación, se realiza una breve introducción de los conceptos de teoría de oleaje (2.2), descripción del oleaje a corto plazo (2.3) y a largo plazo (2.4) para, finalmente, detallar el organigrama de la metodología para la evaluación del recurso de la energía del oleaje (apartado 2.5).

## 2.2 INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DEL OLAJE

El movimiento de la superficie del mar que denominamos oleaje es un fenómeno omnipresente en la superficie de cualquier recinto con agua: piscinas, estanques, lagos, embalses, bahías, mares y océanos. Su estudio, sin embargo, es complejo, y no ha sido hasta la segunda mitad del siglo XX cuando los primeros modelos analíticos han empezado a ser capaces de ofrecer una descripción completa del oleaje. Los recientes avances en la instrumentación de medida y en la capacidad de proceso de datos han permitido el muestreo del océano a velocidades y escalas anteriormente impensables. En las últimas décadas se han obtenido numerosos

resultados fundamentales, documentados en cientos de artículos científicos.

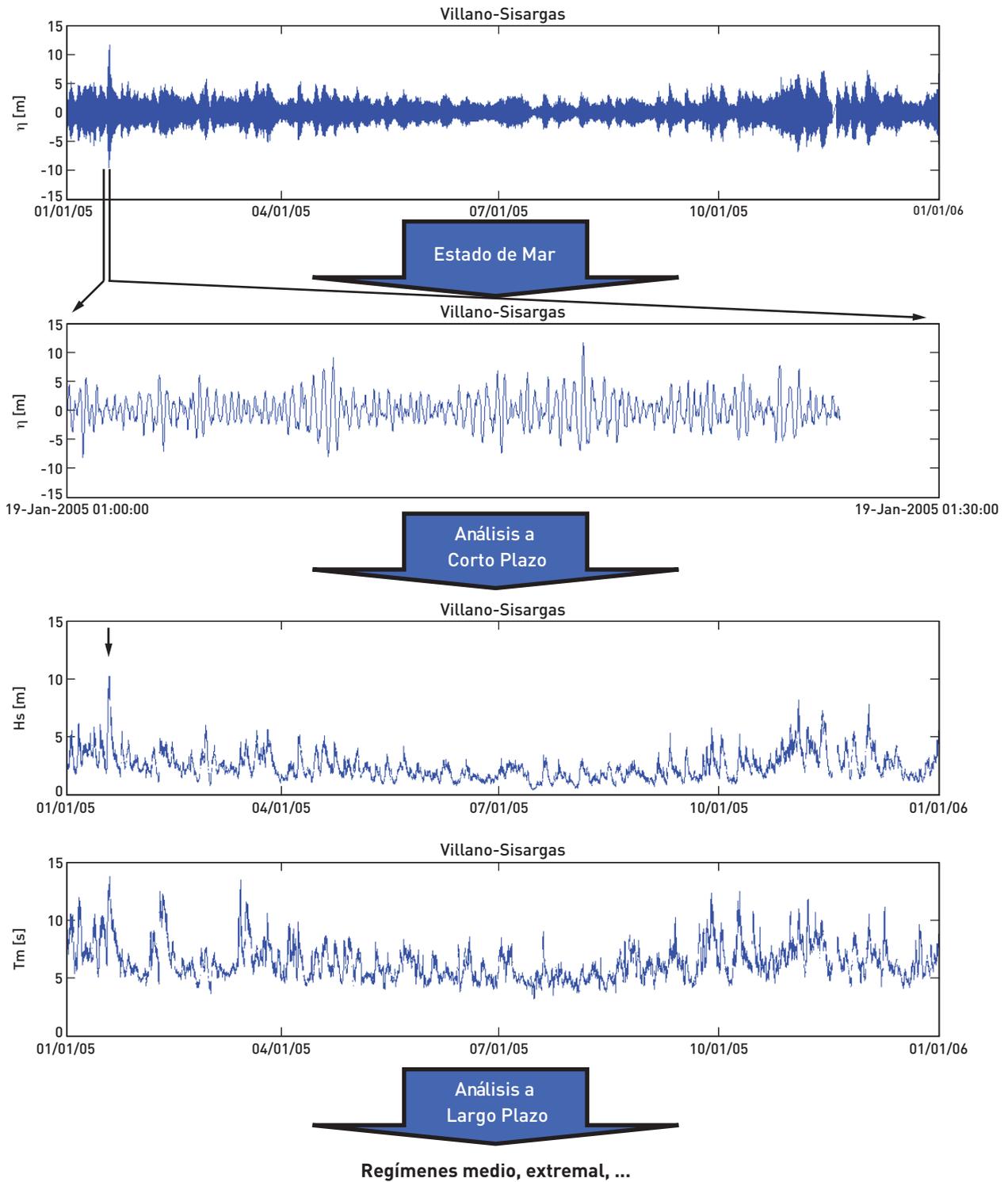
Como veremos más adelante, el oleaje se analiza como un proceso estocástico. Para la simplificación de dicho análisis se suele requerir que el proceso cumpla una serie de propiedades, entre ellas que sea estacionario o al menos, débilmente estacionario (veremos más adelante con detalle las definiciones de estas propiedades). Esta condición implica que los estadísticos del proceso (por ejemplo, media y varianza) se mantengan invariables ante el paso del tiempo. Sin embargo, el oleaje es la respuesta de la superficie del mar a condiciones atmosféricas no estacionarias, luego para poder asumir la estacionariedad es necesario trabajar con "instantáneas" del proceso de una duración tal que, durante ese tiempo la variación de los estadísticos del proceso sea imperceptible. Estos intervalos de tiempo en que el proceso se puede considerar débilmente estacionario se denominan **estados de mar**. La duración de los estados de mar es un compromiso entre un tiempo lo suficientemente corto como para que el proceso sea débilmente estacionario y lo suficientemente largo como para que contenga la necesaria información estadística del proceso. En la actualidad, se utilizan estados de mar de una hora de duración, aunque el límite inferior por información estadística suele ser de unos 30 minutos.

El análisis estadístico y espectral del oleaje en estados de mar, se denomina **análisis a corto plazo**. Los resultados del análisis a corto plazo son una serie de funciones (función de densidad espectral, funciones estadísticas), que pueden ser descritas con unos pocos **parámetros de estado de mar** (por ejemplo, altura de ola del momento de orden cero espectral,  $H_{m0}$ , periodo de pico espectral,  $T_p$ , altura de ola significativa,  $H_s$ , periodo medio,  $T_z$ , etc.). Conocidos los parámetros de estado de mar, el estado de mar puede ser caracterizado tanto espectral como estadísticamente o, en otras palabras, el proceso estocástico de origen puede ser reconstruido o simulado.

Los parámetros de estado de mar, a su vez, varían en cada estado de mar, constituyendo, a lo largo del tiempo, una **serie temporal de estados de mar**. Las características estadísticas de esta serie describen el **clima marítimo a largo plazo** en una determinada zona. En la Figura 2.1 se resume el proceso de análisis del oleaje a corto y largo plazo. Este capítulo de análisis del oleaje

se organiza teniendo en cuenta esta doble escala temporal en el análisis, corto plazo o de estados de mar y largo plazo o clima marítimo, realizado sobre la serie temporal de los parámetros de estado de mar.

**Figura 2.1. Análisis del oleaje a corto y largo plazo. a) envolventes superior e inferior de la serie temporal de desplazamiento vertical de la superficie libre. b) ampliación de un estado de mar del registro anterior. c) serie temporal del parámetro de estado de mar Hs y Tm, obtenidos del análisis espectral de los estados de mar del registro a)**



## 2.2.1 Algunas consideraciones sobre la teoría lineal de ondas de gravedad

En este apartado se presentan algunos conceptos y definiciones referentes a la teoría lineal de ondas, que faciliten la comprensión de los términos y variables asociados al oleaje en los capítulos posteriores, así como la correcta interpretación de los mapas de distribución de la potencia de la energía del oleaje. No es objetivo de este capítulo la realización de una presentación exhaustiva de la teoría lineal de ondas, que puede encontrarse en la literatura especializada. Al primer orden de aproximación, la solución al problema de contorno que supone una onda de gravedad desplazándose con forma constante sobre un fondo de profundidad  $h$ , en un fluido sin viscosidad y con flujo irrotacional, viene determinado por el siguiente potencial de velocidades,  $\phi$ :

$$\phi(x, y, z, t) = \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \sin(kx \cos \theta + ky \sin \theta - \omega t) = \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh(ks)}{\cosh(kh)} \sin(\delta) \quad (2.1)$$

donde:

$g$ : Aceleración de la gravedad  $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$

$H$ : Altura de ola (distancia vertical desde la cresta al seno de la onda)

$\omega$ : Frecuencia angular de la onda,  $\omega = 2\pi/T$

$T$ : Periodo de la onda

$k$ : Número de onda,  $K = 2\pi/L$

$L$ : Longitud de onda

$z$ : Coordenada vertical. Origen en la superficie, positiva hacia arriba

$h$ : Profundidad del agua (distancia positiva desde la superficie al fondo)

$x$ : Coordenada horizontal  $x$

$y$ : Coordenada horizontal  $y$

$t$ : Coordenada de tiempo

$\theta$ : Ángulo entre la dirección de propagación de la onda y el eje  $x$

$\delta$ : Fase de la onda

La frecuencia angular, el número de onda y la profundidad (o entre el periodo, la longitud de onda y la profundidad) están ligados por la relación de dispersión:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (2.2)$$

A partir del potencial de velocidades se pueden obtener todas las variables cinemáticas de la onda, en particular:

Desplazamiento vertical de la superficie libre:

$$\eta(x, y, t) = \frac{H}{2} \cos(\delta) \quad (2.3)$$

Componentes de la velocidad de las partículas bajo la onda:

$$\begin{aligned} v_x = u &= \frac{gkH}{2\omega} \frac{\cosh(ks)}{\cosh(kh)} \cos \theta \cos(\delta) \\ v_y = v &= \frac{gkH}{2\omega} \frac{\cosh(ks)}{\cosh(kh)} \sin \theta \cos(\delta) \\ v_z = w &= \frac{gkH}{2\omega} \frac{\sinh(ks)}{\cosh(kh)} \sin(\delta) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Energía cinética, energía potencial y energía total media temporal, por unidad de área horizontal:

$$\overline{E_p} = \overline{E_c} = \rho g \frac{H^2}{16}, \quad \overline{E} = \overline{E_p} + \overline{E_c} = \rho g \frac{H^2}{8} \quad (2.5)$$

donde  $\rho$  es la densidad del agua

Celeridad de la onda, o velocidad de propagación de la forma:

$$c = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} = \frac{g}{\omega} \tanh(kh) \quad (2.6)$$

Celeridad de grupo o velocidad de propagación de la energía

$$c_g = \frac{c}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (2.7)$$

Flujo de energía medio (temporal en el tiempo), por unidad de anchura

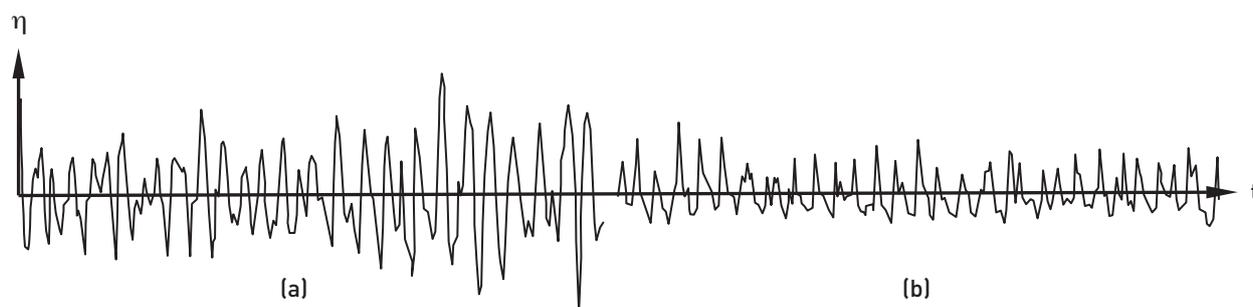
$$\overline{F} = \overline{E} c_g \quad (2.8)$$

## 2.2.2 El oleaje considerado como proceso estocástico

El desplazamiento vertical de la superficie del mar generado por el viento en el océano cambia aleatoriamente con el tiempo. Por ello, las olas generadas por el viento (**mar de viento o SEA**) en un punto presentan características (altura, período) variables aleatoriamente de una ola a otra. Con frecuencia se observa que las olas rompen cuando su peralte supera un determinado límite. Cuando las olas se propagan fuera del área de generación (fuera de la zona donde sopla el viento), los procesos de dispersión y disipación regularizan la superficie del mar (**mar tendida, de fondo o SWELL**).

Otro cambio importante de la superficie del mar se observa cuando la profundidad disminuye y la cinemática del oleaje alcanza el fondo. En la Figura 2.2 puede observarse un ejemplo compuesto por un registro temporal en un punto en profundidades indefinidas seguido del registro temporal del mismo oleaje en otro punto en profundidades someras. Como puede verse, en el primer registro, la altura de crestas y senos y las pendientes frontales y traseras de las crestas son similares. Sin embargo, en el segundo registro, la altura de las crestas es superior a la altura de los senos y la pendiente frontal de las crestas es superior a la pendiente trasera de las mismas.

**Figura 2.2. Registros temporales del oleaje: a) profundidades indefinidas y b) profundidades reducidas**



Como se ve en la Figura 2.2, la evaluación de las propiedades del oleaje es prácticamente imposible en un análisis ola a ola en el dominio del tiempo. Sin embargo, si consideramos el oleaje como un proceso estocástico, entonces es posible la evaluación de sus propiedades estadísticas en los dominios de la frecuencia y de la probabilidad.

En la aproximación estocástica se asume que el oleaje en profundidades indefinidas es un proceso estocástico gaussiano, es decir que el desplazamiento vertical de la superficie libre se distribuye según una normal. Esta hipótesis no se cumple en profundidades reducidas, por la asimetría horizontal del perfil.

## 2.3 ANÁLISIS DEL OLEAJE A CORTO PLAZO: DESCRIPCIÓN ESPECTRAL DEL ESTADO DE MAR

Para poder realizar la representación matemática del oleaje regular es habitual utilizar el desplazamiento vertical de la superficie libre del mar. Supóngase que se considera una onda progresiva en profundidades indefinidas con el sistema de coordenadas  $X, Y, Z$  fijo en el espacio, con  $Z=0$  en el nivel medio y positivo hacia arriba y sea  $\theta$  el ángulo que forma la dirección de propagación con el eje  $X$ , con sentido positivo contrario a las agujas del reloj. Con estos ejes, la superficie libre,  $\eta(x,y,t)$  de una onda propagándose en profundidades indefinidas (la ola no nota el fondo) puede

ser descrita, en primera aproximación, por una senoide definida por:

$$\eta(x, y, t) = a \cos \left\{ \frac{\omega^2}{g} (x \cos \theta + y \sin \theta) - \omega t + \varepsilon \right\} \quad (2.9)$$

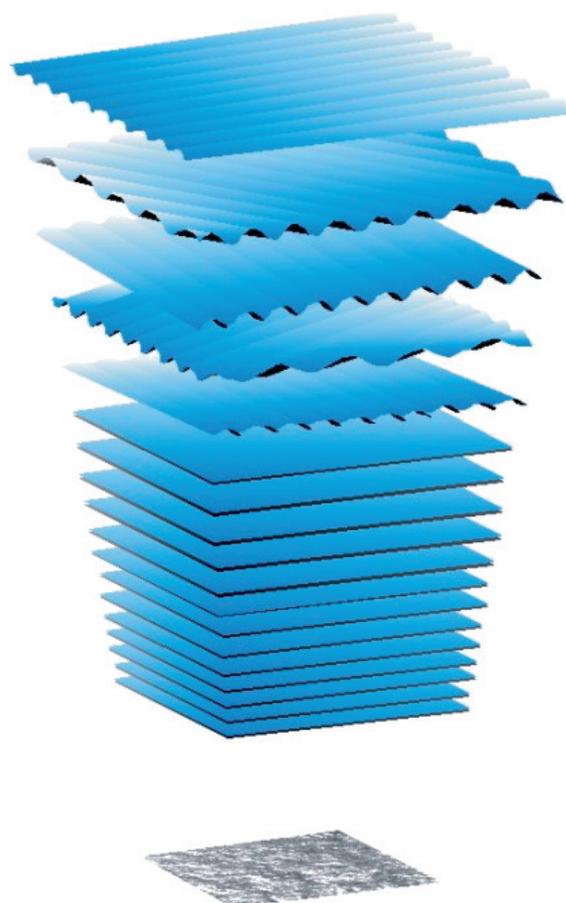
donde  $a$  es la amplitud de la onda,  $\omega$  su frecuencia angular y  $\varepsilon$  su fase.

Asúmase ahora que la superficie libre puede ser interpretada como la suma de un número infinito de componentes sinusoidales de amplitudes, frecuencias y ángulos  $a_j$ ,  $\omega_j$  y  $\theta_j$  aleatorios, cubriendo el rango  $0 < a_j < \infty$ ,  $0 < \omega_j < \infty$ ,  $-\pi < \theta_j < \pi$ , respectivamente. La fase  $\varepsilon$  es también aleatoria, con distribución uniforme en el rango  $-\pi < \varepsilon_j < \pi$  y su magnitud depende de la frecuencia y del ángulo. De esta manera, se puede describir el desplazamiento vertical de la superficie libre del mar debido a un oleaje irregular mediante el sumatorio:

$$\eta(x, y, t) = \sum_j a_j \cos \left\{ \frac{\omega_j^2}{g} (x \cos \theta_j + y \sin \theta_j) - \omega_j t + \varepsilon_j(\omega_j, \theta_j) \right\} \quad (2.10)$$

En la Figura 2.3 se muestra una representación gráfica de la ecuación 2.10.

**Figura 2.3. Descripción de la superficie libre del mar mediante el sumatorio de infinitas componentes sinusoidales con dirección, amplitud, frecuencia y fase diferentes. Tomada de Holthuijen (2007)**

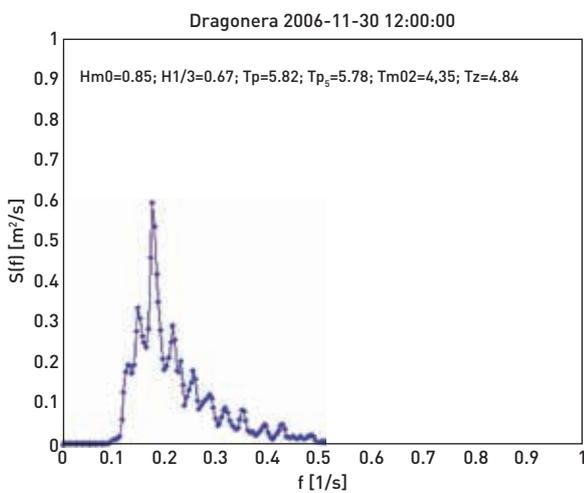


**La energía total del oleaje por unidad de área horizontal, promediada en el tiempo, expresada en función de la frecuencia angular de las ondas componentes,  $\omega$ , se representa mediante la función de densidad espectral del desplazamiento vertical de la superficie libre, o espectro del oleaje,  $S(\omega)$ , ver Figura 2.4.**

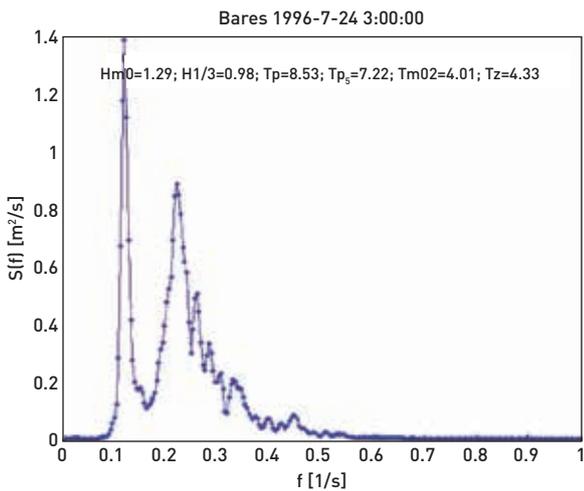
El espectro del oleaje juega un importante papel en la evaluación de las propiedades estadísticas del mismo. El área bajo la curva,  $m_0$ , se denomina **momento de orden cero espectral** y representa la severidad del oleaje. El parámetro del oleaje más utilizado para definir la severidad del oleaje, **la altura de ola del momento de orden cero, es  $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$** . Si el oleaje tiene un espectro de banda estrecha (la energía concentrada en las frecuencias alrededor del pico),  $H_{m0}$  es prácticamente igual a la

**altura significativa del oleaje,  $H_s$  o  $H_{1/3}$** , que es la altura media de las  $N/3$  mayores olas del estado de mar de  $N$  olas representado por  $S(\omega)$ . La altura de ola significativa del oleaje cuyo espectro se muestra en la Figura 2.4 es 0,85 m. Como puede verse, el espectro tiene un máximo absoluto en la frecuencia  $\omega = 1,08$  rad/s (0,17 Hz). Esto implica que las olas cuyo periodo y longitud de onda se aproximan a  $T=2\pi/\omega = 5,8$  s y  $L=2\pi g/\omega^2 = 53$  m contienen la mayor parte de la energía en ese estado de mar.

**Figura 2.4. Ejemplo de un oleaje de generación por viento (SEA)**



**Figura 2.5. Ejemplo del espectro de un oleaje en el que se combinan mar de viento y mar de fondo**



La causa más frecuente del oleaje es el viento. Sin embargo, una vez generado el oleaje por el viento, éste se propaga a costa de su propia energía, por lo que en general, en un punto determinado la superficie libre del mar estará perturbada por el

oleaje generado localmente por el viento (mar de viento o SEA) y por el oleaje que se ha propagado hasta dicho punto procedente de otras zonas de generación (mar de fondo, mar tendida o SWELL). En muchas ocasiones, es posible observar grandes oleajes de fondo propagándose en dirección contraria al viento y al oleaje generado por el viento. Cuando el mar de fondo se mezcla con el mar de viento, es difícil identificarlos en el registro de la superficie libre. Sin embargo, quedan claramente separados en el espectro. La Figura 2.5 muestra el caso de un espectro con una altura de ola significativa de 1,3 m. Como puede verse, el espectro tiene dos picos importantes, uno correspondiente a la frecuencia 0,73 rad/s ( $T = 8,6$  s) y el otro a la frecuencia 1,4 rad/s ( $T = 4,5$  s), de menor amplitud. En este caso, una mar de fondo de 8,6 s de periodo de pico se cruza con un oleaje de viento de 4,5 s de periodo de pico, generado localmente.

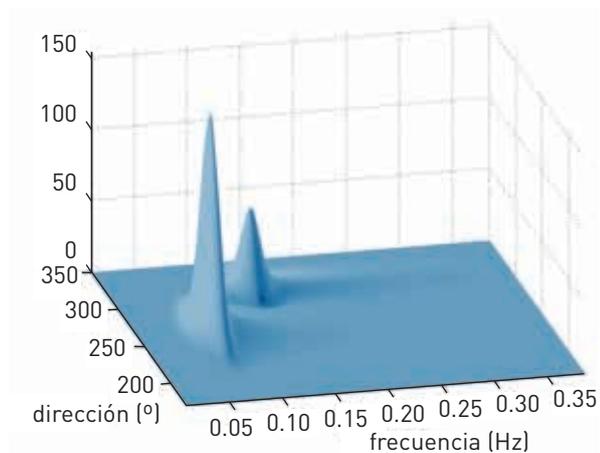
Como las olas en el océano no se mueven necesariamente en la misma dirección que el viento, la energía del oleaje representada en el espectro es la suma de las energías propagándose en muchas direcciones. Por lo tanto se hace necesario considerar una **función de densidad espectral direccional,  $S(\omega, \theta)$** , que representa la energía total por unidad de área horizontal, promediada en el tiempo, existente en cada intervalo de frecuencia  $\Delta\omega$  y en cada intervalo de dirección  $\Delta\theta$ . Si la energía por unidad de área total del oleaje, promediada en el tiempo, en el recinto  $(\Delta\omega, \Delta\theta)$  se representa por  $(1/2)\rho g a_j^2$ , donde  $a_j$  es una variable aleatoria positiva, entonces se puede escribir, ignorando el factor  $\rho g$ :

$$S(\omega, \theta) \Delta\omega \Delta\theta \cong \frac{1}{2} a_j^2 \tag{2.11}$$

El promediado temporal de la energía total de las olas de todas las frecuencias y direcciones de un oleaje viene dado por:

$$\sum_{\Delta\omega} \sum_{\Delta\theta} \frac{1}{2} a_j^2 \cong \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} S(\omega, \theta) d\omega d\theta \tag{2.12}$$

La ecuación (2.12) es la base de la descripción estocástica del oleaje.

**Figura 2.6. Ejemplo de espectro direccional**


En la Figura 2.6 se muestra una representación del espectro direccional medido en un punto y estado de mar. Como puede verse en la figura, el espectro está formado por dos oleajes de procedencia diferente:

SWELL del NW: Dirección de pico: 323°, frecuencia de pico: 0,063 Hz (15,9 s).

SEA del WSW: Dirección de pico: 261°, frecuencia de pico: 0,12 Hz (8,3 s).

De los dos oleajes, el SEA de 8,3 s es el más energético, ya que la integración del volumen dado por la ecuación (2.12) daría el valor más elevado.

### 2.3.2 Parámetros espectrales

El espectro del oleaje contiene gran cantidad de información que puede ser representada mediante la introducción de una serie de parámetros que sirven para conocer las características principales de dicho espectro. Algunos de estos parámetros espectrales aparecen frecuentemente en las funciones de distribución estadísticas asociadas al oleaje.

Se define el **momento de orden n** de la función de densidad espectral como:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega; n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.13)$$

El **momento de orden cero**,  $m_0$ , coincide con la varianza total de proceso,  $\sigma^2$ . Si el proceso que se representa es la variación vertical de la superficie libre, la varianza coincide con el cuadrado del

desplazamiento cuadrático medio,  $\eta_{rms}$  magnitud proporcional a la energía por unidad de área del estado de mar.

El momento de orden cero,  $m_0$ , está relacionado con una altura de ola representativa del estado de mar,  **$H_{m0}$ , o altura de ola del momento de orden cero** mediante la expresión:

$$H_{m0} = 4.004 \sqrt{m_0} \quad (2.14)$$

Si el proceso es de banda estrecha y la distribución de altura de ola es Rayleigh, se puede demostrar que:

$$H_{m0} = 4.004 \cdot \eta_{rms} = H_s \quad (2.15)$$

donde  **$H_s$  es la altura de ola significativa**, o altura media de las  $N/3$  mayores olas de un registro de la superficie libre compuesto de  $N$  olas.

Además, los dos primeros momentos son de especial relevancia, dado que sirven para definir la frecuencia media, su período asociado, el período medio de paso ascendente por cero y el período asociado a la energía:

$$\bar{\omega} = \frac{m_1}{m_0}; \bar{T} = 2\pi \frac{m_0}{m_1}; \bar{T}_z = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}; \bar{T}_{-10} = 2\pi \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (2.16)$$

El flujo medio de energía, en lo sucesivo potencia del oleaje, es la magnitud que se emplea en el cálculo de la potencia disponible en un estado de mar. La expresión (2.8) del flujo de energía representa la potencia media en un periodo, por unidad de anchura, que atraviesa un plano perpendicular a la dirección de propagación que se extendiera desde la superficie hasta el fondo. Si dicho estado de mar está representado por su espectro direccional  $S(\omega, \theta)$  (que recordemos representa la energía por unidad de área asignada a cada componente de frecuencia  $\omega$  y dirección  $\theta$ ) el flujo de energía medio temporal que atraviesa un cilindro vertical de diámetro unidad extendido desde la superficie hasta el fondo viene dado por la suma de todos los flujos de energía (2.8) asignados a cada componente:

$$P_w = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} c_g(\omega, h) S(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad (2.17)$$

En lo que sigue, a la potencia media horaria asociada a un estado de mar se la denomina potencia o potencia de oleaje.

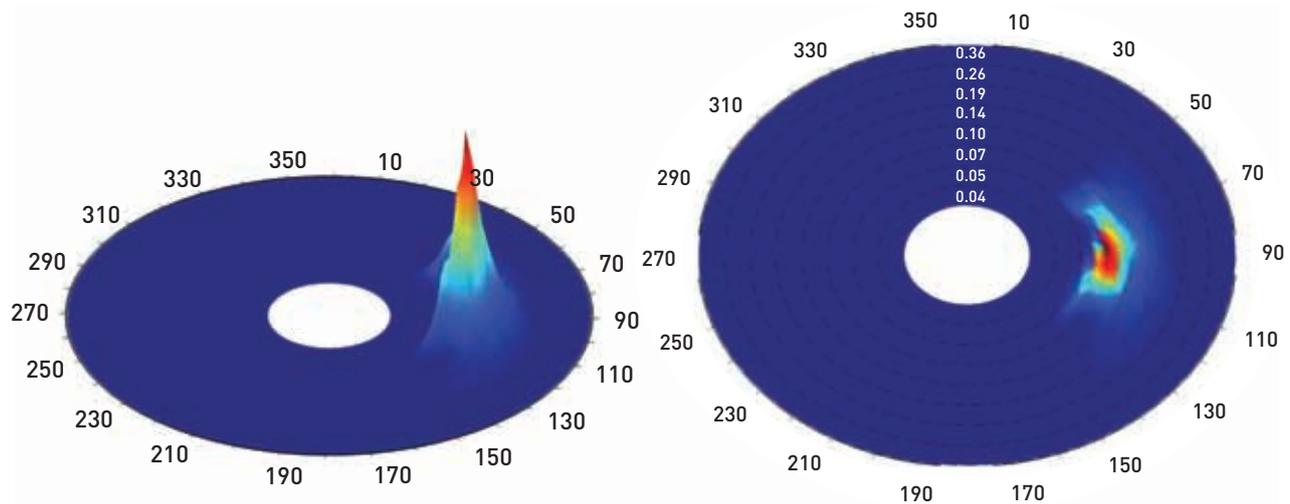
La dirección media de la potencia del oleaje viene definida como:

$$\theta_p = \arctan \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty c_g(\omega, h) S(\omega, \theta) \sin(\theta) d\omega d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty c_g(\omega, h) S(\omega, \theta) \cos(\theta) d\omega d\theta} \quad (2.18)$$

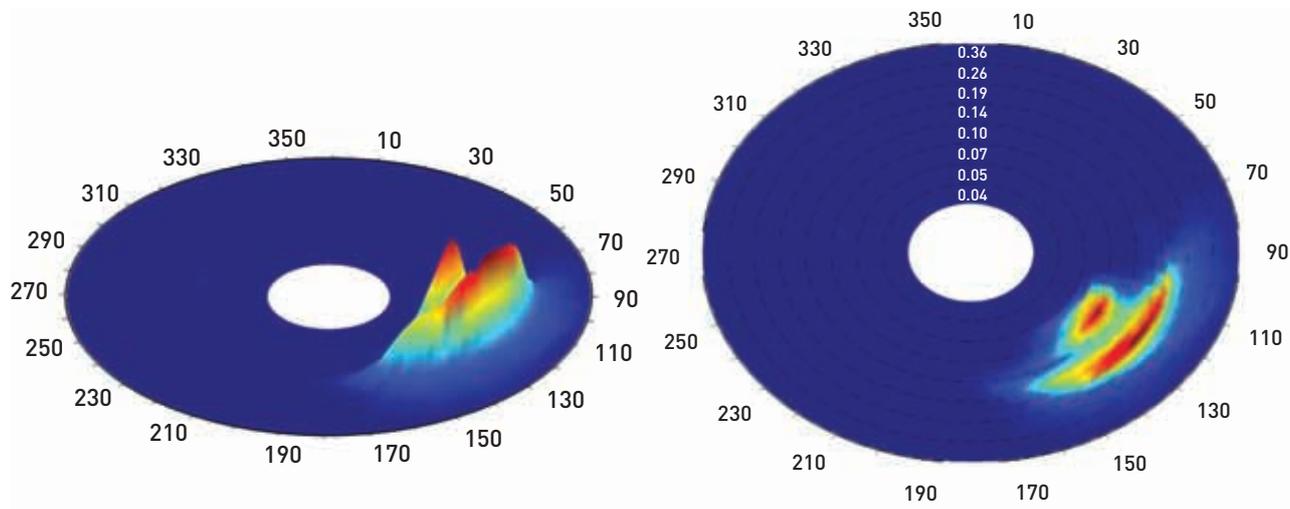
Los estados de mar de las bases de datos de reanálisis suelen definirse mediante los parámetros espectrales  $H_s$ ,  $T_m$ ,  $T_p$  y  $\theta_m$ , y en algunos casos, también se dispone de los parámetros espectrales de las componentes sea y swell del espectro. Esta definición de los estados de mar implica adoptar una determinada forma espectral para caracterizar la distribución de la energía del estado de mar.

La ventaja de la base de datos GOW que se utiliza en este trabajo es que se dispone de los espectros en una serie de puntos en aguas profundas a lo largo de todo litoral y, por tanto, se tiene una mejor definición de la energía del espectro. En las Figuras 2.7, 2.8 y 2.9 se muestran unos ejemplos de espectros de la base de datos GOW en la zona del Mediterráneo, indicándose los parámetros espectrales correspondientes. En los casos de las Figuras 2.8 y 2.9 se puede observar cómo la distribución de la energía no se parece a la forma espectral JONSWAP más habitualmente utilizada. En ellas se observa que la energía no se concentra en una única frecuencia de pico o entorno a una determinada frecuencia como se asume para el espectro JONSWAP.

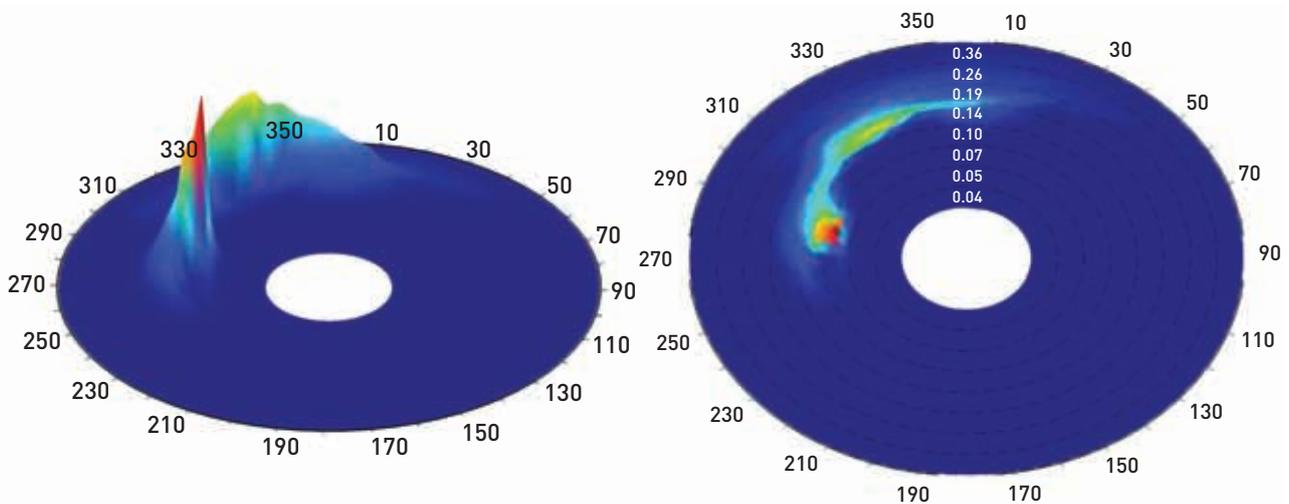
**Figura 2.7. Espectro de un estado de mar con  $H_s = 6,93$  m;  $T_m = 9,89$  s;  $\theta_m = 90.2^\circ$  generado en el Mediterráneo**



**Figura 2.8. Espectro de un estado de mar con  $H_s = 3,02$  m;  $T_m = 6,9$  s;  $\theta_m = 124.8^\circ$  generado en el Mediterráneo**



**Figura 2.9. Espectro de un estado de mar con  $H_s=2,84$  m;  $T_m=7,20$  s;  $\theta_m=323.4^\circ$  generado en el Mediterráneo**



A modo de resumen, en este trabajo se van a utilizar los siguientes parámetros espectrales:  $\{H_{m0}, T_{02}, T_p, \theta_m, P_w, \theta_p\}$ .

## 2.4 DESCRIPCIÓN DEL OLAJE A LARGO PLAZO: CLIMA MARÍTIMO

En las secciones anteriores, se ha descrito el oleaje en el corto plazo, suponiendo condiciones estacionarias a partir del concepto de estado de mar. En la caracterización del oleaje en el largo plazo, la descripción estadística implica la disponibilidad de series temporales con extensiones de al menos unos 10 años. En este caso, las condiciones ya no son estacionarias y el tratamiento es totalmente diferente al corto plazo. En la escala del largo plazo, cada estado de mar es sustituido por los valores de los parámetros espectrales indicados anteriormente. Esta secuencia temporal de parámetros puede ser analizada para estimar las características estadísticas del oleaje en el largo plazo.

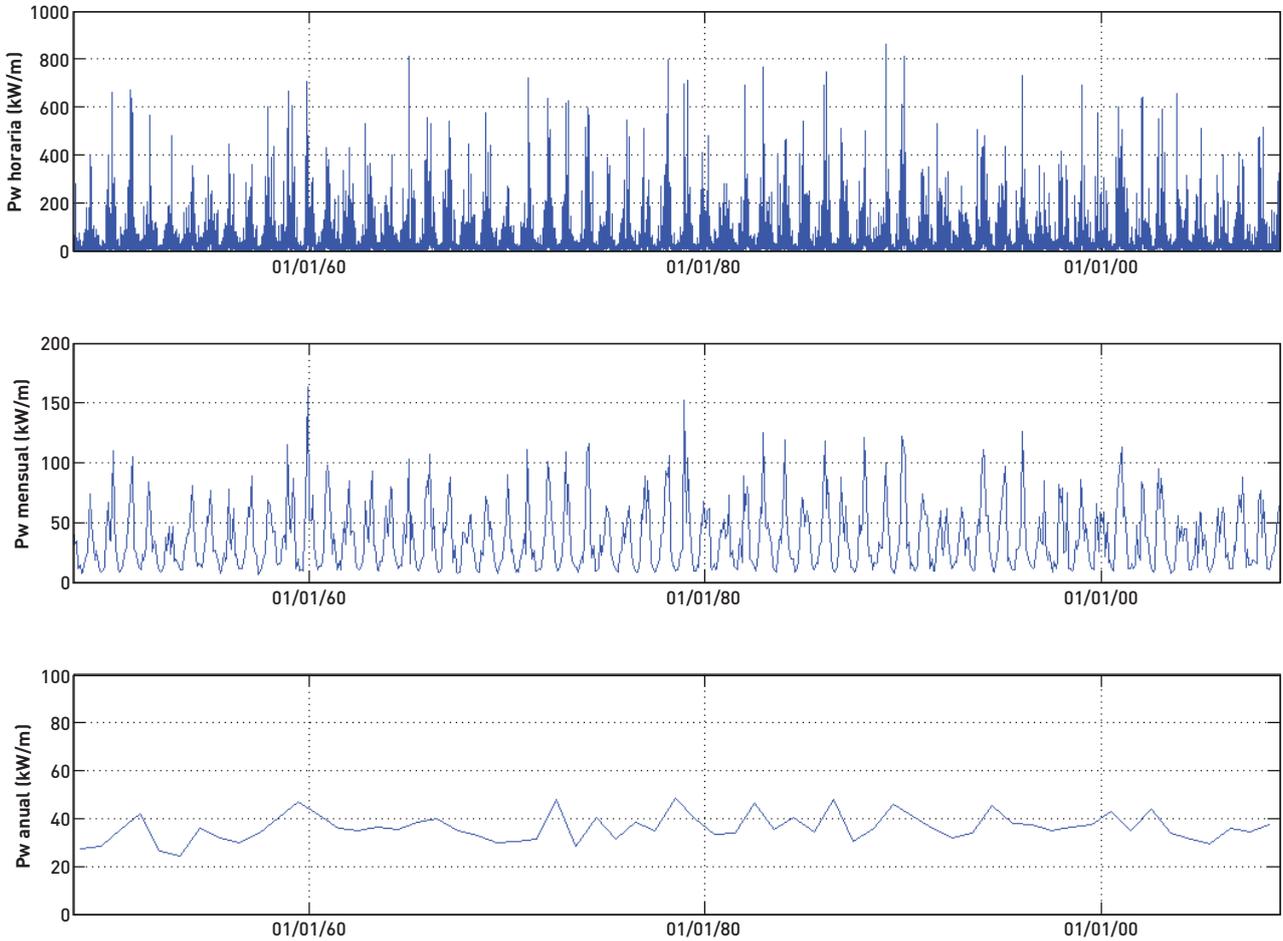
En este trabajo se hace uso de la estadística descriptiva y de las distribuciones estadísticas empíricas para la definición del oleaje en el largo plazo. La estadística descriptiva nace de la necesidad de extraer y resumir la información relevante contenida en grandes volúmenes de datos. Los métodos más comunes para medir y describir la variabilidad de una muestra de datos consisten en

tablas y gráficos para representar la distribución de frecuencias de datos y estadísticos para calcular las medidas más importantes de dicha distribución.

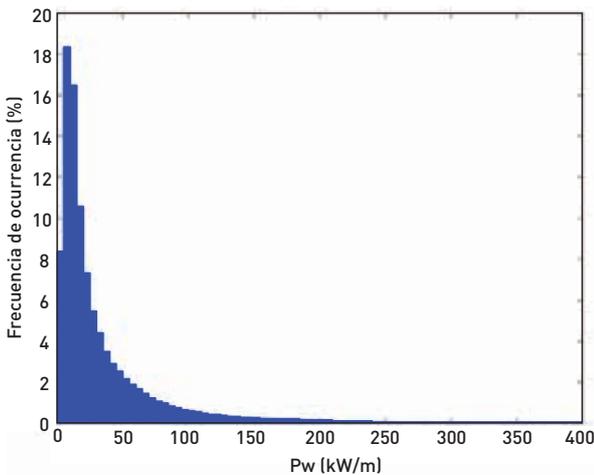
El tipo de variables que se van a estudiar (altura de ola significativa, periodo de pico, dirección media, potencia y dirección media de la energía del oleaje) consisten en variables cuantitativas discretas unidimensionales y bidimensionales (por ejemplo, si se desea analizar de forma conjunta la potencia y la dirección media de la energía del oleaje).

A modo de ejemplo, se analiza uno de los resultados obtenidos en este trabajo. Para ello se considera la serie temporal de la potencia del oleaje en estados de mar horarios reconstruida en la posición de la boya de Villano-Sisargas (Figura 2.10). Uno de los gráficos más frecuentes para describir variables es el histograma (Figura 2.11). En la escala del eje de abscisas aparecen las marcas de clases que cubre el rango de los datos; en la escala del eje de ordenadas aparecen las frecuencias relativas (%) de cada intervalo. Este gráfico nos informa que la mayor cantidad de datos presentan una potencia del oleaje menor a los 50 kW/m, y los estados de mar más energéticos presentan una potencia del oleaje próxima a los 900 kW/m.

**Figura 2.10. Serie temporal de  $P_w$  horaria, mensual y anual en la posición de la boya Villano-Sisargas**

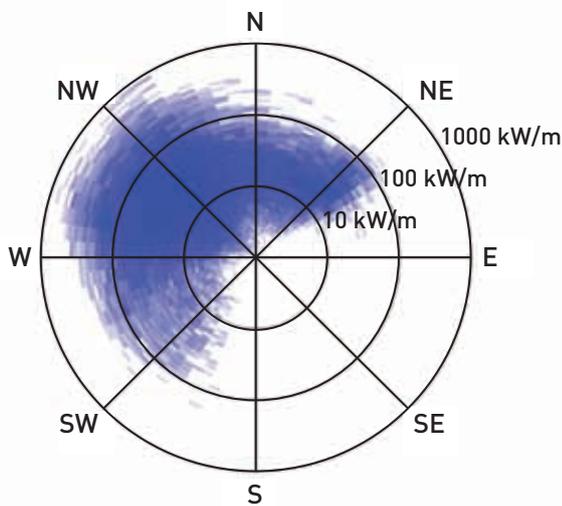


**Figura 2.11. Histograma de  $P_w$  horaria en la posición de la boya Villano-Sisargas**



Una forma muy habitual de representar la información histórica del oleaje es mediante las rosas de oleaje en las que se presenta la intensidad y frecuencia del altura de ola del oleaje respecto a su dirección de procedencia. Como estamos interesados en caracterizar el recurso de energía del oleaje, se puede particularizar esta rosa para la potencia y la dirección media de la energía. En la Figura 2.12 se muestra un ejemplo de rosa o histograma bidimensional de potencia y dirección media ( $P_w, \theta_p$ ). Este tipo de gráficas nos aportan de manera sintetizada una caracterización de la potencia del oleaje en magnitud, frecuencia y direcciones efectivas en cuanto a energía se refiere. En este caso se puede observar cómo existe potencia en los sectores del NE al SW, la mayor potencia del oleaje se corresponde con oleajes cuya dirección media de la energía proviene del WNW y del NW, y cómo además, son estos sectores de la dirección de la energía los más probables. Nótese que el eje radial está en coordenadas logarítmicas.

**Figura 2.12. Histograma bidimensional potencia-dirección en la posición de la boya Villano-Sisargas**



A lo largo de todo el documento se emplean una serie de estadísticos en la caracterización del recurso de energía del oleaje. El poder de síntesis de los estadísticos es muy grande, ya que cada estadístico resume el conjunto de todos los datos en un único valor. El estadístico más importante es la media, definida como la media aritmética de los datos. Por ejemplo, si designamos los datos de

muestra como  $\{P_{w1}, P_{w2}, \dots, P_{wn}\}$ , la potencia media viene dada por:

$$\overline{P_w} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{wi} \tag{2.19}$$

Así, por ejemplo, para la boya de Villano-Sisargas, la potencia media es  $\overline{P_w} = 36 \text{ kW/m}$ .

Otros estadísticos que se utilizan en este documento son los cuantiles (o percentiles en una escala de 0-100). El cuantil  $P_{w\alpha}$  o el percentil  $P_{w100\alpha}$  representa el valor de la variable aleatoria que no es superado con una probabilidad  $\alpha$  (o el 100 $\alpha$  % de las veces).

Otro ejemplo de análisis de la distribución de frecuencias conjunta de una variable bidimensional se muestra en la Figura 2.13. Se trata de una tabla que recoge la probabilidad de presentación de la potencia del oleaje por sectores de 22.5° de la dirección media de la potencia del oleaje y se indica el percentil del 50, 90 y 99% de la potencia para cada uno de los sectores considerados. Se puede observar que los sectores más frecuentes de la energía del oleaje son del WNW y NW con una probabilidad del orden del 25 y 30%, con percentiles del 90 y del 99% del orden de los 100 y 300 kW/m.

**Figura 2.13. Probabilidad de ocurrencia de potencia del oleaje por direcciones en la posición de la boya de Villano-Sisargas**

Direcciones (°)	Prob. dirección	$P_{w_{50\%}}$	$P_{w_{90\%}}$	$P_{w_{99\%}}$
N	0,0560	12,0703	30,7297	75,6797
NNE	0,0451	9,8117	29,5503	68,2124
NE	0,0128	10,4604	31,5124	69,3412
ENE	0,0009	6,8252	12,6076	17,2648
E	0,0002	7,0434	15,1985	17,7457
ESE	0,0001	5,5348	12,1053	18,7292
SE	0,0001	6,3029	10,7335	17,0317
SSE	0,0001	6,8569	12,2249	13,8042
S	0,0002	7,0736	13,9639	19,2311

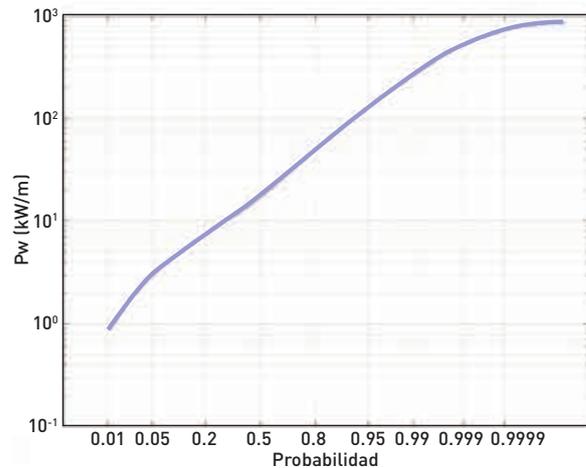
(Continuación)

Direcciones (°)	Prob. dirección	$Pw_{50\%}$	$Pw_{90\%}$	$Pw_{99\%}$
SSW	0,0026	14,6136	38,2596	72,0956
SW	0,0191	13,1708	60,4078	170,1750
WSW	0,0542	20,3574	94,6095	276,4569
W	0,1410	24,1196	106,9049	292,5232
WNW	0,2967	21,1531	95,8019	287,1943
NW	0,2587	20,1597	94,6331	286,9383
NNW	0,1121	15,5887	59,5937	171,2916

Otra forma de caracterizar los recursos energéticos puede ser a partir de la distribución del valor de la potencia horaria del oleaje. En la Figura 2.14 se muestra la distribución de la potencia de la serie horaria de la base de datos GOW reconstruida en la localización de la boya de Villano-Sisargas. Se puede analizar el porcentaje de tiempo al año que la potencia de energía es menor o igual que el valor medio de 36 kW/m, en torno al 80% del año (lo que es lo mismo, el 20% del año la potencia horaria es mayor que la potencia media anual). La distribución del flujo medio de energía puede ser analizada según direcciones de incidencia de la energía o para las diferentes estaciones del año.

Un aspecto importante a señalar es que el valor de  $P_{w50\%}$  no corresponde con el valor medio de la potencia  $\bar{P}_w$  ya que la distribución es claramente asimétrica y muy sesgada a la derecha.

**Figura 2.14. Distribución de la potencia del oleaje en la posición de la boya de Villano-Sisargas, representado en un papel probabilístico Lognormal**



Los estadísticos de la potencia del oleaje para la caracterización del recurso energético pueden ser calculados en diferentes escalas temporales. Se puede determinar la potencia media o una serie de percentiles de la potencia correspondiente a los diferentes meses del año (E, F, M, A, M, J, J, A, S, O, N, D) o las estaciones (DEF, MAM, JJA, SON), y analizar la climatología mensual o estacional. También se pueden obtener estos estadísticos de la potencia mensual para analizar la variabilidad en esta escala o la potencia anual para el análisis de la variabilidad interanual.

En el capítulo 6 *Obtención del recurso de energía de oleaje* se muestra la caracterización estadística del recurso energético del oleaje para diferentes escalas temporales de interés.

## 2.5 ORGANIGRAMA DE LA METODOLOGÍA

La metodología aplicada para la obtención y descripción del recurso energético está condicionada por los datos de partida del oleaje. Como ya se ha expuesto en el apartado 2.1 *Condicionantes*, la necesidad de disponer de registros de oleaje con suficiente cobertura espacial y temporal para poder caracterizar adecuadamente el recurso a lo largo de toda la costa española implica la utilización de datos de reanálisis del oleaje.

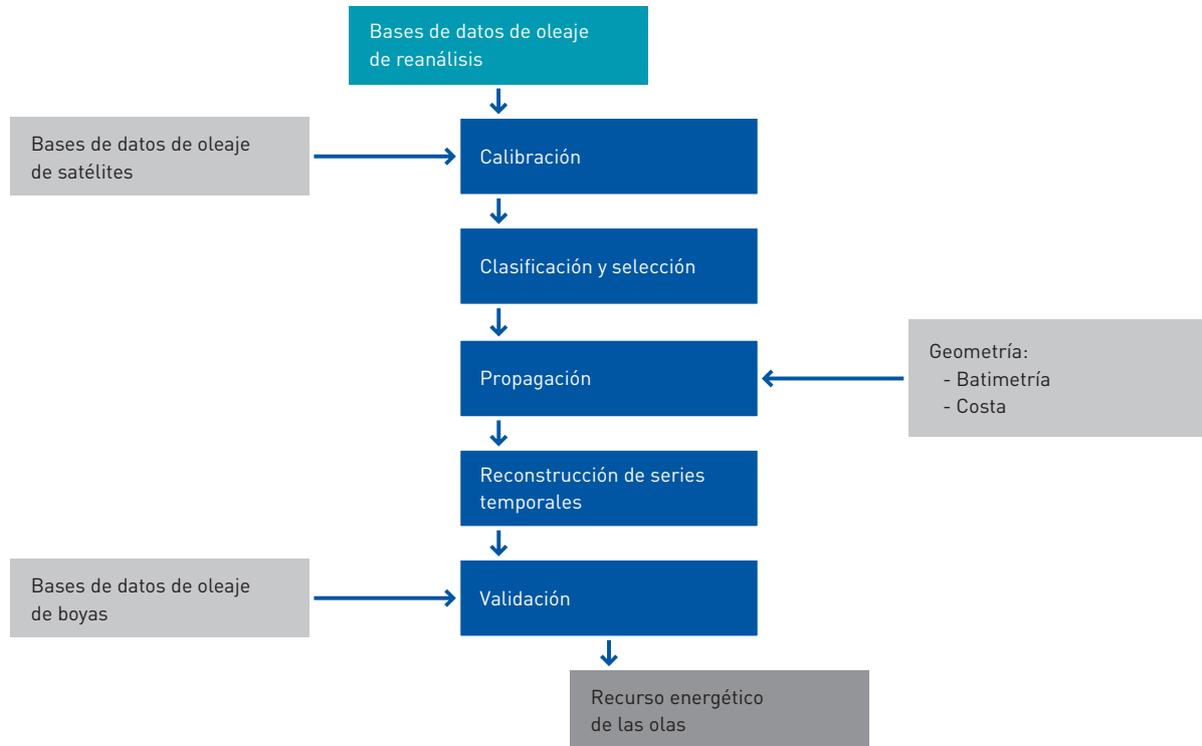
Estos datos generados numéricamente requieren ser calibrados para corregir las limitaciones de los modelos numéricos. Por otro lado, los modelos numéricos de generación del oleaje a partir de forzamientos atmosféricos no simulan de forma adecuada el oleaje en aguas someras debido a que no incorporan procesos relevantes en profundidades reducidas. Por tanto, los datos de reanálisis en aguas profundas deben ser trasladados hasta la costa mediante modelos numéricos de propagación para poder definir el clima marítimo en aguas someras. Otro inconveniente es que de estas bases de datos están formadas por datos horarios con una longitud temporal de 61 años en el caso de la base de datos GOW del Instituto de Hidráulica Ambiental (más de 500.000 estados de mar). Por tanto, para simplificar el trabajo de propagación de oleaje, es necesario aplicar algoritmos matemáticos que seleccionen un número reducido de estados de mar representativos del clima marítimo en indefinidas. Este clima marítimo en aguas profundas se define por una serie de nodos de reanálisis del oleaje y los campos de viento asociados para tener en cuenta la variabilidad espacial del oleaje y la generación local de oleaje por viento. Por tanto, cada situación del clima marítimo en aguas profundas queda descrita mediante un gran número de parámetros, lo que implica trabajar con datos multidimensionales. Esto implica que las técnicas de selección deben ser capaces de trabajar con datos con una elevada dimensionalidad.

Posteriormente, estos estados de mar seleccionados se propagan mediante modelos numéricos de propagación que permiten determinar las características del oleaje en puntos objetivo cercanos a la costa. A partir de los resultados de la propagación de estos casos seleccionados y mediante técnicas de interpolación adecuadas a la dimensionalidad de

los datos y resultados, se reconstruyen las series temporales de los distintos parámetros del oleaje necesarios para la caracterización de los recursos energéticos.

Por tanto, la metodología integral que se ha aplicado en este trabajo comprende los siguientes pasos (ver Figura 2.15): a) análisis de las bases de datos de oleaje disponibles; b) calibración de los datos de reanálisis en profundidades indefinidas utilizando datos de satélite; c) clasificación y selección de los estados de mar a propagar; d) propagación de los estados de mar seleccionados; e) reconstrucción de la serie temporal en el punto objetivo; f) validación con boyas y g) caracterización del recurso energético mediante la aplicación de modelos estadísticos.

**Figura 2.15. Procedimiento general de IH Cantabria para caracterizar los recursos energéticos en una determinada zona en profundidades intermedias o reducidas**



Los datos utilizados tanto en la definición del oleaje y viento en aguas profundas como los datos de satélite para la validación, y los registros de boyas empleados para la validación se describen en el capítulo 3 *Bases de datos utilizadas*.

El proceso de calibración se describe en el capítulo 4 *Calibración de las bases de datos de oleaje*. Las etapas de clasificación, propagación, validación y reconstrucción del clima marítimo se recogen en el capítulo 5 *Transferencia de las dinámicas a aguas costeras*. Y por último, en el capítulo 6 *Obtención del recurso de energía del oleaje* se describen los resultados del recurso energético de las olas.

# **3 Bases de datos utilizadas**

### 3.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se describen las diferentes bases de datos que se han utilizado en este trabajo. En primer lugar se indica la procedencia de los datos batimétricos. En cuanto a las bases de datos del oleaje y del nivel del mar, se describen las bases de datos instrumentales in situ (boyas y mareógrafos), bases de datos provenientes de una medida instrumental remota (satélites) y datos simulados resultantes de la aplicación de modelos numéricos considerados.

### 3.2 BATIMETRÍAS

La información sobre el fondo marino es clave en cualquier estudio de propagación del oleaje. En su viaje hacia la costa el oleaje está condicionado por los forzamientos a los que es sometido y por las irregularidades del fondo marino y la costa. En profundidades indefinidas son importantes las irregularidades a gran escala, como cañones o grandes cabos. Sin embargo, cuando el oleaje llega

a profundidades intermedias y reducidas su comportamiento es un reflejo de la batimetría.

En este estudio se han utilizado dos bases de datos de batimetría. Por un lado la batimetría global "General Bathymetric Chart of the Oceans" (GEBCO) y por otro las cartas náuticas del litoral español disponibles en la base de datos BACO (IH Cantabria).

La batimetría GEBCO es una batimetría global con resolución de 1 minuto disponible en el British Oceanographic Data Centre (BDOC). Ha sido realizada a partir de la combinación de datos de calidad contrastada procedentes de sondas de barcos y satélite.

Las batimetrías proporcionadas por las cartas náuticas son de gran utilidad puesto que completan con detalle, para el litoral español, la batimetría global. El ensamblaje de ambas bases de datos se ha llevado a cabo tomando como referencia el 0 de la carta náutica correspondiente.

En la Figura 3.1 se muestra la batimetría utilizada en la zona del norte de España, Cantábrico y Galicia. En la Figura 3.2 se muestra la batimetría utilizada en las Islas Canarias y en la Figura 3.3 la utilizada en el Mediterráneo.

**Figura 3.1. Batimetría del norte de España**

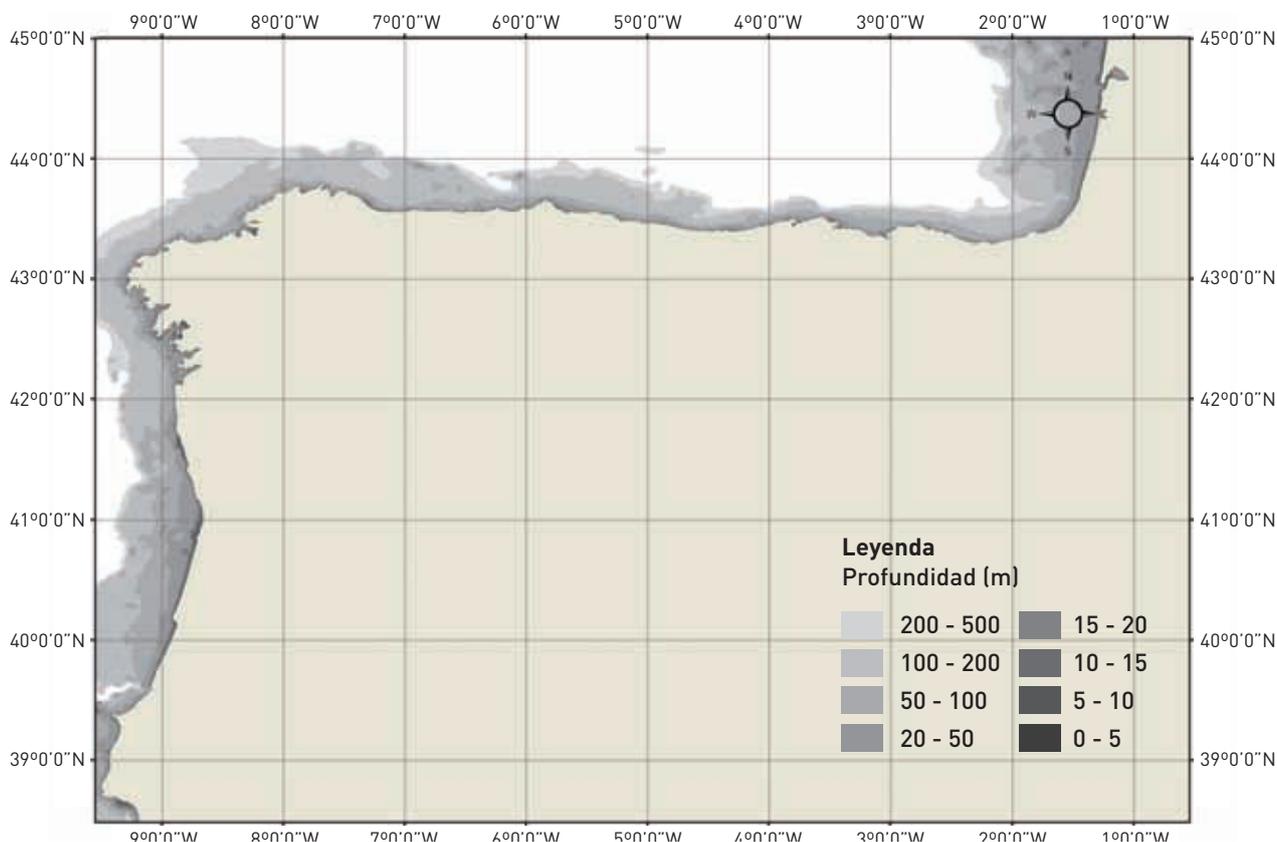


Figura 3.2. Batimetría de las Islas Canarias

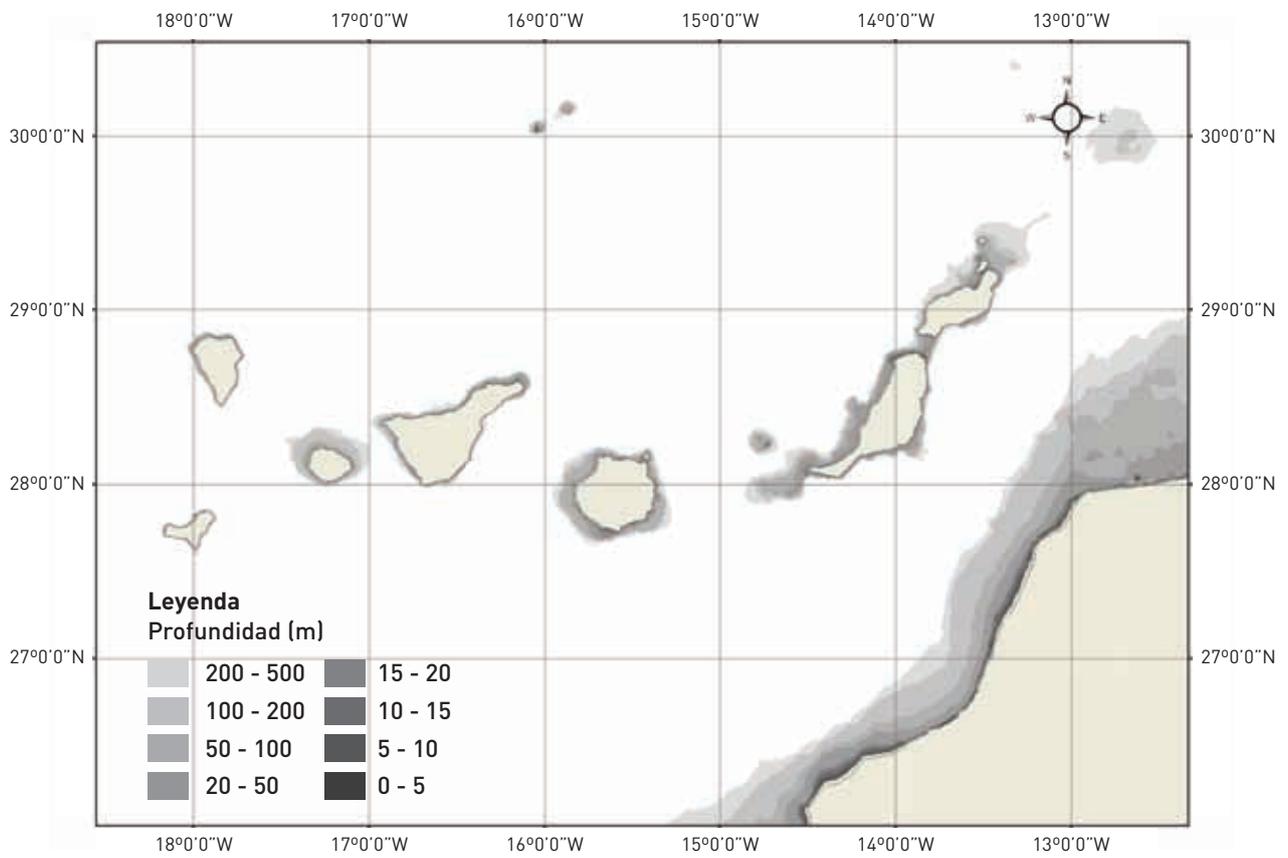
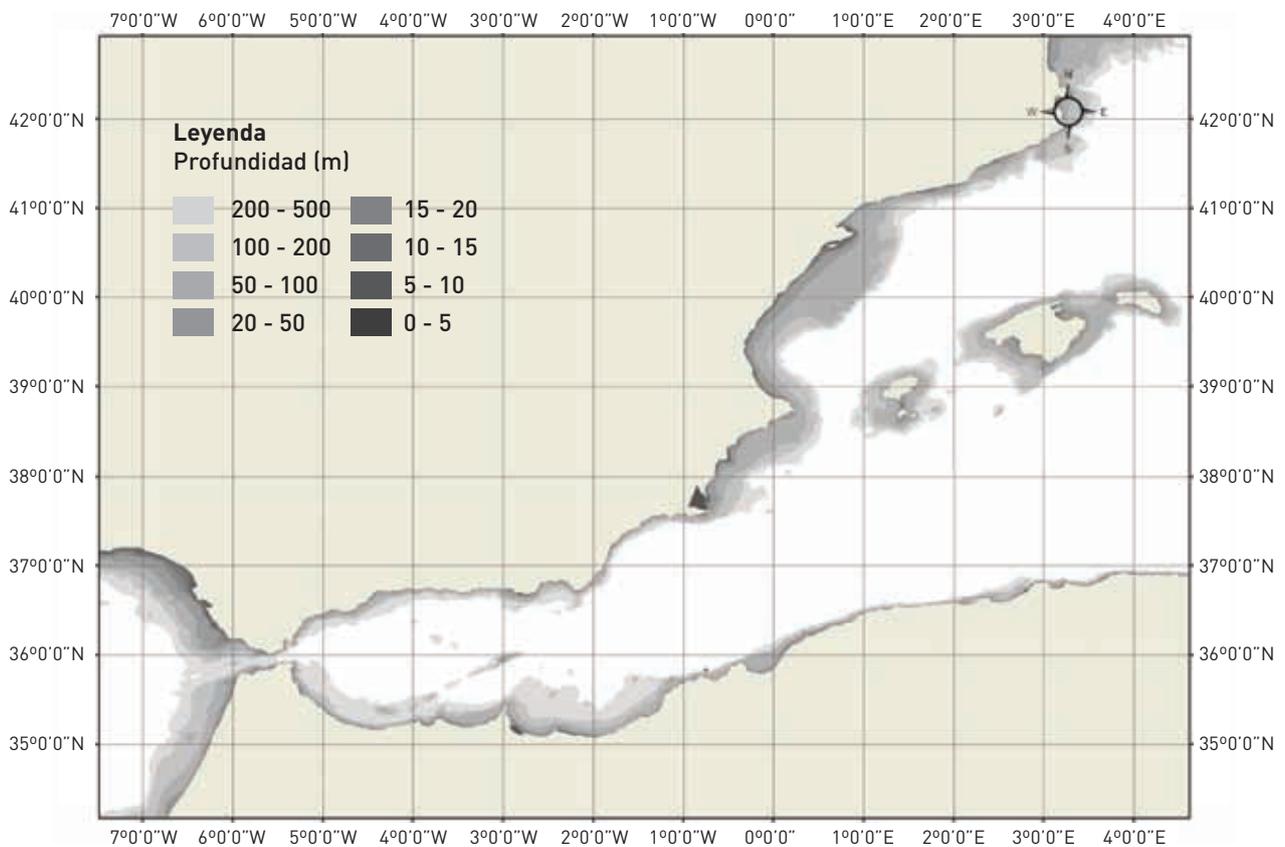


Figura 3.3. Batimetría del Mediterráneo



### 3.3 BASES DE DATOS INSTRUMENTALES

Los datos instrumentales pueden clasificarse en instrumentales in situ, en los que el instrumento de medida se encuentra en el mar, y en instrumentales remotos, en los que el aparato de medida se sitúa fuera del agua y cuyo principio básico es recibir las reflexiones de la superficie del mar de la luz visible, infrarroja o la energía de radar. Las técnicas in situ miden la evolución de la superficie del mar en un punto, en cambio muchos de los instrumentos remotos registran grandes áreas instantáneamente o en un corto periodo de tiempo. A continuación se describen las boyas de medida del oleaje y los mareógrafos para la medida del nivel del mar (técnicas in situ); y los datos de altímetro de satélite (instrumentales remotos).

#### 3.3.1 Boyas de medida de oleaje

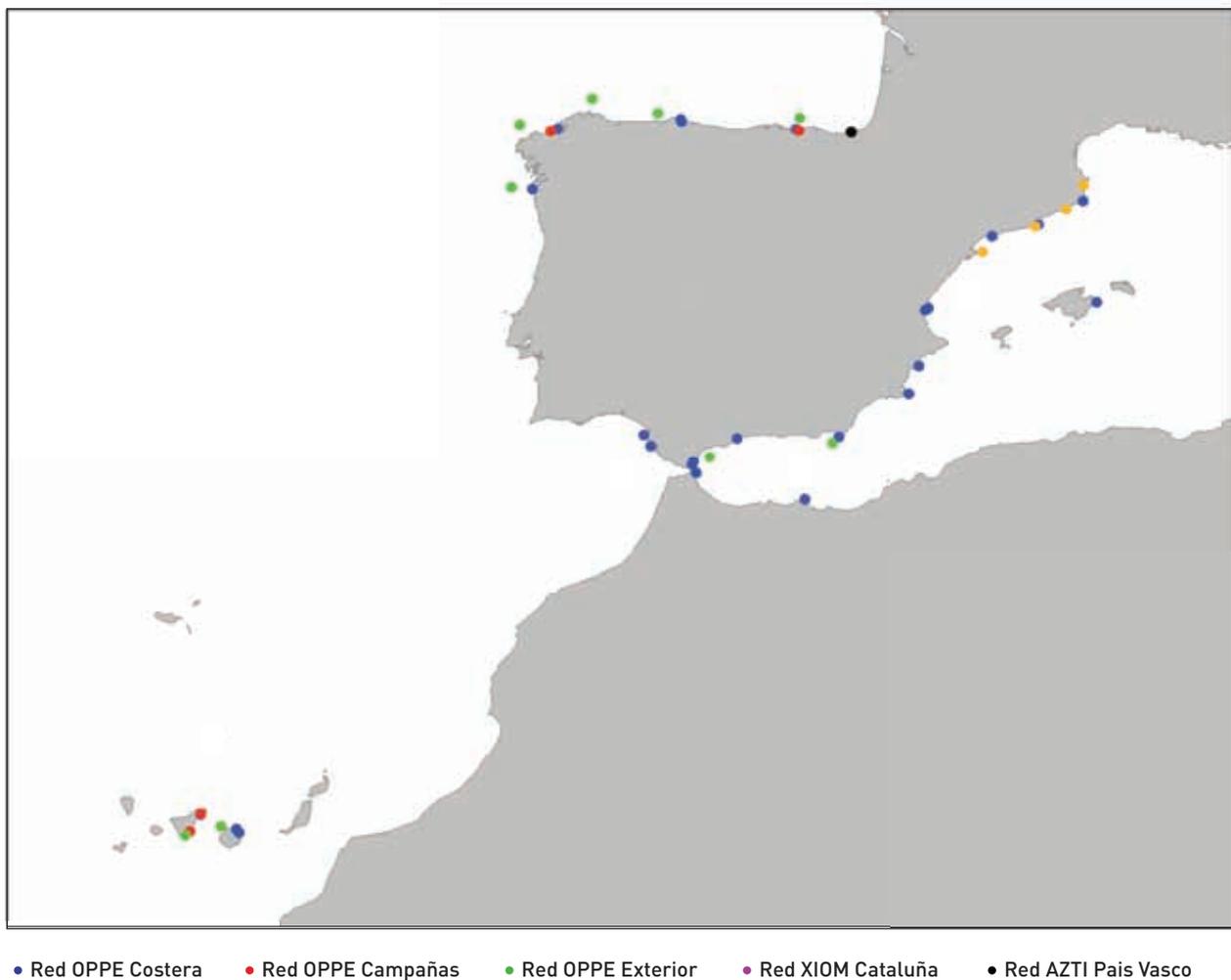
Las boyas son el instrumento de medida de oleaje in situ más extendido, pues proporcionan la información más completa y fiable del oleaje en una posición fija. Las boyas siguen el movimiento de la superficie del mar, determinando la evolución de la superficie libre en un punto gracias a un acelerómetro vertical situado en su interior (boyas escalares). Algunas boyas llevan incorporados otros dispositivos sobre dos ejes ortogonales, como inclinómetros o acelerómetros horizontales, y otro para referenciar el norte magnético (usualmente es un compás electrónico) que permiten estimar las aceleraciones horizontales o el ángulo y orientación de la inclinación de la boya (boyas direccionales). Por lo tanto, con los datos registrados por las boyas se pueden calcular tanto los distintos parámetros espectrales (escalares o direccionales) como los diferentes parámetros estadísticos del oleaje.

El Organismo Público Puertos del Estado (OPPE) dispone de redes fijas de medida en aguas profundas (REDEXT) y aguas costeras (REDCOS) a lo largo del litoral español, con la distribución que se indica en la Figura 3.4, y almacena espectros frecuenciales  $S(\omega)$  y direccionales  $S(\omega, \theta)$  y parámetros estadísticos y espectrales de los estados de mar como la altura de ola significativa ( $H_s$ ), el periodo medio ( $T_m$ ), el periodo de pico ( $T_p$ ), la

dirección media del oleaje ( $\theta_m$ ), la velocidad del viento ( $W$ ), y la dirección media del viento ( $\beta_w$ ).

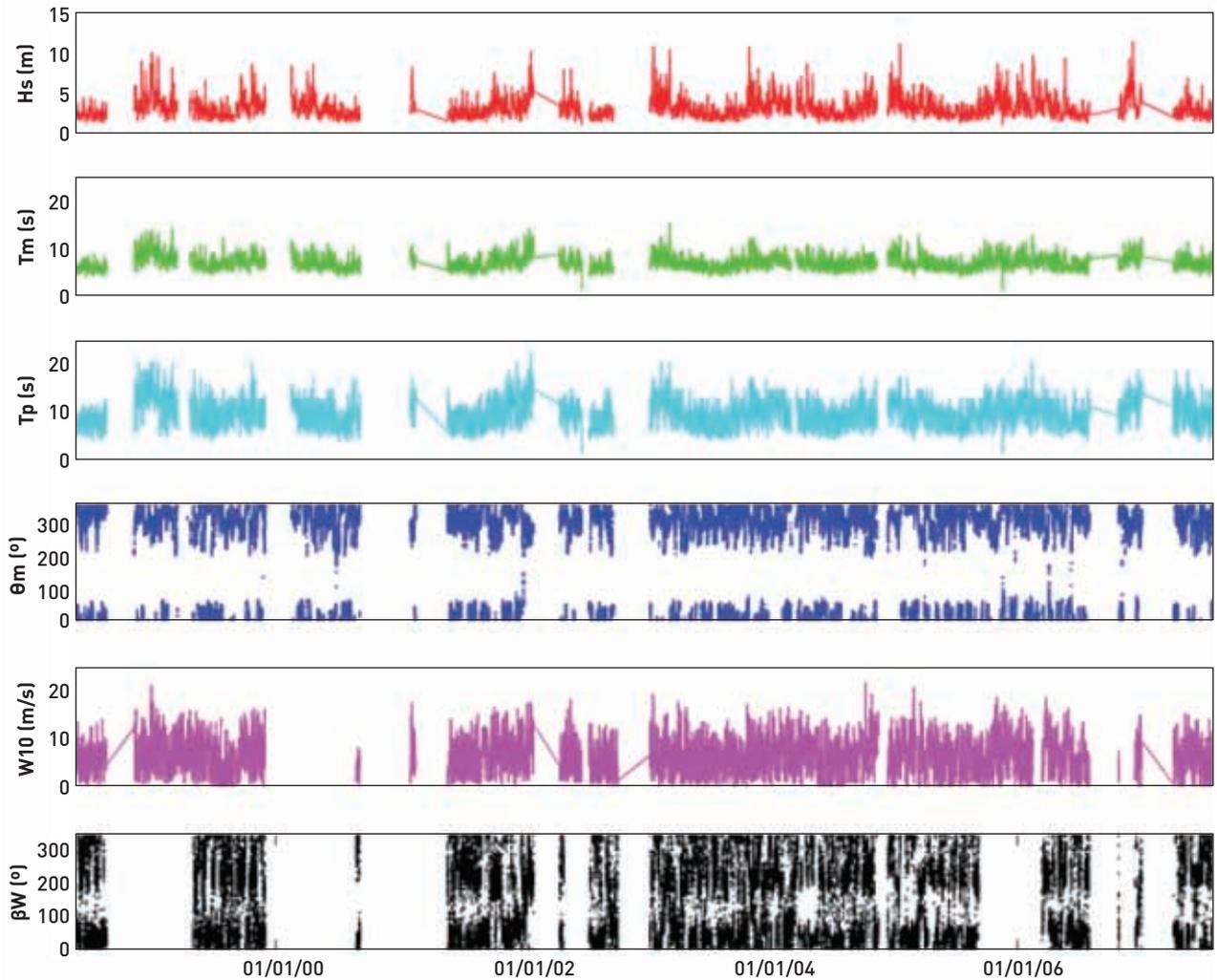
Además se dispone en el marco de este proyecto del conjunto de datos de la red XIOM (Xarxa d'Instruments Oceanogràfics i Meteorològics), propiedad de la Generalitat de Catalunya. Esta red está compuesta por un conjunto de boyas situadas a lo largo de la costa catalana. También se dispone de la boya que gestiona AZTI para el Gobierno Vasco.

**Figura 3.4. Localización de las boyas utilizadas en este trabajo**

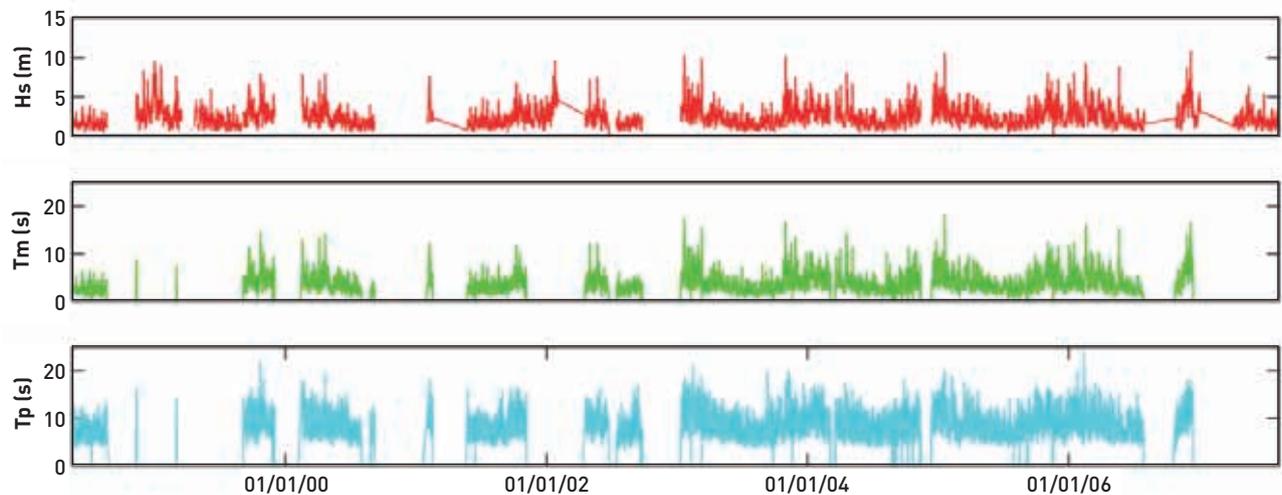


A modo de ejemplo, en la Figura 3.5 se muestran las series temporales de  $H_s$ ,  $T_m$ ,  $T_p$ ,  $\theta_m$  y  $\beta_w$  de la boya direccional de Villano de la red exterior. En la Figura 3.6 se muestran las series temporales de  $H_s$ ,  $T_m$  y  $T_p$  de la boya escalar de La Coruña de la red costera. Y en la Figura 3.7 se muestran las series temporales de  $H_s$ ,  $T_m$ ,  $T_p$  y  $\theta_p$  de la boya de Tordera de la red XIOM.

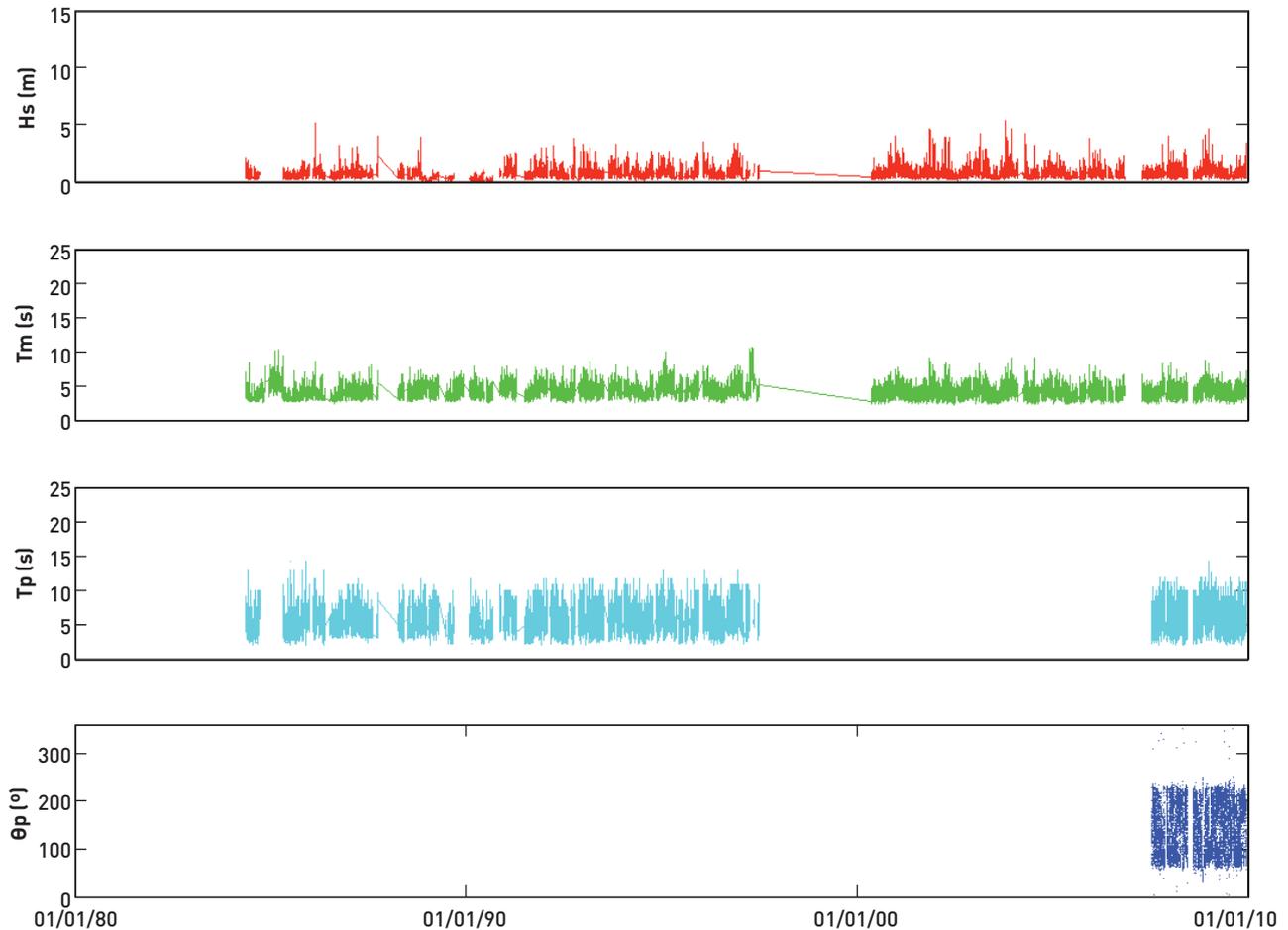
**Figura 3.5. Altura de ola significativa, periodo medio, periodo de pico, dirección media, velocidad del viento y dirección del viento de la boya de Villano**



**Figura 3.6. Altura de ola significativa, periodo medio y periodo de pico, dirección media de la boya de La Coruña**



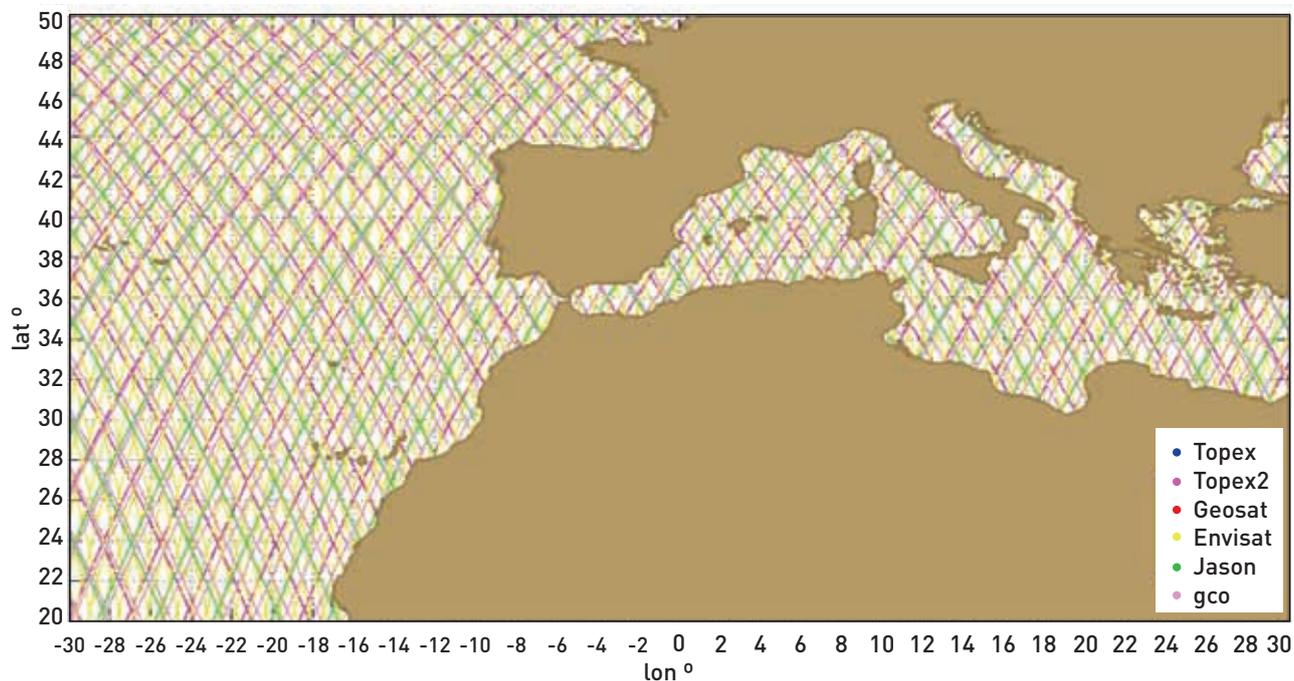
**Figura 3.7. Altura de ola significativa, periodo medio, periodo de pico y dirección del pico de la boya de Tordera**



### 3.3.2 Datos de altímetro de satélite

La única fuente de información instrumental que permite dar información global de oleaje es la procedente de los satélites, que de forma remota (con órbitas del orden de los 1.000 km por encima de la superficie terrestre) consiguen determinar parámetros del oleaje como  $H_{m0}$  con errores similares a los de las boyas (Caires y Sterl, 2003). Los satélites pueden llevar distintos instrumentos, pero son los satélites con altímetros de radar (RA, *Radar Altimeter*) los que mejor determinan y más tiempo llevan usándose. En la Figura 3.8 se presenta la distribución espacial de diversas bases de datos de satélites adquiridas por IH Cantabria a lo largo del Atlántico Norte y el Mediterráneo. Esta base de datos se utiliza para corregir los datos del reanálisis del oleaje.

Figura 3.8. Distribución espacial de diversas bases de datos de satélites



Los altímetros de los satélites son radares que transmiten cortos pulsos hacia la superficie terrestre. El tiempo de retorno de la señal así como su modificación frecuencial después de la reflexión del pulso en la superficie del mar son valores que se pueden relacionar fácilmente con el nivel del mar o la rugosidad superficial. De esta manera es posible determinar variables oceanográficas de vital importancia como la marea meteorológica, la altura de ola o la velocidad del viento.

En contraposición a la multitud de ventajas y novedades que ofrece la altimetría de los satélites, presenta un gran inconveniente que restringe la utilización de los datos provenientes de esta fuente. Este inconveniente es la resolución de los datos medidos, tanto espacial –Figura 3.8– como temporal. El satélite orbita alrededor de la tierra con una trayectoria fija, tardando entre 10 y 15 días en pasar dos veces por un mismo punto, por tanto, los datos provenientes de satélites serán idóneos para estimar el régimen medio de oleaje en una zona, pero nunca será posible determinar con ellos el régimen extremal.

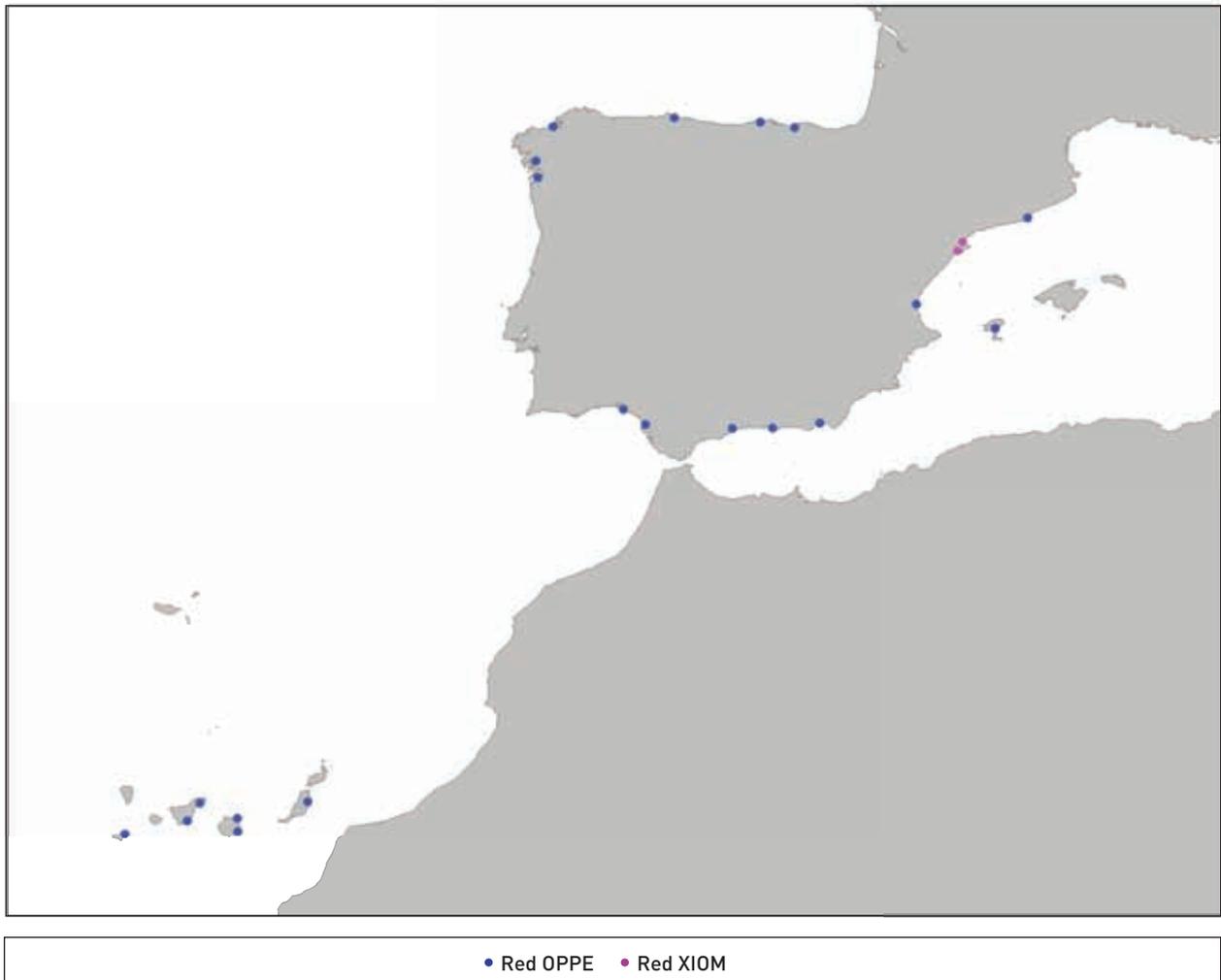
El uso principal que se suele hacer de estos datos es como complemento de los datos medidos por boyas, visuales o de reanálisis, siendo en este último

caso de vital importancia pues permite un calibrado espacial de los campos de oleaje obtenidos por los modelos numéricos [capítulo 4 *Calibración de las bases de datos de oleaje*].

### 3.3.3 Mareógrafos

Para determinar el nivel del mar, se dispone de la red de mareógrafos REDMAR del Organismo Público de Puertos del Estado (Figura 3.9). La Red de Mareógrafos REDMAR está en funcionamiento desde 1992. El objetivo es la monitorización del nivel del mar en tiempo real y la generación de series históricas para su posterior explotación. En la actualidad está constituida por 6 mareógrafos acústicos SONAR, 3 mareógrafos de presión Aanderaa y 33 sensores radar MIROS. Estos últimos además proporcionan datos de agitación. También se dispone de los datos de la red de mareógrafos XIOM (Xarxa d'Instruments Oceanogràfics i Meteorològics), propiedad de la Generalitat de Catalunya.

Figura 3.9. Localización de los mareógrafos utilizados en este trabajo



Cada puerto define un nivel de referencia o cero conveniente para la realización de obras, dragados, etc., que se conoce con el nombre de cero del puerto y que normalmente coincide con la mínima bajamar. En las propagaciones en el Atlántico (Cantábrico, Canarias, Atlántico Sur) se han utilizado 3 niveles, referenciados al cero de cada puerto, a partir de los cuales se interpolan los demás. Estos niveles del mar han sido:

- Bajamar: nivel 0 m, coincidente con el Cero del Puerto (C.P.).
- Media marea: correspondiente al nivel medio del mar.
- Pleamar máxima viva equinoccial.

A partir de los datos de los distintos mareógrafos de la red de Puertos del Estado se realiza un análisis armónico de la marea que permite obtener las componentes más relevantes. Con la información de las componentes armónicas, se puede generar la serie temporal que abarca el mismo periodo de tiempo (1958-2008) que los datos de reanálisis de la base de datos GOW. De esta manera se puede asociar un nivel de mar (debido sólo a la marea astronómica) a cada estado de mar, y reconstruir la serie de oleaje propagada hasta aguas someras según la metodología que se expone en el capítulo 5 *Transferencia de las dinámicas a aguas someras*.

El nivel de la marea se calcula como la suma de las componentes armónicas a través de la ecuación:

$$\eta = a_0 + \sum_{i=1}^8 a_i \cos(\omega_i t - \phi_i)$$

donde:

$\eta$  es la cota del nivel del mar

$a_0$  es el nivel medio respecto al cero del puerto

$a_i$  es la amplitud de la  $i$ -ésima componente

$\omega_i$  es la frecuencia de la  $i$ -ésima componente

$t$  es el tiempo

$\phi_i$  es la fase de la  $i$ -ésima componente

## 3.4 BASES DE DATOS NUMÉRICAS

### 3.4.1 Reanálisis atmosférico

#### 3.4.1.1 Introducción

Primeramente, es importante señalar que el reanálisis de oleaje está condicionado por la disponibilidad de reanálisis atmosféricos, en concreto vientos en superficie (a 10 m de altura). Las simulaciones de la circulación atmosférica a nivel global presentan una resolución espacial y temporal relativamente grosera (entre 1.125 y 2.5°, con resoluciones horarias entre 3 y 6 horas cubriendo periodos de tiempo de entre 20 y 60 años). Estas simulaciones numéricas se han llevado a cabo teniendo en cuenta la información disponible de datos instrumentales atmosféricos. De esta manera, las bases de datos procedentes de reanálisis numérico atmosférico constituyen una fuente de información valiosa en el campo de los estudios climáticos. Actualmente, los reanálisis globales más populares son: el ERA-40, desde 1957 hasta el 2002 y el ERA-Interim, desde 1989 hasta la actualidad, ambos realizados por el *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF); el JRA-25, desde 1979 hasta la actualidad, de la *Japan Meteorological Agency* (JMA); y el NCEP/NCAR *Reanalysis Project*, desde 1948 hasta la actualidad, realizado por el *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) y el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Este último es uno de

los reanálisis globales que cubren un mayor periodo de tiempo, mientras que el ERA-Interim y el JRA-25 constituyen las series de datos con mejor incorporación de datos instrumentales mediante asimilación, a partir de información satelital.

El principal inconveniente que presentan los reanálisis globales aparece cuando la resolución espacial es insuficiente para caracterizar determinadas situaciones locales. Para solventar este problema se suelen emplear técnicas de *downscaling* (incremento de resolución). En concreto, el *downscaling* dinámico consiste en incrementar la resolución de la rejilla del modelo atmosférico global anidando a éste un modelo atmosférico regional o mesoescalar limitando la zona de interés. De esta forma se puede mejorar la orografía y la parametrización de algunos procesos físicos locales de importancia en el área de interés (radiación, capa límite, cúmulos). Usualmente estos reanálisis regionales tienen una resolución espacial de entre 5 y 25 km y utilizan un acoplamiento de los resultados atmosféricos del reanálisis global como condiciones de inicio y contorno. De esta manera se consigue que los campos atmosféricos de mayor resolución sean consistentes con las ecuaciones atmosféricas y se puedan considerar apropiadas representaciones de las condiciones atmosféricas.

Para la realización de este estudio se han seleccionado los campos de vientos procedentes del reanálisis global NCEP/NCAR (para definir el oleaje en el Atlántico, Galicia y Canarias) y del reanálisis regional obtenido a través de un *downscaling* dinámico denominado *SeaWind* y realizado por la Universidad de Cantabria (para el Mediterráneo y el Golfo de Cádiz).

Los campos de vientos a 10 metros de altura seleccionados han sido utilizados como forzamientos para la generación del reanálisis de oleaje. En el caso del reanálisis global NCEP/NCAR con resolución espacial de 1.9° y temporal de 6 h y en el *downscaling* dinámico ERAINTERIM/SeaWind con resolución espacial de 15 km y temporal de 1 h en el periodo 1989-2008.

#### 3.4.1.2 Descripción técnica

Los campos de vientos, a 10 m de altura, procedentes del reanálisis 1 NCEP/NCAR presentan una resolución temporal de seis horas en una rejilla gaussiana de estructura T62 (resolución horizontal de ~210 km) y 28 niveles verticales (Kalnay *et al.*, 1996; <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>). Esta base de datos

presenta la ventaja de cubrir el período 1948-2009 y de ser ampliamente utilizada por la comunidad científica.

Las bases de datos SeaWind a partir de *downscaling* dinámico se han realizado en el marco de otros proyectos en la Universidad de Cantabria mediante la utilización del modelo WRF-ARW 3.1.1 (*Weather Research and Forecasting*, WRF, y *Advanced Research dynamical solver*, ARW). La base del “modo reanálisis” o “modo *hindcast*” consiste en una simulación para cada día, anidando en los contornos los vientos de un reanálisis global, comenzando a las 12 h y simulando 36 horas. De cada simulación se descartan las horas 0-12 (*spinup*) y se acoplan las horas 12-36 (esto es, D+1 completo).

Para la definición del *downscaling* más adecuado se ha realizado una validación previa. Las opciones estudiadas en el desarrollo del *downscaling* dinámico han consistido en:

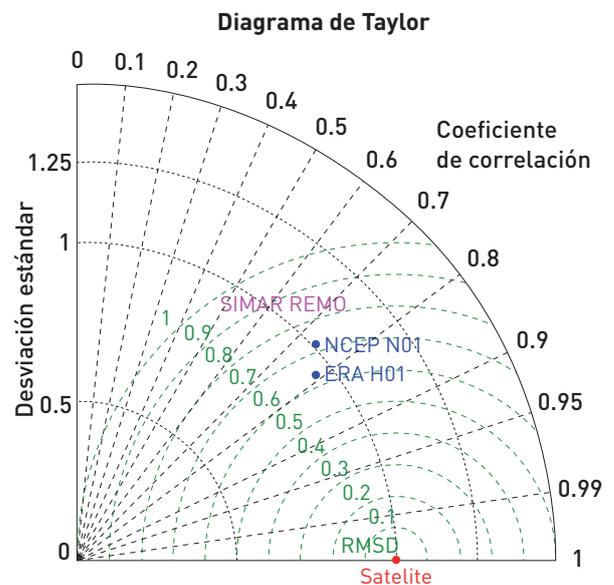
- La selección de la base de datos, procedente de reanálisis global, más adecuada para la introducción en el *downscaling* dinámico como contornos y condiciones iniciales.
- El estudio de diferentes resoluciones y parametrizaciones de procesos físicos (esquemas de capa límite, convección, etc.).

Para llevar a cabo la validación (Figura 3.10), se han comparado las salidas del modelo con las diferentes opciones expuestas frente a datos instrumentales de viento procedentes de satélite (GEOSAT, ERS 1 y 2, TOPEX-POSEIDON, GFO-GEOSAT, ENVISAT y JASON). En dicha gráfica se representa el diagrama de Taylor, que es una forma sintetizada de representar el coeficiente de correlación, el error cuadrático medio y la desviación estándar del error. Así, cuanto más cerca del punto rojo (observaciones) mejor es la validación. Los valores obtenidos, con coeficientes de correlación mejores que el *downscaling* dinámico REMO, confirman la bondad de la validación.

Después del estudio de validación se ha concluido que la parametrización de la capa límite “*Yonsei State University scheme*” modela mejor los campos de viento, mientras que se ha optado por generar un reanálisis regional a partir del reanálisis global ERA-Interim 1989-2009. Este reanálisis proporciona un registro temporal menor que NCEP/NCAR (sólo 20 años frente a los 61 de NCEP/NCAR) pero permite simular las condiciones atmosféricas regionales propias del Mediterráneo con una

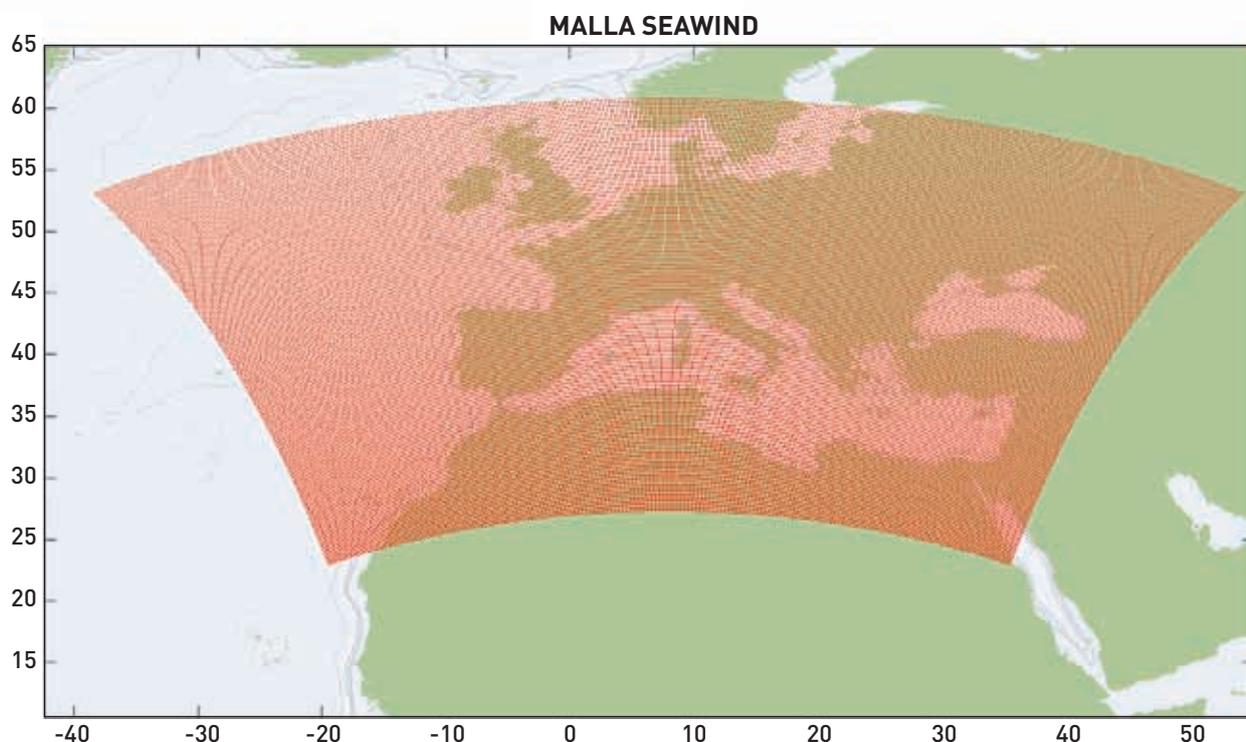
resolución espacial de ~15 km, lo cual va a redundar en una importante mejora de la calidad de los resultados.

**Figura 3.10. Diagrama de Taylor realizado durante la validación del reanálisis atmosférico regional. Se representa la distancia frente a los datos instrumentales de viento a 10 m de altímetro (satélite) de los resultados obtenidos a partir del modelo WRF-ARW a partir de las condiciones de contorno Era-Interim y NCEP/NCAR, y del modelo de *downscaling* REMO a partir de NCEP/NCAR**



Los campos de viento a 10 m de la superficie que resultan del *downscaling* dinámico están definidos en una región sur-europea que cubre parte del Océano Atlántico y del Mar Mediterráneo (ver Figura 3.11), en una rejilla cónica Lambert.

**Figura 3.11. Reanálisis regional de los campos de viento a 10 m de superficie (representación de la figura en proyección Mercator)**



### 3.4.1.3 Producción. Resultados

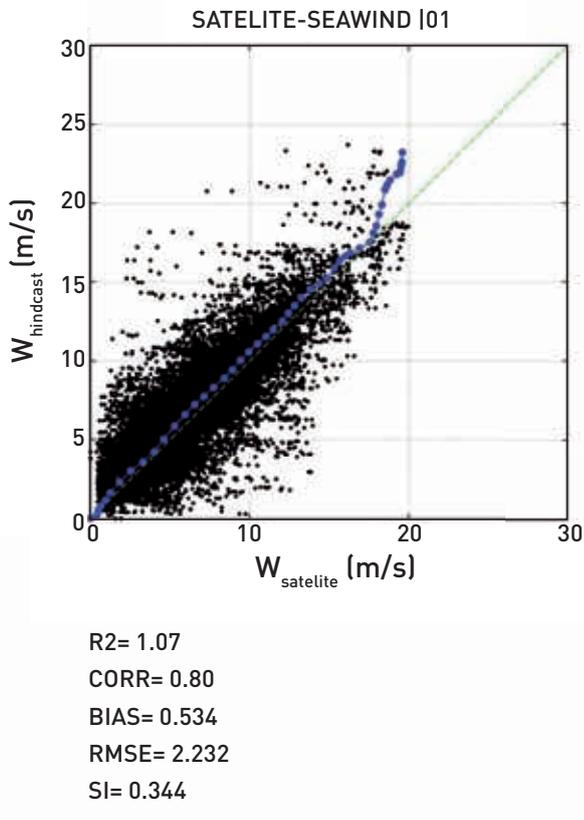
El reanálisis atmosférico utilizado en este proyecto está constituido por 2 bases de datos, siendo cada uno de ellos un reanálisis atmosférico independiente:

1. Reanálisis atmosférico global NCEP/NCAR 1: Salidas de viento instantáneo a 10 m de superficie desde 1948 hasta 2009. Resolución cada 6 horas. Resolución espacial cada  $\sim 1.875^\circ$  (aprox. 200 km) en longitud (malla gaussian T62).
2. Reanálisis atmosférico regional SeaWind 2 (IH Cantabria): Salidas de viento medio y máximo a 10 m de superficie y de presión atmosférica a nivel del mar. Periodo de tiempo: desde 1989 hasta 2009. Resolución temporal: horaria. Resolución espacial cada  $\sim 15$  km (malla en proyección cónica Lambert).

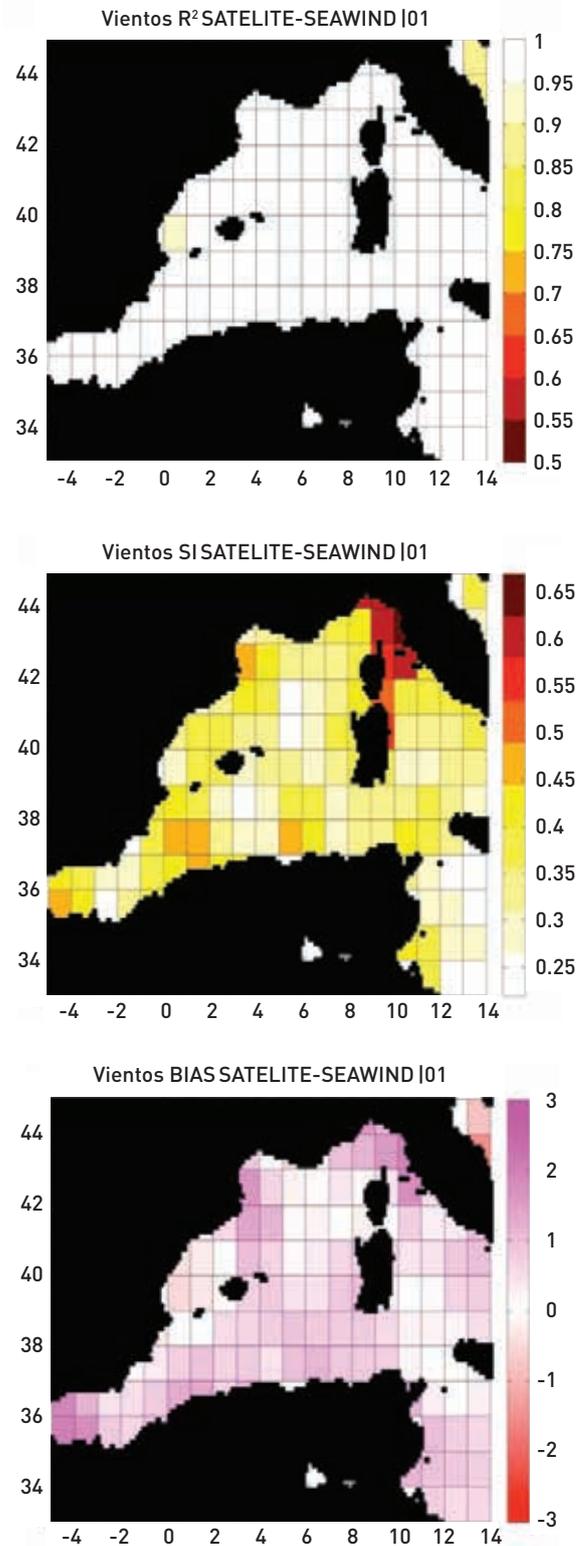
Para la validación de los campos de viento descritos se ha utilizado como referencia la base de datos instrumental procedente de altímetros (satélite). Para la obtención de las parejas de datos a comparar se ha seleccionado el nodo más cercano e interpolado en el tiempo las salidas simuladas

con modelo numérico. El gráfico de dispersión, el de cuantiles y los índices de validación más comunes se muestra en las Figuras 3.12 y 3.13. Como se puede apreciar, la calidad del *downscaling* dinámico realizado es adecuada, obteniéndose una buena caracterización del régimen de viento.

**Figura 3.12. Gráfico de dispersión comparativo de los campos de viento SeaWind 2 en modo reanálisis y la base de datos de satélite**



**Figura 3.13. Mapas de índices de dispersión (R<sup>2</sup>; Scatter Index; Bias) en subregiones del Mediterráneo para los vientos procedentes del reanálisis SeaWind 2 frente a las mediciones de satélite**



## 3.4.2 Reanálisis de oleaje

### 3.4.2.1 Introducción

Una vez definidos los forzamientos de viento para las zonas objetivo de este estudio, el siguiente paso es la generación del reanálisis numérico de oleaje. Los condicionantes de esta base de datos son los siguientes:

- Resolución espacial homogénea y de alta resolución a lo largo del litoral con nodos cada 10-15 km.
- Resolución temporal horaria.
- Almacenamiento de parámetros espectrales de estado de mar ( $H_s$ ,  $T_m$ ,  $T_p$ ,  $\theta_m$ ) en todo el dominio de cálculo.
- Almacenamiento de espectros direccionales,  $S(\omega, \theta)$ , a lo largo de la costa.
- Series largas (>20 años) que permiten una descripción adecuada de la climatología de la potencia de oleaje, así como de la variabilidad interanual.
- Bases de datos actualizables, que permitan incorporar los nuevos registros.

Muchos de estos condicionantes ya se han tenido en cuenta previamente, en la selección de los forzamientos (bases de datos de campos de viento a 10 m de altura) desarrollado en el apartado anterior. Por este motivo, los reanálisis de oleaje utilizados en este trabajo son los siguientes:

- GOW 1.0 (*Global Ocean Waves 1.0*) de IH Cantabria. Reanálisis horario en el periodo 1948-2008 con cobertura global de  $1^\circ \times 1.5^\circ$  y de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  a lo largo del litoral de España. El forzamiento proviene de la base de datos NCEP/NCAR.
- GOW 2.1 (*Global Ocean Waves 2.1*) de IH Cantabria. Reanálisis horario en el periodo 1989-2008 con resolución de  $0.125^\circ$  a lo largo del Mediterráneo y el Golfo de Cádiz. El forzamiento proviene del *downscaling* dinámico SeaWind de 15 km, anidado en el reanálisis atmosférico ERA-INTERIM. En el contorno Oeste se introducen los espectros direccionales horarios del reanálisis GOW 1.0.

A continuación, se describen las principales características de las bases de datos GOW 1.0 y GOW 2.1 utilizadas en este proyecto.

### 3.4.2.2 Descripción técnica

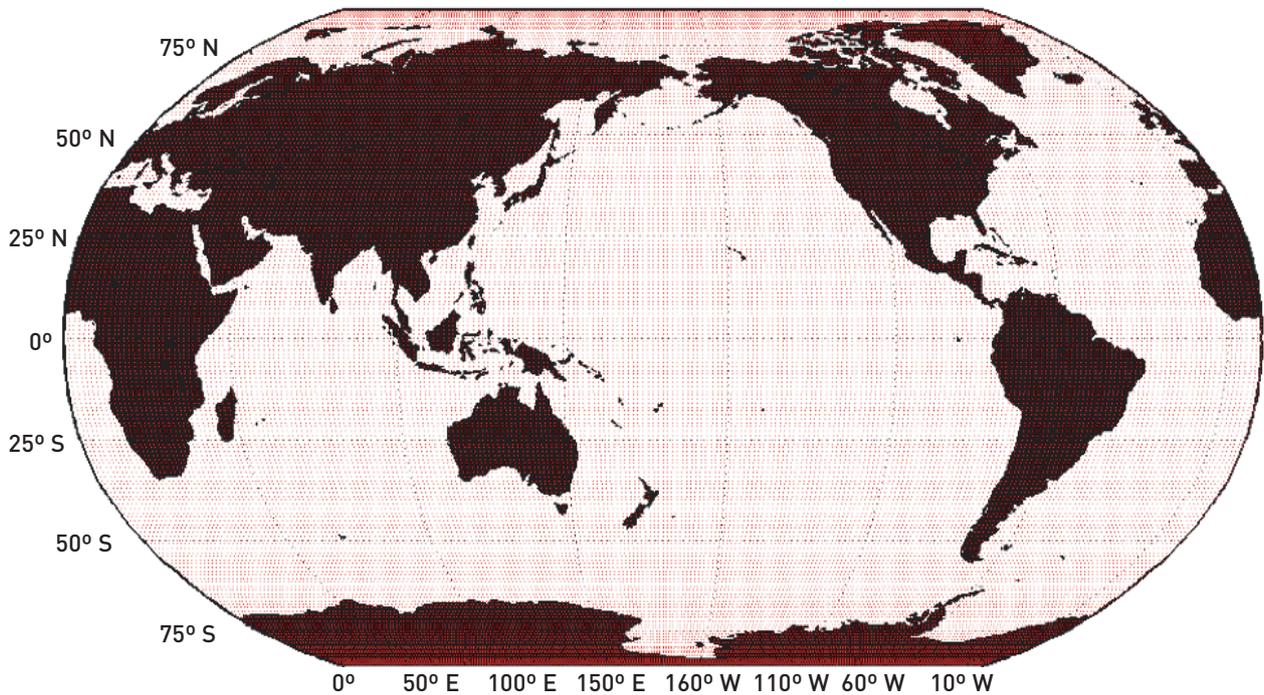
El modelo numérico utilizado ha sido el modelo WaveWatch III (Tolman 1997, 1999). Es un modelo de tercera generación desarrollado por la NOAA/NCEP similar al modelo WAM (WAMDIG 1988, Komen *et al* 1994). WW III es el último desarrollo del modelo inicial WW I elaborado por la Universidad de Delft (Tolman 1989), posteriormente refinado por la NASA en el WW II.

La versión WW III difiere de sus antecesores en muchos e importantes puntos, de especial relevancia, que incluyen aspectos relacionados con: la estructura, método numérico de resolución y parametrizaciones físicas. WW III resuelve la ecuación de balance de densidad espectral. La hipótesis fundamental asumida en la resolución es que las propiedades del medio (corrientes y batimetría) así como las del campo de oleaje, varían, en el espacio y en el tiempo, en escalas mucho mayores que una longitud de onda. Una limitación del modelo, por tanto, es que no es capaz de simular los efectos de propagación del oleaje en profundidades reducidas tan eficazmente como otros modelos. Por este motivo, los resultados de las simulaciones realizadas con el WW III han sido utilizados como condiciones iniciales de las simulaciones con el modelo de propagación de oleaje SWAN. El modelo SWAN está también basado en la conservación de acción de onda, pero ha demostrado resolver más eficazmente los fenómenos que afectan al oleaje en profundidades reducidas.

El alcance temporal del reanálisis GOW comienza en 1948 para la mayor parte de dominio y alcanza hasta la actualidad, ya que es una base de datos actualizable periódicamente. En el caso del Mar Mediterráneo, el reanálisis comienza en 1989, ya que los campos de vientos utilizados para su forzamiento proceden de un *downscaling* con mayor calidad espacial y temporal (sección 3.4.1) para simular las condiciones regionales de las cuencas mediterráneas.

El reanálisis GOW se estructura en distintas escalas espaciales. En primer lugar, se ha determinado el oleaje en una malla global (Figura 3.14) que proporciona el oleaje a escala mundial con nodos de resolución espacial  $1.5^\circ$  en longitud y  $1^\circ$  en latitud.

**Figura 3.14. Malla global del reanálisis GOW 1.0 (representación de la figura en proyección Mercator)**

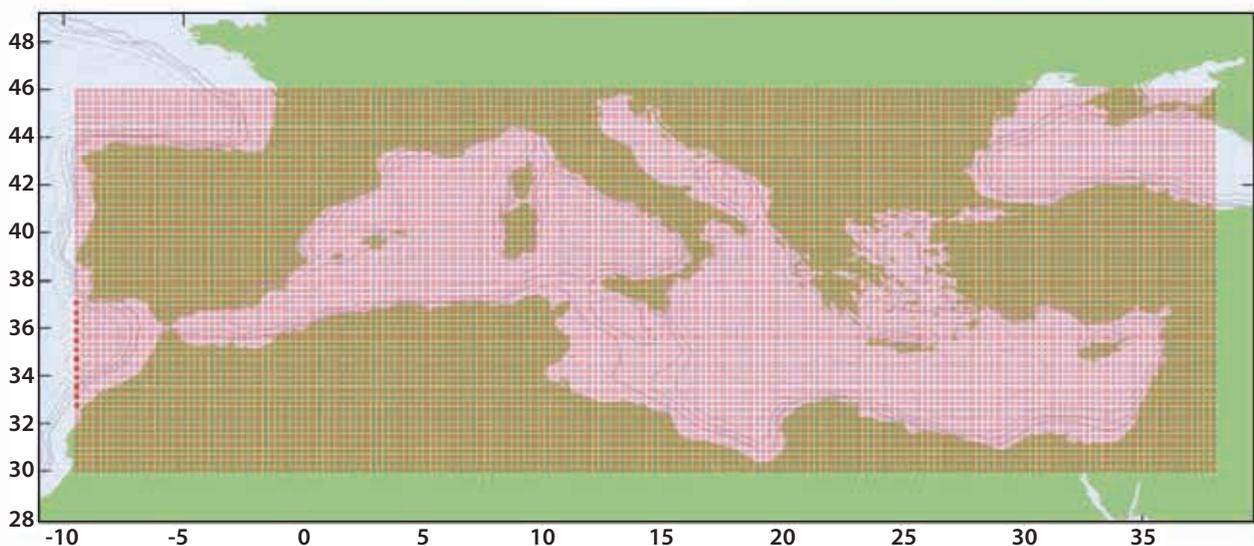


En esta malla global se han anidado una serie de mallas para el estudio de zonas de detalle con mayor grado de definición. Así, en el litoral español, se ha planteado una malla para las Islas Canarias con resolución  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , una malla para todo el Mar Mediterráneo con resolución de  $1/8^\circ$  (Figura 3.15), y otra para el litoral de la Península Ibérica con resolución  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . A su vez, la Península Ibérica se ha subdividido en tres mallas de alta

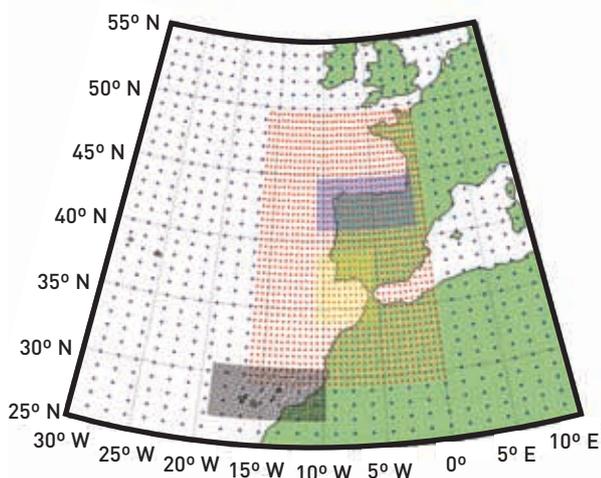
definición, resolviéndose con detalle toda su costa a  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , para alcanzar el mismo grado de detalle que en las Islas Canarias (Figura 3.16).

Como se puede observar en la Figura 3.15, el reanálisis de oleaje en el Mediterráneo comienza en su región occidental en el marco exterior del Golfo de Cádiz. De esta manera, se consigue incorporar el oleaje procedente del Atlántico así como el régimen de vientos.

**Figura 3.15. Rejilla de la Región Mediterránea del reanálisis GOW 2.1. Resolución de  $0.125^\circ$  (representación de la figura en proyección Mercator)**



**Figura 3.16. Rejillas del litoral español del reanálisis GOW 1.0 Malla. Malla Global 1.5° x 1.0°, Malla Iberia 0.5° y Mallas Cantábrico, Cádiz y Canarias 0,1° (representación de la figura en proyección Mercator)**

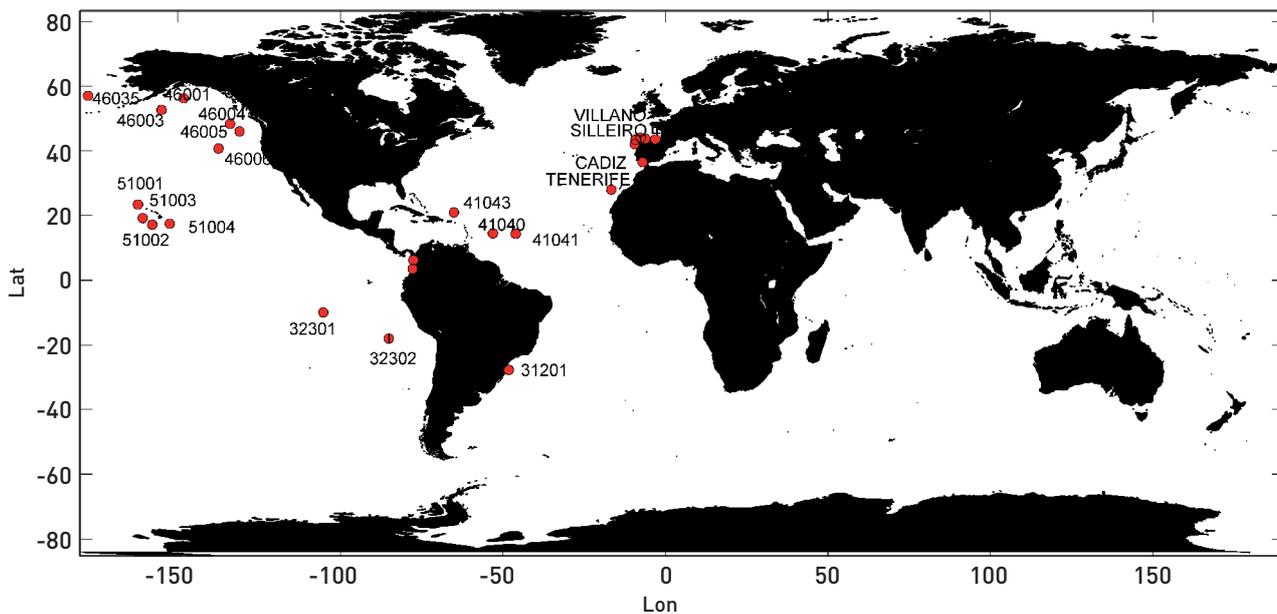


### 3.4.2.3 Resultados

Los resultados obtenidos son parámetros de oleaje en todos los nodos de cálculo con resolución de una hora. Además, con el fin de definir más correctamente el oleaje cerca de la costa, se han obtenido espectros de oleaje con resolución horaria en 500 puntos a lo largo del litoral español, separados entre sí ~10 km, con los cuales anidar modelos de propagación de escala local.

Los resultados han sido validados en el litoral español con boyas de la red exterior de OPPE y los resultados en el resto del mundo con boyas de la NOAA, así como con datos de satélite, en ambas regiones. En la Figura 3.17 se representan las localizaciones donde se ha validado el reanálisis a escala global.

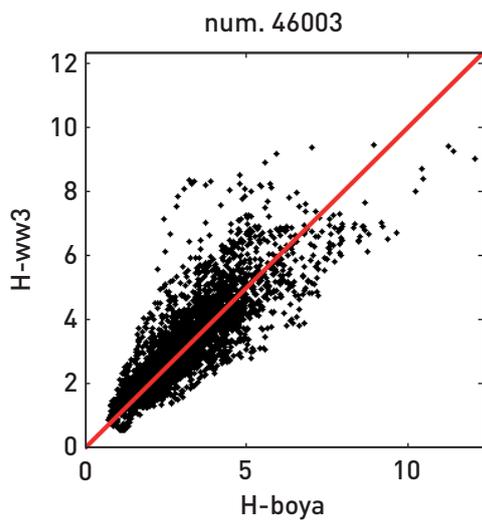
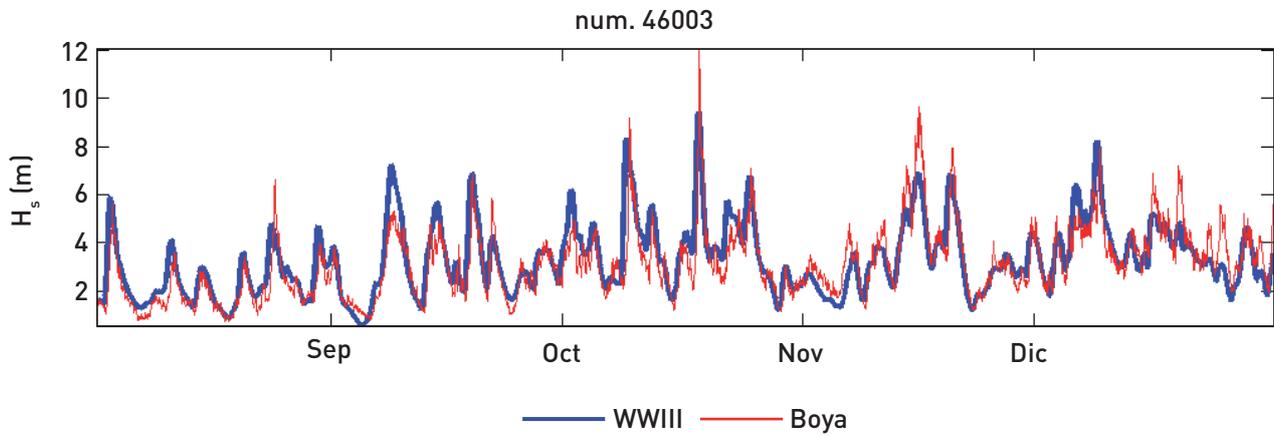
**Figura 3.17. Boyas de oleaje utilizadas para la validación de la malla global del reanálisis GOW**



En las Figuras 3.18, 3.19, 3.20 y 3.21 se presenta la validación realizada en algunas de las boyas utilizadas para comprobar los resultados de la malla global. Las series corresponden al año 2006, mientras que los parámetros de correlación han sido calculados con la totalidad del registro de cada boya. Como puede apreciarse, el reanálisis GOW 1.0 representa de manera satisfactoria la evolución horaria del parámetro altura de ola significativa. Además, la estructura de las series (boya y modelo)

es prácticamente coincidente, confirmando que la base de datos GOW 1.0 simula los temporales históricos de forma adecuada.

Figura 3.18. Validación en la boya NOAA 46003. Malla Global de GOW 1.0



Correlación :

R2=1.0342

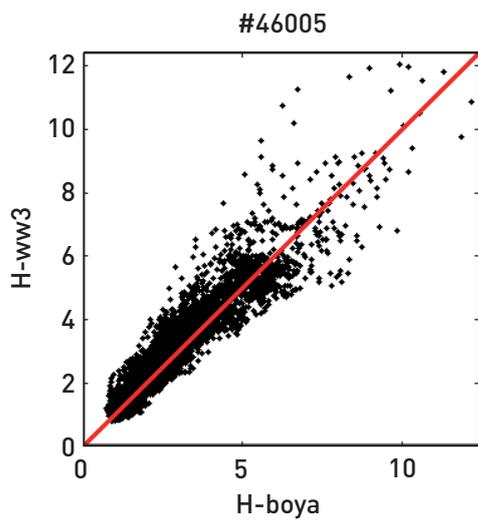
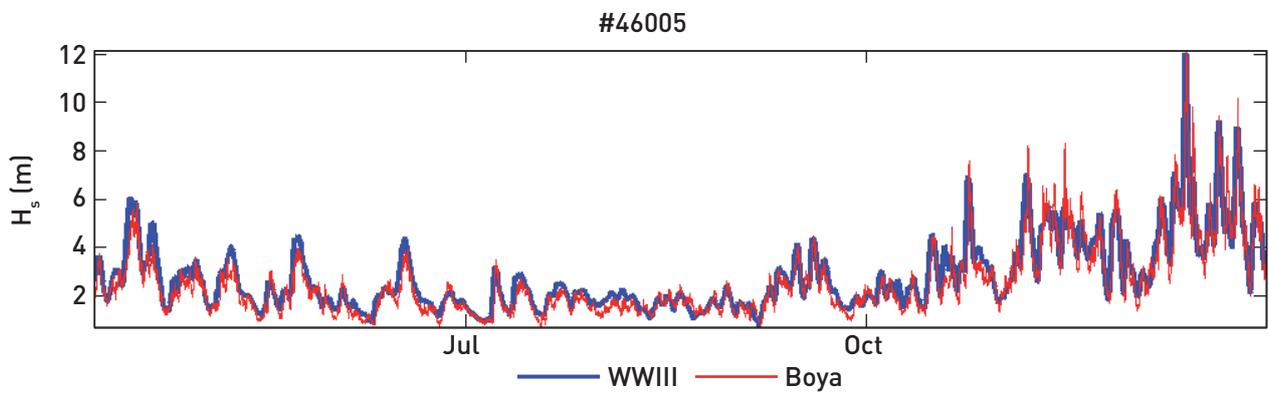
RMSE=0.83055

BIAS=0.12052

CORR=0.83998

SI=0.26484

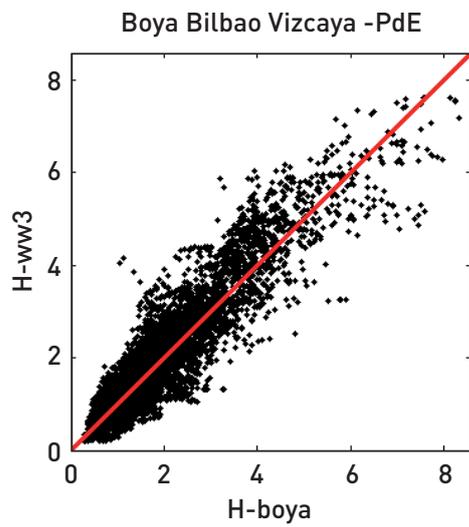
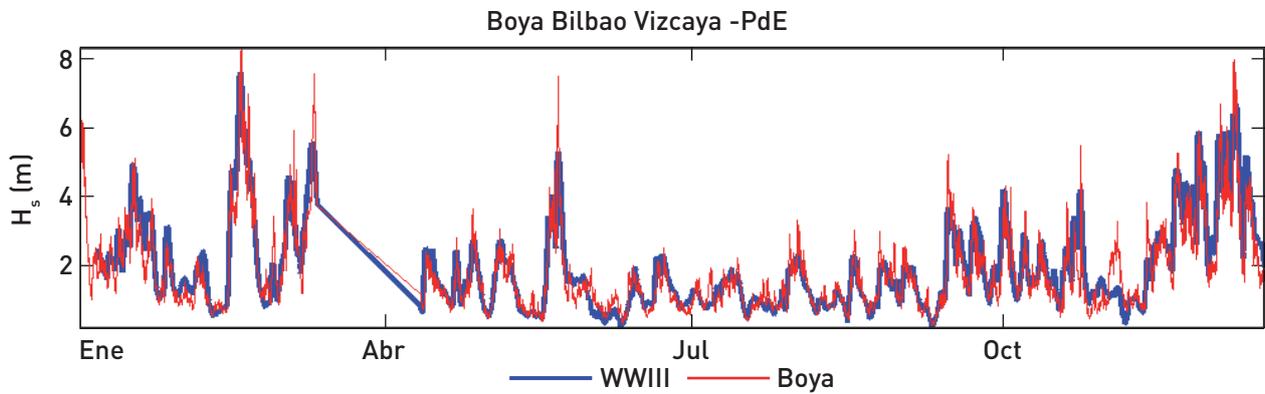
Figura 3.19. Validación en la boya NOAA 46005. Malla Global de GOW 1.0



Correlación :

R2=1.0616  
 RMSE=0.5409  
 BIAS=0.20164  
 CORR=0.94039  
 SI=0.21207

Figura 3.20. Validación en la boya de Bilbao indefinidas (OPPE). Malla Global de GOW 1.0



Correlación :

$R^2=1.0462$

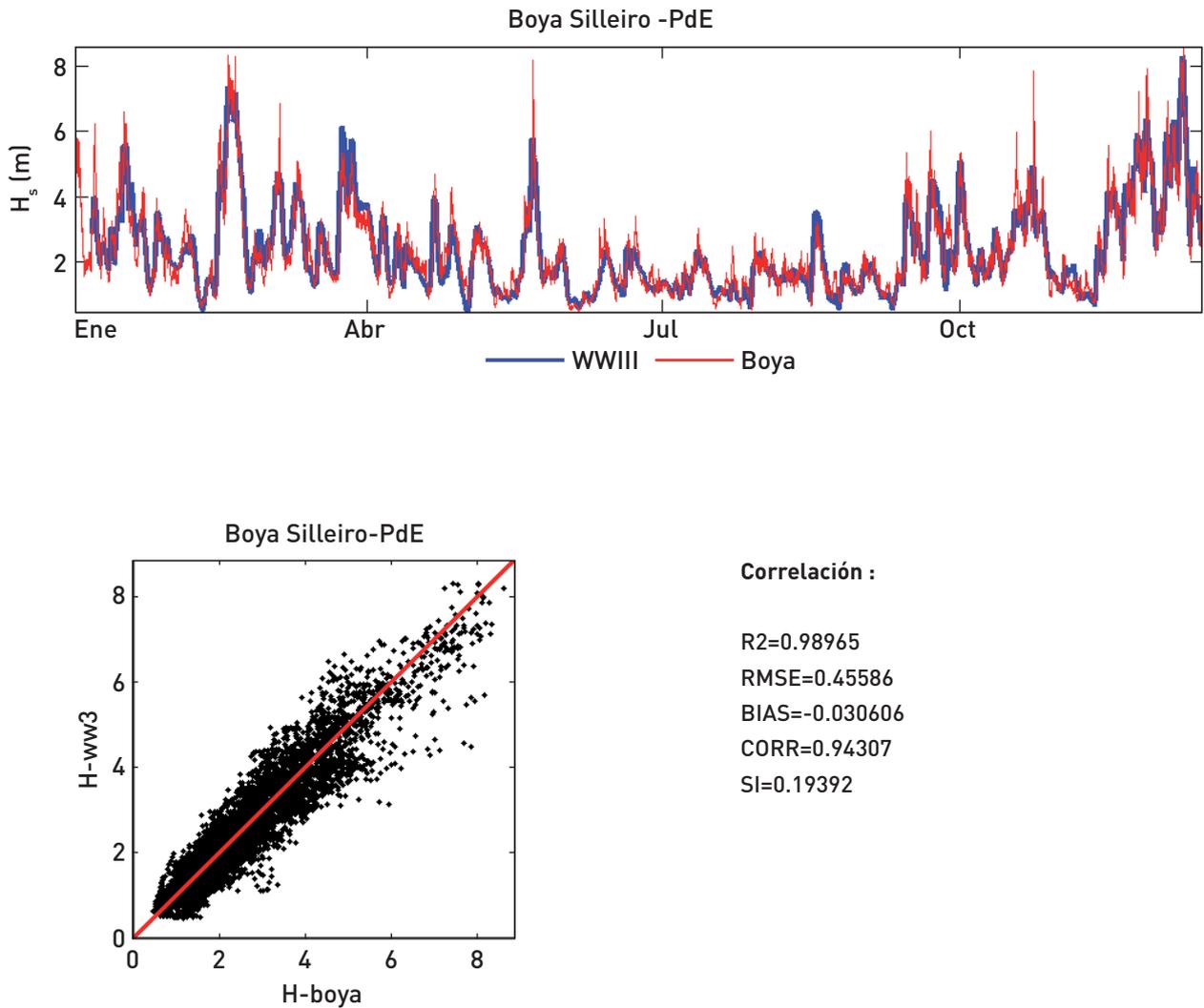
RMSE=0.48925

BIAS=0.067738

CORR=0.92342

SI=0.27311

Figura 3.21. Validación en la boya de Silleiro indefinidas (OPPE). Malla Global de GOW 1.0



Obsérvese que estos resultados mostrados en las Figuras 3.18 a 3.21 corresponden a la malla global. Para mostrar el efecto de incrementar la resolución espacial se muestra a continuación los gráficos de dispersión (Figura 3.22) junto con los cuantiles para los tres niveles de resolución espacial,  $1.5^\circ \times 1^\circ$ ,  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  y  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , en la posición de la boya de Cabo Silleiro (OPPE). Como se puede observar, los resultados son muy similares, ya que la boya se localiza en profundidades indefinidas y el forzamiento de viento (de resolución  $1.9^\circ \times 1.9^\circ$ ) es el mismo para las tres mallas.

Figura 3.22. Validación en la boya de Silleiro indefinidas (OPPE). GOW 1.0 (Malla Global, Iberia (0.5°) y Detalle (0.1°))

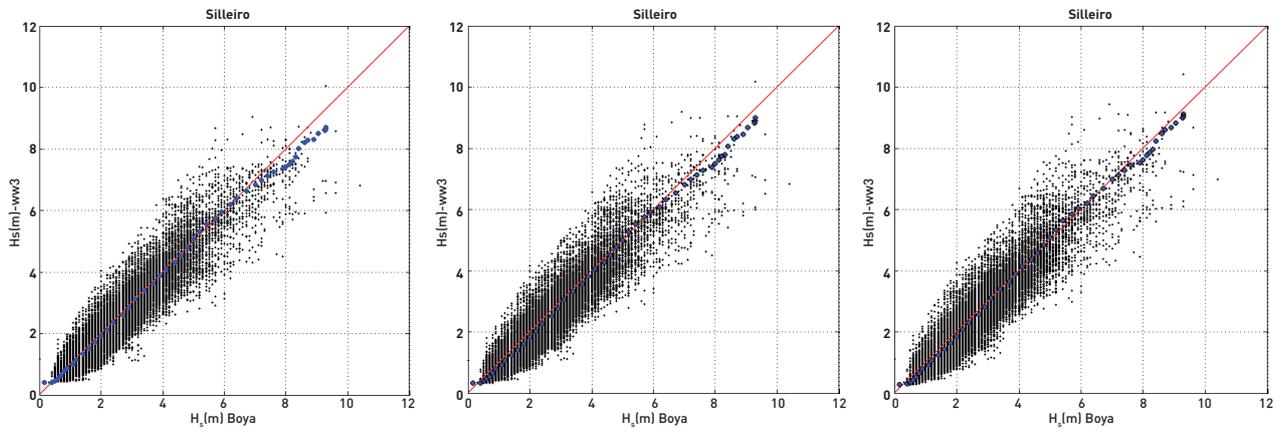
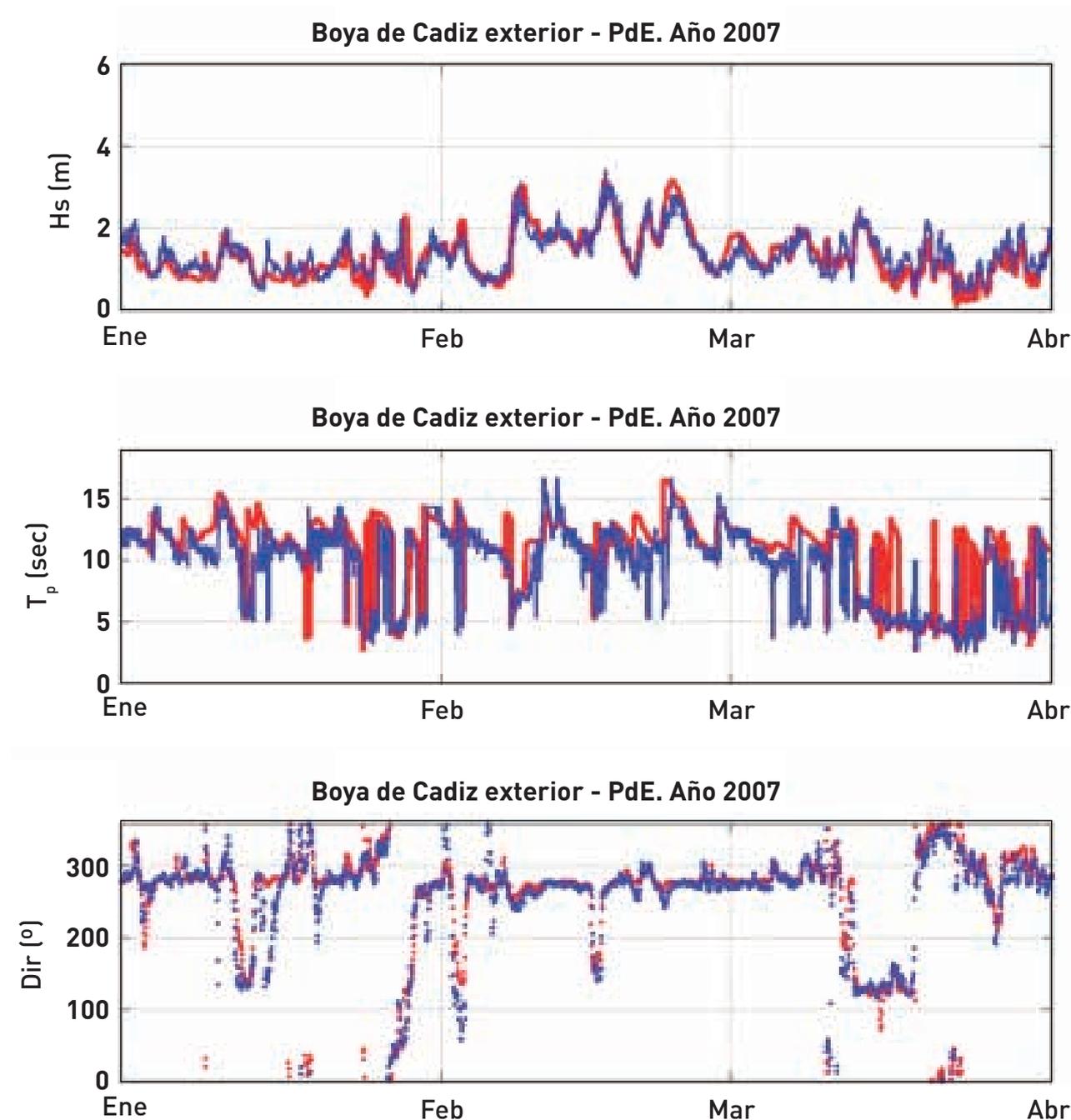


Figura 3.23. Validación en la boya exterior de Cádiz (OPPE). Malla del GOW 2.1



En conclusión, con los reanálisis GOW del IH Cantabria se dispone de una base de datos de oleaje validada, actualizada, con resolución horaria y con resultados de detalle a lo largo del litoral español, cuyos resultados son tanto parámetros de oleaje agregados como espectros direccionales. Aunque la validación realizada indica que desde el punto de vista cuantitativo son satisfactorios, se va a añadir

en la metodología un paso previo a la propagación de esta base de datos hacia la costa. Dicho paso consiste en una corrección de la energía (en términos de  $H_s$ ) utilizando datos de satélite, que va a permitir disponer de datos de oleaje de mayor calidad. Dicha corrección, denominada calibración, consiste en la aplicación de un modelo estadístico, que se desarrolla en el capítulo 4 de este trabajo.

# 4 Calibración de las bases de datos de oleaje

## 4.1 INTRODUCCIÓN

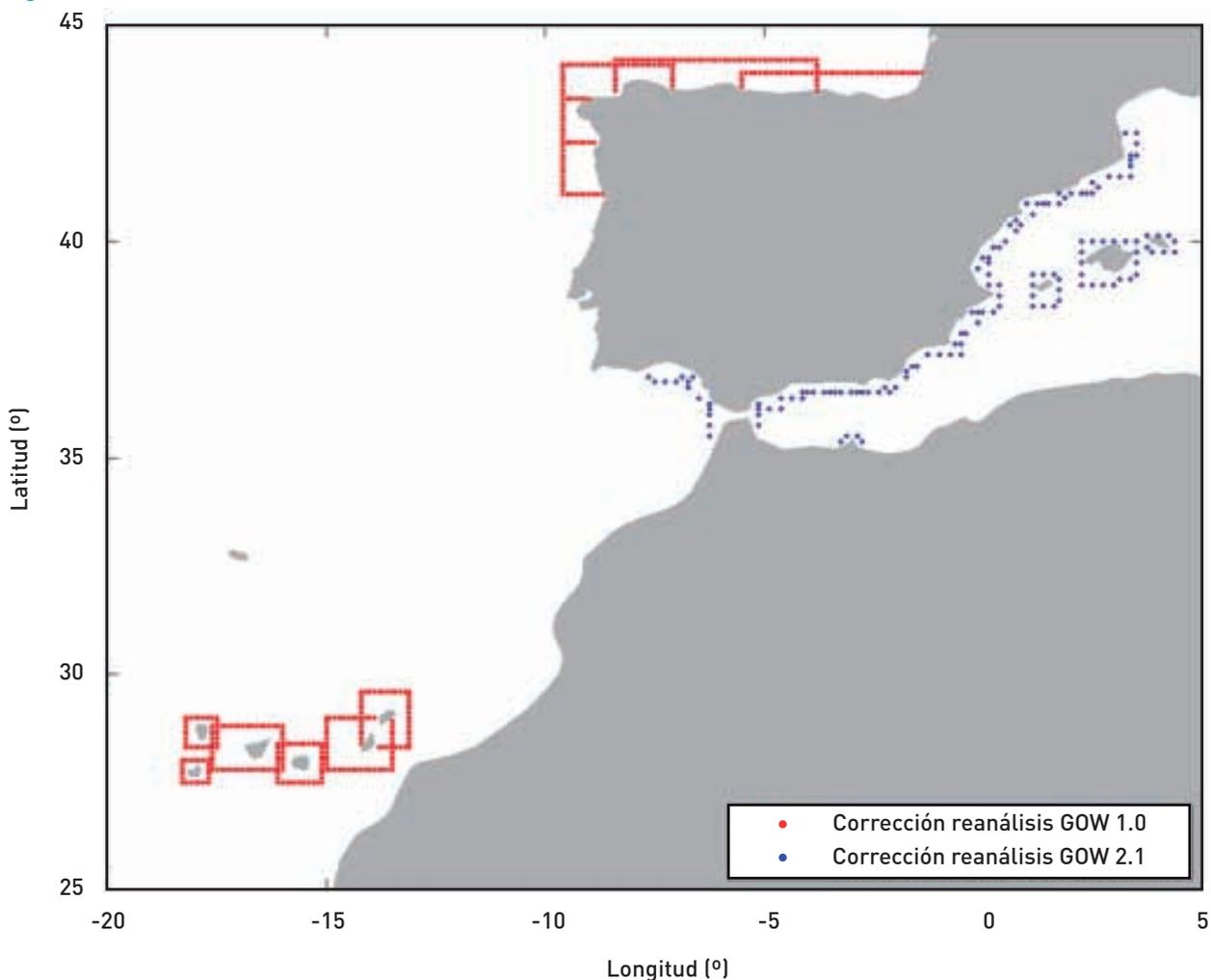
En el capítulo anterior sobre Bases de Datos se habló de la necesidad de disponer de unos datos repartidos espacialmente de manera más o menos estructurada. Del mismo modo sería idóneo un registro lo suficientemente largo y en incrementos de tiempo adecuados para captar toda la variabilidad de los eventos climáticos y oceanográficos que pudieran condicionar la dinámica marina de la zona de estudio. En la actualidad, las bases de datos instrumentales no cumplen con estos requisitos, por lo que los modelos numéricos de reanálisis y de predicción de variables oceanográficas son las únicas herramientas capaces de generar estas bases de datos. Desafortunadamente, desde un punto de vista cuantitativo, se ha comprobado que estas bases de datos obtenidas numéricamente presentan ciertas desviaciones con respecto a los datos instrumentales, por lo que se hace imprescindible su calibración antes de su utilización.

En este capítulo se describe el proceso metodológico seguido para la calibración, basado en Tomás (2009). Para ello se utiliza la información de datos instrumentales de diferentes misiones de satélites.

## 4.2 METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN

La calibración se ha llevado a cabo para cada punto del contorno en el cual se introduce el espectro de oleaje para la propagación. En la Figura 4.1 se muestra la totalidad de los puntos a los cuales se les ha aplicado la corrección. En color rojo se muestran los puntos correspondientes al reanálisis GOW 1.0 que abarcan las zonas del cantábrico y Canarias. En color azul están representados los puntos del reanálisis GOW 2.1 para la zona del Mediterráneo y Golfo de Cádiz.

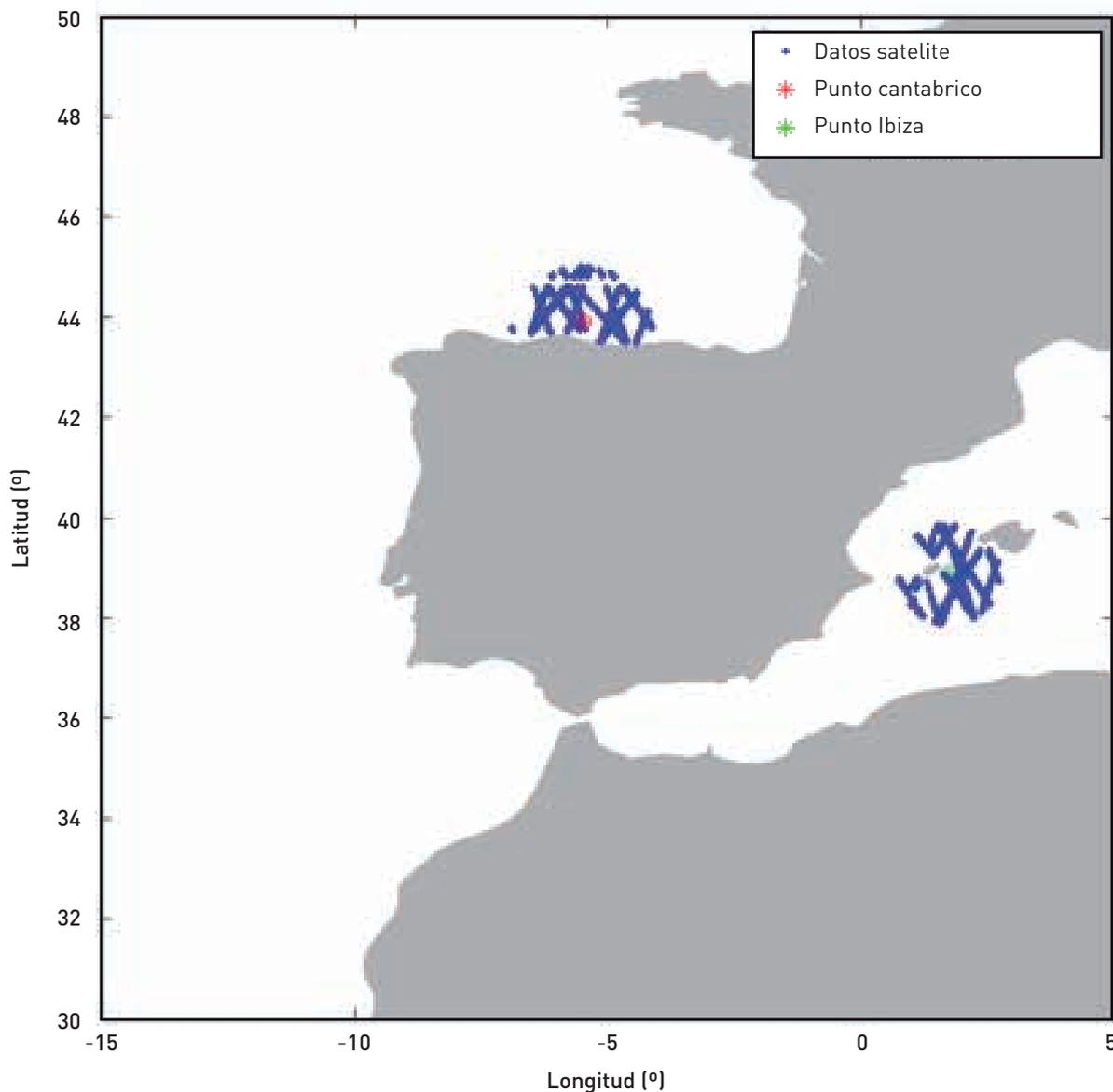
**Figura 4.1. Puntos calibrados**



Antes de calibrar el punto es necesario decidir con qué datos instrumentales se va a llevar a cabo la corrección. Los datos de satélite elegidos para cada punto son los que se encuentran en un área delimitada alrededor del punto. Este área se basa en un criterio de rayos lanzados a partir del punto objeto de calibración de forma que elimina los datos de satélite que puedan estar apantallados por tierra.

Para los puntos del Atlántico se ha elegido un área con radio de  $1.5^\circ$  mientras que en el caso del Mediterráneo, debido a la mayor variabilidad espacial del oleaje, el radio seleccionado es de  $1^\circ$ . En la Figura 4.2 se muestran los puntos de satélite escogidos para la calibración de un punto señalado en el mar Cantábrico y otro en Ibiza.

**Figura 4.2. Datos de satélite utilizados para la calibración de un punto del Cantábrico (rojo) y otro punto de Ibiza (verde)**



Una vez seleccionada la zona de datos de satélite, el siguiente paso consiste en extraer de la base de datos GOW los parámetros  $(H_s, \theta_m)$  correspondientes a cada dato de satélite (definido por su posición e instante). De esta manera se obtiene un conjunto de N datos, definidos como  $\{H_{s,sat}(i), H_{s,GOW}(i), \theta_{m,GOW}(i)\}$ .

A partir de los pares de datos temporales GOW/satélite se lleva a cabo una calibración direccional de las alturas de ola. Esto es debido a que al discretizar un registro de oleaje de reanálisis según sectores de procedencia del oleaje, y comparar en cada sector el registro instrumental con el registro simulado, es fácil apreciar que el modelo simula más acertadamente unas direcciones que otras. A su vez, dentro de un mismo sector direccional, los errores que comete el modelo dependen en gran medida de la altura de ola,  $H_s$ . Es decir, en ocasiones el modelo simula bien las alturas de ola pequeñas, pertenecientes al régimen medio, cometiendo grandes errores en aquellos oleajes mayores pertenecientes a la rama superior del régimen de oleaje (cuantiles elevados).

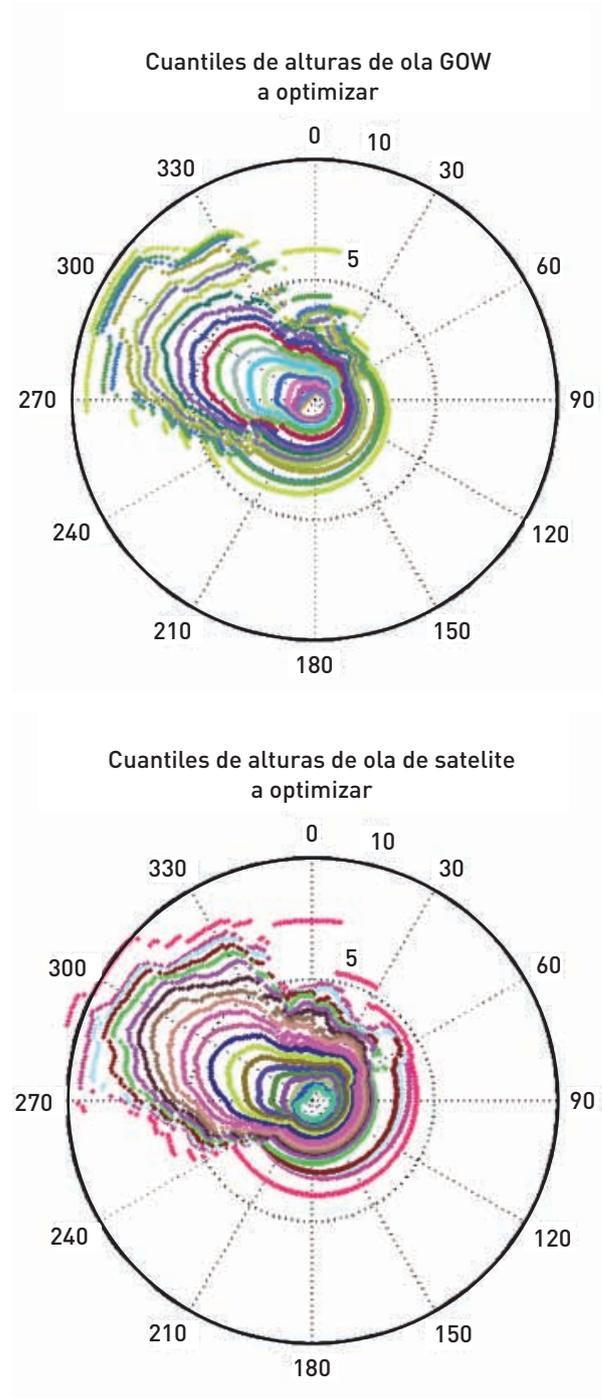
Una vez obtenidos los pares de datos de  $H_s$  junto con las direcciones, se han agrupado por direcciones según sectores direccionales de  $22.5^\circ$  de amplitud y para cada subconjunto de pares de datos se ha procedido a realizar un ajuste cuantil-cuantil en base a 20 cuantiles equiespaciados en la escala de Gumbel de máximos. Esta discretización se emplea para tratar de dar el mismo peso a los datos en todo el rango de variación de la altura de ola, de forma que los regímenes medio-bajo, mucho más frecuentes, no enmascaren los temporales. La ecuación seleccionada para el ajuste es la siguiente:

$$H_{s,c} = \begin{cases} a(\theta) d(\theta)^{b(\theta)-1} H_s & \text{si } H_s \leq d(\theta) \\ a(\theta) H_s^{b(\theta)} & \text{si } H_s > d(\theta) \end{cases}$$

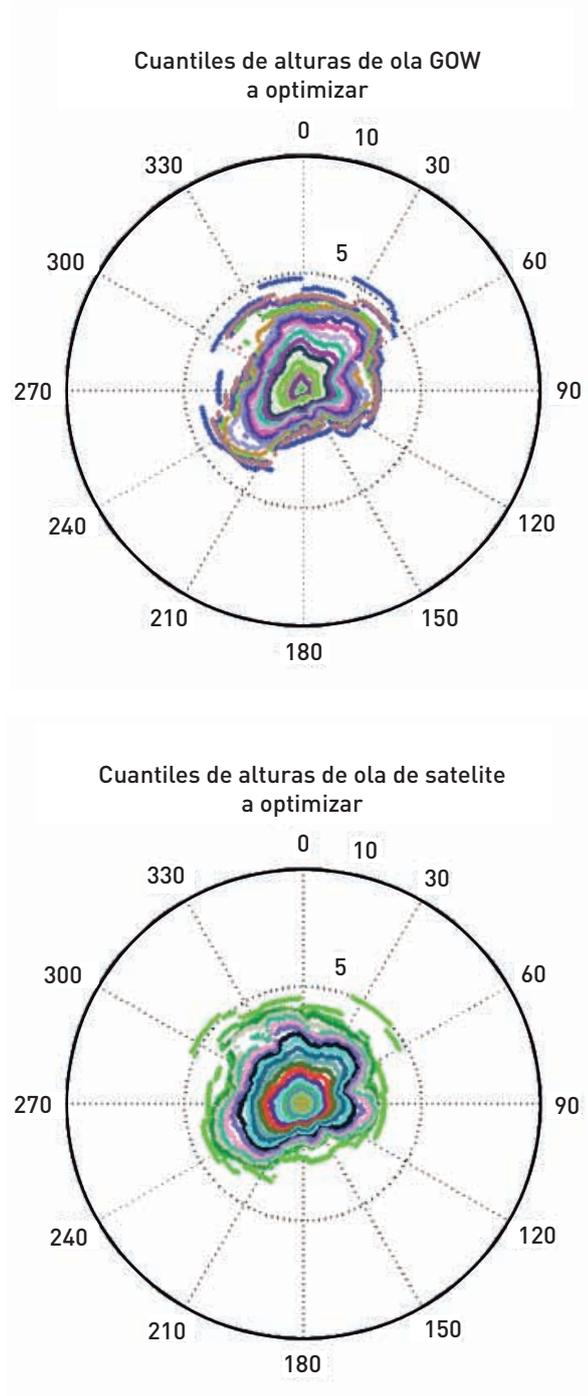
donde  $H_{s,c}$  es la altura de ola significativa corregida,  $H_s$  es la altura de ola significativa de reanálisis,  $a(\theta)$  y  $b(\theta)$  son los coeficientes que dependen de la dirección de procedencia del oleaje y  $d(\theta)$  es la altura de ola límite, por debajo de la cual la calibración es lineal. Nótese que la calibración es lineal para el régimen medio bajo, y potencial a partir del umbral definido por el parámetro  $d(\theta)$  pero hay una continuidad en la calibración. Esto da más flexibilidad al modelo para calibrar mejor en todas las ramas del régimen de altura de ola.

La selección de los cuantiles en sectores de  $22.5^\circ$  se hace desplazando éstos grado a grado, de forma que se obtiene una variación suave de los cuantiles a lo largo de la circunferencia. En la Figura 4.3 se puede ver la representación de los cuantiles seleccionados por direcciones para las alturas de ola GOW (panel izquierdo) y para las alturas de ola satélite (panel derecho) en el punto del Cantábrico. En la Figura 4.4 se puede ver la misma representación para el punto seleccionado de Ibiza.

**Figura 4.3. Cuantiles de altura de ola seleccionados para la calibración en el punto del Cantábrico**



**Figura 4.4. Cuantiles de altura de ola seleccionados para la calibración en el punto de Ibiza**



Ambos gráficos aportan información sobre los principales cuantiles de altura de ola a calibrar en base a la dirección de procedencia del oleaje. Así se puede ver que en el Cantábrico el oleaje proviene fundamentalmente del noroeste, mientras que los oleajes a calibrar en Ibiza son muy variados, con direcciones más energéticas del suroeste y el nordeste.

Las variaciones en los valores que van adoptando los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $d$  a lo largo de la rosa de direcciones posibles, se obtienen suponiendo que se produce una variación suave mediante un spline, de forma que una vez evaluados los coeficientes y alturas de ola límites del tramo lineal cada 22.5 grados, los valores correspondientes asociados a cualquier otra orientación se obtienen interpolando mediante una cúbica. De esta forma se puede expresar cada coeficiente como:

$$a(\theta_i) = a_j + x_j^a (\theta_i - \theta_j) + y_j^a (\theta_i - \theta_j)^2 + z_j^a (\theta_i - \theta_j)^3$$

$$b(\theta_i) = b_j + x_j^b (\theta_i - \theta_j) + y_j^b (\theta_i - \theta_j)^2 + z_j^b (\theta_i - \theta_j)^3$$

$$d(\theta_i) = d_j + x_j^d (\theta_i - \theta_j) + y_j^d (\theta_i - \theta_j)^2 + z_j^d (\theta_i - \theta_j)^3$$

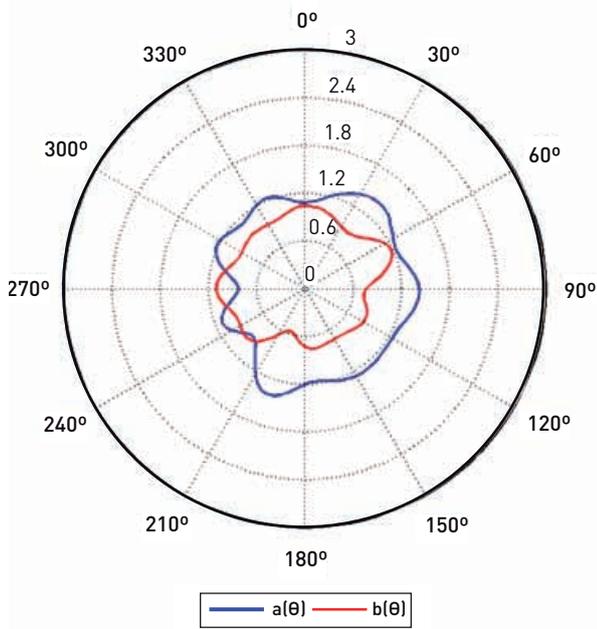
donde  $\theta_i$  es el ángulo de procedencia del oleaje  $0 \leq \theta \leq 360$ , y  $\theta_j$  es la dirección en la que se conocen los parámetros  $a_j$ ,  $b_j$  y  $d_j$  del spline, y los demás parámetros son los necesarios para que la variación sea suave a lo largo de toda la circunferencia.

De este modo, conociendo la dirección media de propagación de un estado de mar resultan conocidos los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $d$  que hay que aplicar a  $H_{s,GOW}$  para obtener  $H_{s,c}$ .

Al llevar a cabo esta metodología en los puntos mostrados en la Figura 4.2, con un total de 31.263 pares de datos satélite-GOW para el punto del Cantábrico y 24.750 para el punto de Ibiza, se obtienen los valores de los coeficientes de calibración mostrados en las Figuras 4.5 y 4.6.

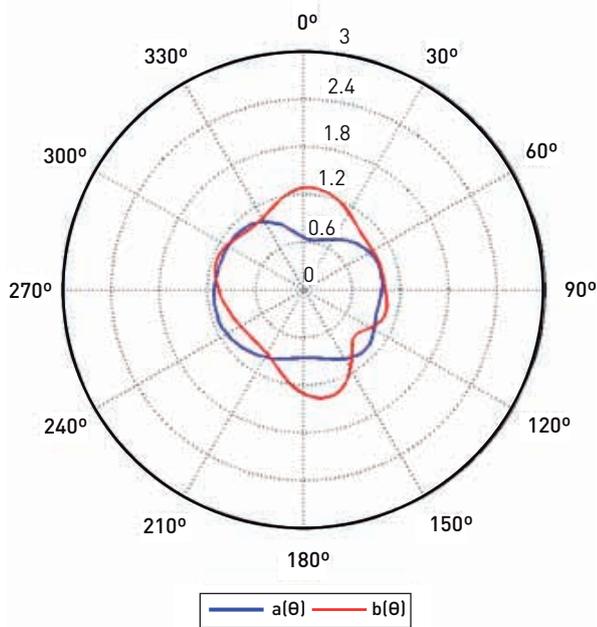
**Figura 4.5. Rosa de calibración de  $H_s$  obtenida para GOW en el punto seleccionado del Cantábrico**

Ajuste con splines con 17 puntos intervalo equiespaciado



**Figura 4.6. Rosa de calibración de  $H_s$  obtenida para GOW en el punto seleccionado de Ibiza**

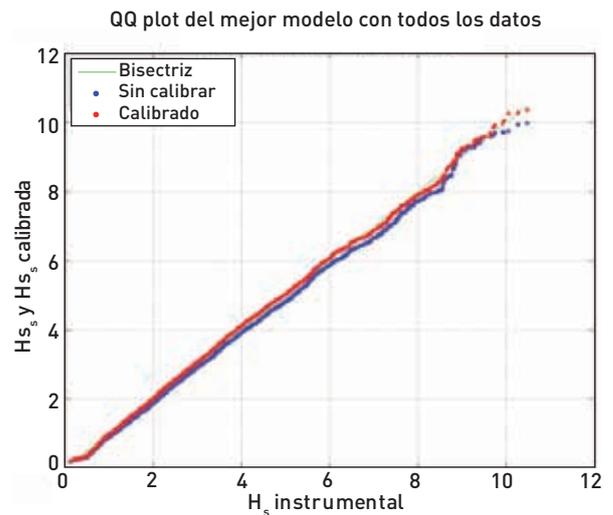
Ajuste con splines con 17 puntos intervalo equiespaciado



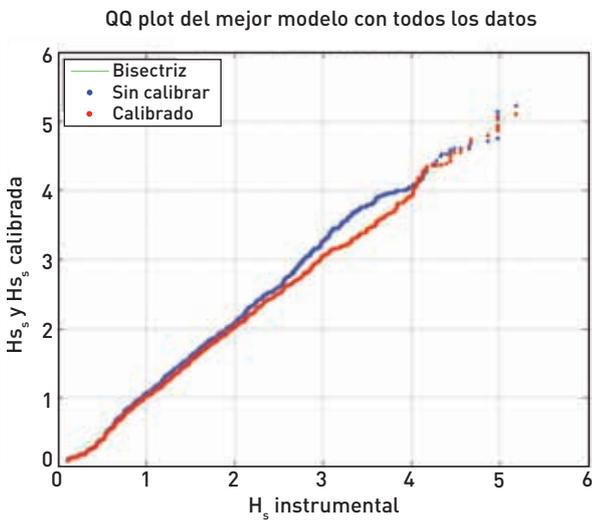
Como puede verse en ambas figuras, los coeficientes  $a$  y  $b$  calculados van adoptando valores comprendidos entre distintos rangos en función de la dirección. Las líneas se corresponden con los splines interpolados. La variación resulta ser suave, lo que indica que las desviaciones (o errores) de la base de datos GOW varían en función de la dirección de procedencia del oleaje. Este error está asociado principalmente a errores sistemáticos en la definición del forzamiento de viento (Tomás *et al.*, 2008).

A continuación se muestran los gráficos cuantil-cuantil de altura de ola significativa,  $H_s$ , de los datos de la serie GOW original y calibrada para ambos puntos (Figuras 4.7 y 4.8). Como se puede apreciar las mejoras con la calibración son evidentes ya que los puntos calibrados están mucho más próximos a la bisectriz que los datos de reanálisis. En el punto del Cantábrico (Figura 4.7) se puede ver cómo el reanálisis GOW infravalora ligeramente las alturas de ola, acentuándose este comportamiento con el aumento de  $H_s$ . Sin embargo, en el caso de Ibiza (Figura 4.8) el modelo sobreestima los valores de altura de ola por encima de los 2,5 m. Mediante la calibración ambas tendencias se corrigen, obteniendo valores próximos a la diagonal, es decir, de acuerdo a la información instrumental.

**Figura 4.7. Diagramas QQplot con las alturas de ola instrumentales (satélite) versus GOW calibrado y sin calibrar. Punto del Cantábrico**



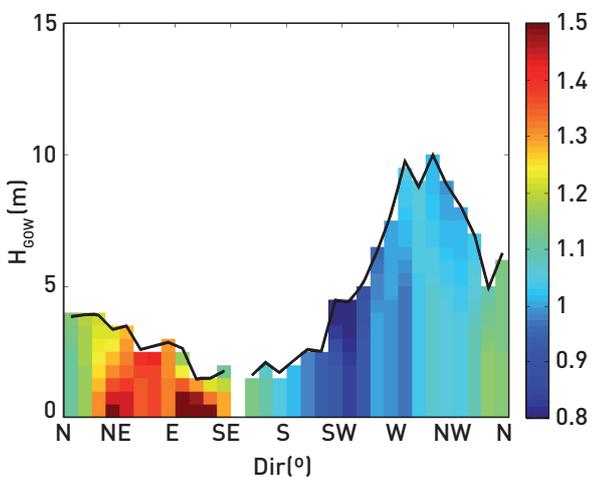
**Figura 4.8. Diagramas QQplot con las alturas de ola instrumentales (satélite) versus GOW calibrado y sin calibrar. Punto de Ibiza**



La gran ventaja de calibrar direccionalmente el oleaje radica en el hecho de que no todos los estados de mar del reanálisis necesitan la misma corrección, de esta manera se consigue que a lo largo del registro los errores y aciertos sean independientes de la dirección del oleaje.

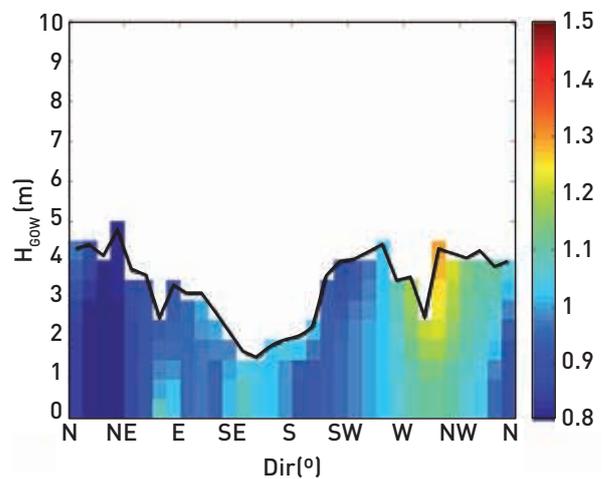
Por último, en las Figuras 4.9 y 4.10 se muestra el valor medio del coeficiente de corrección ( $k=H_{s,c}/H_{s,GOW}$ ) por direcciones e intervalos de altura de ola de 0,25 m para los puntos del Cantábrico e Ibiza respectivamente.

**Figura 4.9. Valor medio del coeficiente de corrección y valor máximo de altura de ola (línea negra) por direcciones. Punto del Cantábrico**



En la Figura 4.9 se puede ver que los oleajes del noroeste, los más importantes de la zona no tienen apenas corrección (coeficiente de corrección en torno a 1), lo que muestra la fiabilidad de la base de datos GOW. El mayor problema se encuentra en los oleajes procedentes del sur y del nordeste, los cuales son poco probables y difíciles de modelar, puesto que son oleajes de viento en generación debido a la proximidad del continente y la limitación por fetch. Como se puede ver la variación del coeficiente de corrección por direcciones y alturas de ola es suave, lo que se corresponde con la variación natural del proceso físico.

**Figura 4.10. Valor medio del coeficiente de corrección y valor máximo de altura de ola (línea negra) por direcciones. Punto de Ibiza**



En cuanto a la corrección de los oleajes del punto de Ibiza, se puede ver cómo todas las direcciones muestran una corrección suave y en torno a 1. Los oleajes procedentes del norte y nordeste están ligeramente sobreestimados, teniendo que reducirlos multiplicándolos por un coeficiente próximo a 0,8. Sin embargo, los oleajes procedentes del sector oeste son multiplicados por valores en torno a 1,1, amplificando de esta manera los datos obtenidos por el GOW.

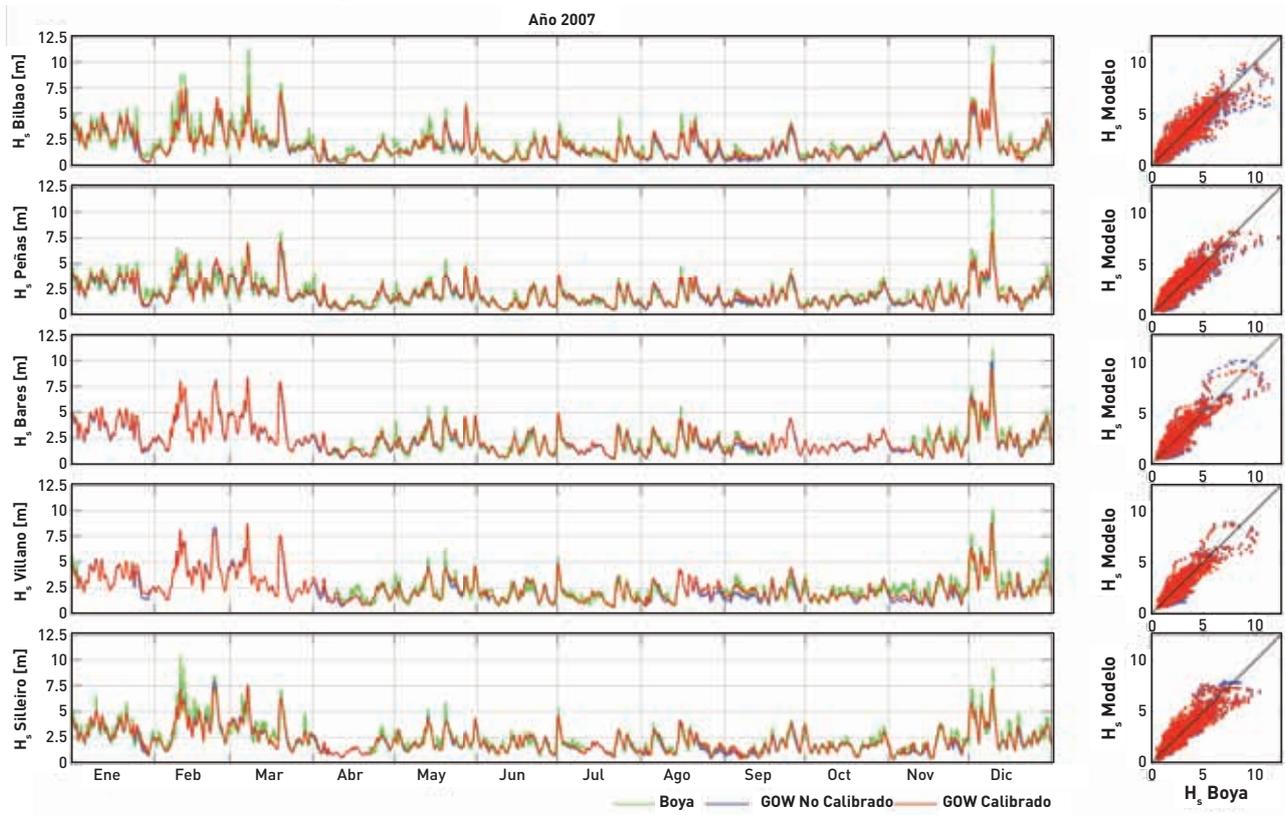
### 4.3 VALIDACIÓN

Finalmente, una vez realizada la calibración con datos de satélite se procede a la validación en las posiciones de las boyas exteriores en profundidades indefinidas.

En la Figura 4.11 se muestra la validación de la calibración en 5 boyas del Cantábrico: Bilbao, Cabo

Peñas, Estaca de Bares, Villano-Sisargas y Silleiro. Se muestra la serie temporal del año 2007 de la boya, el reanálisis GOW sin calibrar y el reanálisis GOW calibrado. Asimismo la información se completa con el gráfico de dispersión en el que se representan los datos de la boya frente a los datos GOW calibrados.

**Figura 4.11. Validación de la calibración en la posición de 5 boyas exteriores del Cantábrico en el año 2007. La corrección a realizar en estos casos es inapreciable a esta escala ya que la calidad del reanálisis GOW es muy elevada**



# **5 Transferencia de las dinámicas a aguas costeras**

Para la caracterización del recurso energético a lo largo de la costa española con suficiente resolución espacial y temporal es necesario utilizar la base de datos de reanálisis del oleaje GOW. Estos datos generados numéricamente definen el oleaje en aguas profundas siendo necesaria la aplicación de una metodología para su transferencia hasta aguas someras. En el capítulo 2 (apartado 2.5 *Organigrama de la metodología*) se ha descrito la metodología considerada en este trabajo.

Con el objetivo de una mejor caracterización de la energía del oleaje en aguas someras, se dispone de los espectros direccionales de la energía del oleaje en una serie de puntos localizados en aguas profundas a lo largo del litoral español, obtenidos en la generación de base de datos GOW. Por tanto, se transfiere el oleaje hasta la costa partiendo de unas condiciones de contorno del oleaje definidas por estos espectros direccionales y mediante el anidamiento de un modelo de propagación del oleaje. La aplicación de un modelo de propagación requiere la definición de una malla de computación que se extiende desde la posición de los datos del oleaje en aguas profundas hasta la costa, en este caso en los puntos en los que se dispone de los espectros de la base de datos GOW. En este trabajo, se han considerado una serie de mallas para poder abarcar todo el litoral español. En cada una de estas mallas se aplica la metodología de propagación propuesta, que conlleva la calibración de los datos en aguas profundas, la selección de una serie de casos representativos, la propagación de estos casos y la reconstrucción de la serie temporal para la obtención posteriormente del recurso energético.

A continuación se describen la serie de mallas establecidas en la transferencia de las dinámicas a aguas someras. Posteriormente, se exponen las etapas de clasificación, propagación y reconstrucción del oleaje, comunes a cada una de las mallas generales en las que se ha dividido el proceso de caracterización del recurso energético. También se incluye la descripción de la librería de casos propagados y la validación de la transferencia del oleaje en aguas someras en la localización de las boyas costeras distribuidas a lo largo de la costa española.

## 5.1 SELECCIÓN DE LAS MALLAS

La propagación del oleaje desde aguas profundas a aguas someras se realiza mediante el modelo numérico de propagación SWAN (*Simulating WAves Nearshore*) desarrollado por *Delft University of Technology*. Cada una de las situaciones de oleaje a propagar está definida por unas condiciones de contorno, que vienen dadas por los datos de oleaje de la base de datos GOW, y forzadas por unos campos de viento procedentes de la base de datos de reanálisis atmosférico.

Para la ejecución del modelo numérico son necesarias una serie de mallas de cálculo que permitan la transferencia del oleaje desde la posición de los datos espectrales hasta la costa. Además a estas mallas se le anidan otra serie de mallas de tamaño inferior pero con mayor resolución espacial para poder ofrecer unos resultados del recurso energético del oleaje con un mayor detalle (mejora de resolución, regionalización o *downscaling*).

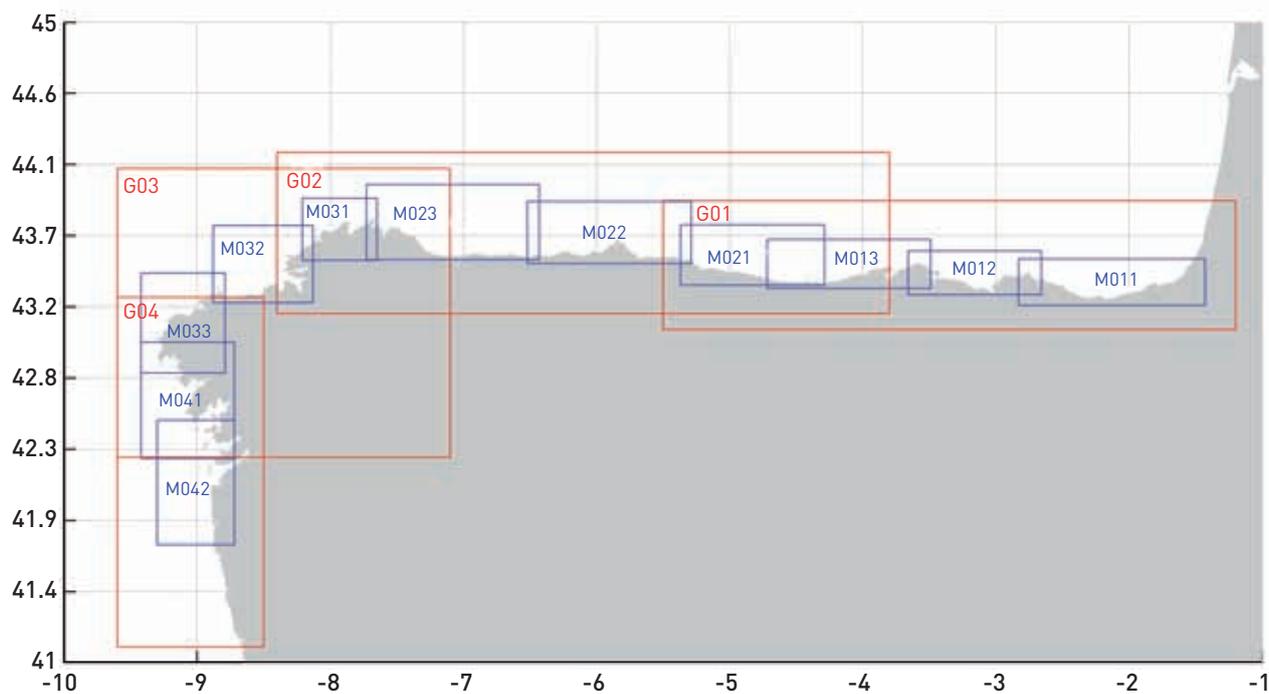
El oleaje en el Atlántico (en este caso Cantábrico y Canarias) y el oleaje en el Mediterráneo (costa sur del Atlántico y Mediterráneo propiamente dicho) presentan características diferentes debido principalmente a su generación. En el caso del Atlántico, los oleajes tienen una componente *swell* muy importante, es decir, son generados por borrascas localizadas a grandes distancias de la costa. Por el contrario, en el Mediterráneo, debido a su configuración de mar local, los oleajes de *swell* no están tan desarrollados y están formados en su mayor parte por vientos más locales (componente *sea*). Esta característica del oleaje en el mar Mediterráneo supone una mayor variabilidad espacial del oleaje. Por tanto, estas características del clima marítimo ha condicionado la selección de mallas de cálculo del modelo de propagación. En el Atlántico se han planteado mallas desde aguas más profundas y de mayores dimensiones. En el Mediterráneo, las mallas abarcan un área más local. A continuación se describen las características de las mallas seleccionadas para cada uno de los casos.

En el Atlántico, se han planteado unas mallas generales (Malla G) que se extienden desde la localización de los datos del oleaje en forma de registros espectrales de la base de datos GOW hasta la costa con una resolución espacial de  $0.01^\circ \times 0.008^\circ$  (1,11 km x 0,89 km). A estas mallas se le han anidado

unas mallas más cercanas a costa (Mallas M) con una mayor resolución espacial de  $0.005^\circ \times 0.004^\circ$  (0,555 km x 0,444 km), ver Figura 5.1. Las mallas G de Canarias presentan una resolución espacial de  $0.005^\circ \times 0.004^\circ$  (0,555 km x 0,444 km), y las mallas M de  $0.0025^\circ \times 0.002^\circ$  (0,28 km x 0,22 km), ver

Figura 5.2. En el Mediterráneo se ha considerado un único tamaño de malla para transferir el oleaje desde aguas profundas a aguas someras (Mallas GM) con una resolución espacial de  $0.0025^\circ \times 0.0025^\circ$  (0,28 km x 0,28 km), ver Figura 5.3.

**Figura 5.1. Mallas de propagación del Cantábrico**



**Figura 5.2. Mallas de propagación de Canarias**

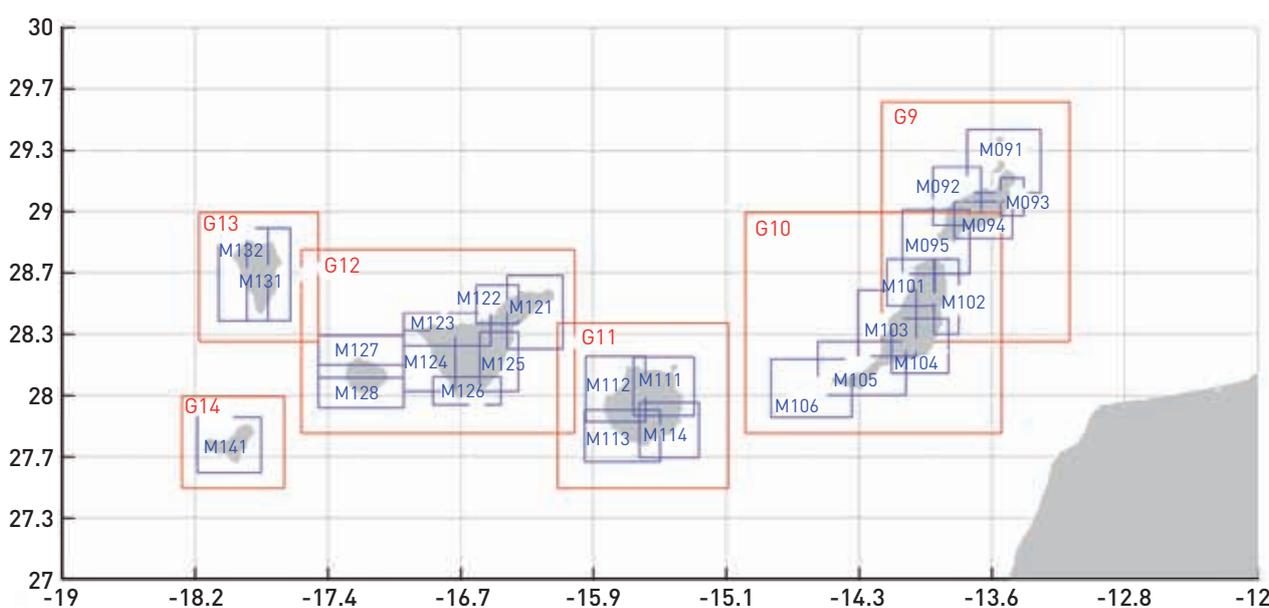
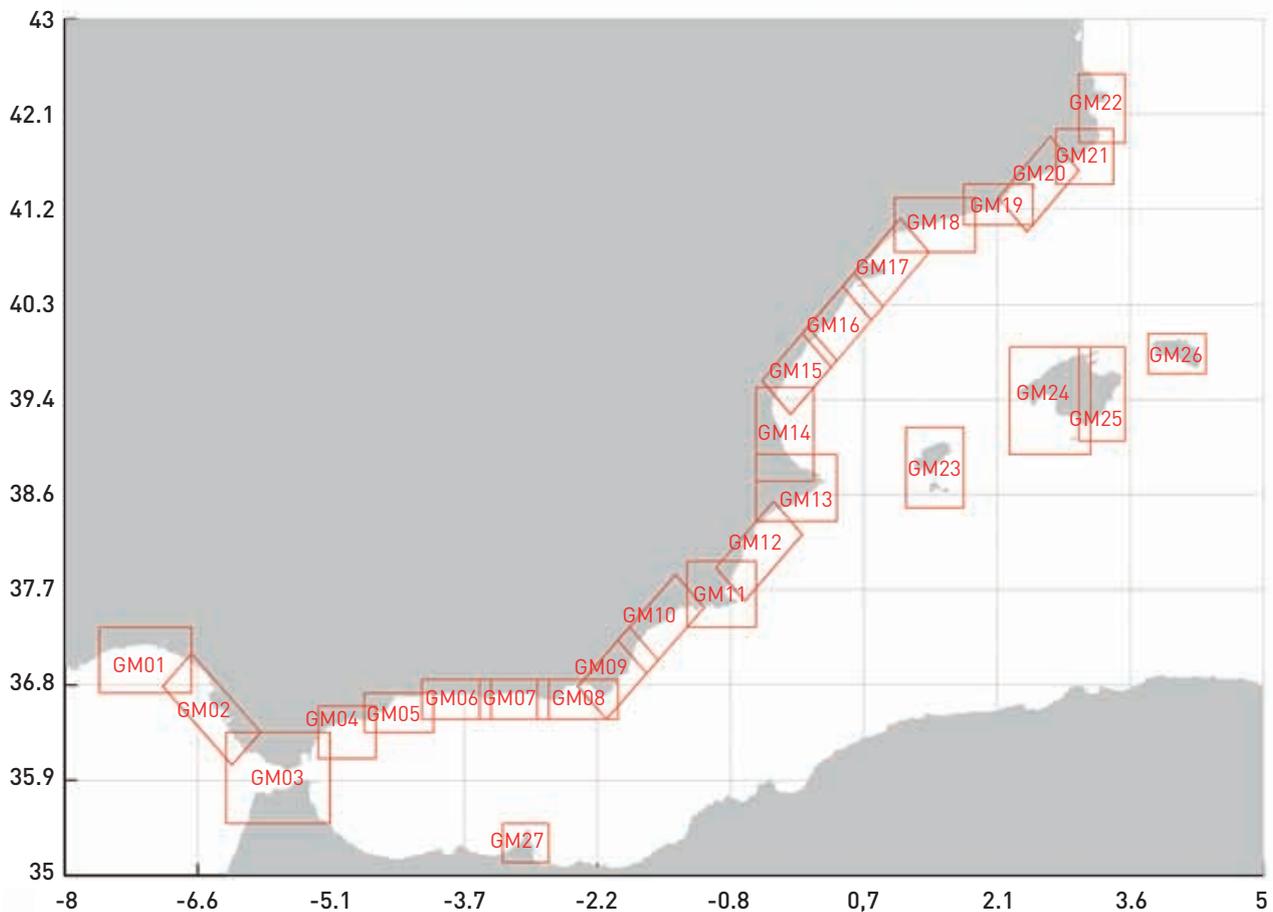


Figura 5.3. Mallas de propagación del Mediterráneo



## 5.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ESTADOS DE MAR

Esta etapa 2 de la metodología general de propagación del clima marítimo (apartado 2.5. *Organigrama de la metodología*) consiste en la selección de una serie reducida de casos representativos del oleaje en profundidades indefinidas. La selección de los estados de mar a propagar se realiza mediante el algoritmo de máxima disimilitud (MaxDiss) que permite la identificación de aquel subconjunto  $M$  con la mayor diversidad posible del total de la base de  $N$  datos (Camus *et al.*, 2010). Este algoritmo comienza con la inicialización del subconjunto mediante la elección de un dato de la base origen. Los siguientes elementos del subconjunto seleccionados se corresponden con los datos aún pertenecientes a la base de

datos de partida que presenta la mayor disimilitud con respecto al subconjunto seleccionado.

Este proceso de clasificación de los estados de mar en aguas profundas se realiza para cada una de las mallas generales planteadas a lo largo del litoral español. El oleaje a clasificar está definido por las series horarias de los parámetros espectrales en los nodos de la base de datos de reanálisis GOW en los que se dispone de los espectros direccionales que, a su vez, definen las condiciones de contorno de las mallas de propagación.

### 5.2.1 Algoritmos de máxima disimilitud (MaxDiss)

Los algoritmos de máxima disimilitud consisten en la selección de un subconjunto de datos representativo de la muestra de datos de partida. Por tanto, si

se dispone de una muestra de datos  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  compuesta por  $N$  vectores  $n$ -dimensionales, el objetivo de este algoritmo consiste en obtener un número  $M$  de vectores  $\{v_1, \dots, v_M\}$  de los datos de partida que representen la diversidad de estos datos. El algoritmo comienza con la inicialización del subconjunto  $\{v_j\}$  mediante la transferencia de un dato de la base de partida. La selección del resto de elementos se realiza iterativamente, y en cada ciclo se transfiere al subconjunto aquel dato perteneciente a la base de datos de partida con la mayor disimilitud respecto al subconjunto seleccionado.

Este algoritmo fue descrito por Kennard y Stone (1969) y admite distintas versiones dependiendo del criterio considerado en la inicialización del subconjunto y en el criterio de selección del resto de datos del subconjunto. En este trabajo el elemento inicial del subconjunto  $\{v_j\}$  es el estado de mar con la mayor altura de ola significativa.

Una vez seleccionado el primer elemento del subconjunto, la selección del resto de elementos se realiza en dos fases. En primer lugar, para cada dato aún perteneciente a la base de datos de partida, se calcula la distancia o disimilitud con todos los elementos del subconjunto y se define una única distancia entre este dato y el subconjunto, según distintos criterios. En segundo lugar, una vez que se dispone de la distancia entre cada dato de la muestra de partida y el subconjunto, se elige aquel dato con el máximo valor de esta distancia.

Por ejemplo, si en el subconjunto ya existen  $R$  ( $R \leq M$ ) datos seleccionados, primero se calcula la disimilitud entre el dato  $i$  de la muestra de datos  $N-R$  y los  $j$  elementos pertenecientes al subconjunto  $R$ :

$$d_{ij} = \|x_i - v_j\|; i = 1, \dots, N - R; j = 1, \dots, R \quad (5.1)$$

Posteriormente se calcula la disimilitud  $d_{i, \text{subconjunto}}$  entre el dato  $i$  y el subconjunto  $R$ , esta definición admite varios criterios (Willet *et al.*, 1996). Después de diversas pruebas, el subconjunto de casos seleccionados más representativo de los datos de partida se consigue definiendo la distancia  $d_{i, \text{subconjunto}}$  como:

$$d_{i, \text{subconjunto}} = \min\{\|x_i - v_j\|\}; i = 1, \dots, N - R; j = 1, \dots, R \quad (5.2)$$

En segundo lugar, una vez calculadas las  $N-R$  disimilitudes según el criterio elegido, el dato con la máxima disimilitud es seleccionado para ser incluido en el subconjunto.

Los algoritmos de máxima disimilitud presentan un tiempo de cálculo de  $O(m^2N)$  para la selección de un subconjunto de  $M$  datos a partir de una base de datos de  $N$  elementos. En este trabajo se ha aplicado una versión simplificada (Polinsky *et al.*, 1996) que permite reducir el tiempo de computación a  $O(mN)$ .

En esta versión, el cálculo de la distancia  $d_{i, \text{subconjunto}}$  definida como el mínimo de las distancias entre el elemento  $i$  y los  $R$  elementos pertenecientes al subconjunto, no supone determinar cada una de las distancias entre los diferentes elementos,  $d_{ij}$ . Por ejemplo, en la selección del elemento  $r$ , la definición de la distancia  $d_{i, \text{subconjunto}}$  se define como el mínimo de la distancia entre el dato  $i$  de la muestra de datos de partida (compuesta en este ciclo del algoritmo por  $N-(R-1)$  elementos) y el último dato añadido al subconjunto  $R$ , y la distancia mínima entre el dato  $i$  y los datos del subconjunto  $R-1$  calculada en el paso anterior.

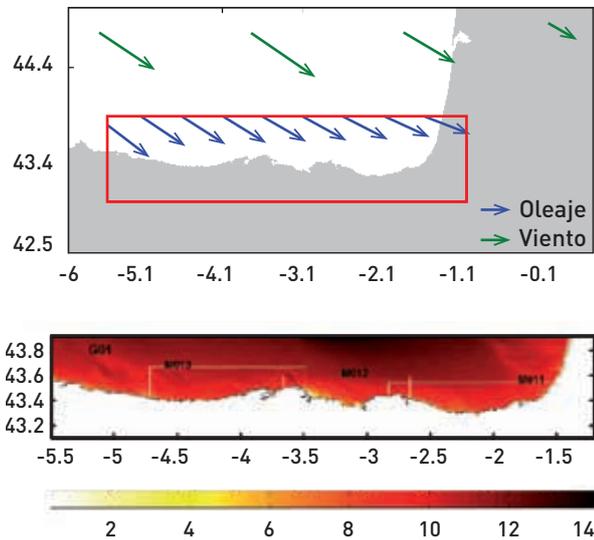
$$d_{i, \text{subconjunto}}^{\min} = \min [d_{i, R} + d_{i, \text{subconjunto } (R-1)}^{\min}] \quad (5.3)$$

## 5.2.2 Metodología para la selección de los estados de mar a propagar

En la metodología que se aplica en este trabajo se considera la variabilidad espacial del clima marítimo en profundidades indefinidas. Esto significa que cada situación horaria del clima marítimo se define a partir de las condiciones del oleaje en el contorno del área de estudio y el campo de vientos sobre toda el área.

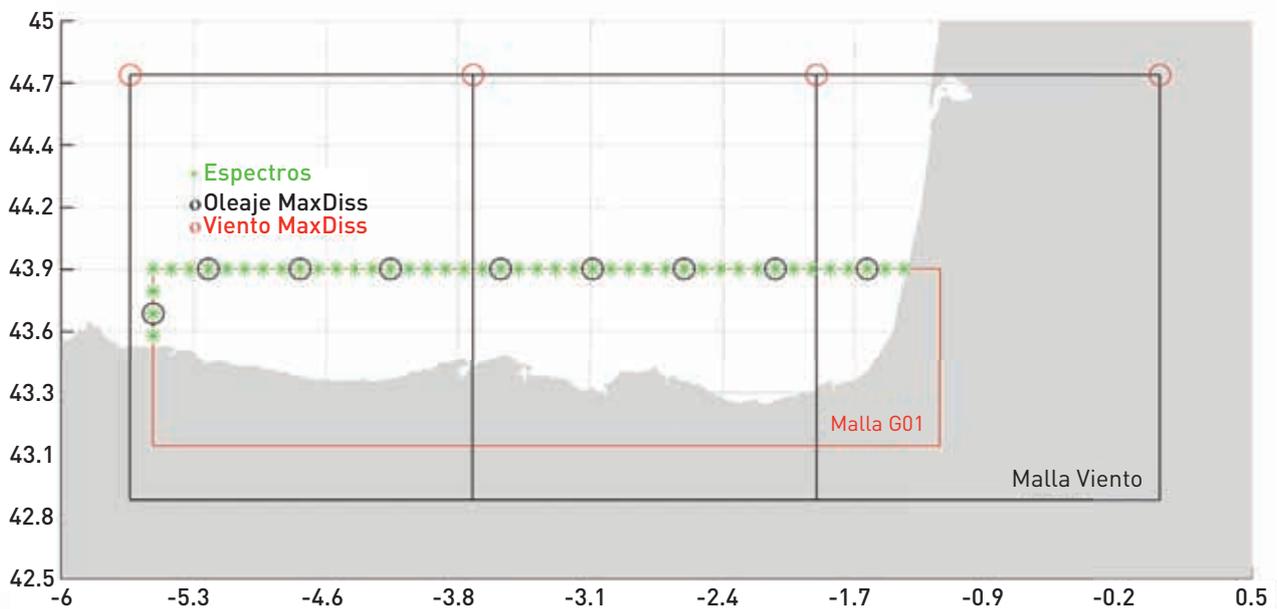
En la gráfica superior de la Figura 5.4 se muestra una condición horaria del clima marítimo en el área de propagación considerada para la caracterización del oleaje a lo largo de la costa este del Cantábrico (malla G01). Se puede apreciar cómo la dirección del oleaje varía a lo largo del contorno superior. En la gráfica inferior de la Figura 5.4 se muestra la propagación de las condiciones del oleaje representadas en la gráfica superior. En este caso se puede observar también la diferencia en la magnitud del oleaje en el contorno superior de la malla de propagación. Además se puede comprobar la influencia de la variabilidad espacial del campo de oleaje en la propagación del oleaje hasta aguas someras. A continuación se describe el proceso de selección de los casos representativos del clima marítimo multidimensional.

**Figura 5.4. Condiciones de oleaje y viento en la malla de propagación G01 y su correspondiente propagación. Escala: altura de ola significativa (en m)**



En primer lugar es necesario determinar el número de nodos de reanálisis que se van a considerar en la definición del clima marítimo en profundidades indefinidas. En el caso de la malla G01, se disponen los espectros en una serie de puntos en el contorno de la malla (se han marcado en verde en la Figura 5.5). Para la definición de la variabilidad espacial del clima marítimo y la selección de un conjunto de casos representativos del clima en aguas profundas, se han considerado los puntos señalados en la Figura 5.5 (Oleaje MaxDiss). Se han utilizado los parámetros espectrales  $H_s$ ,  $T_m$  y  $\theta_m$  de estos puntos. Por otro lado, para definir las características del viento simultáneas al oleaje se han empleado los parámetros  $W_x$  y  $W_y$  de los cuatro puntos indicados (Viento MaxDiss señalados en la Figura 5.5), perteneciente a la malla de vientos NCEP.

**Figura 5.5. Puntos de oleaje y viento utilizados en la selección de los casos representativos del clima marítimo en profundidades indefinidas mediante MaxDiss para el caso de la malla G01 del Cantábrico**



Por tanto, los datos de oleaje en el contorno se definen como:

$$X_i = \{H_{s,1}, T_{m,1}, \theta_{m,1}, \dots, H_{s,9}, T_{m,9}, \theta_{m,9}, W_{x,1}, W_{y,1}, \dots, W_{x,4}, W_{y,4}\}_i \quad i=1, \dots, N \quad (5.4)$$

donde  $N$  es el número total de datos,  $N=534.000$  en el caso de la base de datos GOW 1.0, y  $n$  la dimensión de los datos, en este caso  $n=35$ .

El nivel de marea correspondiente a cada situación de oleaje afecta a la propagación del oleaje. El efecto de la marea se considera importante en la propagación en aquellas zonas en las que la carrera de marea astronómica es significativa (valores superiores a 1,0 m). La zona correspondiente a la malla G01 está sometida a una carrera de marea media de unos 4,5 m, y por tanto, es necesario tener en cuenta el nivel asociado a cada estado de mar. Este fenómeno se incluye en la caracterización del clima marítimo en aguas someras mediante la propagación de los casos seleccionados en una serie de niveles representativos de todas las posibles situaciones (por ejemplo, la bajamar mínima viva equinoccial (BMVE), nivel medio del mar (NMM) y pleamar máxima viva equinoccial (PMVE)), y posterior reconstrucción de cada situación del clima marítimo en indefinidas interpolando al nivel correspondiente.

Generalmente, las distintas componentes de los espacios de alta dimensionalidad suelen estar correlacionadas, lo que supone que existe información redundante. La técnica del análisis de las componentes principales permite reducir la dimensionalidad de una muestra de datos mediante la proyección en un nuevo espacio de menor dimensión conservando el máximo de la varianza de los datos. En el caso del clima marítimo en profundidades indefinidas, la reducción de la dimensionalidad facilita la posterior aplicación de la técnica de selección MaxDiss.

Este método estadístico descompone una determinada variable numérica espacio-temporal  $R(x,t)$  en

$$X_i^i = \{H_{s,1}, T_{m,1}, \theta_{mx,1}, \theta_{my,1}, \dots, H_{s,9}, T_{m,9}, \theta_{mx,9}, \theta_{my,9}, W_{x,1}, W_{y,1}, \dots, W_{x,4}, W_{y,4}\}_i \quad i=1, \dots, N \quad (5.7)$$

y una vez estandarizados:

$$X_i^* = \{H_{11}, T_{11}, \theta_{x,11}, \theta_{y,11}, \dots, H_{11}, T_{11}, \theta_{x,11}, \theta_{y,11}, W_{x,1}, W_{y,1}, \dots, W_{x,4}, W_{y,4}\}_i \quad i=1, \dots, N \quad (5.8)$$

Posteriormente, se aplica la técnica de componentes principales a los datos del clima marítimo estandarizados. La media temporal de cada variable es cero debido a la estandarización, por lo que:

$$X^*(x,t) = \sum_{i=1}^d EOF_{X_i^*}(x) \cdot PC_{X_i^*}(t) \quad (5.9)$$

En la Figura 5.6 se muestra una situación horaria de oleaje en profundidades indefinidas compuesta por un oleaje del NW y un viento asociado de la misma dirección. En las gráficas inferiores de esta

una combinación lineal de modos o funciones ortogonales numéricas (EOFs). Estos modos espaciales definen la nueva base de proyección y representan aquellas direcciones del espacio donde los datos tienen la mayor varianza. Las proyecciones sobre esta nueva base son las componentes principales (PCs). Por tanto, una variable numérica espacio temporal se puede expresar como:

$$R(x,t) = \overline{R(x)} + \sum_{i=1}^n EOF_i(x) \cdot PC_i(t) \quad (5.5)$$

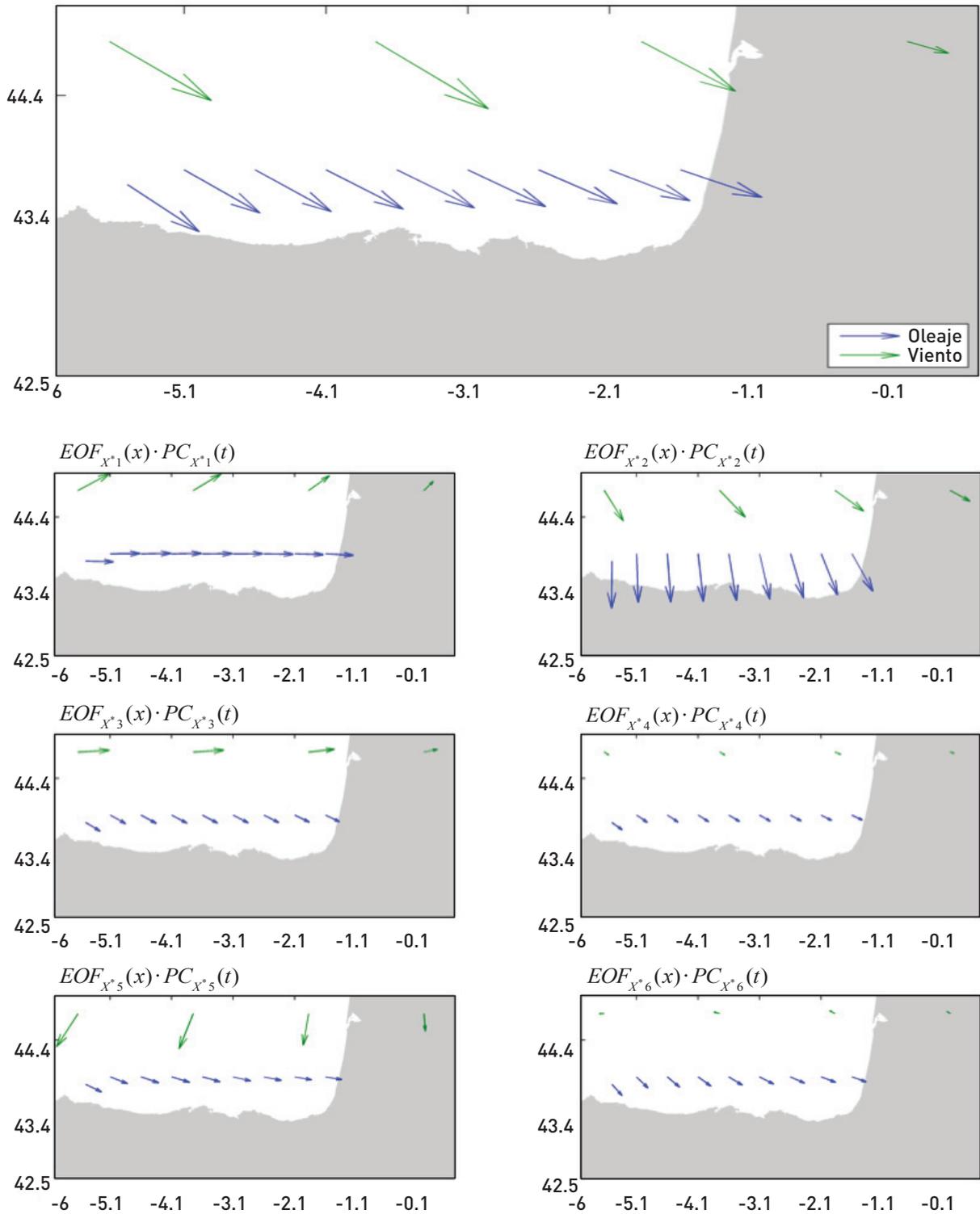
donde  $\overline{R(x)}$  es la media de la variable,  $EOF_i(x)$  son los modos espaciales o vectores de proyección,  $PC_i(t)$  son las componentes temporales y  $n$  es la dimensión espacial de los datos de partida. La proyección de los datos sobre cada modo temporal explica una determinada varianza de los mismos. Los EOFs están numerados de mayor a menor en función de la cantidad de varianza. Como el objetivo es proyectar los datos en un espacio de menor dimensión, se suele considerar un número  $d$  de EOFs, tal que  $d \ll n$ .

$$R(x,t); \overline{R(x)} + \sum_{i=1}^d EOF_i(x) \cdot PC_i(t) \quad (5.6)$$

La aplicación de esta técnica requiere, en primer lugar, la descomposición de las direcciones del oleaje y del viento en sus componentes zonal y meridional ( $x$  e  $y$ ), y en segundo lugar, la estandarización de todas las variables para evitar problemas debido a la diferencia de escalas. De tal manera que los datos quedan definidos de la siguiente forma:

figura se muestra la contribución de las 6 primeras EOFs en la definición de la situación temporal considerada. Por ejemplo, el primer modo representa la variación de la altura de ola significativa en la dirección W y de la intensidad del viento en la dirección SW, mientras que el segundo modo representa la variación de la altura de ola en la dirección NNW y la variación de la intensidad del viento en la dirección NW.

Figura 5.6. Situación de temporal y contribución de los 6 primeros EOFs



A mayor número de EOFs considerados mayor es la varianza total explicada y mayor la aproximación a los datos espacio-temporales originales. En el panel superior de la Figura 5.7 se muestra el valor de la varianza acumulada en función del número de modos espaciales. Se puede observar cómo para un número de EOFs igual a 5 la varianza es superior al 90%, y para un número superior a 25 es

prácticamente del 100%. En el panel inferior de la figura se han representado los errores medios de las variables estandarizadas. En la Figura 5.8 se muestran los errores medios para las variables originales; por ejemplo, si se considera una varianza igual al 99,0% se cometen unos errores de 0,1 m; 0,2 s; 2.5° y menores de 1 m/s en la reconstrucción de  $H_s, T_m, T_m, \theta_m, W_x, W_y$ , respectivamente.

**Figura 5.7. Varianza explicada en función del número de EOFs. RMSE de las variables estandarizadas en función de la varianza explicada (%)**

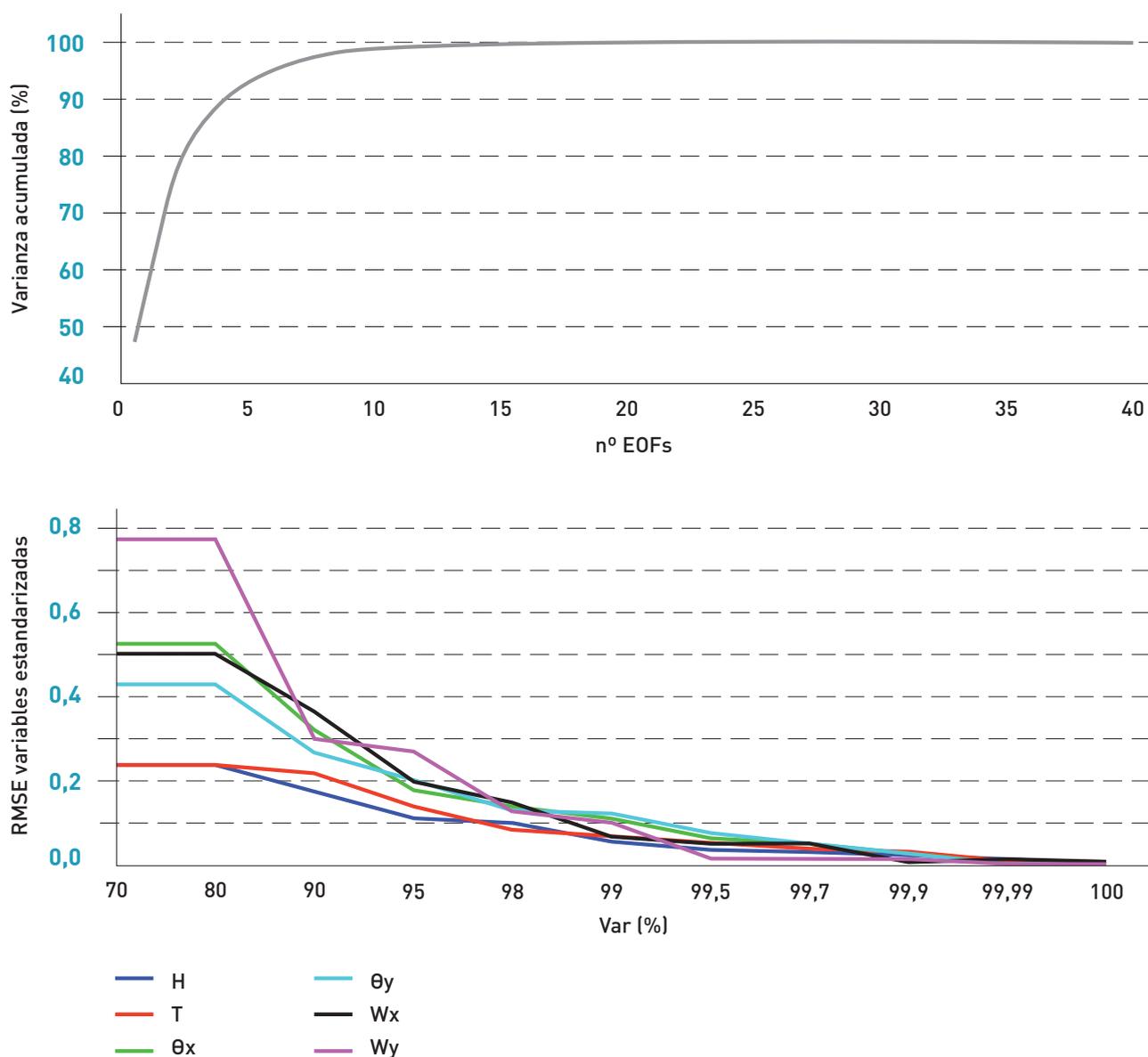
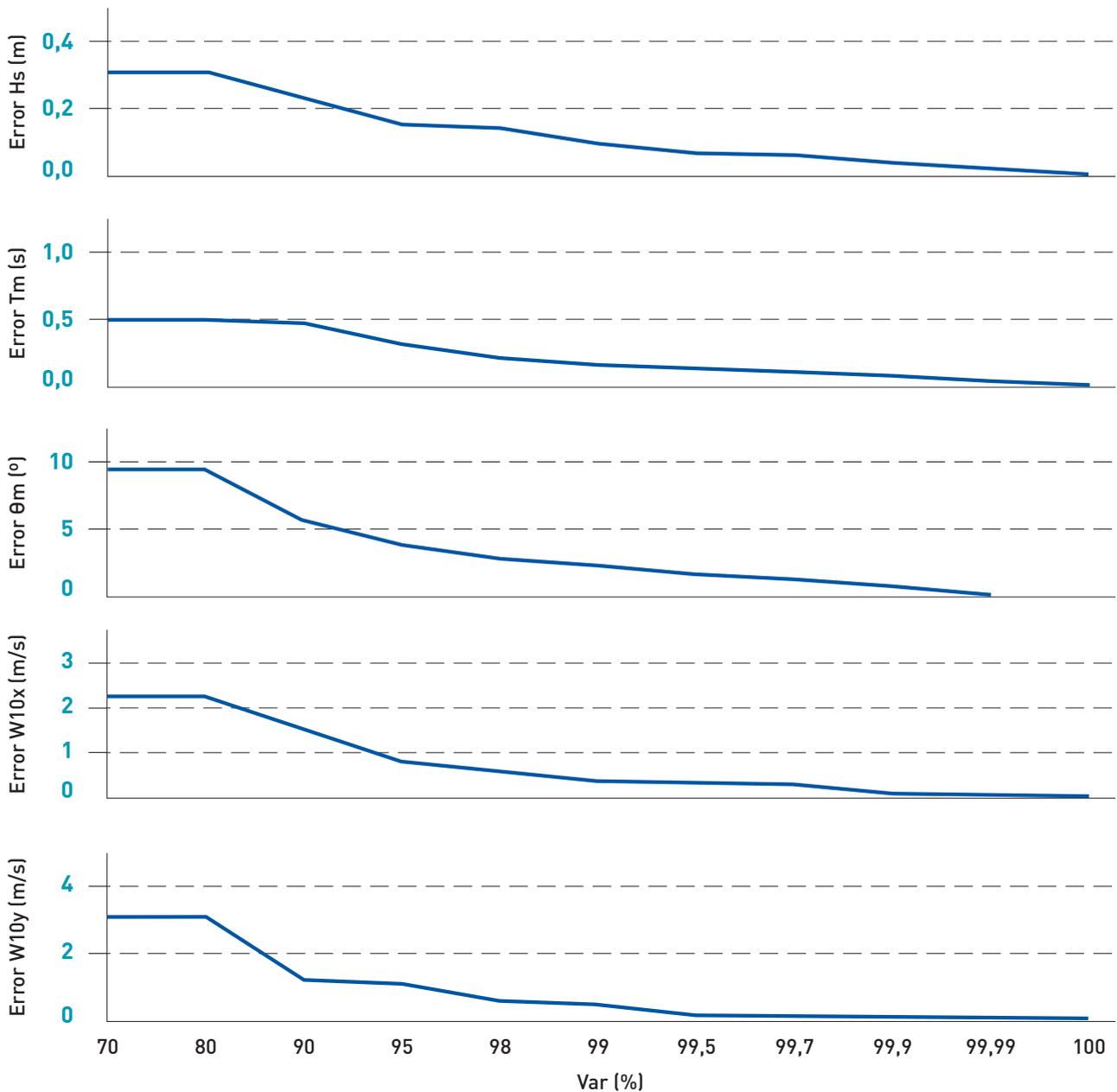


Figura 5.8. RMSE de las variables en función de la varianza explicada (%)



Una vez definido el clima marítimo multidimensional y reducida su dimensionalidad mediante la proyección en la base formada por los EOFs, se aplica el algoritmo MaxDiss a las componentes principales  $PC_{X^{*j}}(t)$  del espacio reducido para seleccionar los  $M$  casos representativos que se van a propagar mediante un modelo numérico. Se ha considerado un número de componentes principales  $d=13$  que explican un 99,0% de la varianza total de los datos originales.

El primer caso seleccionado se corresponde con aquel dato que presenta la mayor altura de ola significativa en el contorno del área considerada. El subconjunto seleccionado con el algoritmo MaxDiss en el espacio de proyección de los EOFs no se reconstruye por medio de los  $d$  modos espaciales  $EOF_{X^{*j}}$  considerados para volver al espacio original. Los casos seleccionados se buscan en la base de datos de partida, de esta forma se dispone de situaciones reales a propagar.

El subconjunto formado por  $M=500$  casos en el espacio de proyección de las EOFs se define como:

$$D_j^{EOF} = \{PC_{x^*}^D, \dots, PC_{x^*_d}^D\}_j \quad j=1, \dots, M \tag{5.10}$$

que en el espacio original de los datos se define como:

$$D_j = \{H_{s,1}^D, T_{m,1}^D, \theta_{m,1}^D, \dots, H_{s,11}^D, T_{m,11}^D, \theta_{m,11}^D, W_{x,1}^D, W_{y,1}^D, \dots, W_{x,19}^D, W_{y,19}^D\}_j \quad j=1, \dots, M \tag{5.11}$$

Dada la elevada dimensión de los datos seleccionados, en la Figura 5.9 se muestra la distribución de los casos seleccionados (en verde) sobre los datos de partida (en rojo) para los tres parámetros  $\{H_s, T_m, \theta_m\}$  del punto 5 de oleaje y los dos parámetros  $\{W_x, W_y\}$  del punto 2 de viento de la Figura 5.5. En realidad cada uno de los casos seleccionados está definido según se muestra en la Figura 5.10.

**Figura 5.9. Distribución de los casos seleccionados correspondientes a los datos del punto 5 de oleaje y punto 2 de viento de los utilizados en la selección con MaxDiss**

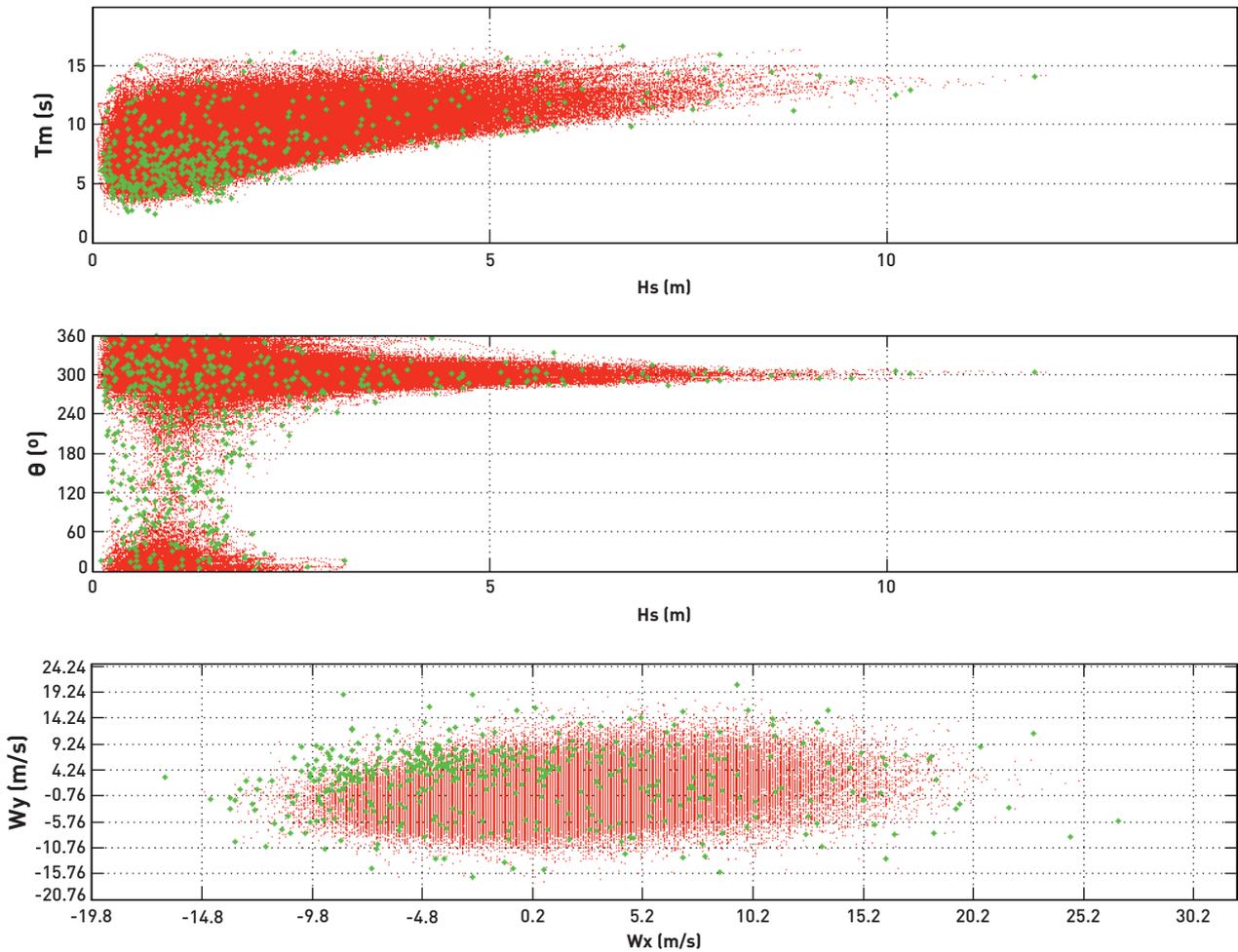
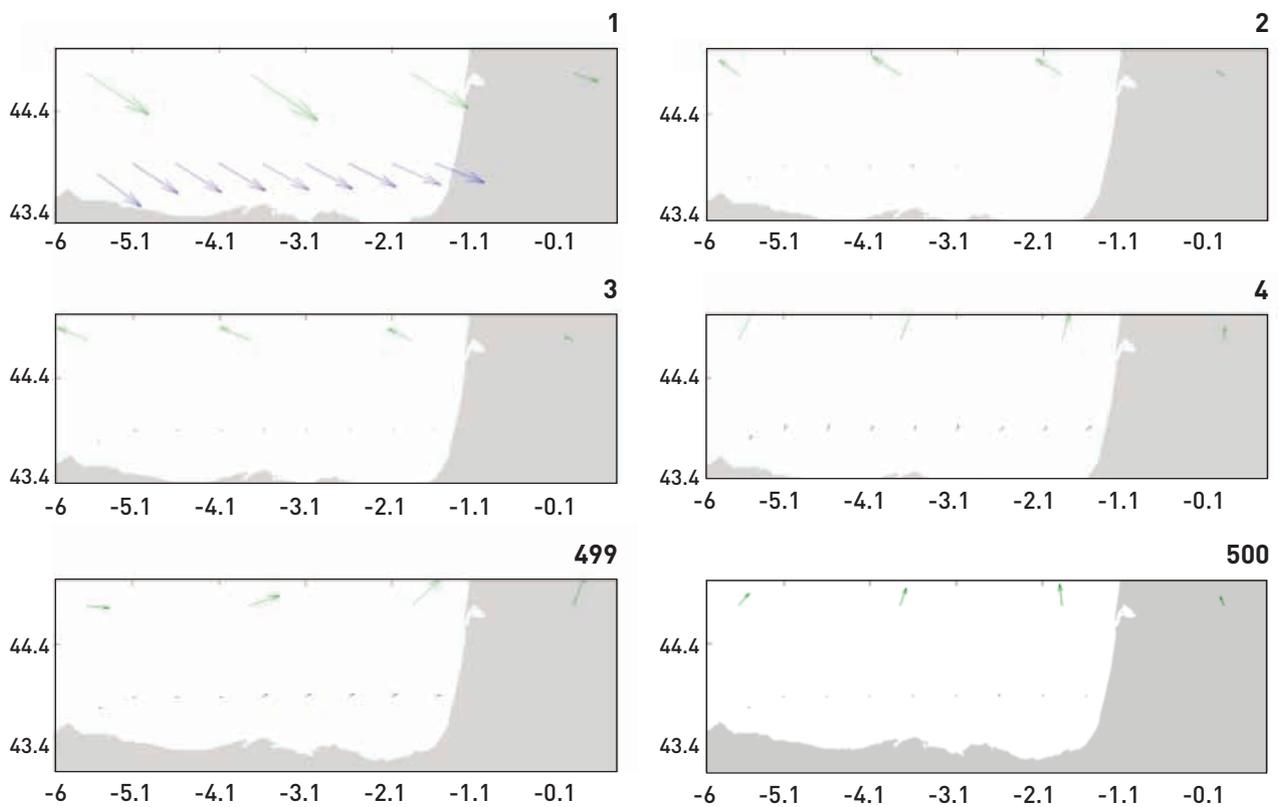
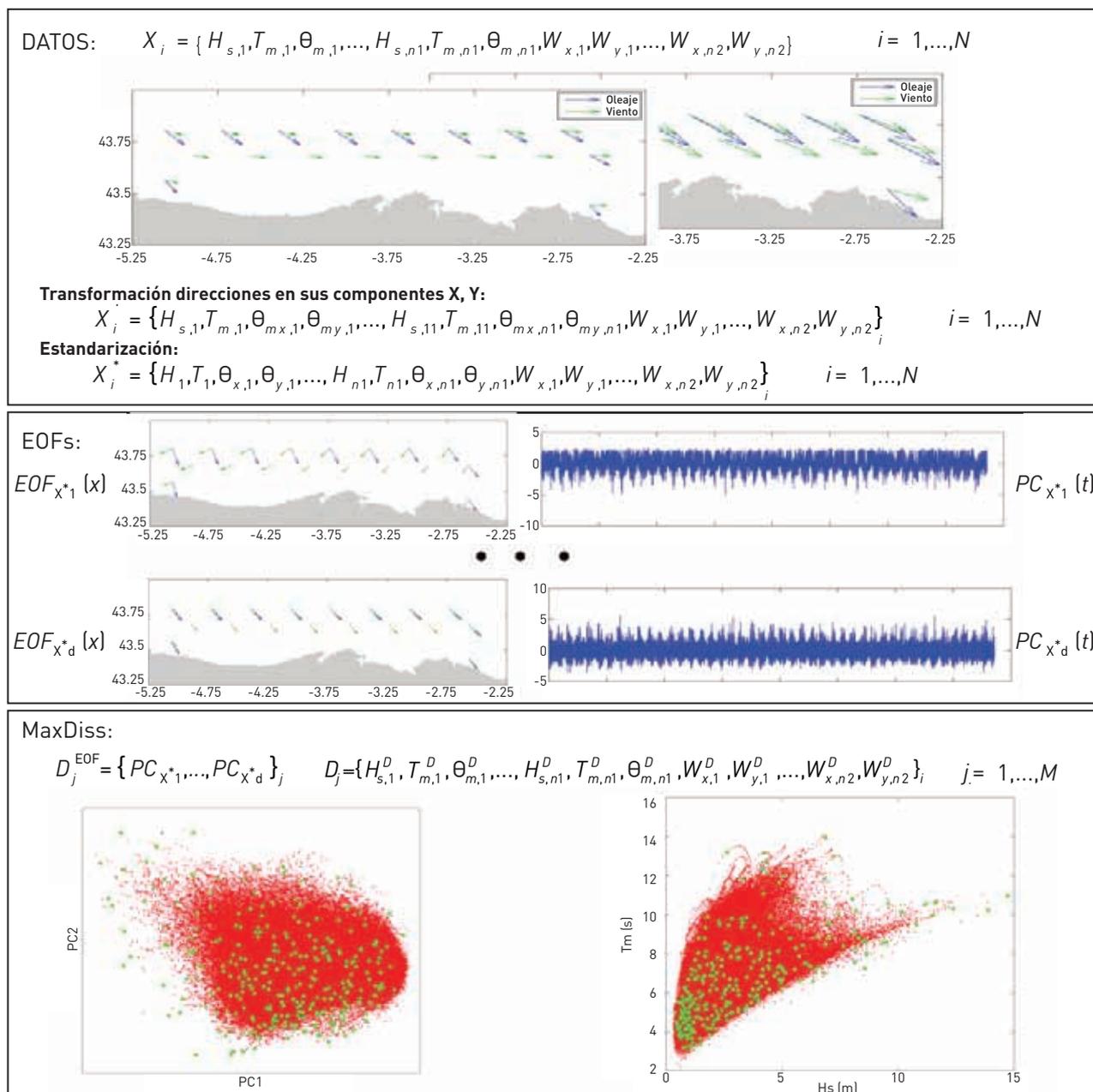


Figura 5.10. Casos seleccionados con el algoritmo MaxDiss en la malla G01



En el esquema de la Figura 5.11 se resumen los pasos necesarios para la selección de los casos representativos del clima marítimo con variabilidad espacial en profundidades indefinidas.

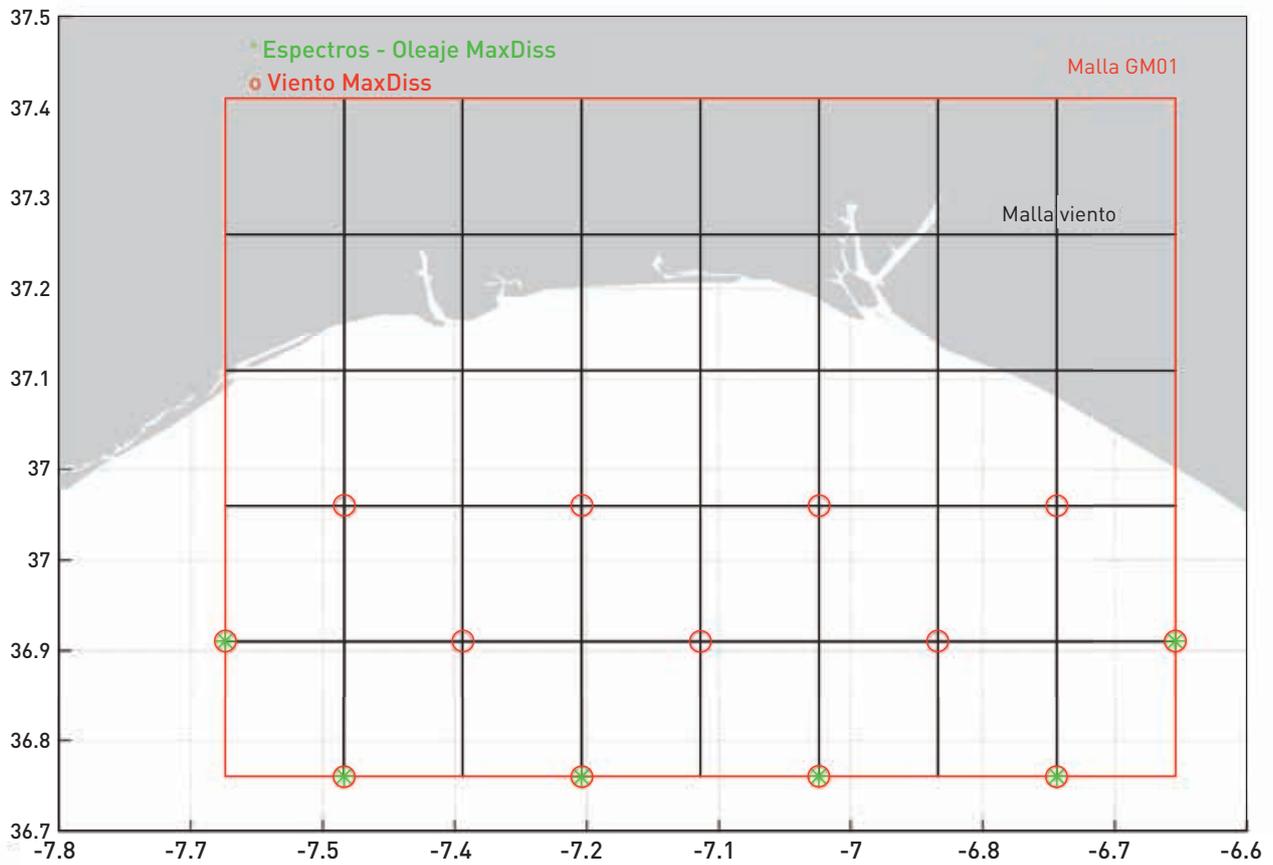
- En primer lugar se eligen los  $n1$  puntos de reanálisis que definen las condiciones de contorno del oleaje y los  $n2$  puntos que definen los campos de vientos. Se transforman las variables direccionales en sus componentes  $x$  e  $y$ , y se estandarizan todas las variables.
- En segundo lugar, se aplica la técnica de las EOFs a los datos estandarizados obteniendo los  $d$  primeros modos que expliquen un determinado porcentaje de varianza (por ejemplo, 99,0%).
- En tercer lugar se seleccionan los  $M$  casos representativos de las componentes principales de los datos del clima marítimo en el espacio de proyección de las EOFs, y se identifican estos casos seleccionados en el espacio original de los mismos.

**Figura 5.11. Esquema del proceso de selección de los casos representativos del clima marítimo con variabilidad espacial en indefinidas**


En la Figura 5.12 se muestran los puntos utilizados en la selección de los casos representativos de la malla GM01 del reanálisis GOW 2.1. En este caso, los datos de viento proceden de la base de datos del reanálisis regional obtenido dentro del proyecto SeaWind (capítulo 3 *Bases de datos utilizadas*), la malla con los campos de viento presenta mayor resolución espacial y, por tanto, el número de puntos utilizados para definir el viento es mayor. Por tanto, los datos del oleaje en indefinidas se definen como:

$$X_i = \{H_{s,1}, T_{m,1}, \theta_{m,1}, \dots, H_{s,6}, T_{m,6}, \theta_{m,6}, W_{x,1}, W_{y,1}, \dots, W_{x,13}, W_{y,13}\} \quad i = 1, \dots, N \quad (5.12)$$

**Figura 5.12. Puntos de oleaje y viento utilizados en la selección de los casos representativos del clima marítimo en profundidades indefinidas mediante MaxDiss para el caso de la malla GM01 del GOW 2.1**

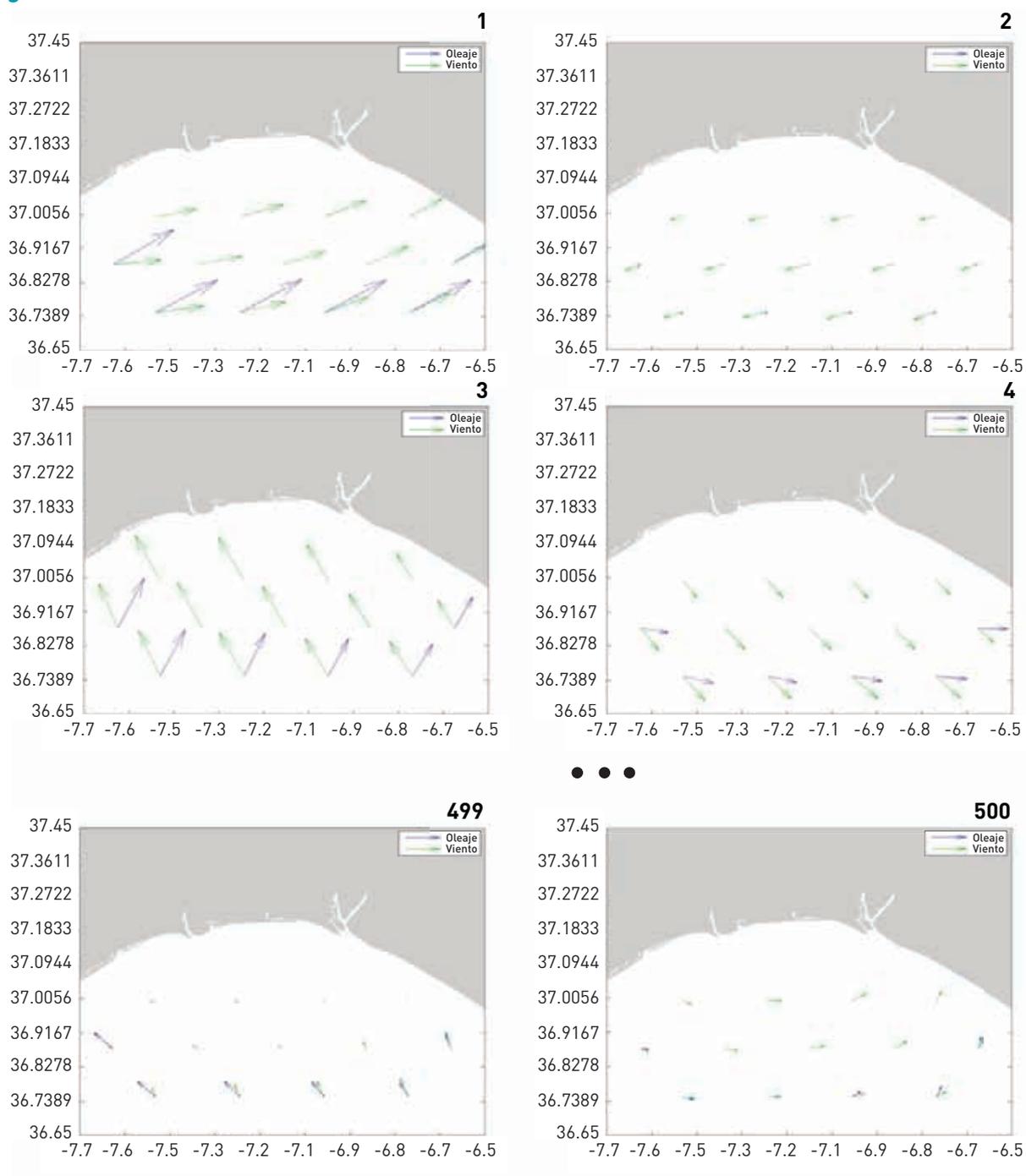


En el espacio original de los datos se define cada caso seleccionado mediante MaxDiss para la malla GM01 como:

$$D_j = \{H_{s,1}^D, T_{m,1}^D, \theta_{m,1}^D, \dots, H_{s,6}^D, T_{m,6}^D, \theta_{m,6}^D, W_{x,13}^D, W_{y,13}^D, \dots, W_{x,19}^D, W_{y,19}^D\}_j \quad j = 1, \dots, M \quad (5.13)$$

Estos casos seleccionados para la malla GM01 quedan definidos como se muestra en la Figura 5.13.

Figura 5.13. Selección MaxDiss de la malla GM01 del GOW 2.1



## 5.3 PROPAGACIÓN DEL OLEAJE A AGUAS SOMERAS

A medida que el oleaje se aproxima a la costa el efecto del fondo empieza a hacerse palpable. Como consecuencia de esta interacción de las ondas con el fondo, el oleaje se transforma. Estos procesos de transformación se traducen fundamentalmente en variaciones de la altura de ola y en la dirección de propagación.

Los fenómenos más importantes que sufre el oleaje cuando se acerca a la costa son: la refracción y el asomeramiento, debido a la batimetría y las corrientes, la difracción, como consecuencia de la presencia de cabos o islas, la pérdida de energía debido a la disipación con el fondo. Además, parte de esta energía se refleja y vuelve a aguas profundas. En aguas más someras, la amplitud de olas aumenta mientras que la longitud de onda se reduce, generando un peraltamiento del perfil de las olas. En estas profundidades, la celeridad de ola es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad, de manera que la cresta de la ola viaja a mayor velocidad produciéndose el vuelco sobre la base de la ola, se produce la rotura del oleaje, que genera una gran pérdida de energía y una gran turbulencia.

El objetivo de la metodología de propagación consiste en aproximar los oleajes desde aguas profundas hasta la costa y poder evaluar estadísticamente el recurso energético del oleaje. La batimetría de la zona de estudio y la orientación de la costa respecto a los oleajes incidentes condiciona los fenómenos más relevantes que sufre el oleaje para cada caso particular. Las características de la zona de estudio y los procesos de transformación del oleaje que se requieran resaltar imponen la elección del modelo de propagación.

Los modelos numéricos de propagación de ondas intentan modelar la transformación que sufre el oleaje en su propagación hacia la costa. Los diferentes tipos de modelos numéricos existentes dependen de las ecuaciones que se utilicen para modelar el problema y del esquema numérico empleado, que implica una serie de limitaciones en los fenómenos que son capaces de simular.

Actualmente, los modelos de propagación del oleaje pueden dividirse en dos grandes grupos: modelos que resuelven la fase, basados en las ecuaciones

de conservación de masa y de momentum, dependientes del tiempo e integrados en vertical; y los modelos de fase promediada, que se basan en la ecuación de balance de energía espectral. Los modelos que resuelven la fase se limitan a áreas pequeñas, del orden de 0-10 km, ya que requieren de 10-100 pasos de tiempo por periodo del oleaje. Por otro lado, los modelos que promedian la fase se pueden emplear en áreas más extensas porque no necesitan tanta resolución espacial.

Dado los condicionantes de este estudio en cuanto a la resolución espacial (~200 m) a lo largo del litoral español, se ha elegido el modelo de propagación energético SWAN, desarrollado por *Delft University of Technology*, basado en la ecuación de acción de onda que promedia la fase y no reconstruye la superficie del mar en el espacio y el tiempo (Booij, 1999).

Esta base teórica genera uno de los principales atractivos de este modelo, que es la posibilidad de propagar oleaje en todas las direcciones. Además es posible la aplicación de este tipo de modelos a extensas superficies, ya que no requiere un número mínimo de puntos de cálculo por longitud de onda. Por otro lado, las últimas versiones de este modelo (tercera generación) han incorporado fenómenos exclusivos de profundidades someras, como son la rotura del oleaje y las interacciones no lineales (triadas), que han permitido ampliar el rango de aplicación de estos modelos. Al ser un modelo energético se consigue simular la generación de oleaje por viento.

La ecuación que resuelve el modelo de propagación SWAN es la siguiente:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (5.14)$$

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (5.15)$$

Se trata de una ecuación de transporte de energía, en el que las variaciones locales de la energía espectral en el tiempo y las variaciones del flujo de energía en el espacio se compensan con las salidas y entradas de energía al sistema. En este caso el espacio presenta cuatro dimensiones, dos correspondientes al espacio geográfico  $x$  e  $y$ , las otras al espacio espectral, siendo la frecuencia y la dirección sus componentes.

Se considera la densidad de acción  $N(\sigma, \theta)$  en lugar de la densidad de energía espectral  $E(\sigma, \theta)$  porque en presencia de corrientes se conserva la densidad de acción y no la densidad de energía. Las variables independientes son  $\sigma$  (frecuencia relativa, en el caso de corrientes), y  $\theta$  (dirección de incidencia del oleaje).

En la ecuación (5.14) el primer término en la parte izquierda de la ecuación, representa la variación local de la densidad de acción en el tiempo, el segundo y el tercer término representan la propagación de la acción en el espacio geográfico (siendo  $C_x$  y  $C_y$  la velocidad de propagación de la energía del oleaje en la dirección  $x$  e  $y$ , respectivamente). El cuarto término representa el cambio en la frecuencia relativa debido a variaciones en la profundidad y en las corrientes ( $C_\sigma$  representa la velocidad de propagación en el espacio frecuencial). El quinto término representa la refracción inducida por la profundidad o las corrientes (siendo  $C_\theta$  la velocidad de propagación en el espacio direccional).

El término localizado en la parte derecha de la ecuación, representa las fuentes y sumideros de la energía espectral, contempla la generación de oleaje por viento, la disipación de energía por *white-capping*, por fricción con el fondo y por rotura del oleaje, y las interacciones no lineales del oleaje (triadas y cuádruplas).

Las expresiones de las velocidades de propagación de la densidad de energía en las diferentes dimensiones están tomadas de la teoría lineal, presentando las expresiones siguientes (Rogers *et al.*, 1999):

$$C_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x \quad (5.16)$$

$$C_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y \quad (5.17)$$

$$C_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[ \frac{\partial d}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla d \right] - c_g \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial s} \quad (5.18)$$

$$C_\theta = \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial m} \right] \quad (5.19)$$

donde:

$\bar{k} = (k_x, k_y)$  es el número de onda de magnitud  $k$  (relacionado con  $\sigma$  a través de la ecuación de la dispersión de teoría lineal).

$d$ : profundidad o calado

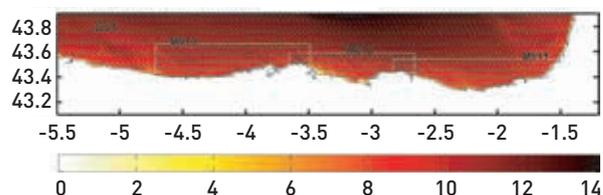
$\bar{U} = (U_x, U_y)$ : velocidad de la corriente

$s$ : coordenada espacial en la dirección de propagación  $\theta$

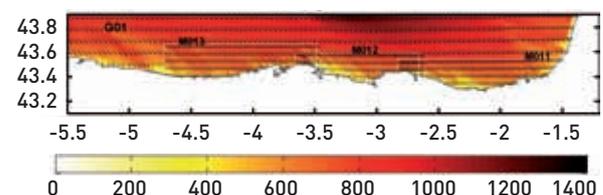
$m$ : coordenada espacial en la dirección perpendicular a  $s$ .

En las Figuras 5.14 y 5.15 se muestra la propagación del caso 1 de la selección MaxDiss correspondiente a la malla G01 del Cantábrico. En la Figura 5.14 se han representado los resultados de la altura de ola significativa y la dirección media del oleaje. En la Figura 5.15 se muestran los resultados de la potencia del oleaje y la dirección media de la energía del oleaje.

**Figura 5.14. Propagación del Caso 1 de la selección MaxDiss de la malla G01 del Cantábrico. Resultados de la altura de ola significativa (m) y dirección media del oleaje**



**Figura 5.15. Propagación del Caso 1 de la selección MaxDiss de la malla G01 del Cantábrico. Resultados de la potencia del oleaje (kW/m) y dirección media de la energía del oleaje**



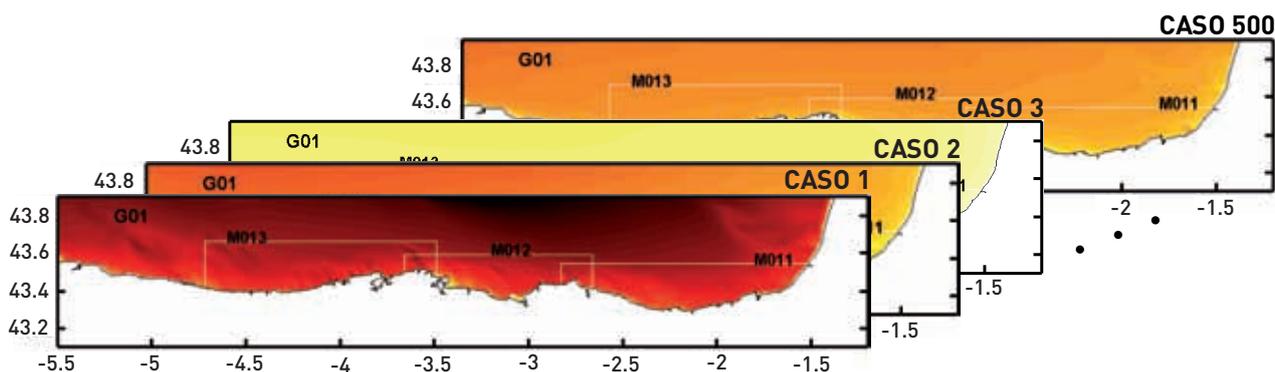
## 5.4 CARACTERÍSTICAS DE LA LIBRERÍA DE CASOS GENERADA DOW

Los  $M=500$  casos seleccionados mediante MaxDiss, representativos del clima marítimo en profundidades indefinidas, se propagan hasta la costa mediante el modelo numérico SWAN. Cada uno de estos casos está definido por las condiciones de contorno del oleaje en la malla general de computación y el campo de vientos simultáneo. La propagación de cada caso nos permite obtener los parámetros espectrales en los nodos de cálculo de la malla de computación correspondiente. En este trabajo se han considerado los parámetros altura de ola significativa ( $H_s$ ), periodo medio ( $T_m$ ), periodo

de pico ( $T_p$ ), dirección media del oleaje ( $\theta_m$ ), potencia del oleaje ( $P_w$ ) y la dirección media de energía del oleaje ( $\theta_p$ ).

El conjunto de las  $M=500$  propagaciones realizadas en todas las mallas de cálculo establecidas definen una librería de casos. Esta librería está formada por 500 valores horarios de los parámetros espectrales considerados  $\{H_s, T_m, T_p, \theta_m, P_w, \theta_p\}$  en los nodos de las mallas de computación (mallas G, M y GM), correspondientes a unas determinadas condiciones climáticas en aguas profundas, particulares para cada malla de cálculo general (mallas G y GM). En la Figura 5.16 se muestra un esquema de las características que presenta esta librería para la malla G01. En este caso, sólo se ha representado el parámetro espectral  $H_s$ , siendo semejante para el resto de parámetros.

Figura 5.16. Esquema de la librería de casos generada a partir de los 500 casos seleccionados



Cada uno de los  $M=500$  casos propagados representa a un conjunto de datos de oleaje en aguas profundas, es decir, aquellas situaciones de clima marítimo cuyo oleaje en el contorno de la malla de computación y campo de viento asociado presente unas características similares. Este conjunto de datos generados se denomina DOW (*Downscaled Ocean Waves*). La cantidad de condiciones de oleaje en aguas profundas representada por cada caso supone una probabilidad de presentación de ese caso. Como se muestra en el capítulo 6 *Obtención del recurso de energía del oleaje*, esta probabilidad permite caracterizar la energía espacialmente en las diferentes escalas de tiempo de una manera muy sencilla, para el volumen de información que se maneja.

## 5.5 RECONSTRUCCIÓN DE SERIES TEMPORALES HORARIAS DE PARÁMETROS ESPECTRALES

La reconstrucción del clima marítimo en aguas someras se realiza mediante una interpolación a partir de la serie de casos seleccionados y propagados desde profundidades indefinidas. Se ha considerado la técnica de interpolación basada en funciones de base radial (*radial basis functions*), muy adecuada para datos con una alta dimensionalidad y no distribuidos uniformemente (Franke, 1982).

Se dispone de una serie de valores de la función real  $f(x_j)$   $j = 1, \dots, M$  en los puntos  $\{x_1, \dots, x_M\}$ . La técnica de interpolación RBF considera que la función de aproximación RBF está formada por una combinación lineal de funciones radiales simétricas centradas en los puntos dados (ver Figura 5.17). La función objetivo presenta la siguiente expresión:

$$RBF(x) = p(x) + \sum_{j=1}^M a_j \Phi(\|x - x_j\|) \quad (5.20)$$

e interpola los valores dados de tal manera que:

$$RBF(x_j) = f_j \quad j = 1, \dots, M \quad (5.21)$$

donde:

$RBF$  es la función de interpolación

$p(x)$  es el polinomio lineal en todas las variables involucradas en el problema

$a_j$  son los coeficientes de ajuste RBF

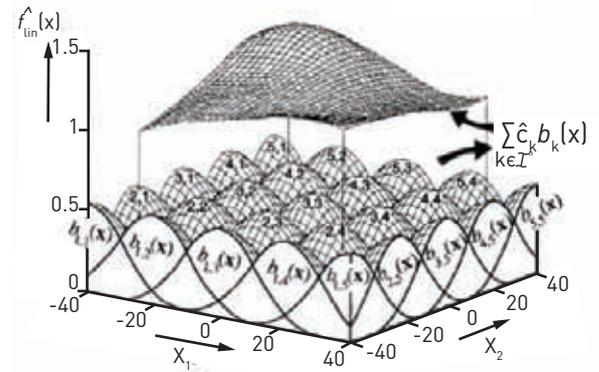
$\Phi$  es la función radial básica, donde  $\|\cdot\|$  es la norma euclidiana

$x_j$  son los centros de la interpolación RBF

El polinomio  $p(x)$  de la expresión de la función de interpolación RBF se define como una base de monomios  $\{p_0, p_1, \dots, p_d\}$ , formada por una cantidad de monomios de grado uno igual a la dimensionalidad de los datos (en este caso igual al número de componentes principales  $d$  considerado) y un monomio de grado cero, siendo  $b = \{b_0, b_1, \dots, b_d\}$  los coeficientes de estos monomios.

Las funciones de base radial pueden presentar diferentes expresiones. Algunas de estas funciones radiales contienen un parámetro de forma que juega un papel muy importante en la precisión de la técnica. En la metodología de propagación del clima marítimo se han considerado funciones radiales gaussianas que dependen de un parámetro de forma. El valor óptimo de este parámetro se obtiene a partir del algoritmo propuesto por Rippa (1999).

**Figura 5.17. Interpolación RBF definida como una combinación de funciones radiales (Fuente: Heiss and Kampl, 1996)**



En la implementación de la técnica de interpolación RBF en la reconstrucción del clima marítimo multidimensional, se dispone de  $M$  puntos  $d$ -dimensionales  $D_j^{EOF} = \{PC_{x^{*1}}^D, \dots, PC_{x^{*d}}^D\}; j = 1, \dots, M$ , que se corresponden con los casos del clima marítimo multidimensional en profundidades indefinidas, seleccionados mediante el algoritmo MaxDiss en el espacio de proyección de las EOFs, donde  $d$  es igual al número de componentes principales consideradas. El valor exacto de la función en esos puntos  $f_j(x)$  es igual a los parámetros espectrales obtenidos como resultado de la propagación en un punto objetivo: la altura de ola significativa propagada  $\{H_{sp,j}^D\}$ , el periodo de pico  $\{T_{pp,j}^D\}$ , las componentes  $x$  e  $y$  de la dirección media propagada  $\{\theta_{x_{mp,j}}^D, \theta_{y_{mp,j}}^D\}$ , (la dirección media se recompone a partir de las componentes  $x$  e  $y$ ), la potencia del oleaje propagada  $\{P_{wp,j}^D\}$  y las componentes de la dirección media propagada de la energía del oleaje  $\{\theta_{x_{pp,j}}^D, \theta_{y_{pp,j}}^D\}$ .

Por tanto, el objetivo de la aplicación de esta técnica de interpolación en la reconstrucción del clima marítimo es el cálculo de una función de interpolación  $RBF_{H_i}$  de la altura de ola propagada  $H_{sp}$ , una función de interpolación  $RBF_T$  del periodo de pico propagado  $T_{pp}$ , una función de interpolación  $RBF_{\theta_x}$  de la componente  $x$  de dirección media propagada  $\theta_{x_{mp}}$ , una función de interpolación  $RBF_{\theta_y}$  de la componente  $y$  de dirección media propagada  $\theta_{y_{mp}}$ , una función de interpolación  $RBF_{P_{wp}}$  de la potencia del oleaje propagada  $P_{wp}$  y una función de interpolación  $RBF_{\theta_{xp}}$  y  $RBF_{\theta_{yp}}$  de la componente  $x$  e  $y$  de la dirección media propagada de la energía del oleaje  $\theta_{x_{pp}}, \theta_{y_{pp}}$ . Estas funciones RBF permiten inferir los valores de los parámetros propagados en cualquier otro punto del espacio, es decir, cualquier otra situación de clima marítimo en indefinidas proyectada en el espacio de las EOFs:  $X_i^{EOF} = \{PC_{x^{*1}}^D, \dots, PC_{x^{*d}}^D\}; i = 1, \dots, N$ .

Por tanto, en primer lugar es necesario determinar estas funciones de interpolación. Las componentes principales que definen a cada situación del clima marítimo en indefinidas se normalizan mediante una transformación lineal que escala los valores entre 0 y 1, y se definen como  $X_i^{EOF, norm} = \{PC_{X^{*1}}^{norm}, \dots, PC_{X^{*d}}^{norm}\}_i$ . Cada caso seleccionado en el que se dispone del valor de los parámetros propagados se expresa como  $D_j^{EOF, norm} = \{PC_{X^{*1}}^{D, norm}, \dots, PC_{X^{*d}}^{D, norm}\}_j$

La función de interpolación *RBF* se calcula mediante la siguiente expresión:

$$RBF(X^{EOF, norm}) = p(X^{EOF, norm}) + \sum_{j=1}^M a_j \Phi(\|X^{EOF, norm} - D_j^{EOF, norm}\|) \quad (5.22)$$

donde:

$$p(X^{EOF, norm}) = b_0 + b_1 PC_{X^{*1}}^{norm} + b_2 PC_{X^{*2}}^{norm} + \dots + b_d PC_{X^{*d}}^{norm} \quad (5.23)$$

y  $\Phi$  representa la función gaussiana con un parámetro de forma,  $c$ :

$$\Phi(\|X^{EOF, norm} - D_j^{EOF, norm}\|) = \exp\left(-\frac{\|X^{EOF, norm} - D_j^{EOF, norm}\|^2}{2c^2}\right) \quad (5.24)$$

El parámetro de forma  $c$  más adecuado se estima mediante el algoritmo de Rippa basado en el método *leave-one-out-cross validation* (LOOCV). Los coeficientes  $b_i = [b_0, b_1, \dots, b_d]^T$  de los polinomios y  $a_j = [a_1, \dots, a_M]^T$  de las funciones radiales se determinan a partir de las condiciones de interpolación:

$$RBF(D_j^{EOF, norm}) = f_j(D_j^{EOF, norm}) = D_{p,j}; \quad j = 1, \dots, M \quad (5.25)$$

donde el vector de datos  $f_j$  está definido por los parámetros espectrales propagados  $\{H_{sp,j}\}, \{T_{pp,j}\}, \{\theta_{x_{mp,j}}\}, \{\theta_{y_{mp,j}}\}, \{P_{wp,j}\}, \{\theta_{x_{pp,j}}\}$  ó  $\{\theta_{y_{pp,j}}\}$  correspondientes a los estados de mar  $D_j$  seleccionados mediante el algoritmo MaxDiss.

Por tanto, las funciones *RBF* de cada uno de los parámetros espectrales propagados en el punto objetivo permiten transferir el clima marítimo multidimensional definido por  $X^{EOF, norm} = \{PC_{X^{*1}}^{norm}, \dots, PC_{X^{*d}}^{norm}\}$  desde aguas profundas hasta aguas someras. Estas funciones *RBF* se definen como:

$$H_{sp,i} = RBF_H(\{D_j^{EOF, norm}, H_{sp,j}(j=1, \dots, M)\}, X_i^{EOF, norm}); i = 1, \dots, N \quad (5.26)$$

$$T_{pp,i} = RBF_T(\{D_j^{EOF, norm}, T_{pp,j}(j=1, \dots, M)\}, X_i^{EOF, norm}); i = 1, \dots, N \quad (5.27)$$

$$\theta_{x_{mp,i}} = RBF_{\theta_x}(\{D_j^{EOF, norm}, \theta_{x_{mp,j}}(j=1, \dots, M)\}, X_i^{EOF, norm}); i = 1, \dots, N \quad (5.28)$$

$$\theta_{y_{mp,i}} = RBF_{\theta_y}(\{D_j^{EOF, norm}, \theta_{y_{mp,j}}(j=1, \dots, M)\}, X_i^{EOF, norm}); i = 1, \dots, N \quad (5.29)$$

$$P_{wp,i} = RBF_{P_w}(\{D_j^{EOF, norm}, P_{wp,j}(j=1, \dots, M)\}, X_i^{EOF, norm}); i = 1, \dots, N \quad (5.30)$$

$$\theta_{x_{pp,i}} = RBF_{\theta_{x_p}}(\{D_j^{EOF, norm}, \theta_{x_{p,j}}(j=1, \dots, M)\}, X_i^{EOF, norm}); i = 1, \dots, N \quad (5.31)$$

$$\theta_{y_{pp,i}} = RBF_{\theta_{y_p}}(\{D_j^{EOF, norm}, \theta_{y_{p,j}}(j=1, \dots, M)\}, X_i^{EOF, norm}); i = 1, \dots, N \quad (5.32)$$

La función de transferencia general de cada estado de mar en indefinidas proyectado en el espacio de las EOFs,  $X_i^{EOF, norm}$ ;  $i = 1, \dots, N$ , se expresa como:

$$X_{p,i} = RBF \{ \{ D_j^{EOF, norm} \cdot D_{p,j}^* \} (j = 1, \dots, M) \}, X_i^{EOF, norm} \}; \quad i = 1, \dots, N \quad (5.33)$$

El resultado final es la serie de reanálisis transferida a aguas someras:

$$X_{p,i} = \{ H_{sp,i}, T_{mp,i}, \theta_{mp,i} \} (i = 1, \dots, N) \quad (5.34)$$

En el caso de la existencia de marea astronómica significativa, es necesario propagar los casos seleccionados en  $Q$  diferentes niveles ( $z_q$ ;  $q = 1, \dots, Q$ ):  $D_{p,j}(z_q) = \{ H_{sp,j}^D, T_{mp,j}^D, \theta_{mp,j}^D, P_{wp,j}^D, \theta_{pp,j}^D, z_q \} (j = 1, \dots, M; q = 1, \dots, Q)$ , calculando una función  $RBF$  para cada parámetro propagado de interés y para cada nivel de propagación. La transferencia de una condición de clima marítimo con variabilidad espacial desde aguas profundas al punto objetivo se obtiene a partir de las correspondientes funciones RBF para los  $q$  niveles y posteriormente, se realiza una interpolación lineal al nivel correspondiente a la situación climática en indefinidas  $z_i$ . La función de transferencia generalizada para un nivel del mar determinado  $z_i$  se expresa como:

$$X_{p,i}^*(z_i) = INTERP \left[ RBF \{ \{ D_j^{EOF, norm} \cdot D_{p,j}^*(z_q) \} (j = 1, \dots, M) \}, X_i^{EOF, norm}, z_i \{ q = 1, \dots, Q \} \right] \quad i = 1, \dots, N \quad (5.35)$$

En la caracterización del clima marítimo en aguas someras en el Atlántico, las propagaciones se realizaron en 3 niveles del mar que caracterizan la bajamar máxima viva equinoccial (BMVE), el nivel medio y la pleamar (PMVE):  $z_1=0,0$  m;  $z_2=2,5$  m;  $z_3=5,0$  m. En el caso del Mediterráneo, las propagaciones sólo se han realizado en un nivel de marea, correspondiente a la BMVE.

## 5.6 VALIDACIÓN DE LAS SERIES TEMPORALES HORARIAS

La transferencia del oleaje hasta la costa se ha validado mediante la reconstrucción de la serie de reanálisis GOW en la posición de las distintas boyas localizadas a lo largo del litoral español y disponibles en este estudio.

Las series temporales reconstruidas de los parámetros altura de ola significativa ( $H_s$ ), el periodo de pico ( $T_p$ ), la dirección media del oleaje ( $\theta_m$ ) y la potencia media ( $P_w$ ) se han comparado con los registros instrumentales de la boya correspondiente.

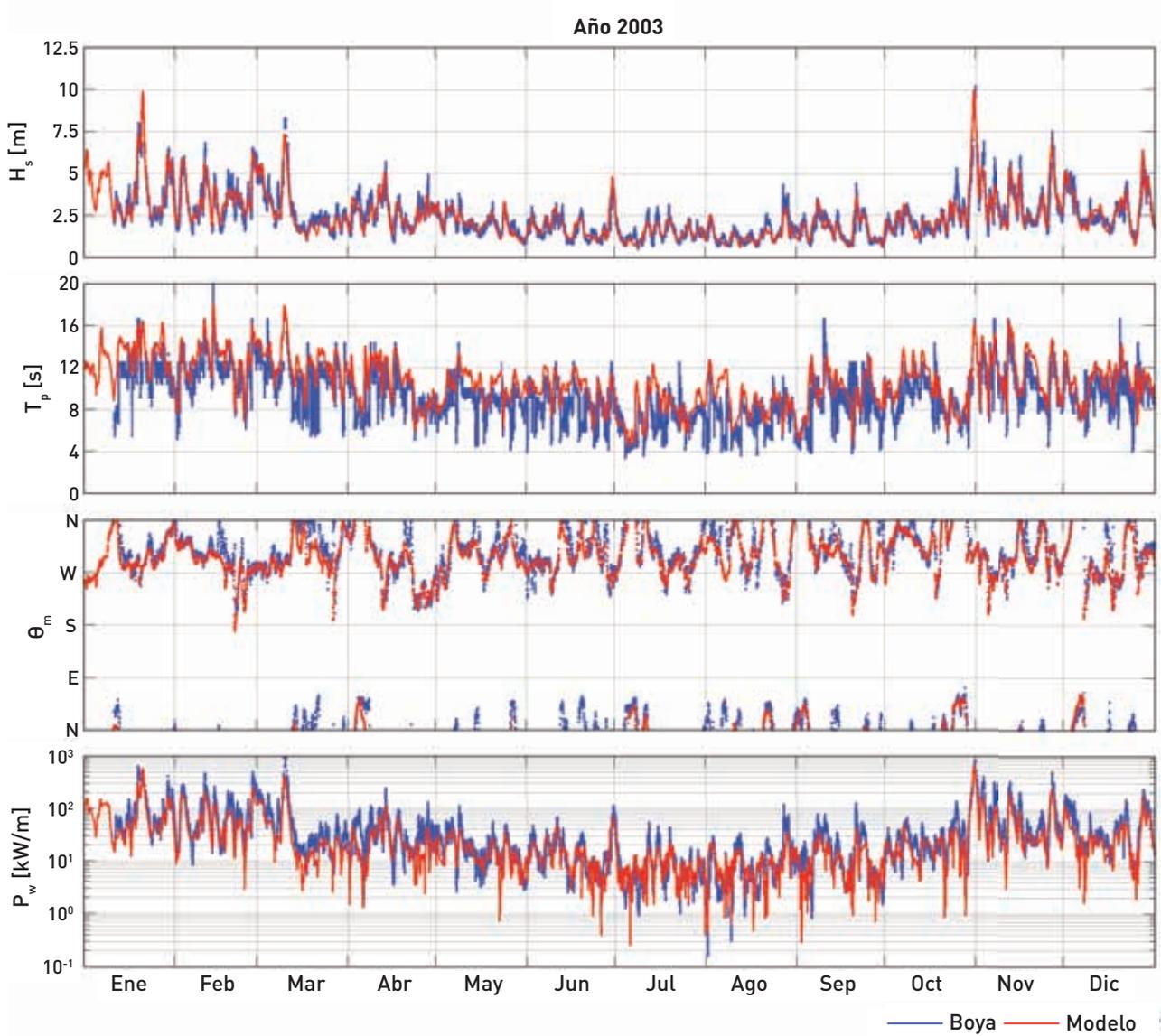
En la Figura 5.18 se muestran la serie temporal de la base de datos GOW (rojo), reconstruida en la posición de la boya de Cabo de Peñas, a partir de la metodología propuesta, y la serie temporal registrada por dicha boya (azul) correspondiente al año 2008. Se puede observar cómo la metodología de

propagación es capaz de reproducir la estructura de la serie temporal de los distintos parámetros considerados, incluso los eventos más energéticos.

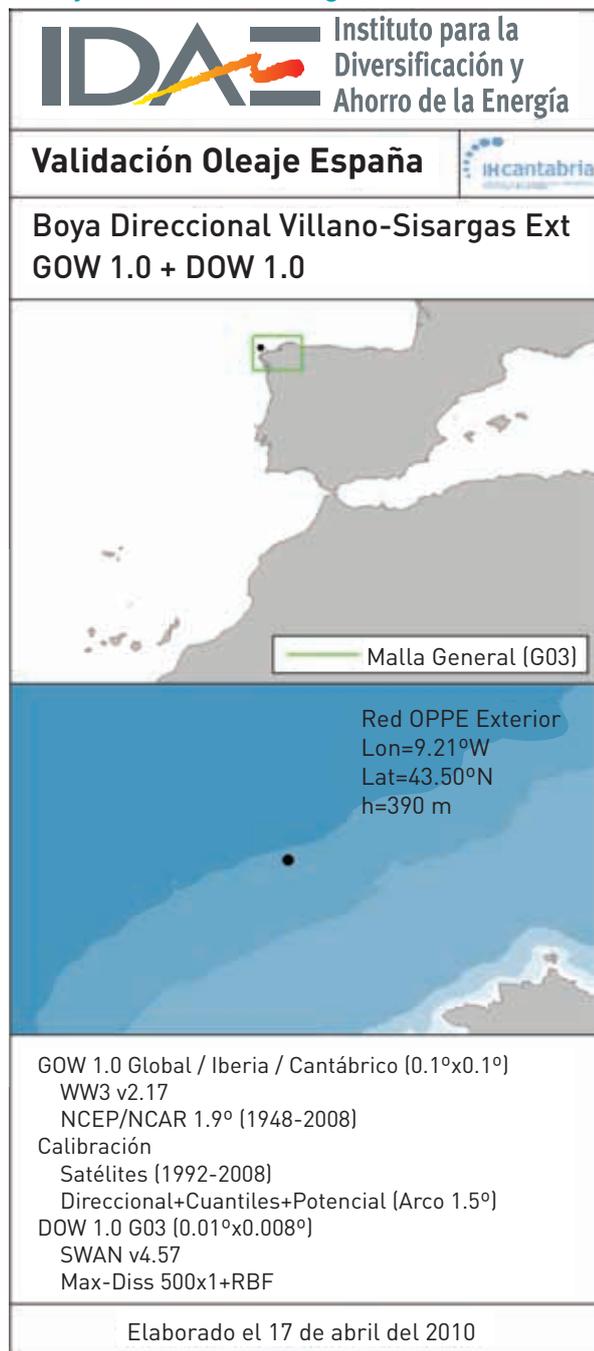
La validación en cada una de las boyas disponibles se ha almacenado en una serie de fichas que se recogen en el Anexo 1. *Validación de las series temporales*, donde se recogen la comparación de las series temporales de los parámetros  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\theta_m$  y  $P_w$  para los diferentes años de registros existentes y además se incluye una serie de información adicional.

Esta información consta de la localización de la boya y la correspondiente malla de computación de la que se extraen los resultados de la propagación; las características de la boya (red a la que pertenece, posición geográfica, profundidad y localización en la batimetría de la zona); resumen de las características de los datos GOW empleados (versión y mallas de computación del WaveWatch, junto con su resolución), de la calibración aplicada (datos y metodología) y de la metodología de transferencia del oleaje hasta la costa (versión datos DOW, malla de computación y su resolución, versión del modelo de propagación SWAN, número de casos seleccionados, MaxDiss, y algoritmo de interpolación, RBF). En la Figura 5.19 se muestra la información correspondiente a la validación de la boya de Villano-Sisargas.

Figura 5.18. Validación de las series temporales de los parámetros  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\theta_m$  y  $P_w$  en la posición de la boya de Villano-Sisargas correspondientes al año 2003. Serie GOW reconstruida (rojo) y registro boya (azul)



**Figura 5.19. Información adicional a la validación de las series temporales de los parámetros  $H_s$ ,  $T_m$ ,  $\theta_m$  y  $P_w$  en la posición de la boya de Villano-Sisargas**



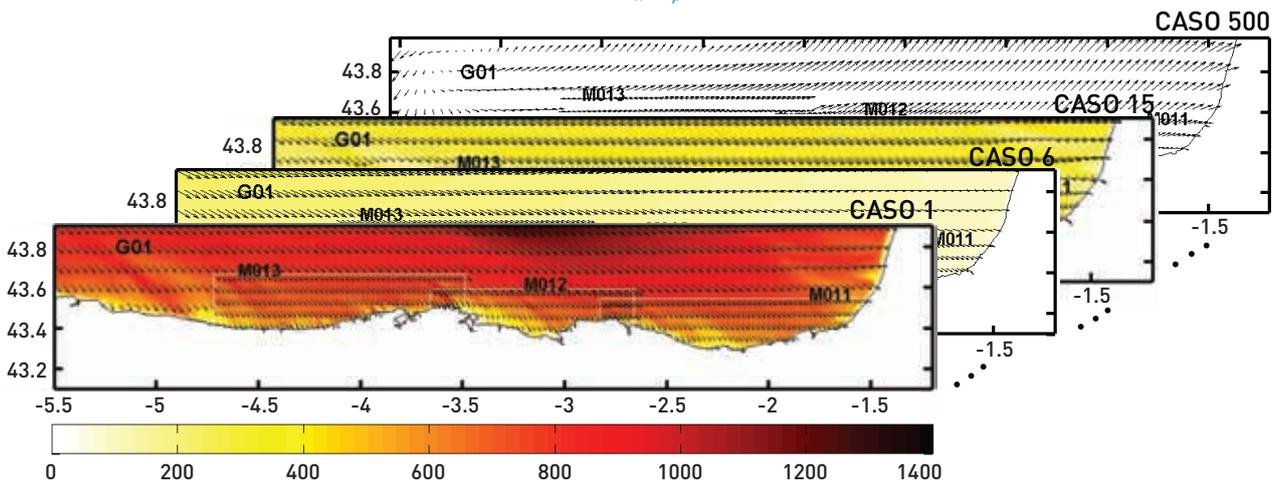
# 6 Obtención del recurso de energía de oleaje

## 6.1 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA DEL RECURSO

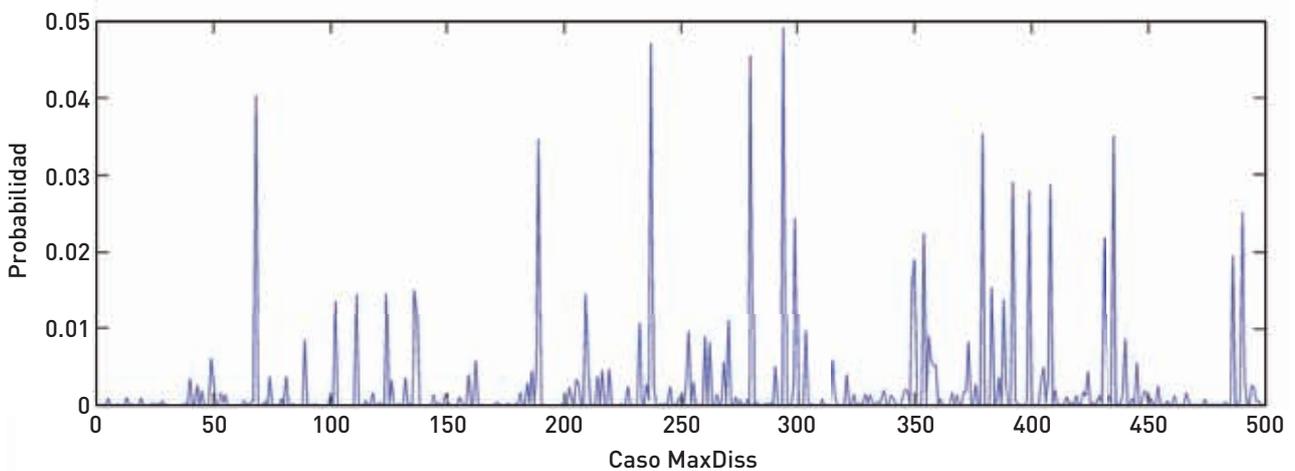
La propagación de los  $M=500$  casos seleccionados mediante el algoritmo MaxDiss permite disponer de los parámetros potencia del oleaje ( $P_w$ ) y dirección media de energía del oleaje ( $\theta_p$ ), que caracterizan el recurso energético del oleaje, en los nodos de cálculo de cada una de las mallas de computación consideradas a lo largo del litoral español. El

conjunto de las 500 propagaciones realizadas en todas las mallas de cálculo establecidas definen una librería de casos compuesta de 500 valores horarios de los parámetros espectrales  $\{P_w, \theta_p\}$  en los nodos de las mallas de computación (mallas G, M y GM), correspondientes a unas determinadas condiciones climáticas en aguas profundas, particulares para cada malla de cálculo general (mallas G y GM). En la Figura 6.1 se muestra un esquema de las características que presenta esta librería para la malla G01 en cuanto a los parámetros necesarios para la caracterización del recurso energético ( $P_w, \theta_p$ ). Cada uno de los 500 casos propagados tiene una probabilidad de presentación (Figura 6.2), función de la cantidad de condiciones del clima marítimo en aguas profundas similares representadas por cada caso particular.

**Figura 6.1. Esquema de la librería de casos definida a partir de los  $M=500$  casos seleccionados con las características energéticas del oleaje  $\{P_w, \theta_p\}$**



**Figura 6.2. Probabilidad de presentación de cada uno de los 500 casos seleccionados mediante MaxDiss**



La disponibilidad de la probabilidad de presentación de cada uno de los 500 casos seleccionados mediante MaxDiss nos permiten una caracterización espacial del recurso energético más directa sin necesidad de aplicar el algoritmo de interpolación basado en funciones radiales.

En cada nodo de las diferentes mallas de computación consideradas se dispone de  $M=500$  valores de  $P_w = \{P_{w1}, P_{w2}, \dots, P_{wM}\}; j = 1, \dots, M$  y de  $\theta_p = \{\theta_{p1}, \theta_{p2}, \dots, \theta_{pM}\}; j = 1, \dots, M$  con una probabilidad  $p = \{p_1, p_2, \dots, p_M\}; j = 1, \dots, M$  que nos permite calcular la potencia media anual  $\bar{P}_w$ , la dirección media de la energía del oleaje  $\bar{\theta}_p$  y el cuantil del 95% de la potencia  $P_{w95}$ .

$$\bar{P}_w = \sum_{j=1}^M P_{wj} \cdot p_j \quad (6.1)$$

$$\bar{\theta}_p = \tan^{-1} \left( \frac{\sum_{j=1}^M P_{w,j} \cdot \sin(\theta_{p,j}) p_j}{\sum_{j=1}^M P_{w,j} \cdot \cos(\theta_{p,j}) p_j} \right) \quad (6.2)$$

El cuantil del 95% de la potencia  $P_{w95}$  se calcula realizando las siguientes operaciones:

- Se ordenan los valores  $P_{w,j}$  de menor a mayor:

$$X = \left\{ p_{w(1)}, p_{w(2)}, \dots, p_{w(M=500)} \right\}$$

- Se calculan las probabilidades acumuladas asociadas:

$$Y = \left\{ p_{(1)}, p_{(1)} + p_{(2)}, \dots, \sum_{i=1}^M p_{(i)} = 1 \right\}$$

- Se interpola en la función  $(X, Y)$  utilizando  $Y_k = 0,95$  y obteniendo el cuantil  $X_k = P_{w95}$ .

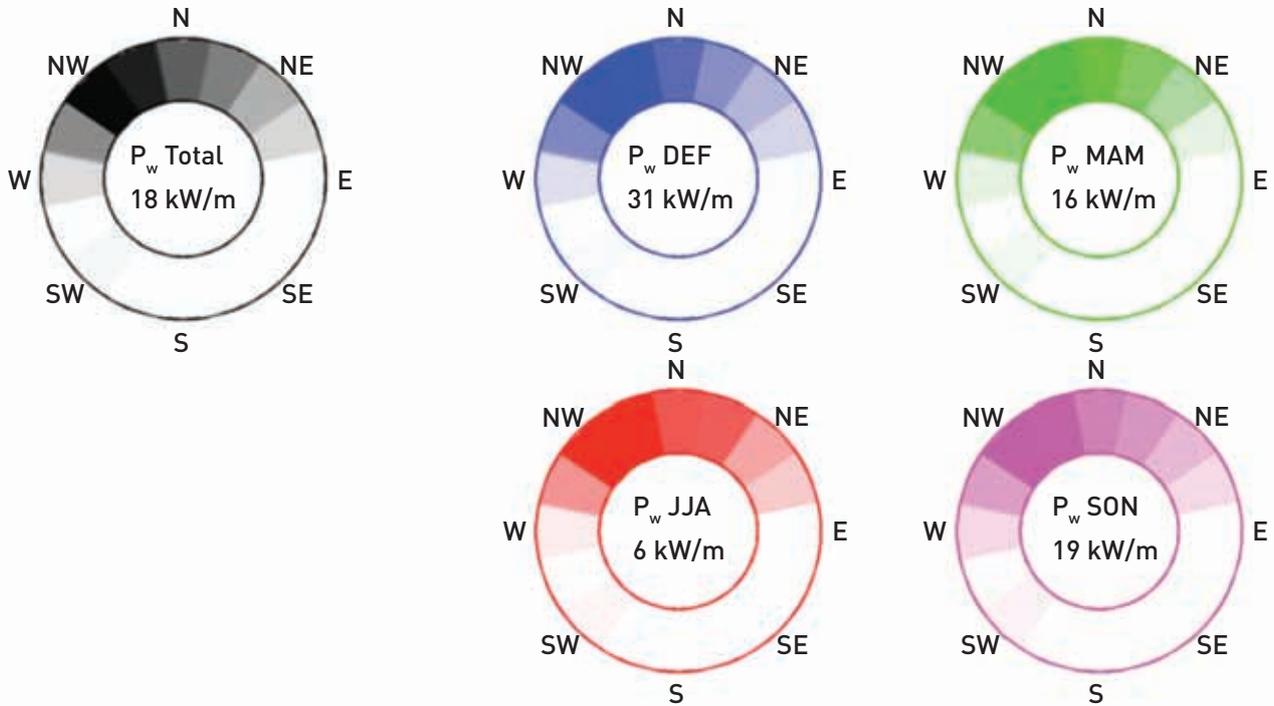
También es posible caracterizar la variación estacional del recurso energético a lo largo del año a partir del cálculo de la probabilidad estacional  $\{P_{DEF}, P_{MAM}, P_{JJA}, P_{SON}\}$ , donde DEF se corresponde con los meses de diciembre, enero y febrero, MAM con marzo, abril y mayo, JJA con junio, julio y agosto, y SON con septiembre, octubre y noviembre. De tal manera que la potencia media en el invierno, por ejemplo, se calcula como:

$$\bar{P}_{w,DEF} = \sum_{j=1}^M P_{wj} \cdot p_{DEF,j} \quad (6.3)$$

Estos valores de la potencia media pueden ser analizados por sectores direccionales según la dirección media de energía del oleaje con objeto de determinar la cantidad de energía proveniente de cada sector direccional de 22.5°.

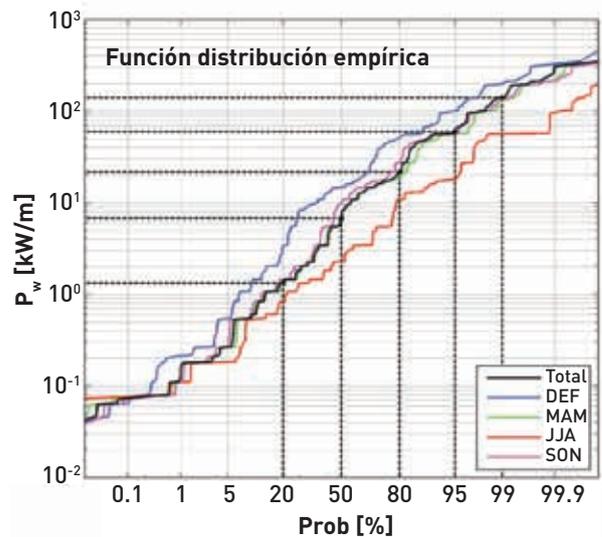
En la Figura 6.3 se muestra la potencia media total y estacional, junto con su distribución por sectores según la dirección media de incidencia de la energía del oleaje para el punto situado en el Cantábrico en las proximidades de la costa de Cantabria. En este ejemplo, se puede observar cómo el oleaje presenta una mayor potencia durante los meses de invierno (31 kW/m) frente al valor medio total (18 kW/m). Durante los meses de verano la potencia se reduce considerablemente (6 kW/m). En cuanto a direcciones de procedencia de energía del oleaje, no existen grandes diferencias a lo largo del año, siendo las direcciones principales NW y NNW.

**Figura 6.3. Potencia media total, estacional (DEF, MAM, JJA y SON) y distribución por sectores de dirección de incidencia de la energía del oleaje**



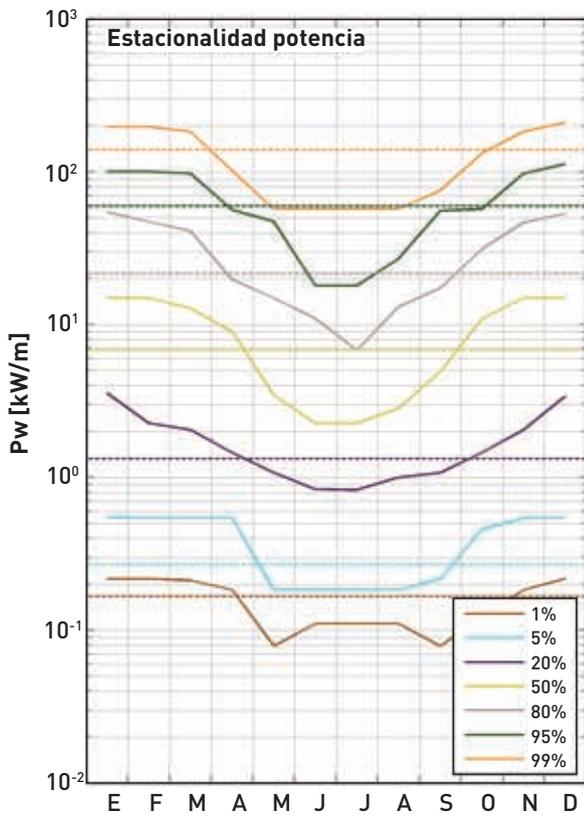
Otra forma de caracterizar la potencia del oleaje es mediante la función de distribución empírica durante todo el año y en las cuatro estaciones. En la Figura 6.4 se muestra la función de distribución empírica para el mismo punto considerado anteriormente. Se puede distinguir la estacionalidad de la potencia como ya se pudo comprobar en la anterior figura.

**Figura 6.4. Función de distribución empírica de la potencia total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en papel probabilístico log-normal**

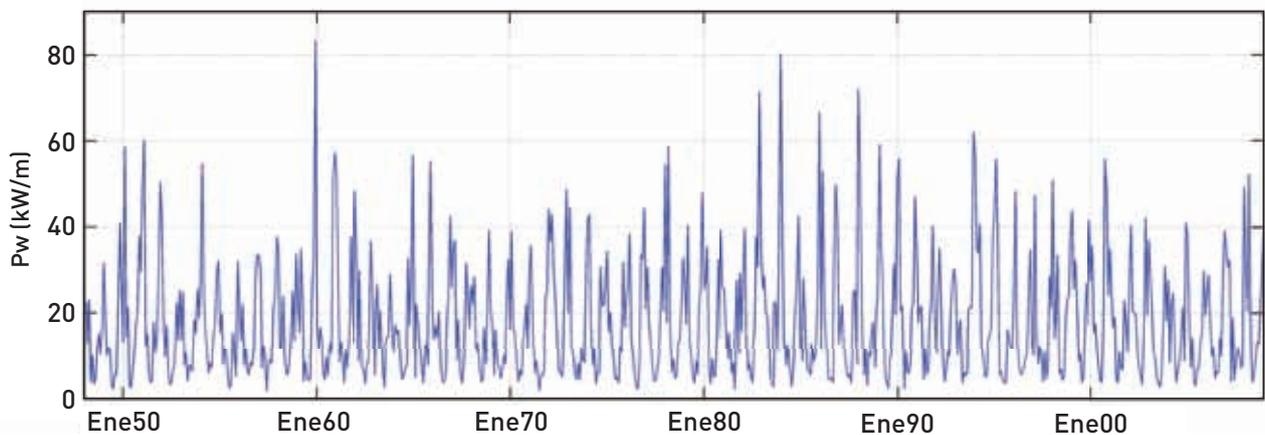


Por otro lado, también es interesante analizar la estacionalidad mensual de la potencia del oleaje a partir de la probabilidad mensual  $\{P_{enero}, P_{febrero}, \dots, P_{diciembre}\}$ . En la Figura 6.5 se muestra la distribución estacional de los percentiles 1%, 5%, 20%, 50%, 80%, 95% y 99%, donde se vuelve a observar la estacionalidad del recurso energético del oleaje para un punto localizado en la costa cántabra.

**Figura 6.5. Distribución estacional de distintos estadísticos de la potencia del oleaje (percentiles 1%, 5%, 20%, 50%, 80%, 95% y 99%)**



**Figura 6.6. Variación interanual de la potencia media mensual**



La caracterización de la potencia del oleaje en la escala del mes permite el análisis de la variabilidad interanual del recurso. En este caso, se requiere conocer la probabilidad de cada uno de los estados de mar seleccionados mediante el algoritmo MaxDiss en esta escala temporal  $\{P_{mes1}, P_{mes2}, \dots, P_{mesk}, \dots, P_{mesq}\}$ ;  $k = 1, \dots, q$ , siendo  $\{P_{mesk,1}, \dots, P_{mesk,j}, \dots, P_{mesk,M}\}$ ;  $j = 1, \dots, M$ . En la Figura 6.6 se muestra la variación interanual de la potencia media mensual en el punto considerado. Se puede observar que además de la variabilidad estacional existen años más energéticos que otros. Se puede analizar la correlación de las variaciones mensuales de la potencia media con patrones climáticos (por ejemplo, Oscilación del Atlántico Norte, NAO). En el caso de que la correlación sea significativa, estos patrones climáticos explican parte de la variabilidad del recurso energético del oleaje.

La metodología para el estudio del recurso de energía del oleaje aplicada en este trabajo permite disponer de la potencia del oleaje en puntos próximos a la costa, bien reconstruyendo cada estado de mar mediante la técnica de interpolación RBF (apartado 5.5 *Reconstrucción de series temporales horarias de parámetros espectrales*) o mediante los resultados de los  $M$  casos propagados en cada una de las mallas de computación y su probabilidad de presentación (apartado 6.1 *Metodología para la obtención de la distribución estadística del recurso*). La ventaja de esta última metodología supone que de una manera sencilla y rápida se pueda caracterizar el recurso energético con una importante resolución espacial, y por tanto, muy adecuado para la definición de un atlas del recurso energético. Por el contrario, esta metodología supone una aproximación más grosera de los valores de la potencia con respecto a la metodología que incluye el método de interpolación RBF. A continuación se comparan los resultados obtenidos mediante ambas metodologías en la caracterización del recurso energético en la posición de la boya de Villano.

El algoritmo MaxDiss (expuesto en el apartado 5.2 *Clasificación de los estados de mar*) es muy adecuado para la posterior aplicación de un método de interpolación por la distribución de los casos seleccionados en la nube de datos de partida. En el cálculo de la potencia a partir de las probabilidades de cada caso, es necesario considerar que cada dato está representado por el caso seleccionado mediante MaxDiss más similar, y que cada uno de estos datos tiene asociada una potencia igual a la del caso MaxDiss correspondiente. Se ha comprobado cómo los casos situados en la periferia de los datos, como por ejemplo el caso con la mayor altura de ola, representan a una serie de datos que tienen una menor energía, y por tanto, dan lugar a una sobreestimación del recurso energético. Esta limitación del algoritmo se debe a que consiste en un método de selección no de clasificación, por tanto, no agrupa los datos en clases o grupos con la condición de mínima distancia entre grupos. Existen otra serie de algoritmos más adecuados en este sentido, como la técnica de k-medias, pero con un peor comportamiento en la reconstrucción de las series temporales mediante la interpolación RBF. Para minimizar la sobreestimación de los parámetros del oleaje se han considerado más vecinos a la hora de asociar la potencia a cada estado de mar horario. Se han realizado diversas pruebas y se ha comprobado que con dos vecinos los resultados mejoran de una manera apreciable.

Por un lado, se dispone de la serie horaria de la potencia media del oleaje reconstruida mediante el método de interpolación RBF  $P_w = \{P_{w,1}, \dots, P_{w,i}, \dots, P_{w,N}\}; i = 1, \dots, M$ . Se han considerado los estados de mar horarios representados por cada caso  $D_j$  MaxDiss ( $j=1, \dots, M$ ), y se ha calculado la potencia media correspondiente a cada uno de ellos ( $P_{w\text{mediahoraria},j}$ ).

$$P_{w\text{mediahoraria},j} = \sum_{x_i \in D_j} \frac{P_{w,i}}{n_j} \quad (6.4)$$

donde  $n_j$  son la cantidad de datos representados por el grupo  $D_j$ .

Por otro lado, disponemos de la potencia correspondiente a cada caso MaxDiss ( $P_{w,j}; j = 1, \dots, M$ ). Además se ha determinado el valor medio de la potencia correspondiente a cada caso asociando a cada dato horario la potencia de los 2, 3 y 4 casos más próximos, proporcional a la similitud de las condiciones del clima marítimo en profundidades indefinidas. Por ejemplo, si a un estado de mar horario de los datos de partida  $X_i; i = \{1, \dots, N\}$  se le asocian los dos casos más próximos  $\{D_{j1}, D_{j2}\} \in \{1, \dots, M\}$ , la potencia media correspondiente se calcula como:

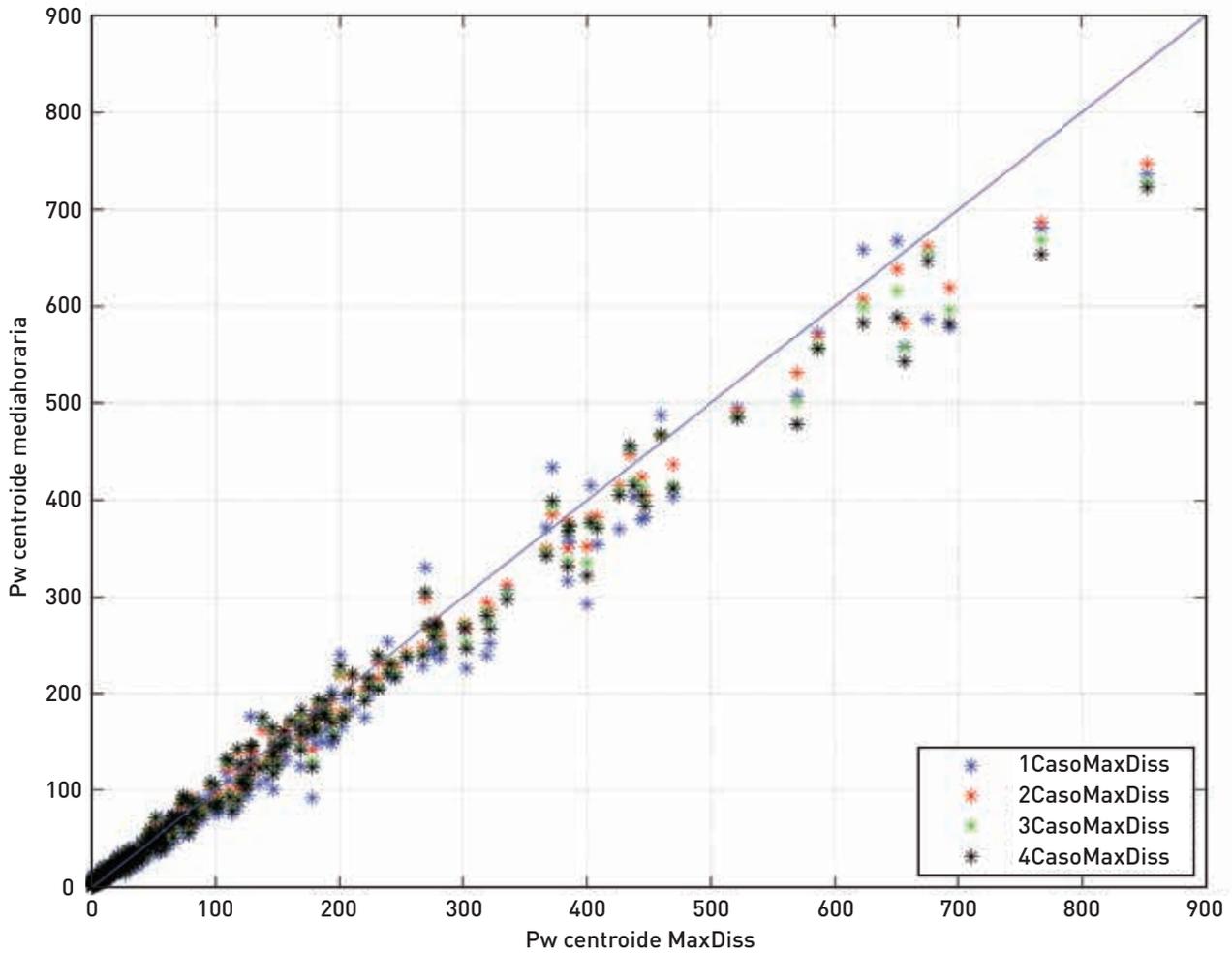
$$P_{w2,i} = \left( \frac{\left(\frac{1}{d_{j1}}\right)^2}{\left(\frac{1}{d_{j1}}\right)^2 + \left(\frac{1}{d_{j2}}\right)^2} \right) \cdot P_{w,j1} + \left( \frac{\left(\frac{1}{d_{j2}}\right)^2}{\left(\frac{1}{d_{j1}}\right)^2 + \left(\frac{1}{d_{j2}}\right)^2} \right) \cdot P_{w,j2} \quad (6.5)$$

donde  $d_{j1}$  es la distancia entre  $X_i$  y  $D_{j1}$ ,  $d_{j2}$ , la distancia entre  $X_i$  y  $D_{j2}$ , y  $P_{w,j1}$  y  $P_{w,j2}$ , la potencia correspondiente a los casos  $j1$ ,  $j2$ , respectivamente. De esta manera se dispone de una serie temporal  $P_{w2} = \{P_{w2,1}, \dots, P_{w2,i}, \dots, P_{w2,N}\}; i = 1, \dots, M$ , y se calcula la potencia correspondiente a cada caso  $D_j$ :

$$P_{w2\text{mediahoraria},j} = \sum_{x_i \in D_j} \frac{P_{w2,i}}{n_j} \quad (6.6)$$

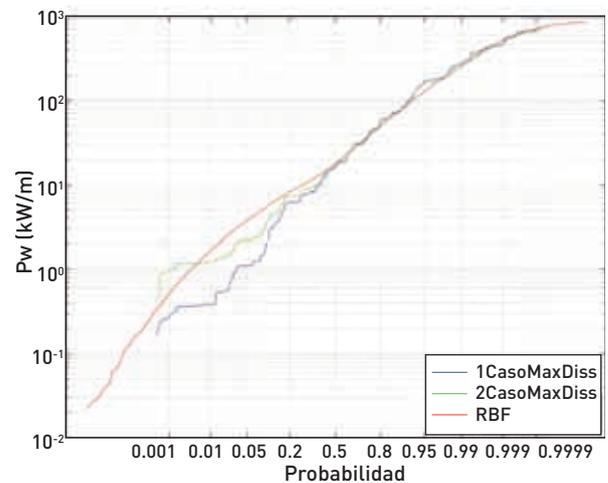
En la Figura 6.7 se comparan los valores de la potencia correspondientes a cada caso  $D_j$  considerando 1, 2, 3 y 4 casos MaxDiss más similares frente al valor obtenido a partir de cada dato horario reconstruido mediante RBF. Se puede observar cómo los mejores resultados se obtienen cuando se asocia a cada estado de mar la potencia ponderada de los dos casos más próximos.

Figura 6.7. Comparación potencia media asociada a cada caso MaxDiss



Por tanto, se establece que la metodología para la obtención de la distribución estadística del recurso mejora considerando que la potencia asociada a cada estado de mar se define a partir de la media ponderada de los dos casos MaxDiss más próximos. En la Figura 6.8 se muestra la distribución de la potencia calculada a partir de las tres expresiones descritas anteriormente:  $P_{w,mediahoraria,j}$  se corresponde con la representación RBF (en rojo),  $P_{w,j}$  con 1CasoMaxDiss (en azul) y  $P_{w2mediahoraria,j}$  con 2CasoMaxDiss (en verde), comprobándose que la utilización de los 2 vecinos mejora los resultados, aproximándose de mejor manera a la reconstrucción horaria con RBF.

Figura 6.8. Comparación distribución de la potencia media estacional



Por otro lado, se ha calculado la potencia media en cada mes a partir de la serie horaria  $P_{w,i}; i = 1, \dots, N$ , reconstruida mediante el método de interpolación RBF. Por ejemplo, para el mes de enero:

$$\bar{P}_{w, \text{enero-horaria}} = \sum_{x_j \in \text{enero}} P_{w,i} \tag{6.7}$$

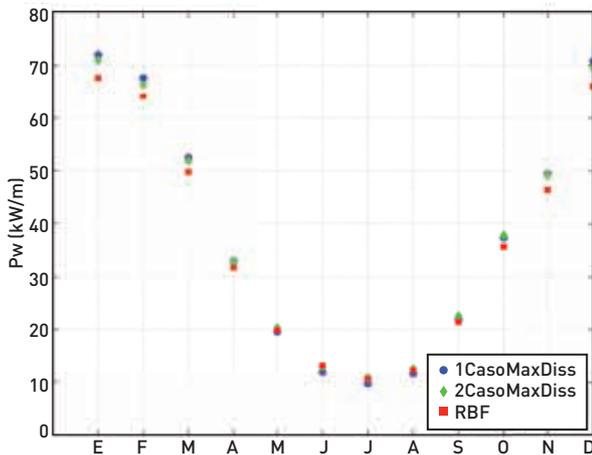
La potencia media de cada mes también se calcula a partir de la potencia correspondiente a cada caso MaxDiss  $P_{w,j}; j = 1, \dots, M$  y su probabilidad de presentación en cada mes  $\{P_{\text{enero}}, P_{\text{febrero}}, \dots, P_{\text{diciembre}}\}$ , considerando un caso o considerando los dos más próximos. Las expresiones para el cálculo de la potencia en enero son las siguientes:

$$\bar{P}_{w, \text{enero}} = \sum_{j=1}^M P_{w,j} \cdot p_{\text{enero}, j} \tag{6.8}$$

$$\bar{P}_{w2, \text{enero}} = \sum_{j=1}^M \left( P_{w,j1} \cdot p_{\text{enero}, j1} \cdot \frac{\left(\frac{1}{d_{j1}}\right)^2}{\left(\frac{1}{d_{j1}}\right)^2 + \left(\frac{1}{d_{j2}}\right)^2} + P_{w,j2} \cdot p_{\text{enero}, j2} \cdot \frac{\left(\frac{1}{d_{j2}}\right)^2}{\left(\frac{1}{d_{j1}}\right)^2 + \left(\frac{1}{d_{j2}}\right)^2} \right) \tag{6.9}$$

En la gráfica 6.9 se muestra los resultados de la potencia determinada a partir de las expresiones anteriores, donde  $\bar{P}_{w, \text{enero-horaria}}$  está representado por RBF (en rojo),  $\bar{P}_{w, \text{enero}}$  por 1CasoMaxDiss (en azul) y  $\bar{P}_{w2, \text{enero}}$  por 2CasoMaxDiss (en verde).

**Figura 6.9. Comparación potencia media estacional**



Estos resultados nos permiten concluir, que a pesar de ciertas limitaciones, la metodología para la obtención de la distribución estadística del recurso de la energía del oleaje propuesta supone una buena estimación de la potencia del oleaje en áreas con una alta resolución espacial.

## 6.2 VALIDACIÓN EN LAS LOCALIZACIONES DE LAS BOYAS

La transferencia del recurso energético del oleaje a las proximidades de la costa se ha validado en la posición de las distintas boyas disponibles a lo largo del litoral español.

La validación del recurso energético en la posición de las distintas boyas disponibles a lo largo del litoral español se ha realizado mediante la reconstrucción de las series temporales de los parámetros espectrales que caracterizan cada estado de mar.

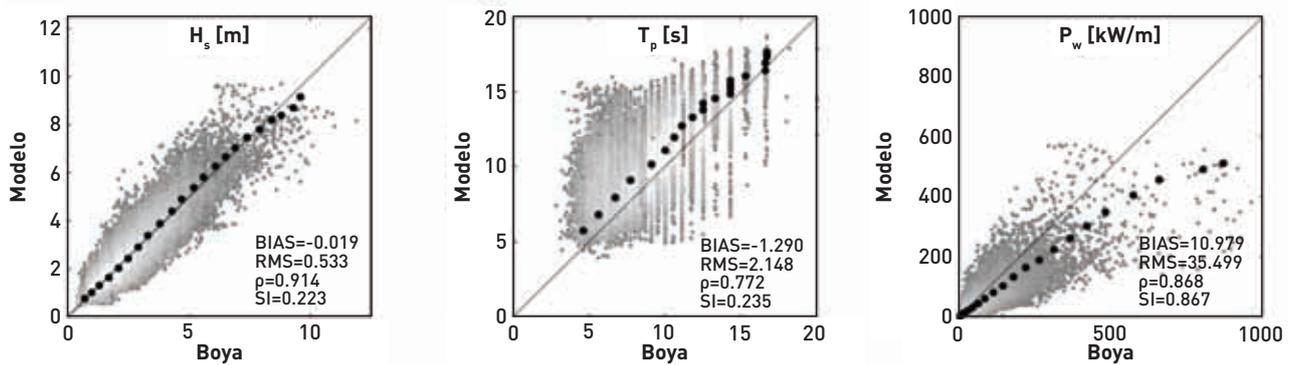
La reconstrucción de las series temporales de diferentes parámetros espectrales del oleaje (altura de ola significativa,  $H_s$ , el periodo de pico,  $T_p$ , la potencia media,  $P_w$  y dirección media de la energía del oleaje,  $\theta_p$ ) se ha realizado según la metodología descrita en el apartado 5.5 *Reconstrucción de series temporales horarias de parámetros espectrales*.

La validación en las localizaciones de las boyas se ha realizado mediante la comparación de los registros horarios de la boya frente a los parámetros horarios de los estados de mar de la base GOW

transferidos a las proximidades de la costa. En la Figura 6.10 se muestran los diagramas de dispersión o *scatter plots* de los datos de la boya frente al modelo y la comparación cuantil-cuantil para el caso de la boya de Villano-Sisargas. Además

se indican el error cuadrático medio (RMS), el sesgo (BIAS), el coeficiente de correlación ( $\rho$ ) y la dispersión (*scatter index*, SI), respecto a la bisectriz, como medida de calidad de la modelización del oleaje.

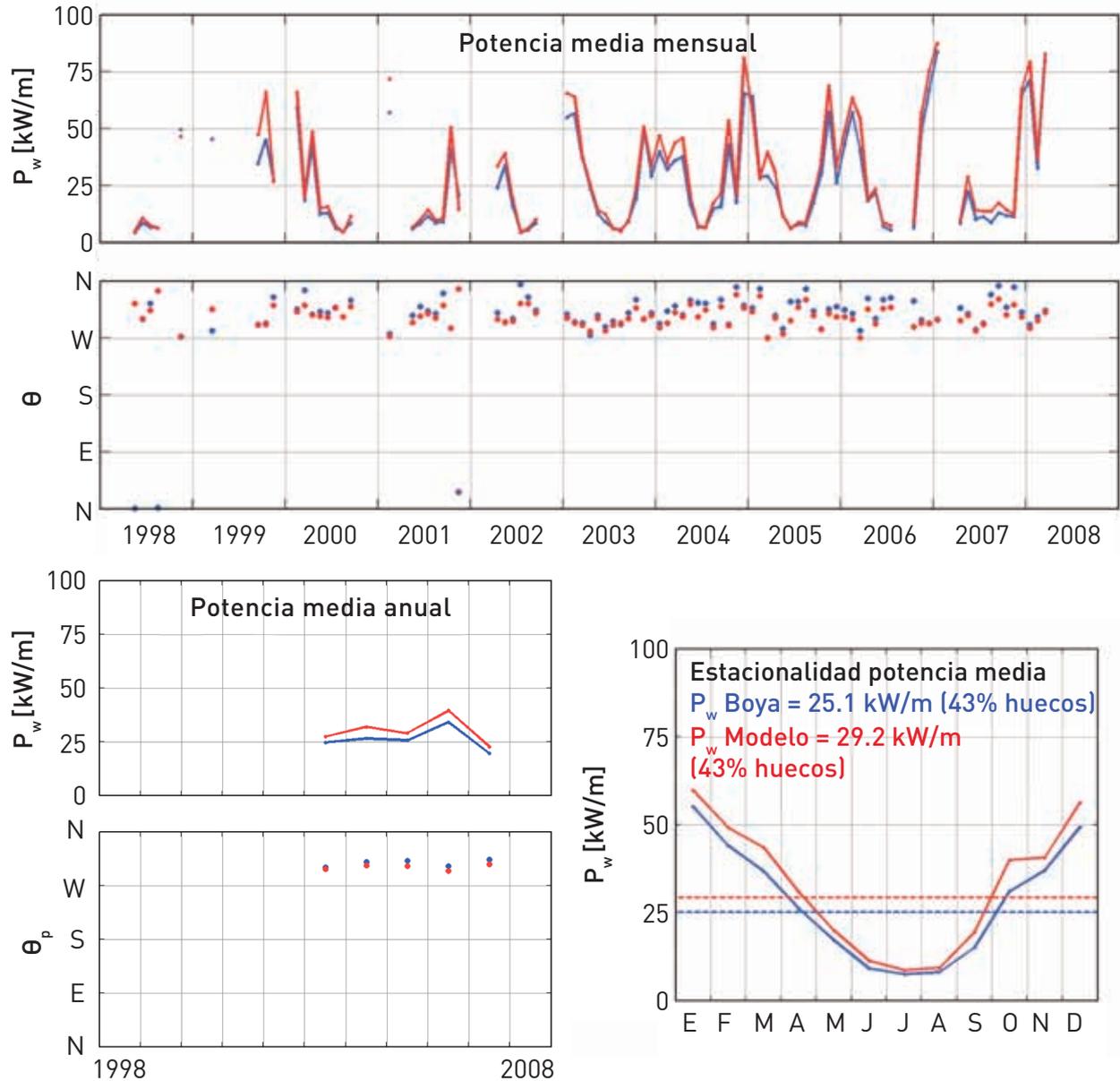
**Figura 6.10. Comparación datos horarios de la boya de Villano-Sisargas y serie GOW reconstruida para los parámetros  $H_s$ ,  $T_p$  y  $P_w$ . Comparación cuantil-cuantil. Error medio cuadrático (RMS), sesgo (BIAS), coeficiente de correlación ( $\rho$ ) y dispersión (SI)**



Se han calculado los valores de la potencia media del oleaje en diferentes escalas temporales: mensual, anual, estacional. Los valores obtenidos a partir de la serie reconstruida en la posición de la boya se han comparado con los valores calculados a partir de los registros de la boya. En la Figura 6.11 se muestran estos valores de la potencia media, en azul los correspondientes a la boya

y en rojo los correspondientes al reanálisis GOW, para la boya de Villano-Sisargas. La potencia del oleaje está subestimada respecto a la registrada realmente en la posición de esta boya, pudiéndose apreciar en los meses más energéticos tanto en los valores mensuales como estacionales y ligeramente en el valor medio.

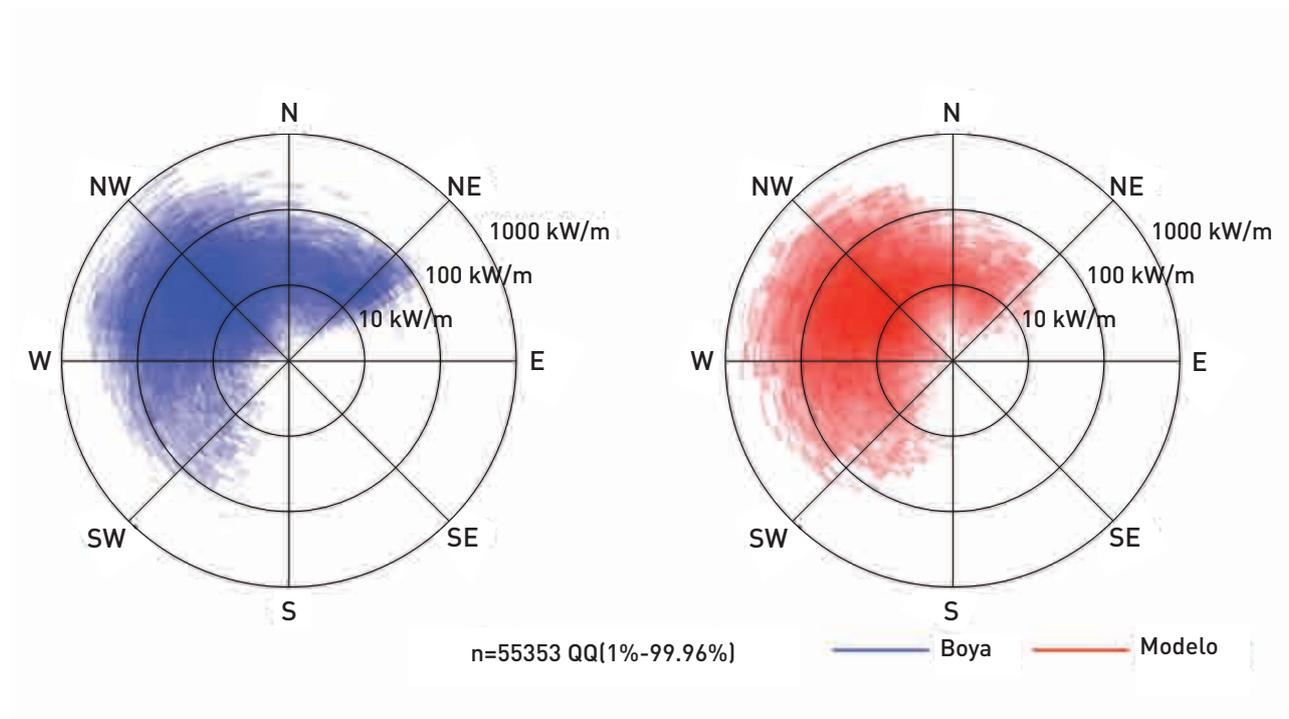
**Figura 6.11. Comparación potencia media en las escalas de tiempo mensual, anual y estacional obtenida a partir de los registros de la boya (azul) y de la serie de datos GOW reconstruida (rojo) correspondientes a la boya de Villano-Sisargas**



Además también se ha analizado la distribución conjunta de la potencia horaria respecto a la dirección media de la energía del oleaje utilizando tanto los registros de la boya como la serie de datos GOW reconstruida. En el panel izquierdo de la Figura 6.12 se muestra la distribución en polares de los registros de la boya de Villano-Sisargas (azul); en el panel derecho, la distribución de la serie reconstruida en la posición de la boya de Villano-Sisargas (rojo). La potencia en el eje radial y

la probabilidad potencia-dirección media del oleaje están representadas en escala logarítmica. Se puede observar cómo, en este caso, la potencia del oleaje más probable proviene de la dirección NW y los estados de mar más energéticos son también de esta dirección.

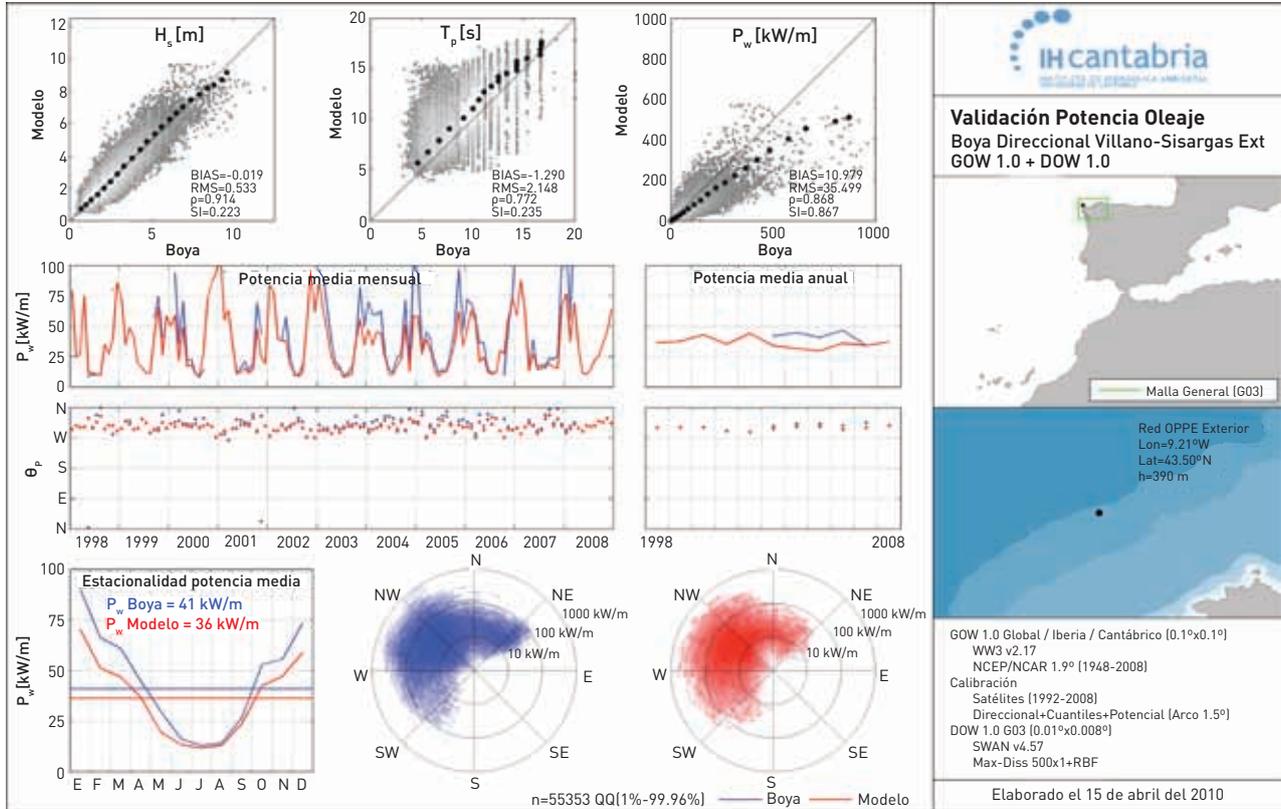
**Figura 6.12. Rosas de distribución de la potencia media del oleaje respecto a la dirección media de la energía, boya Villano-Sisargas**



La validación en cada una de las boyas disponibles se ha almacenado en una serie de fichas que se recogen en el Anexo 2. *Validación del recurso energético*, donde se recoge toda la información descrita en este apartado, además de unos datos adicionales, de igual forma que en las fichas del Anexo 1. *Validación de las series temporales*.

Esta información consta de la localización de la boya y la correspondiente malla de computación de la que se extraen los resultados de la propagación; las características de la boya (red a la que pertenece, posición geográfica, profundidad y localización en la batimetría de la zona); resumen de las características de los datos GOW empleados (versión y mallas de computación del WaveWatch, junto con su resolución), de la calibración aplicada (datos y metodología) y de la metodología de transferencia del oleaje hasta la costa (versión datos DOW, malla de computación y su resolución, versión del modelo de propagación SWAN, número de casos seleccionados, MaxDiss, y algoritmo de interpolación, RBF). En la Figura 6.13 se muestra la ficha completa correspondiente a la validación en la boya de Villano-Sisargas.

Figura 6.13. Ficha con la validación del recurso de la energía del oleaje correspondiente a la boya de Villano-Sisargas



En el caso de la validación de boyas escalares, no se dispone de registros de la dirección media de la energía del oleaje y, por tanto, no se puede comparar la transferencia y reconstrucción del parámetro  $\theta_p$  ni la distribución conjunta de potencia-dirección media de la energía del oleaje,  $p(P_w, \theta_p)$ . Además, los valores de la potencia correspondientes al registro de la boya no se han podido obtener a partir de los parámetros espectrales, ya que sólo se dispone de la altura de ola significativa y del periodo medio y de pico para definir cada estado de mar. En este caso, se asume que la energía espectral puede calcularse a partir de una única componente representativa mediante la siguiente expresión:

$$P(H_s, T_p) = \frac{1}{8} \rho g H_s^2 C_g \quad (6.10)$$

donde  $\rho$  es la densidad del agua,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $H_s$  es la altura de ola significativa y  $C_g$  es la celeridad de grupo, que se define como:

$$C_g = \frac{1}{2} \frac{\omega}{k} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (6.11)$$

donde  $k$  es el número de onda,  $h$  es la profundidad, y  $\omega$  es la frecuencia angular dada por:

$$\omega = 2\pi f_p = \frac{2\pi}{T_p} \quad (6.12)$$

donde  $f_p$  es la frecuencia de pico, que se corresponde con el periodo de pico del espectro.

El cálculo de la potencia de un estado de mar a partir de esta expresión supone la introducción de cierto error debido al desconocimiento de la forma espectral. Para tratar de solventar este error, se ha considerado la siguiente relación:

$$P_{espectral} = \alpha \cdot P(H_s, T_p) \quad (6.13)$$

donde  $\alpha$  es un coeficiente que depende de la forma espectral del estado de mar y  $P_{espectral}$  se define como:

$$P_{espectral} = \rho g \int_{f=0}^{\infty} S(f) \cdot C_g(f) \cdot df \quad (6.14)$$

En este trabajo, se ha aplicado un valor del coeficiente  $\alpha$  correspondiente al valor calculado a partir de la serie GOW reconstruida de los parámetros  $\{P_w, H_s, T_p\}$ . Por tanto, la potencia espectral de los estados de mar registrados de una boya se corrige mediante la siguiente expresión:

$$P_{espectral, boya} = \alpha \left( \frac{P_{espectral, GOW}}{P_{GOW} (H_s, T_p)} \right) P_{boya} (H_s, T_p) \tag{6.15}$$

En la Figura 6.14 se compara el valor de la potencia media obtenido a partir del registro de la boya frente al valor de la potencia media obtenido a partir de la serie temporal de la potencia reconstruida en la posición de la boya correspondiente. En la Figura 6.15 se muestra esta misma comparación para la potencia media mensual. Esta validación de la potencia media en las boyas disponibles a lo largo del litoral español permite comprobar la validez de la metodología aplicada en este trabajo para la estimación del recurso energético de las olas a lo largo del litoral.

**Figura 6.14. Validación potencia media en las boyas disponibles a lo largo del litoral español**

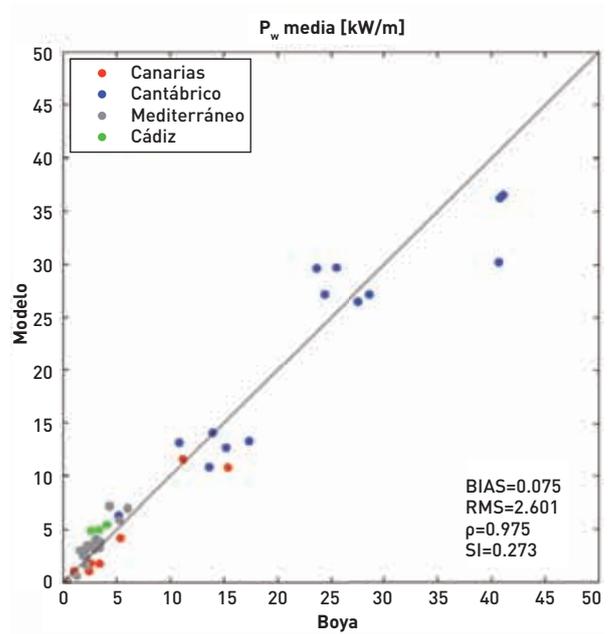
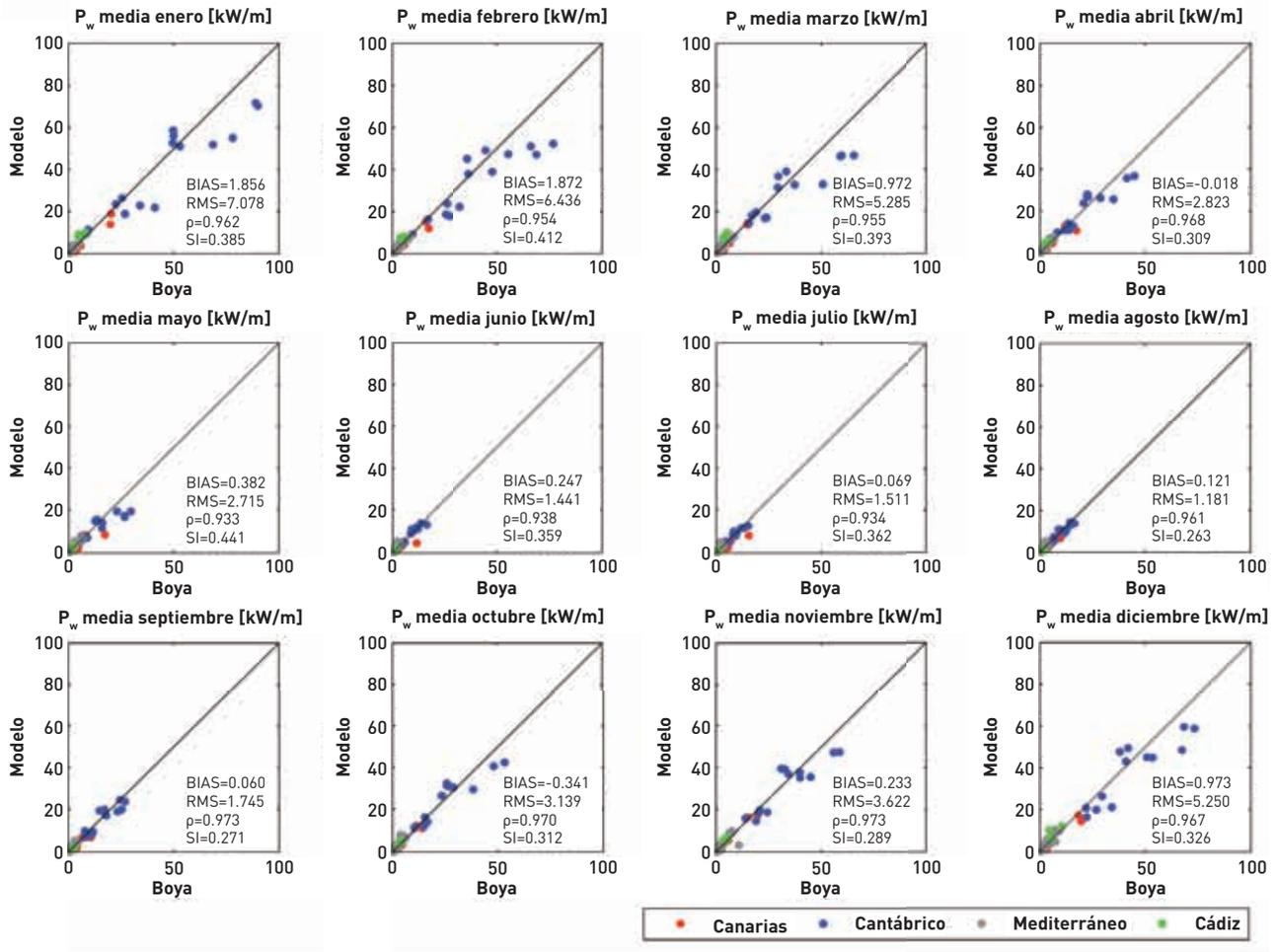


Figura 6.15. Validación potencia media estacional en las boyas disponibles a lo largo del litoral español



## 6.3 MAPAS DEL RECURSO DE ENERGÍA DE OLAJE POR MALLA DE CÁLCULO

La metodología expuesta en el apartado 6.1 para la obtención de la distribución estadística del recurso de energía permite obtener la potencia media en distintas escalas temporales en las distintas mallas de computación planteadas para la transferencia del oleaje desde aguas profundas a aguas someras (Figuras 5.1, 5.2 y 5.3), a partir del valor de la potencia correspondiente a los  $M=500$  casos seleccionados mediante MaxDiss y la probabilidad de cada uno en las distintas escalas temporales.

A continuación se muestran una serie de mapas de resultados que caracterizan la potencia media, el cuantil del 95% de la potencia, la estacionalidad de la potencia media y la variabilidad interanual. Estos mapas componen el atlas del recurso de energía de oleaje en España. En el Anexo 3 se recogen los mapas de la potencia media (total y estacional) y el porcentaje de energía proveniente de cada sector para cada una de las mallas de cálculo.

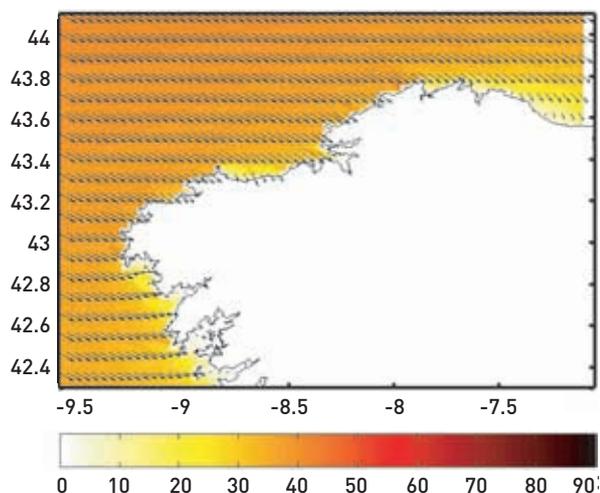
### 6.3.1 Potencia media

Los mapas con la distribución de la potencia media a lo largo de todo el litoral español se encuentran disponibles en forma GIS. Como ejemplo del tipo de resultados, en la Figura 6.16 se muestra el mapa

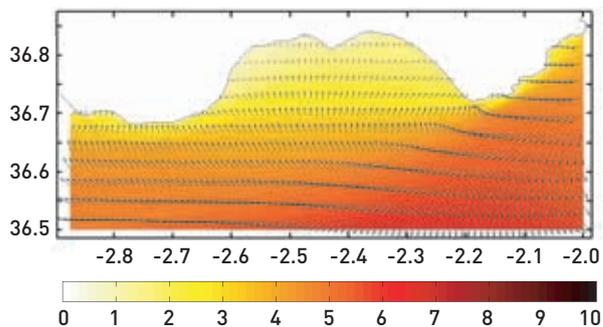
correspondiente a la potencia media y la dirección media de la energía en la malla G03 del Atlántico Norte. La escala del mapa se establece en función de la potencia estacional (Figura 6.20) para poder comparar los valores en las distintas escalas temporales. A pesar de la escala de la Figura 6.16, se puede observar que la potencia del oleaje es mayor en la esquina superior del mapa, debido a que los temporales en esta zona del litoral español proceden de esta dirección e inciden directamente en este tramo de costa. Por otro lado, se forman unos gradientes de potencia del oleaje a ambos lados de esta zona de mayor energía, disminuyendo considerablemente la potencia en las zonas próximas a la costa norte y oeste, por el efecto de protección de los cabos localizados en estos tramos.

En la Figura 6.17 se muestra la potencia media y dirección media de la energía del oleaje en la malla GM08 del Mediterráneo Sur, que abarca la zona de Almería. En este caso la potencia del oleaje es mucho menor que en el Atlántico, presentando valores en torno a 6 kW/m en aguas profundas hasta 2 kW/m cerca de costa, frente al valor medio de 40 kW/m en la zona del Atlántico. Además, en esta zona del Mediterráneo se puede observar una gran variación de la dirección media de la energía. La energía proviene del NNE-NE en la parte derecha de la malla, marcada por los temporales más energéticos existentes en esta zona; mientras que en las proximidades de la costa la energía incide con una dirección sur, debido a la refracción del oleaje en su propagación hacia aguas someras.

**Figura 6.16. Potencia media (kW/m) en la malla G03 (Atlántico Noroeste)**



**Figura 6.17. Potencia media (kW/m) en la malla GM08 (Mediterráneo Sur)**

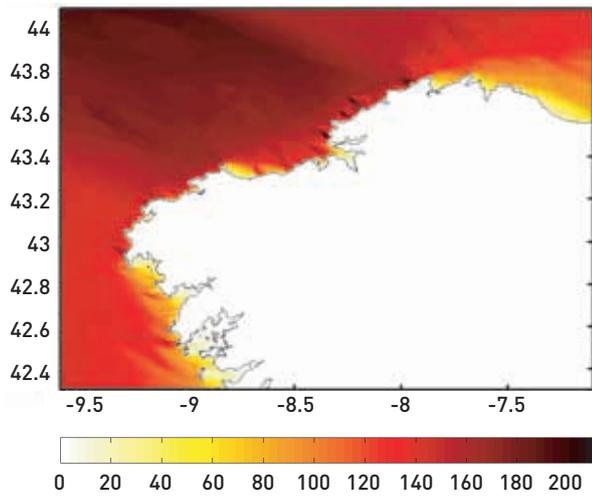


### 6.3.2 Cuantil del 95% de la potencia

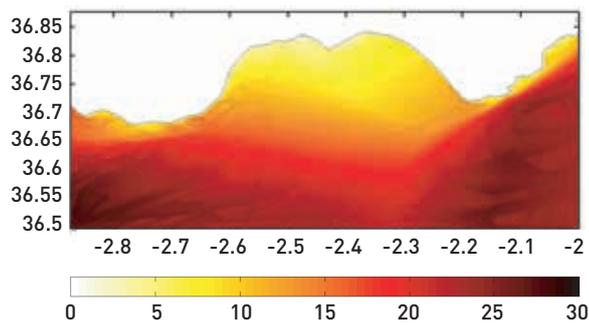
En la Figura 6.18 se muestra la distribución del cuantil del 95% de la potencia del oleaje en la malla G03. En este mapa se puede observar con mayor detalle el patrón de potencia existente en esta zona, descrito para la potencia media del oleaje. Además de la existencia de una zona central más energética y una disminución de la potencia hacia ambos laterales, se puede observar la concentración de energía en zonas próximas a la costa debido a la existencia de bajos en la batimetría de la zona.

En la Figura 6.19 se representa el cuantil del 95% para la potencia del oleaje en la malla GM08 del Mediterráneo Sur. En esta distribución de la potencia se puede observar una mayor energía en ambos extremos de la malla debido a la incidencia de las dos familias de temporales existentes en la zona (NE-SW) y una zona próxima a la costa mucho menos energética por el efecto de protección debido a la configuración de la costa.

**Figura 6.18. Cuantil del 95% de la potencia (kW/m) en la malla G03 (Atlántico Noroeste)**



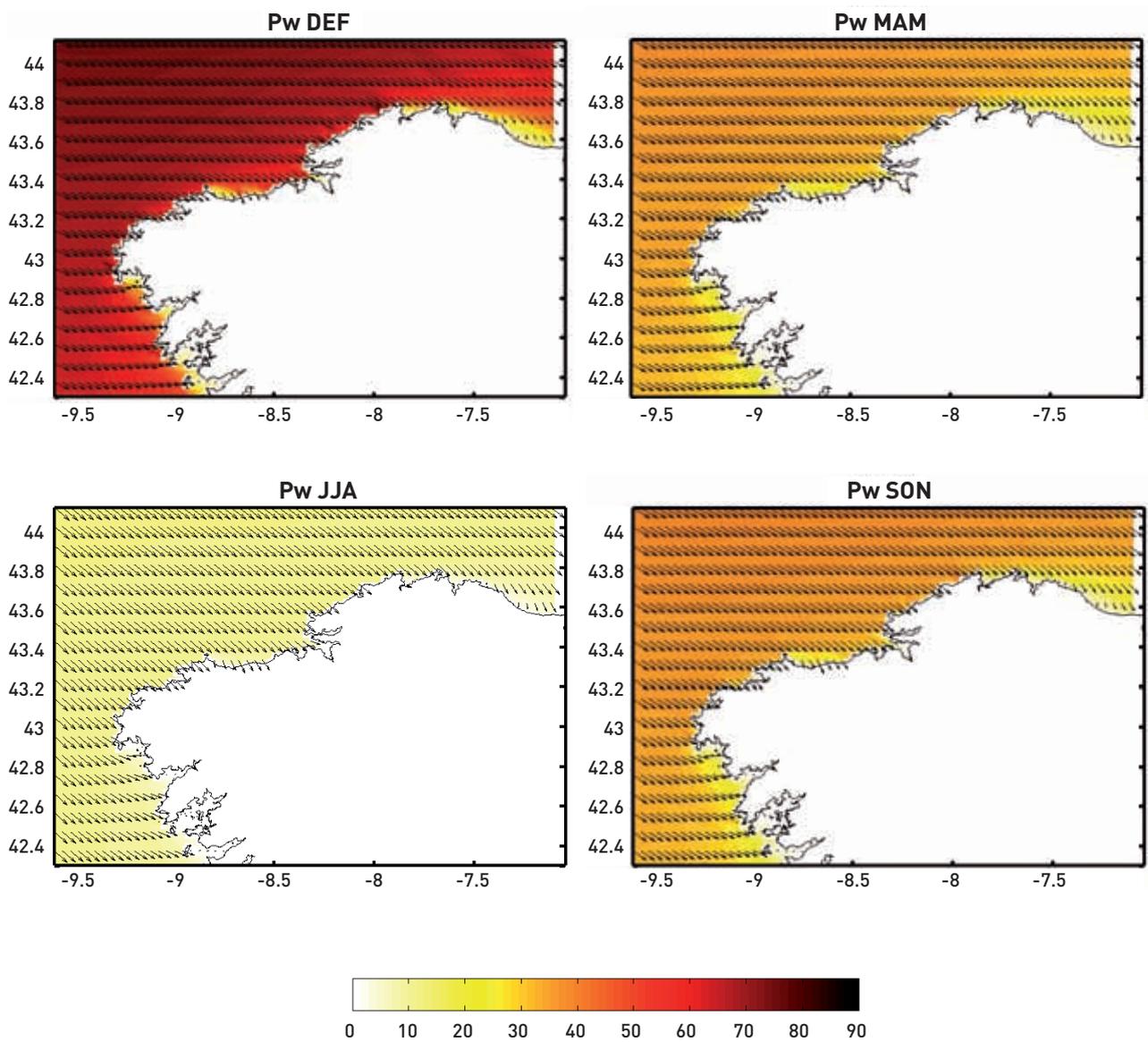
**Figura 6.19. Cuantil del 95% de la potencia (kW/m) en la malla GM08 (Mediterráneo Sur)**



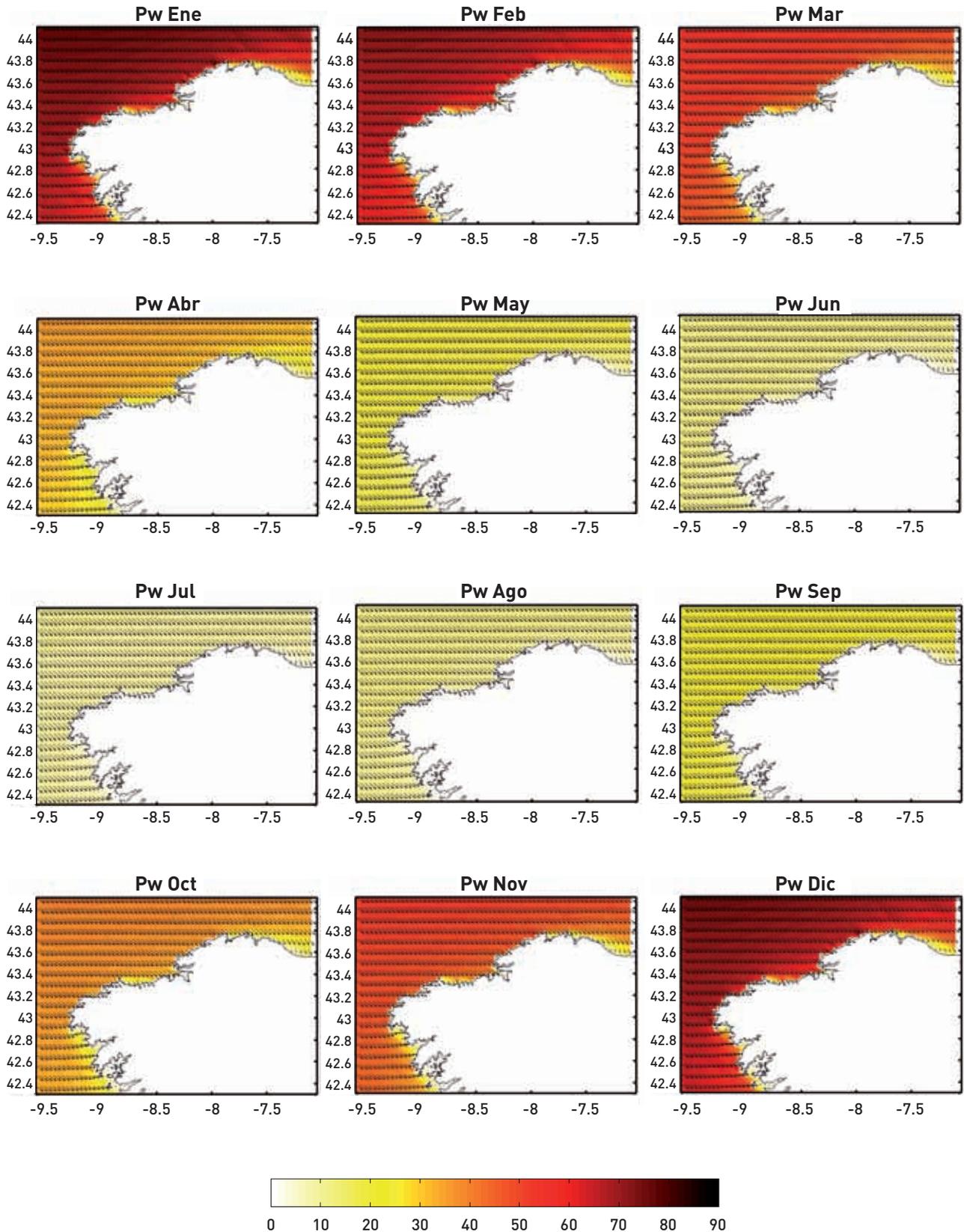
### 6.3.3 Estacionalidad de la potencia media

En este caso se caracteriza el recurso de la energía del oleaje en las distintas estaciones y meses del año. En la Figura 6.20 se muestra la distribución estacional de la potencia media en DEF, MAM, JJA y SON para la malla G03. Se puede observar cómo durante los meses de invierno la potencia es significativamente superior que en el resto de estaciones, siendo mínima durante los meses de verano. En la Figura 6.21 se muestra la estacionalidad mensual. En este caso se vuelve a observar la mayor energía del oleaje durante los meses de invierno frente a los de verano, pero en este caso, se pueden distinguir los meses más energéticos dentro de cada estación. Por ejemplo, en MAM, la potencia del oleaje va descendiendo desde marzo a mayo.

**Figura 6.20. Estacionalidad de la potencia media (kW/m) en la malla G03 (Atlántico Noroeste): DEF, MAM, JJA, SON**



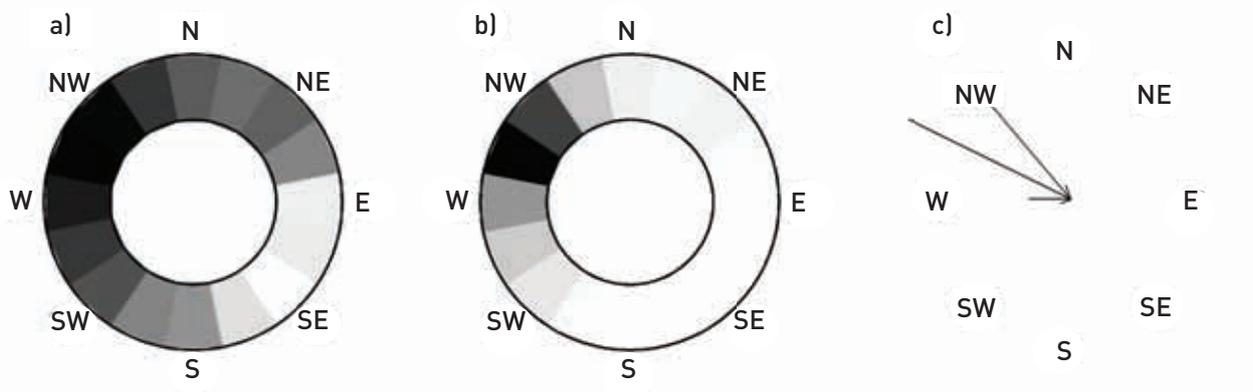
**Figura 6.21. Estacionalidad mensual de la potencia media (kW/m) en la malla G03 (Atlántico Noroeste)**



Con objeto de analizar la dirección media de la energía, se ha calculado el porcentaje de energía proveniente de los distintos sectores direccionales de 22.5°, de igual manera que el gráfico de la Figura 6.3. En este caso, el porcentaje de energía de cada sector se ha representado por una línea, cuya dirección es la dirección media del sector de procedencia de la energía del oleaje y su longitud es función de la proporción de energía proveniente de ese sector respecto a la energía total en ese punto. En la Figura 6.22 se muestra el porcentaje de

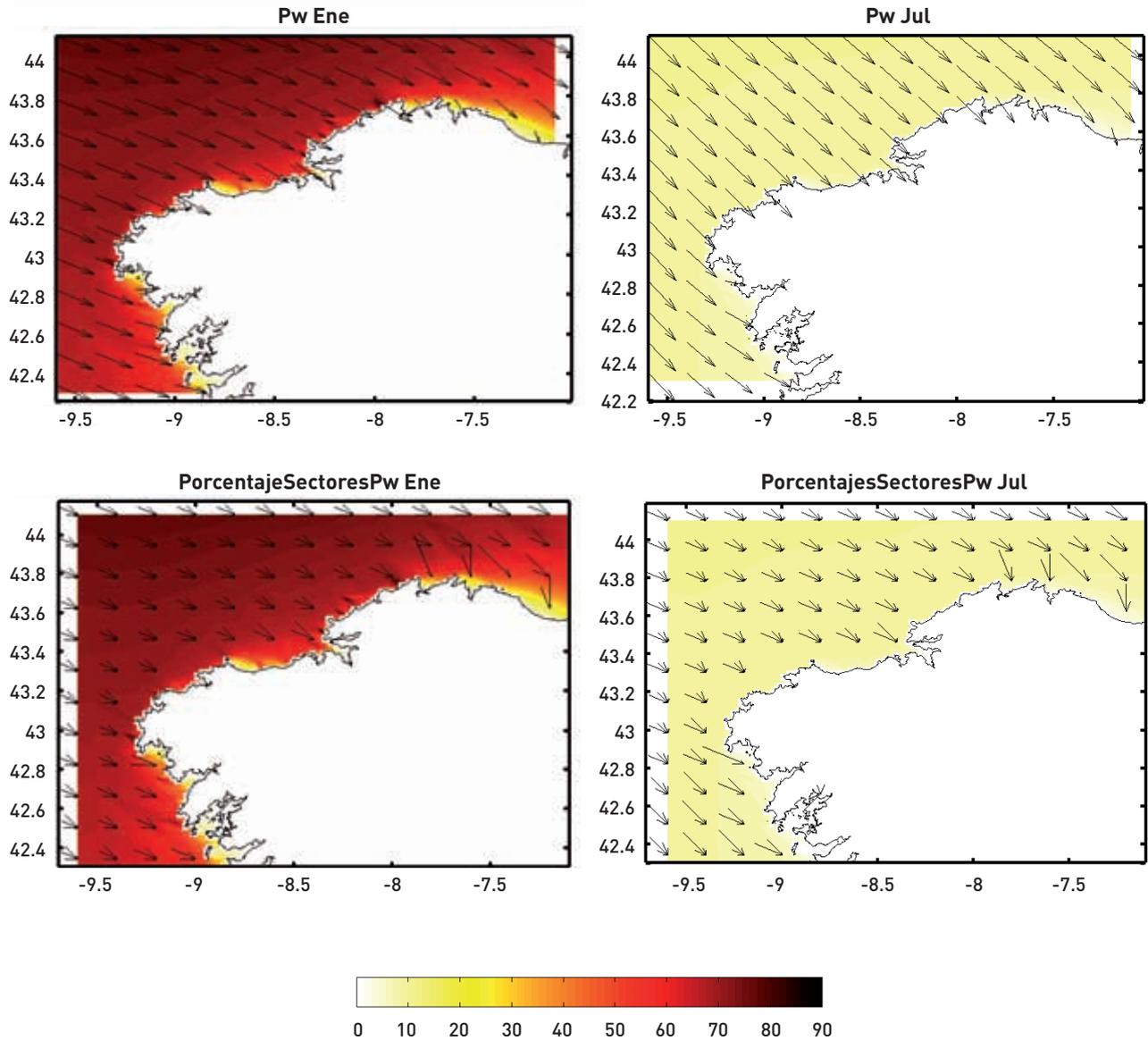
potencia proveniente de cada sector para un punto localizado en las proximidades de La Coruña. En el panel a) se ha representado el logaritmo del porcentaje en una escala de grises (como los gráficos de la Figura 6.3); en el panel b) el porcentaje en una escala de grises, y en el panel c) el tamaño de las flechas y su dirección representa el porcentaje de potencia y el sector de procedencia de la energía. Esta última representación es la adoptada en los mapas espaciales del recurso de energía del oleaje a lo largo del litoral español.

**Figura 6.22. Porcentaje de potencia procedente de los distintos sectores direccionales de 22.5°**



En el panel superior izquierdo de la Figura 6.23 se muestra la potencia del oleaje y la dirección media de la energía correspondiente al mes de enero; en el panel inferior izquierdo se muestra la potencia media y el correspondiente porcentaje de energía de cada sector. En el panel superior e inferior derecho se representan la información para el mes de julio. Se puede observar cómo la energía del oleaje en enero proviene principalmente de las direcciones W-WNW-NW, siendo, por tanto, la dirección media de la energía del WNW. En el caso de julio, los mayores porcentajes de energía se corresponden con las direcciones NW-NNW, por tanto, la dirección media de la energía presenta una componente N más significativa.

**Figura 6.23. Potencia media (kW/m), dirección media de la energía del oleaje y porcentaje de energía correspondiente a cada sector direccional de 22.5° para el mes de enero (panel izquierdo) y julio (panel derecho) en la malla G03 (Atlántico Noroeste)**



En la Figura 6.24 se muestra la estacionalidad de la potencia media en la malla GM08 del Mediterráneo Sur. En esta zona del litoral español la estacionalidad es diferente, siendo las estaciones DEF y MAM las más energéticas con un orden de valores de la potencia muy similares. Esta estacionalidad es notable en la zona más expuesta a los temporales (extremo derecho de la malla), mientras que en la zona cercana a costa apenas es apreciable la estacionalidad. En la Figura 6.25 se ha representado la estacionalidad mensual de la potencia. Se puede

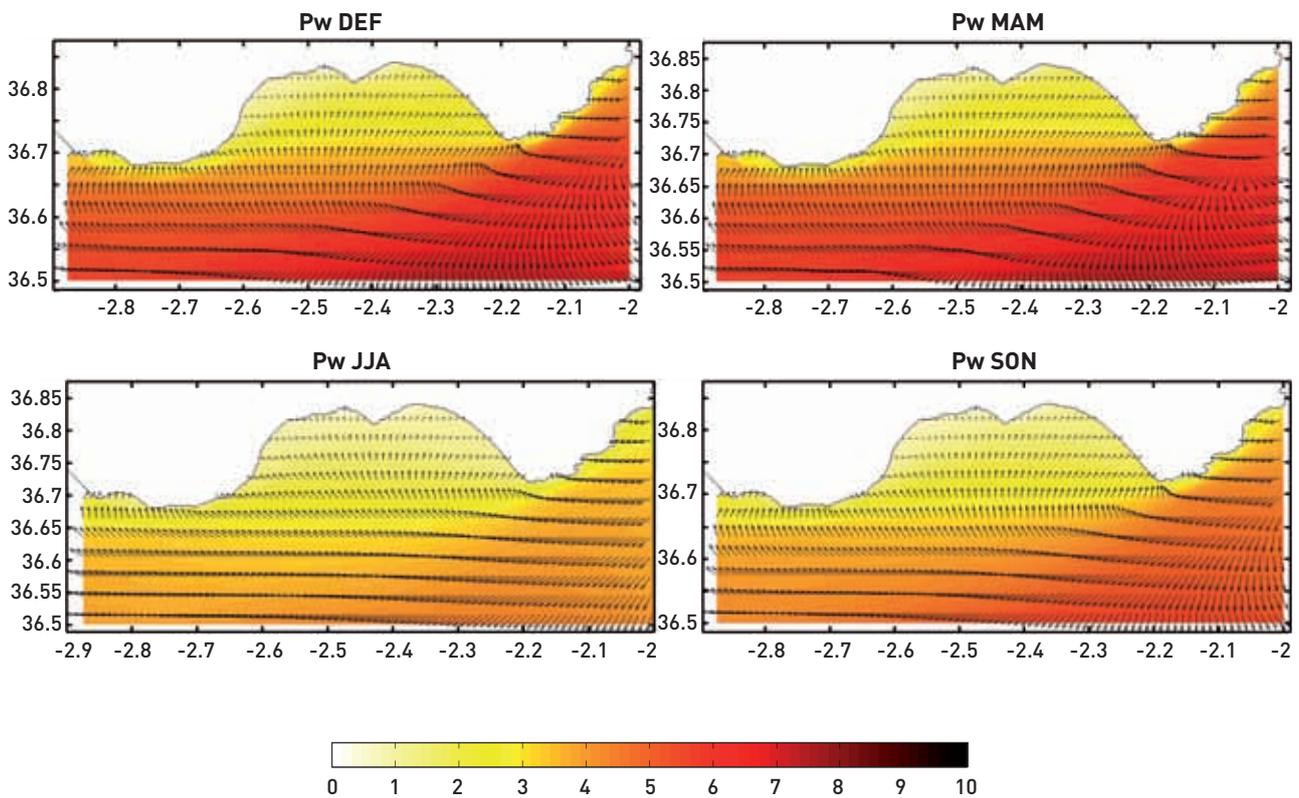
observar cómo en este caso el mes de marzo es el más energético del año.

En la Figura 6.26 se muestra la potencia y dirección media de la energía del oleaje en abril (panel superior e inferior derecho) y en julio (panel superior e inferior izquierdo) en la malla GM08. En este caso se han seleccionado estos dos meses por presentar direcciones medias muy diferentes. En el porcentaje de energía por sectores en aguas profundas se puede observar las dos direcciones principales de procedencia del oleaje NE-SW (correspondientes

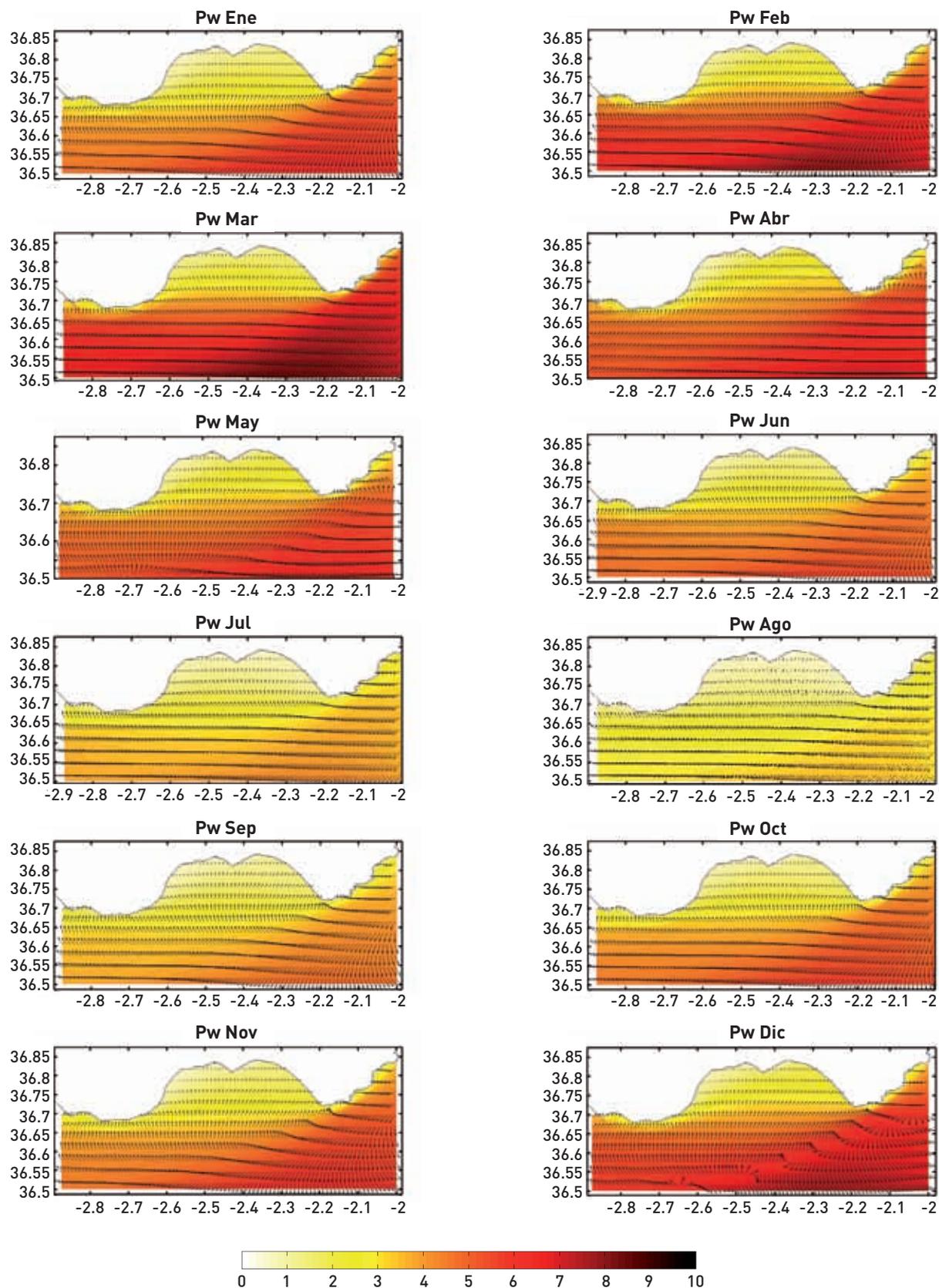
a las dos familias de oleaje señaladas anteriormente). En las proximidades a costa también se advierten dos direcciones importantes: SE-SSW, debidas a la refracción de las dos familias de oleaje en aguas profundas. El mayor porcentaje de energía en cada uno de estos sectores a distintas profundidades determina la dirección media de la energía del oleaje. De tal manera que en abril es mayor la

cantidad de energía proveniente del SW y, por tanto, la dirección media de la energía es SW (extremo inferior izquierdo de la malla) o SSW (en las proximidades de la costa). En julio, es mayor la energía del NE, y por tanto, la dirección media de la energía es del NE (extremo inferior derecho de la malla) o del SE (cerca de costa).

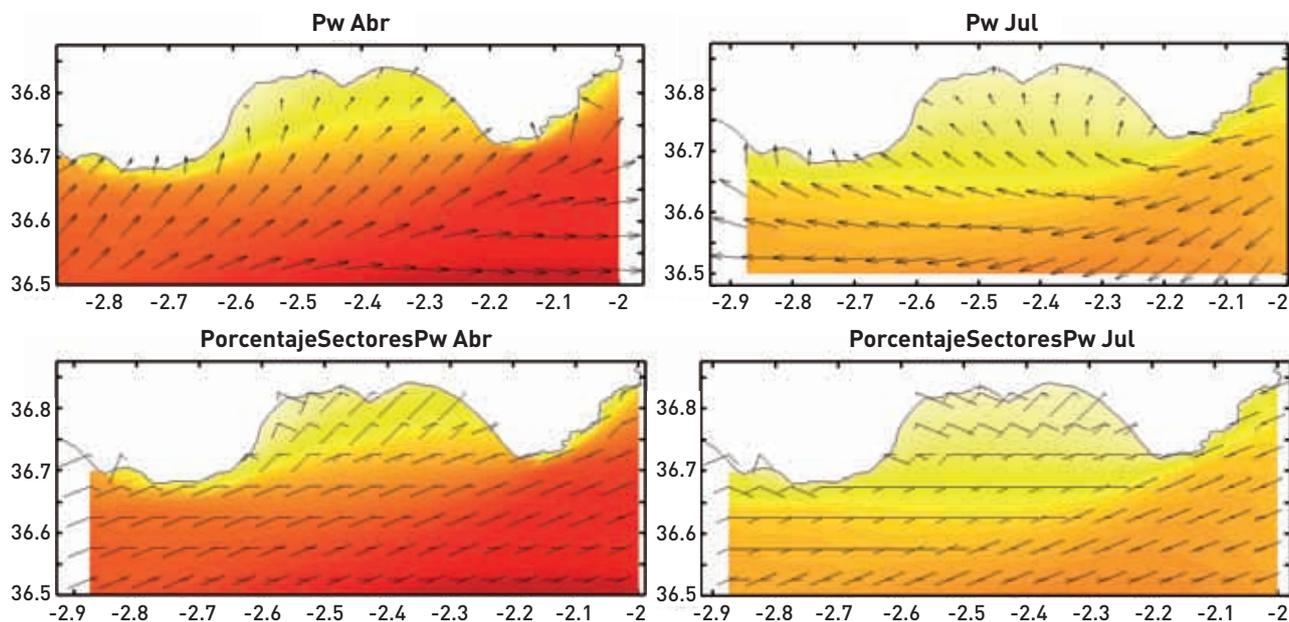
**Figura 6.24. Estacionalidad de la potencia media (kW/m) en la malla GM08 (Mediterráneo Sur): DEF, MAM, JJA, SON**



**Figura 6.25. Estacionalidad mensual de la potencia media (kW/m) en la malla GM08 (Mediterráneo Sur)**



**Figura 6.26. Dirección media de la energía del oleaje y porcentaje de energía correspondiente a cada sector direccional de 22.5° para el mes de abril (panel izquierdo) y julio (panel derecho) en la malla GM08 (Mediterráneo Sur)**



## 6.4 ATLAS DEL RECURSO DE ENERGÍA EN ESPAÑA

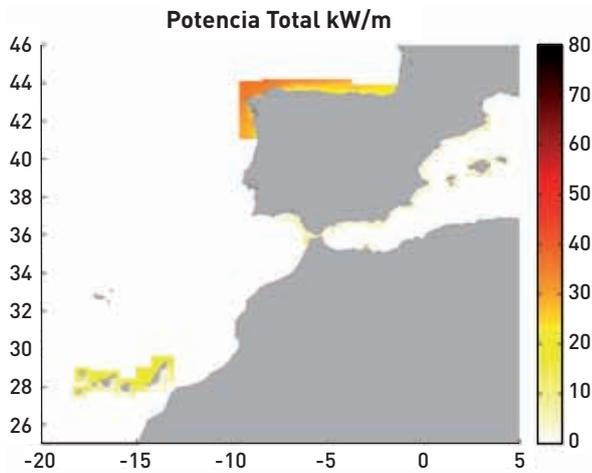
En la Figura 6.27 se muestra la potencia media anual en el litoral español. A la vista de los resultados obtenidos, se puede comentar lo siguiente:

- Galicia presenta los valores de potencial de energía más elevados, con potencias medias en profundidades indefinidas entre 40-45 kW/m.
- El Mar Cantábrico es, en segundo lugar, la siguiente zona del litoral en cuanto a recurso (alrededor de 30 kW/m disminuyendo de Oeste a Este).
- En tercer lugar, la fachada norte de las Islas Canarias (con 20 kW/m).
- La fachada sur de las Islas Canarias, junto con el Mediterráneo español y el Golfo de Cádiz presentan valores medios anuales menores a 10 kW/m.
- Los resultados obtenidos en profundidades indefinidas van disminuyendo progresivamente a medida que el calado disminuye aunque en algunas áreas se producen concentraciones locales motivadas por la configuración de la costa y de la batimetría.

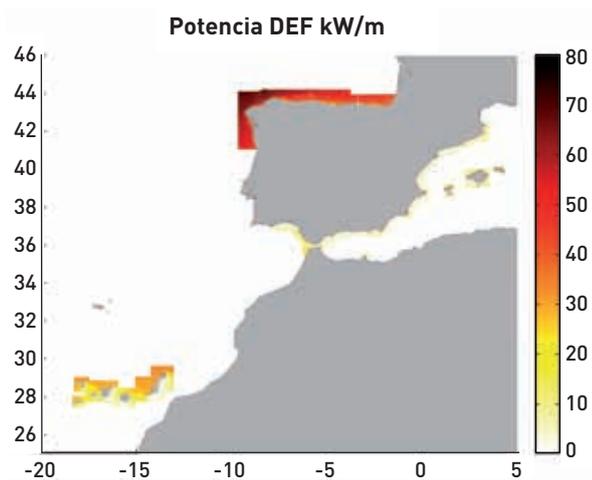
En las Figuras 6.28, 6.29, 6.30 y 6.31 se muestra la potencia media en el litoral en las estaciones del año: DEF, MAM, JJJ y SOM, pudiéndose comprobar:

- Existencia de una fuerte estacionalidad en la potencia media, presentándose en invierno potencias medias de 75 kW/m (Galicia), 50 kW/m (Cantábrico) y 35 kW/m (Norte de Canarias).

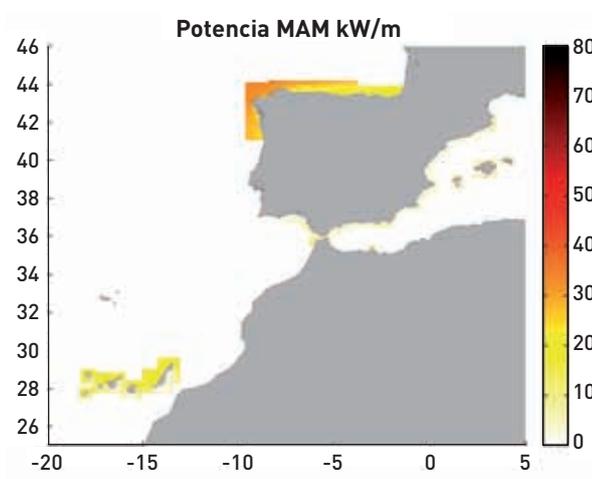
**Figura 6.27. Atlas de la potencia media del oleaje en España (unidades: kW/m)**



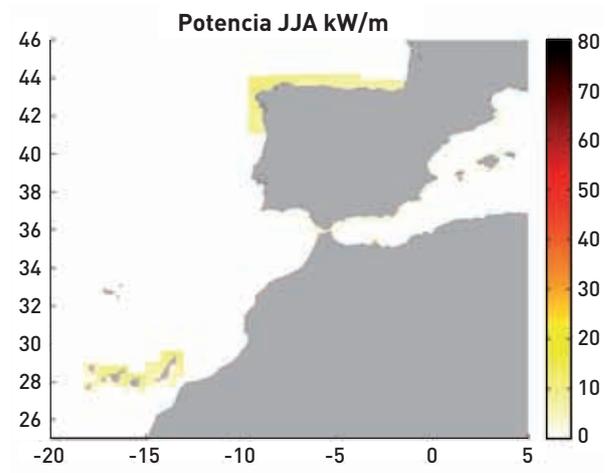
**Figura 6.28. Atlas de la potencia media del oleaje en España en DEF (unidades: kW/m)**



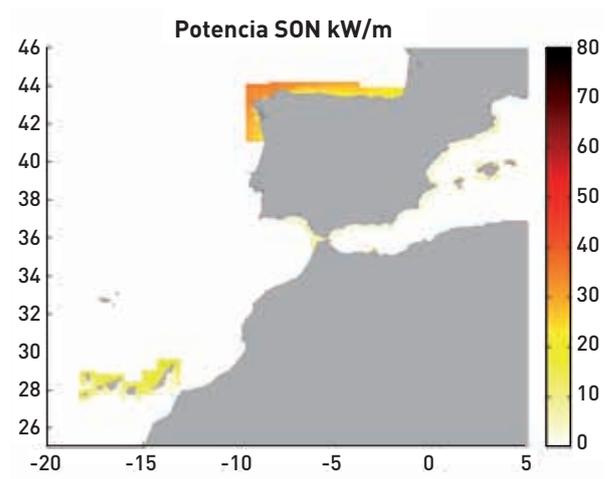
**Figura 6.29. Atlas de la potencia media del oleaje en España en MAM (unidades: kW/m)**



**Figura 6.30. Atlas de la potencia media del oleaje en España en JJA (unidades: kW/m)**



**Figura 6.31. Atlas de la potencia media del oleaje en España en SON (unidades: kW/m)**

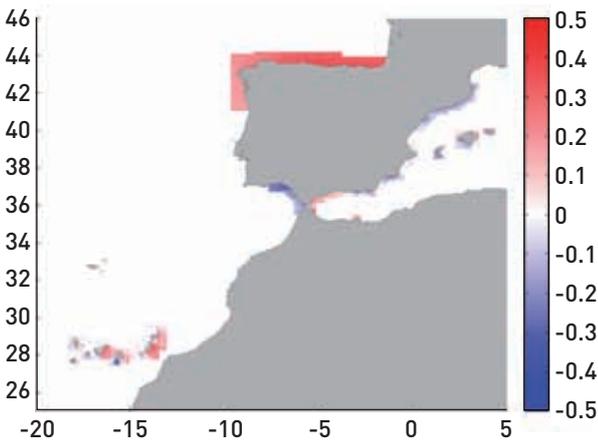


### 6.4.1 Variabilidad interanual

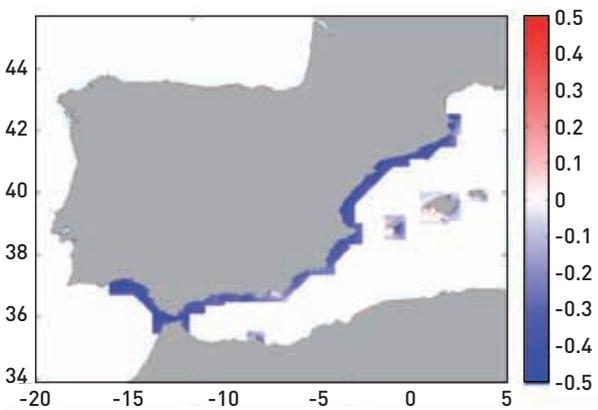
Por otro lado, existe una fuerte correlación de la potencia media mensual con los patrones climáticos de escala oceánica: Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y Patrón del Atlántico Este (EA). En la Figura 6.32 se muestra la correlación de la potencia media mensual con un índice mensual del patrón de la oscilación del Atlántico Norte mientras que en la Figura 6.33 se muestra la correlación con un índice mensual del patrón del Atlántico Este. Estas fuertes correlaciones indican una elevada variabilidad interanual de la potencia media mensual y también del posible uso de la información generada con fines predictivos (a escala de meses). En el caso del Mediterráneo, la correlación con estos patrones del Atlántico no es tan significativa. Por

tanto, se ha considerado un patrón climático de escala local: Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO). En la Figura 6.34 se muestra la correlación con un índice mensual representativo de este patrón, pudiéndose observar la alta correlación a lo largo del litoral mediterráneo y atlántico sur de la Península Ibérica.

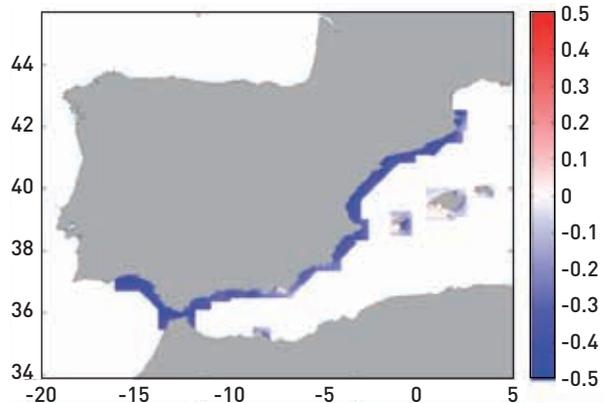
**Figura 6.32. Atlas de coeficiente de correlación con el índice climático NAO**



**Figura 6.33. Atlas de coeficiente de correlación con el índice climático EA**



**Figura 6.34. Atlas de coeficiente de correlación con el índice climático WeMO**



## 6.5 ANÁLISIS DEL RECURSO PUNTO A PUNTO

Se ha obtenido esta caracterización del recurso de energía a lo largo de la costa española con una resolución espacial de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  (Figura 6.35) a 20, 50, 100 m de calado y en profundidades indefinidas. Esta información se ha almacenado en una ficha para cada punto de interés como la que se muestra en las Figuras 6.36, 6.37 y 6.38, correspondientes a las profundidades 20, 50 y 10 m. En esta ficha se incluyen las gráficas comentadas en el apartado 6.1. El recurso de energía del oleaje se caracteriza mediante la potencia media y su distribución en sectores direccionales según la dirección media de la energía del oleaje, total y estacional, la función de distribución empírica de la potencia total y estacional, y la estacionalidad mensual de la potencia a partir de una serie de estadísticos. Además de las anteriores gráficas, se incluye la localización del punto con las características de datos de oleaje, modelos de propagación y metodología de transferencia aplicada para la obtención del recurso energético.

Figura 6.35. Mapa con los puntos en los que se dispone de una caracterización del recurso punto a punto

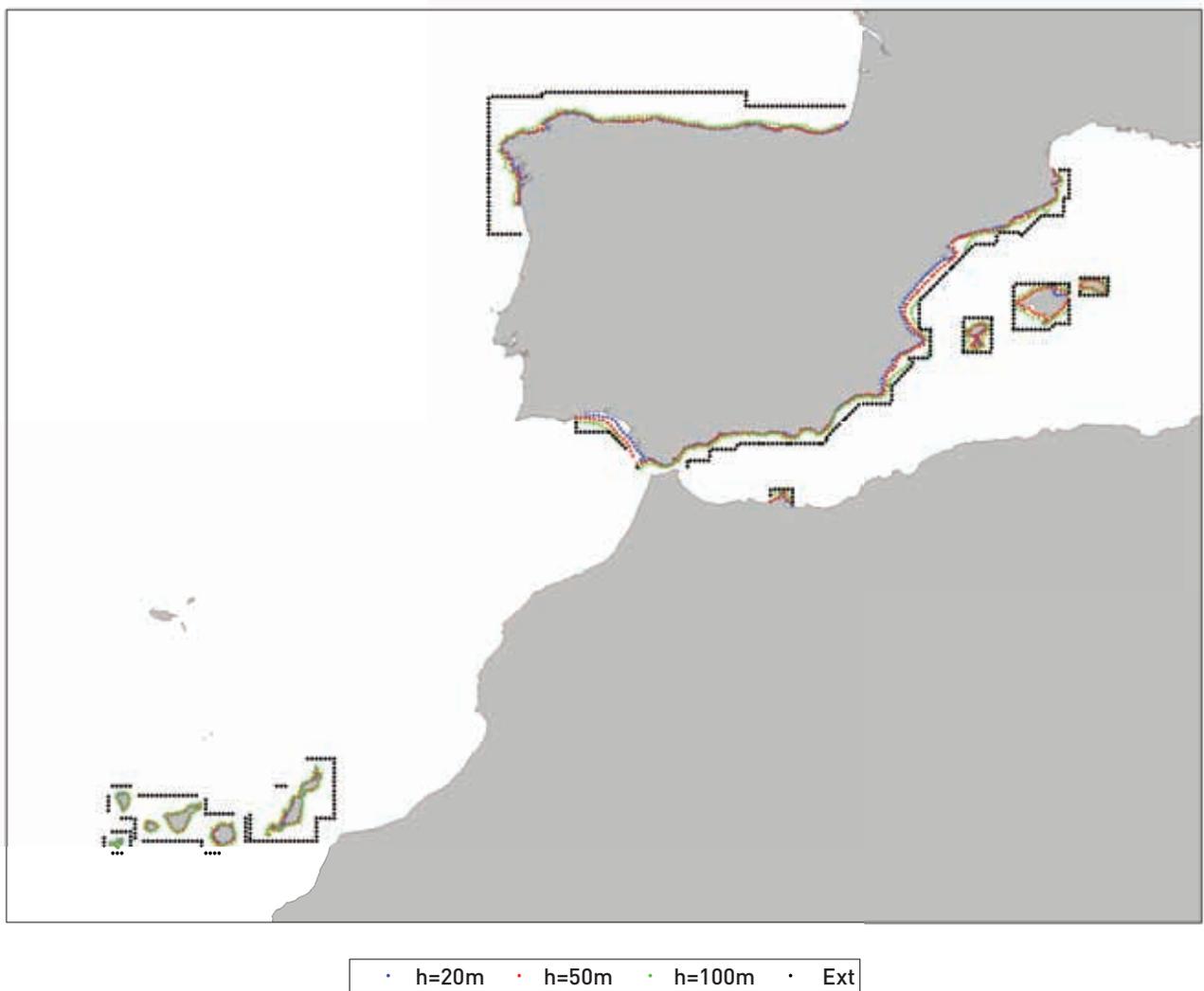


Figura 6.36. Ficha con la caracterización de la potencia del oleaje en distintas escalas temporales (total, estacional y climatología mensual)

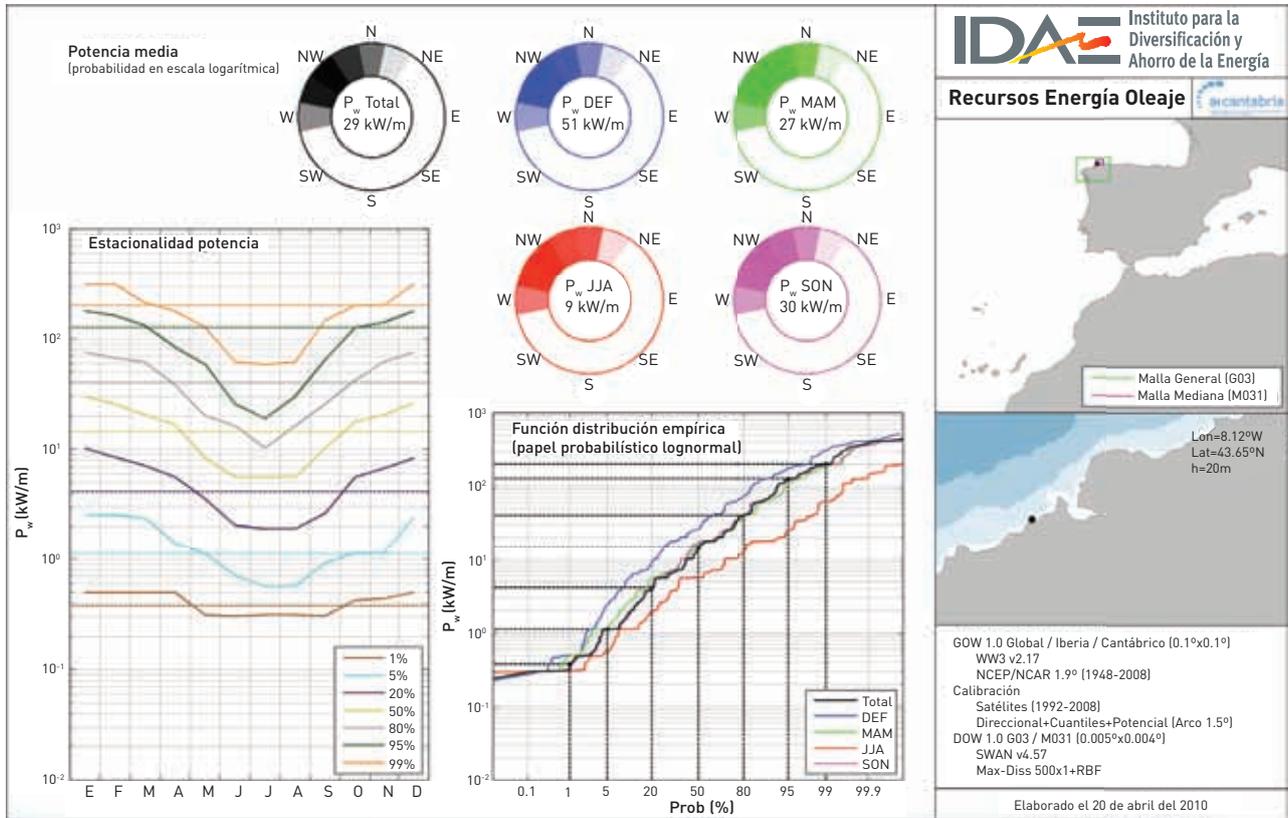


Figura 6.37. Ficha con la caracterización de la potencia del oleaje en distintas escalas temporales (total, estacional y climatología mensual)

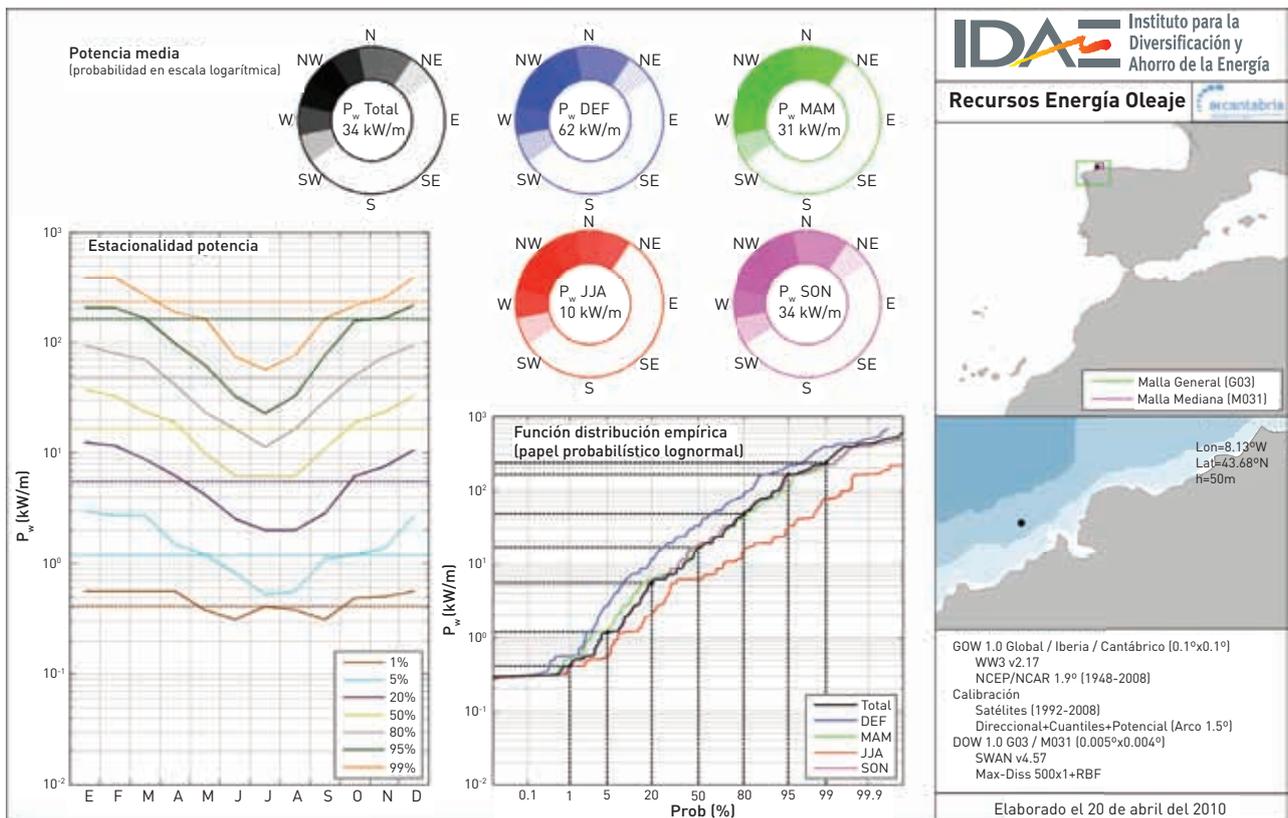
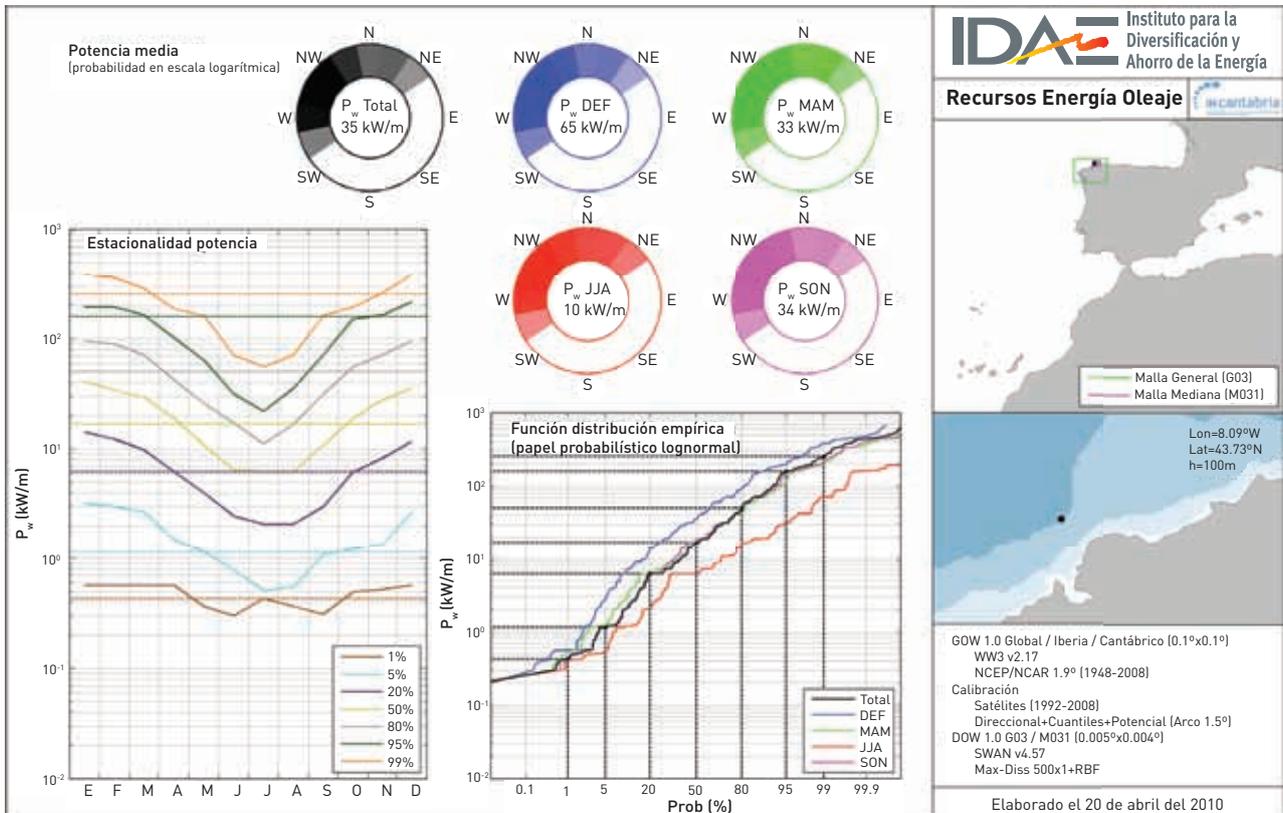


Figura 6.38. Ficha con la caracterización de la potencia del oleaje en distintas escalas temporales (total, estacional y climatología mensual)



## 6.6 DISTRIBUCIÓN DEL RECURSO POR COMUNIDADES AUTÓNOMAS

### 6.6.1 Potencia media por comunidades autónomas

A partir de los resultados obtenidos en las secciones anteriores, en la Tabla 6.1 se muestra la potencia media por comunidades autónomas en profundidades indefinidas. Dada la variabilidad existente a lo largo de la costa de cada comunidad autónoma, la tabla recoge el valor medio y los valores máximo y mínimo de dicha potencia media en kW/m. Asimismo se recoge la desviación típica.

Tabla 6.1. Potencia media en el exterior,  $P_w$ (kW/m)

	Potencia media en el exterior, $P_w$ (kW/m)			
	Media	Desviación típica	Máximo	Mínimo
País Vasco	26,68	0,58	27,39	25,46
Cantabria	30,97	2,59	33,75	27,46

(Continuación)

	Potencia media en el exterior, Pw (kW/m)			
	Media	Desviación típica	Máximo	Mínimo
Asturias	35,14	1,15	37,3	33,47
Galicia	37,97	2,34	41,27	33,22
Andalucía	4,50	1,17	7,56	2,91
Murcia	3,08	0,85	4,25	2,14
Valencia	2,96	0,36	3,72	2,33
Cataluña	4,17	1,66	7,51	2,37
Baleares	5,11	1,69	8,74	2,68
Canarias	13,59	6,03	23,67	2,63
Melilla	5,40	0,64	6,03	4,17

Los resultados ponen de manifiesto que Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco y Canarias son las comunidades con mayor recurso. Como era esperable la mayor desviación se encuentra en Canarias por la gran diferencia entre las fachadas del archipiélago.

Dado que existe una fuerte dependencia del recurso energético del oleaje en función de su ubicación en el litoral, en las tablas siguientes se muestran los resultados de la potencia media a 100 m, 50 m y 20 m de profundidad.

**Tabla 6.2. Potencia media a 100 m, Pw (kW/m)**

	Potencia media a 100 m, Pw (kW/m)			
	Media	Desviación típica	Máximo	Mínimo
País Vasco	19,89	1,91	22,15	16,26
Cantabria	22,94	1,69	25,91	19,69
Asturias	21,51	2,67	25,88	14,90
Galicia	30,26	6,15	37,01	11,99
Andalucía	3,42	1,41	7,81	1,57
Murcia	2,25	0,95	3,74	1,26
Valencia	2,86	0,46	3,67	2,00

*(Continuación)*

	Potencia media a 100 m, Pw (kW/m)			
	Media	Desviación típica	Máximo	Mínimo
Cataluña	3,13	1,11	5,62	1,59
Baleares	4,56	1,96	8,68	1,72
Canarias	9,70	6,99	22,58	0,30
Melilla	4,65	0,74	5,70	3,71

**Tabla 6.3. Potencia media a 50 m, Pw (kW/m)**

	Potencia media a 50 m, Pw (kW/m)			
	Media	Desviación típica	Máximo	Mínimo
País Vasco	15,18	3,76	20,46	7,55
Cantabria	18,96	4,44	24,26	9,65
Asturias	17,48	3,77	25,51	10,8
Galicia	25,21	8,64	36,6	8,58
Andalucía	3,06	1,60	7,31	0,90
Murcia	1,43	0,71	3,03	0,62
Valencia	2,30	0,38	3,04	1,47
Cataluña	2,26	0,79	4,59	1,28
Baleares	3,63	2,00	8,31	1,14
Canarias	8,94	6,97	20,99	0,23
Melilla	3,50	0,56	4,63	2,97

Tabla 6.4. Potencia media a 20 m, Pw (kW/m)

	Potencia media a 20 m, Pw (kW/m)			
	Media	Desviación típica	Máximo	Mínimo
País Vasco	12,2	4,58	18,98	4,65
Cantabria	14,94	3,81	20,9	7,98
Asturias	13,55	4,58	23,14	7,56
Galicia	17,08	9,21	33,62	1,50
Andalucía	2,53	1,50	6,56	0,48
Murcia	1,07	0,73	2,41	0,35
Valencia	1,70	0,46	2,71	0,74
Cataluña	1,62	0,68	3,72	0,82
Baleares	2,01	0,88	4,09	0,83
Canarias	7,53	6,56	21,84	0,23
Melilla	3,20	0,51	4,24	2,71

En todas las comunidades se produce una disminución de la potencia media con la profundidad.

### 6.6.2 Energía bruta disponible por comunidad autónoma

La energía bruta disponible en cada comunidad autónoma se ha obtenido teniendo en cuenta la tipología de la plataforma continental y la dirección media del flujo de energía. Para las comunidades peninsulares, esto se traduce en multiplicar la longitud de las diferentes fachadas por el coseno del ángulo que forma el flujo medio anual de energía con la dirección media de la batimétrica correspondiente, que se asume paralela a cada fachada.

En el caso de los archipiélagos, se han encerrado en un rectángulo que los abarca en su totalidad. En profundidades indefinidas se ha tenido en cuenta el flujo de energía que entra por cada lado del rectángulo. En el resto de las profundidades se determina

el flujo de energía que entra por la línea paralela al rectángulo proyectada sobre cada una de las islas y situada sobre la batimétrica correspondiente. En la primera tabla adjunta (6.5) se incluye la longitud que se ha utilizado para cada fachada, tanto en profundidades indefinidas, como en 100, 50 y 20 m de profundidad. Obsérvese que en algunas comunidades autónomas y dada la diferente orientación de sus costas se ha realizado una subdivisión en subfachadas.

**Tabla 6.5. Longitud de fachada considerada en km para cada comunidad autónoma por profundidades**

	Longitud (km)			
	Indef.	100 m	50 m	20 m
País Vasco	110	110	110	110
Cantabria	110	110	110	110
Asturias	200	200	200	200
Galicia	460	445	430	415
Andalucía W	175	175	175	175
Andalucía E	350	350	350	350
Murcia	100	100	100	100
Valencia	280	280	280	280
Cataluña	330	330	330	330
Baleares NW	350	300	270	245
Baleares NE	150	140	130	125
Baleares SE	350	300	270	245
Baleares SW	150	140	130	125
Canarias N	490	350	340	330
Canarias E	160	150	150	150
Canarias S	490	350	340	330
Canarias W	160	150	150	150
Melilla	6	6	6	6

Siguiendo la metodología anteriormente descrita en la Tabla 6.6 se indica la energía media anual bruta en TWh/año y por profundidades.

**Tabla 6.6. Energía media anual bruta por fachadas y profundidades en profundidades indefinidas, 100, 50 y 20 m de profundidad (TWh/año)**

	Energía media anual bruta (TWh/año)			
	Indef.	100 m	50 m	20 m
País Vasco	11,69	11,96	10,68	9,61
Cantabria	13,96	13,99	13,33	12,34
Asturias	28,49	26,11	24,28	20,81
Galicia	98,84	90,15	72,94	50,40
Andalucía W	6,58	6,63	6,68	5,49
Andalucía E	2,70	4,67	3,73	3,10
Murcia	1,34	1,42	1,07	0,81
Valencia	5,85	5,83	5,03	3,64
Cataluña	3,78	4,58	4,49	3,38
Baleares NW	14,67	12,39	9,32	4,30
Baleares NE	3,85	4,19	3,98	2,16
Baleares SE	3,86	3,26	2,65	1,48
Baleares SW	5,48	3,91	2,04	1,60
Canarias N	77,87	34,17	31,39	22,63
Canarias E	1,33	1,13	0,98	0,91
Canarias S	0,00	2,85	2,30	1,43
Canarias W	8,71	6,63	6,71	7,24
Melilla	0,21	0,18	0,13	0,13

Dada su potencia media y longitud de costa, Galicia destaca sobre el resto de las comunidades autónomas. En la Tabla 6.7 se recoge la información correspondiente a la energía media anual bruta específica a diferentes profundidades. Es decir, la energía media anual bruta por metro de fachada.

Tabla 6.7. Energía media anual bruta específica MWh/(año.m)

	Energía media anual bruta específica (MWh/(año.m))			
	Indef.	100 m	50 m	20 m
País Vasco	106,29	108,72	97,10	87,39
Cantabria	126,93	127,19	121,21	112,19
Asturias	142,45	130,57	121,38	104,04
Galicia	214,86	202,58	169,63	121,43
Andalucía W	37,63	37,89	38,15	31,39
Andalucía E	7,72	13,35	10,66	8,84
Murcia	13,35	14,22	10,66	8,15
Valencia	20,89	20,81	17,95	13,01
Cataluña	11,44	13,87	13,61	10,23
Baleares NW	41,91	41,29	34,53	17,56
Baleares NE	25,68	29,91	30,65	17,28
Baleares SE	11,04	10,87	9,83	6,05
Baleares SW	36,53	27,90	15,67	12,83
Canarias N	158,92	97,62	92,34	68,58
Canarias E	8,32	7,54	6,50	6,07
Canarias S	0,00	8,15	6,76	4,34
Canarias W	54,45	44,22	44,74	48,29
Melilla	35,03	30,52	22,37	21,15

### 6.6.3 Energía media anual neta por comunidad autónoma

La energía media anual neta se obtiene considerando que la energía bruta disponible no es aprovechable en su totalidad. Para el cálculo de la energía media anual neta por comunidad autónoma es necesario realizar una serie de hipótesis dado que para

evaluarla con precisión sería necesario hacer estudios específicos que tuvieran en cuenta limitaciones de tipo ambiental y otros conflictos de uso en la zona litoral. Además, algunos de los otros coeficientes que se van a aplicar son dependientes de la tecnología empleada, por lo que los resultados que se muestran a continuación deben tomarse con cautela dado que se trata más de un ejemplo de procedimiento que no de una cuantificación válida.

### Reducción por conflictos de uso

Las granjas de energía del oleaje ocupan franjas de la plataforma continental básicamente lineales. Dichas franjas se orientan perpendicularmente al flujo medio de energía, de manera, que ya por la propia disposición de las franjas, queda libre un porcentaje importante de la línea de costa.

Además, los conflictos de uso más importantes son los referidos a las zonas de protección natural (LIC), zonas de pesca extractiva, tráfico marítimo, etc. La mayoría de estos conflictos pueden ser resueltos con el traslado hacia tierra o hacia el mar de la franja donde se sitúa la granja marina. Considerando los dos elementos anteriores, se asume que por conflictos de uso sólo se podrá aprovechar un 80% de la franja costera.

**Coefficiente de reducción por conflictos de uso de la franja costera: 0,80**

### Reducción por parada de la planta en calmas y en temporales

Los sistemas de aprovechamiento de energía del oleaje no pueden aprovechar el flujo de energía del oleaje por debajo y por encima de determinados umbrales de flujo. De estos dos umbrales, es el superior el que se pierde más energía, del orden del 20%, asociado a los temporales. Este umbral puede variar dependiendo de la tecnología que se utilice. La pérdida de energía por bajo nivel de la misma se puede asumir despreciable.

**Coefficiente de reducción por energía perdida en temporales: 0,80**

### Reducción por la eficiencia hidrodinámica de los sistemas de aprovechamiento

Asumiendo que los sistemas de aprovechamiento se disponen de manera que la energía absorbida no reduce la absorbida en los contiguos, la energía que atraviesa la granja estará relacionada con la eficiencia hidrodinámica (potencia mecánica absorbida/flujo de energía del oleaje). Esta eficiencia depende del tipo de captador y de su capacidad para adaptarse a los distintos tipos de oleaje. Una aproximación optimista puede ser del orden del 40% para un sistema de última generación, capaz de sintonizarse con el oleaje.

**Coefficiente de eficiencia hidrodinámica: 0,40**

### Reducción por eficiencia mecánico-eléctrica

La energía mecánica generada puede pasar a través de un fluido intermedio, a una turbina y un alternador o puede ser convertida directamente en energía eléctrica mediante, por ejemplo, un generador lineal. En el primer caso, se pierde eficiencia en los sucesivos pasos, por ejemplo, en un sistema OWC se tiene, aproximadamente:

- Eficiencia por turbulencias en el flujo de aire en la cámara y en la atmósfera: 0,9.
- Eficiencia de la turbina de aire: 0,6.
- Eficiencia OWC: 0,54.

En un sistema mecánico hidráulico, las pérdidas se producen en el circuito hidráulico y en el motor hidráulico y pueden ser del mismo orden que en el OWC.

En el caso de conversión directa, las únicas pérdidas son las derivadas de los rozamientos de los cojinetes, que pueden englobarse dentro de la eficiencia del alternador lineal. Aunque esta alternativa es la más eficiente, debe tenerse en cuenta que la capacidad de acumulación de energía de este sistema es nula, lo que no ocurre en los casos anteriores, en los que se acumula energía en la rotación de turbina y alternador o en el circuito hidráulico, lo que mejora las características y calidad de la energía generada.

Asumiendo el caso más favorable de conversión directa, se puede asumir un rendimiento medio optimista del generador lineal del orden del 80%.

**Coefficiente de eficiencia mecánico-eléctrica: 0,8**

### Reducción por eficiencia en el acondicionamiento de la salida eléctrica

Las pérdidas en el acondicionamiento de la señal electrónica de potencia, transformación, son también dependientes del tipo de dispositivo, pero puede asumirse de forma optimista una eficiencia del orden del 90%.

**Eficiencia electrónica de potencia y transformación: 0,9**

### Reducción por consumos propios de la planta

La planta tiene unos consumos propios de energía, asociados a la regulación del alternador, monitoreo de sensores, equipos de señalización, etc. Estos consumos suelen ser pequeños, salvo el de

regulación del alternador, que puede actuar como motor en los sistemas de última generación para optimizar la eficiencia hidrodinámica. En este caso se asumirá un 5% de pérdidas por estas razones.

**Eficiencia por consumos propios de la planta: 0,95**

**Reducción por eficiencia del transporte a tierra y transformación para conexión a la red**

La eficiencia en el transporte a tierra depende de la distancia a tierra, del tipo de cable submarino y de la tensión de transporte. En este caso asumiremos una eficiencia en el transporte y transformación en tierra, para la conexión a la red de alta tensión, de 0,9.

**Eficiencia transporte y conexión a red: 0,9**

**Eficiencia total**

Coefficiente de reducción por conflictos de uso de la franja costera: 0,80.

Coefficiente de reducción por energía perdida en temporales: 0,80.

Eficiencia hidrodinámica: 0,40.

Eficiencia mecánico-eléctrica: 0,8.

Eficiencia electrónica de potencia y transformación: 0,9.

Eficiencia por consumos propios de la planta: 0,95.

Eficiencia transporte y conexión a red: 0,9.

**Eficiencia total:**

**$0,8 \times 0,8 \times 0,4 \times 0,8 \times 0,9 \times 0,95 \times 0,9 = 0,16$**

Aplicando estos coeficientes se llega a los siguientes resultados de energía media anual neta por fachada y profundidad, Tabla 6.8. Como referencia se hace constar que 1 TWh equivale a la producción continua durante un año (8.760 horas) de un grupo de 114 MW o a un parque eólico de 333 MW con 3.000 h de producción.

**Tabla 6.8. Energía media anual neta por fachada y profundidad en TWh/año**

	Energía media anual neta (TWh/año)			
	Indef.	100 m	50 m	20 m
País Vasco	1,87	1,91	1,71	1,54
Cantabria	2,23	2,24	2,13	1,97
Asturias	4,56	4,18	3,88	3,33
Galicia	15,81	14,42	11,67	8,06
Andalucía W	1,05	1,06	1,07	0,88
Andalucía E	0,43	0,75	0,60	0,50
Murcia	0,21	0,23	0,17	0,13
Valencia	0,94	0,93	0,80	0,58
Cataluña	0,60	0,73	0,72	0,54
Baleares NW	2,35	1,98	1,49	0,69
Baleares NE	0,62	0,67	0,64	0,35
Baleares SE	0,62	0,52	0,42	0,24

(Continuación)

	Energía media anual neta (TWh/año)			
	Indef.	100 m	50 m	20 m
Baleares SW	0,88	0,62	0,33	0,26
Canarias N	12,46	5,47	5,02	3,62
Canarias E	0,21	0,18	0,16	0,15
Canarias S	0,00	0,46	0,37	0,23
Canarias W	1,39	1,06	1,07	1,16
Melilla	0,03	0,03	0,02	0,02

Análogamente en la Tabla 6.9 se recogen los resultados de la energía media anual específica neta MWh/(año.m).

**Tabla 6.9. Energía media anual específica neta**

	Energía media anual bruta específica neta (MWh/(año.m))			
	Indef.	100 m	50 m	20 m
País Vasco	17,01	17,40	15,54	13,98
Cantabria	20,31	20,35	19,39	17,95
Asturias	22,79	20,89	19,42	16,65
Galicia	34,38	32,41	27,14	19,43
Andalucía W	6,02	6,06	6,10	5,02
Andalucía E	1,23	2,14	1,71	1,41
Murcia	2,14	2,28	1,71	1,30
Valencia	3,34	3,33	2,87	2,08
Cataluña	1,83	2,22	2,18	1,64
Baleares NW	6,71	6,61	5,52	2,81
Baleares NE	4,11	4,79	4,90	2,76
Baleares SE	1,77	1,74	1,57	0,97

*(Continuación)*

	Energía media anual bruta específica neta (MWh/(año.m))			
	Indef.	100 m	50 m	20 m
Baleares SW	5,85	4,46	2,51	2,05
Canarias N	25,43	15,62	14,77	10,97
Canarias E	1,33	1,21	1,04	0,97
Canarias S	0,00	1,30	1,08	0,69
Canarias W	8,71	7,07	7,16	7,73
Melilla	5,60	4,88	3,58	3,38

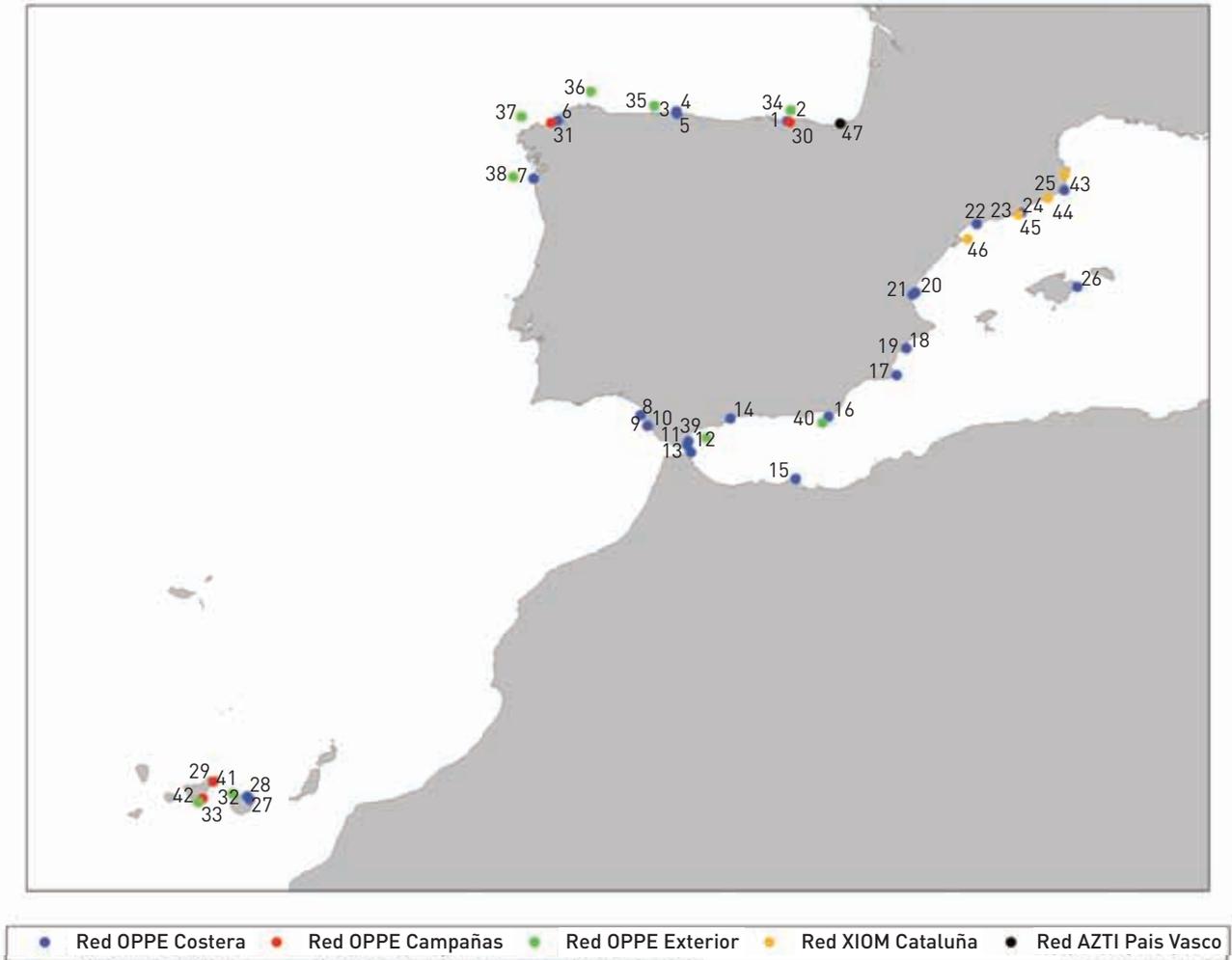
La energía específica es un índice relativo de rentabilidad de la explotación. Es necesario reiterar que los valores recogidos en el apartado 6.6.3 son sólo cualitativos y que la aplicación de otros coeficientes basados en estudios de usos específicos o en tecnologías específicas podría modificar los mismos al alza o a la baja.

# Anexo 1.

# Validación series temporales

En este Anexo se presenta la validación de los resultados del presente trabajo con las series temporales horarias de un año de datos de las boyas presentadas en la Figura A1.1 y en la Tabla A1.1, el resto de años se pueden consultar en el SIG desarrollado a tal efecto.

**Figura A1.1. Localización de las boyas utilizadas en la validación**



**Tabla A1.1. Descripción de las boyas utilizadas en la validación**

	Nombre	Fondeo (m)	Inicio fondeo	Final fondeo	Lat (°N)	Long (°E)	Red	Comentarios
1	Bilbao	50	1985	2005	43,400	-3,143	OPPE Costera	Escalar
2	Cost-Bilbao	53	2004	-	43,398	-3,132	OPPE Costera	Direccional
3	Gijón I	23	1981	2002	43,567	-5,650	OPPE Costera	Escalar
4	Gijón II	43	1994	-	43,612	-5,667	OPPE Costera	Escalar

(Continuación)

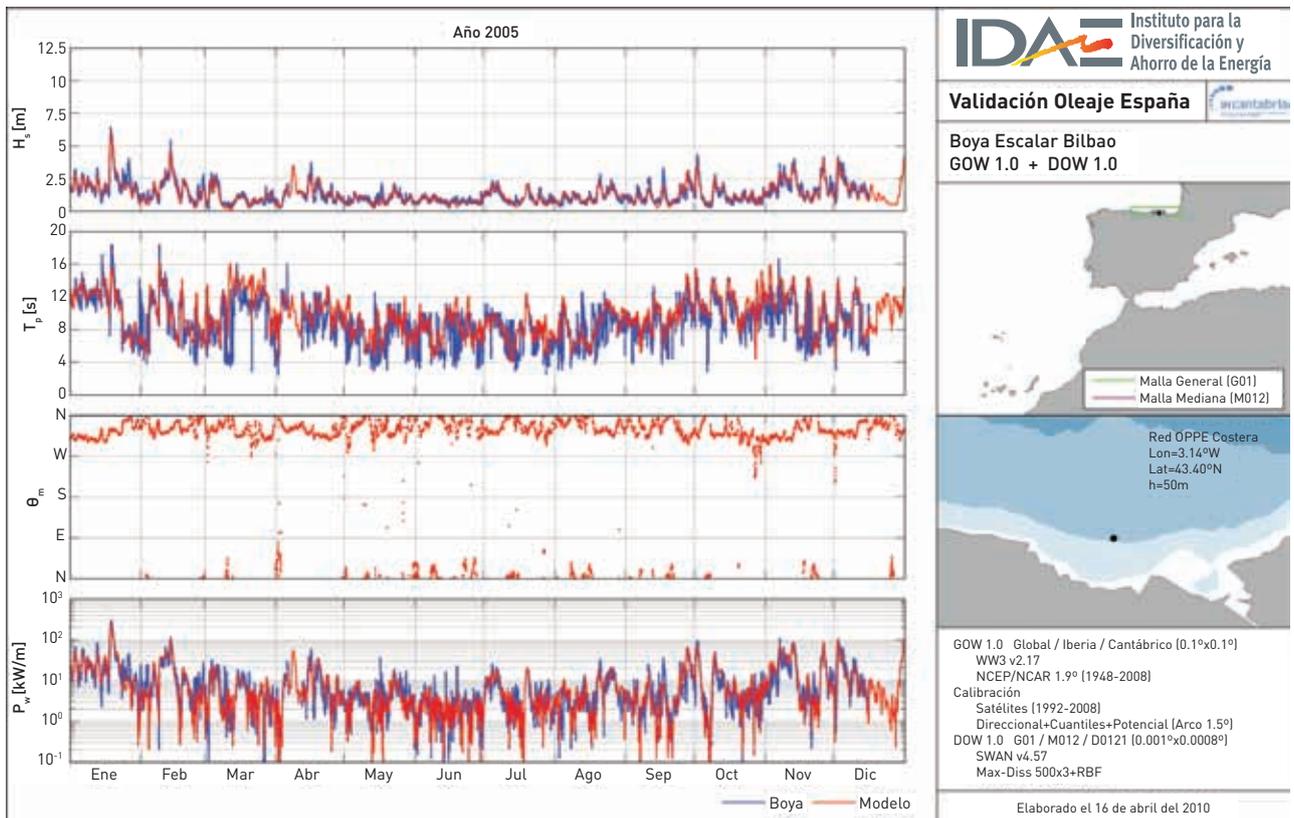
	Nombre	Fondeo (m)	Inicio fondeo	Final fondeo	Lat (°N)	Long (°E)	Red	Comentarios
5	Cost-Gijón	54	2001	-	43,613	-5,670	OPPE Costera	Direccional
6	La Coruña	50	1982	-	43,413	-8,383	OPPE Costera	Escalar
7	Silleiro	70	1991	2006	42,097	-8,930	OPPE Costera	Escalar
8	Sevilla	10	1983	-	36,740	-6,480	OPPE Costera	Escalar
9	Cádiz	22	1983	2003	36,500	-6,330	OPPE Costera	Escalar
10	Cost-Cádiz	22	2001	-	36,500	-6,330	OPPE Costera	Direccional
11	Algeciras-Campamento	84	1993	2006	36,160	-5,390	OPPE Costera	Escalar
12	Cost-Algeciras	55	2004	2005	36,080	-5,420	OPPE Costera	Direccional
13	Ceuta	21	1985	-	35,900	-5,330	OPPE Costera	Escalar
14	Málaga	22	1985	-	36,670	-4,430	OPPE Costera	Escalar
15	Melilla	15	2008	-	35,320	-2,940	OPPE Costera	Escalar
16	Cabo de Gata	35	1991	-	36,710	-2,200	OPPE Costera	Escalar
17	Cabo de Palos	67	1985	-	37,650	-0,640	OPPE Costera	Escalar
18	Alicante	50	1985	2007	38,250	-0,420	OPPE Costera	Escalar
19	Cost-Alicante	52	2006	-	38,250	-0,420	OPPE Costera	Direccional
20	Valencia	20	1985	2005	39,470	-0,280	OPPE Costera	Escalar
21	Cost-Valencia II	48	2005	-	39,520	-0,210	OPPE Costera	Direccional (Valencia Copa)
22	Tarragona	35	1992	-	41,070	1,190	OPPE Costera	Escalar
23	Barcelona	30	2003	2006	41,290	2,150	OPPE Costera	Escalar (Barcelona Sur)

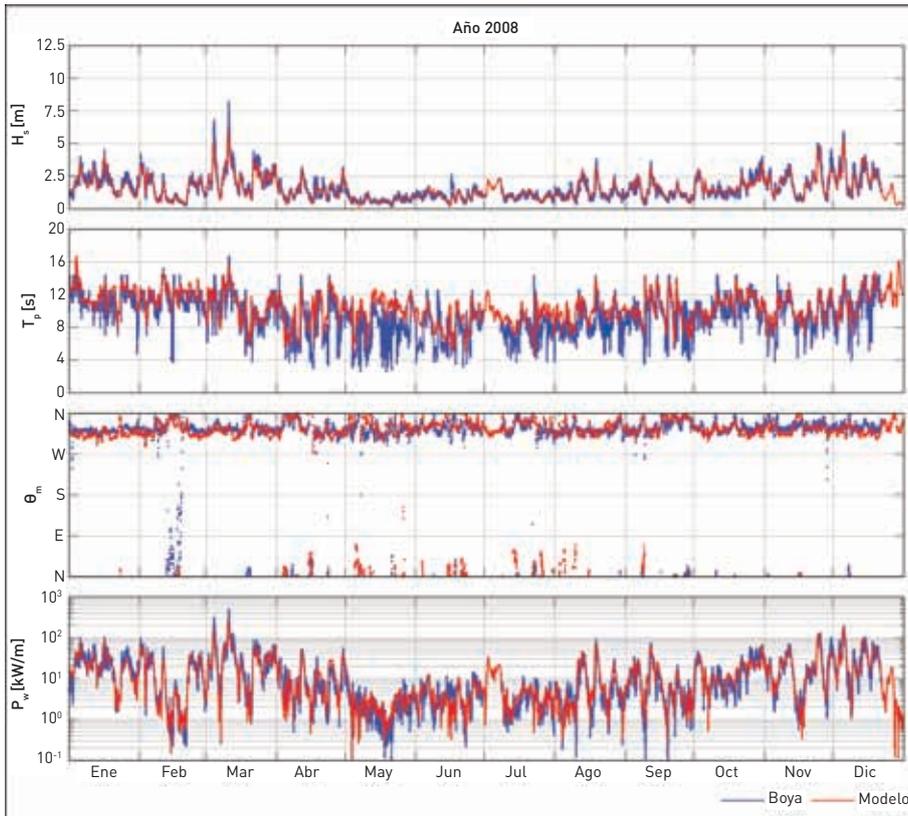
(Continuación)

	Nombre	Fondeo (m)	Inicio fondeo	Final fondeo	Lat (°N)	Long (°E)	Red	Comentarios
24	Cost-Barcelona	68	2004	-	41,320	2,210	OPPE Costera	Direccional
25	Palamós	90	1988	-	41,830	3,190	OPPE Costera	Escalar
26	Cap de Pera	46	1989	-	39,650	3,490	OPPE Costera	Escalar
27	Las Palmas I	42	1982	-	28,142	-15,458	OPPE Costera	Escalar
28	Las Palmas II	48	1992	-	28,067	-15,397	OPPE Costera	Escalar (Las Palmas Este)
29	Tenerife	52	1981	2007	28,455	-16,248	OPPE Costera	Escalar
30	Ciérvana Cam	22	2001	-	43,370	-3,070	OPPE Campañas	Direccional
31	Langosteira	40	1998	-	43,360	-8,530	OPPE Campañas	Direccional
32	Santa Cruz	60	2006	-	28,470	-16,240	OPPE Campañas	Direccional
33	Granadilla	22	2007	-	28,090	-16,477	OPPE Campañas	Escalar
34	Bilbao-Vizcaya Ext	600	1990	-	43,640	-3,050	OPPE Exterior	Direccional
35	Cabo de Peñas Ext	450	1997	-	43,740	-6,170	OPPE Exterior	Direccional
36	Estaca de Bares Ext	380	1996	-	44,060	-7,620	OPPE Exterior	Escalar 1997 Direccional
37	Villano-Sisargas Ext	390	1998	-	43,500	-9,210	OPPE Exterior	Direccional
38	Cabo Silleiro Ext	320	1998	-	42,130	-9,390	OPPE Exterior	Escalar 2003 Direccional
39	Alborán Ext	580	1997	2006	36,250	-5,030	OPPE Exterior	Escalar 2003 Direccional
40	Cabo de Gata Ext	530	1998	-	36,570	-2,340	OPPE Exterior	Escalar 2003 Direccional
41	Gran Canaria Ext	780	1997	-	28,200	-15,800	OPPE Exterior	Escalar 2003 Direccional
42	Tenerife Ext	710	1998	-	28,000	-16,580	OPPE Exterior	Escalar 2003 Direccional

(Continuación)

	Nombre	Fondeo (m)	Inicio fondeo	Final fondeo	Lat (°N)	Long (°E)	Red	Comentarios
43	Rosas Gen	46	1990	-	42,180	3,200	XIOM Cataluña	Escalar
44	Tordera Gen	74	1984	-	41,650	2,820	XIOM Cataluña	Escalar 2007 Direccional
45	Llobregat Gen	45	1984	-	41,278	2,140	XIOM Cataluña	Escalar 2004 Direccional
46	Tortosa Gen	60	1990	-	40,720	0,980	XIOM Cataluña	Direccional
47	Pasaia	25	2003	-	43,338	-1,925	AZTI País Vasco	Escalar

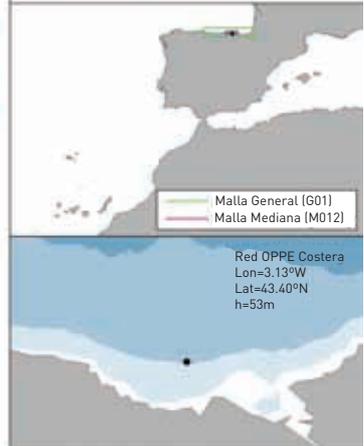




**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

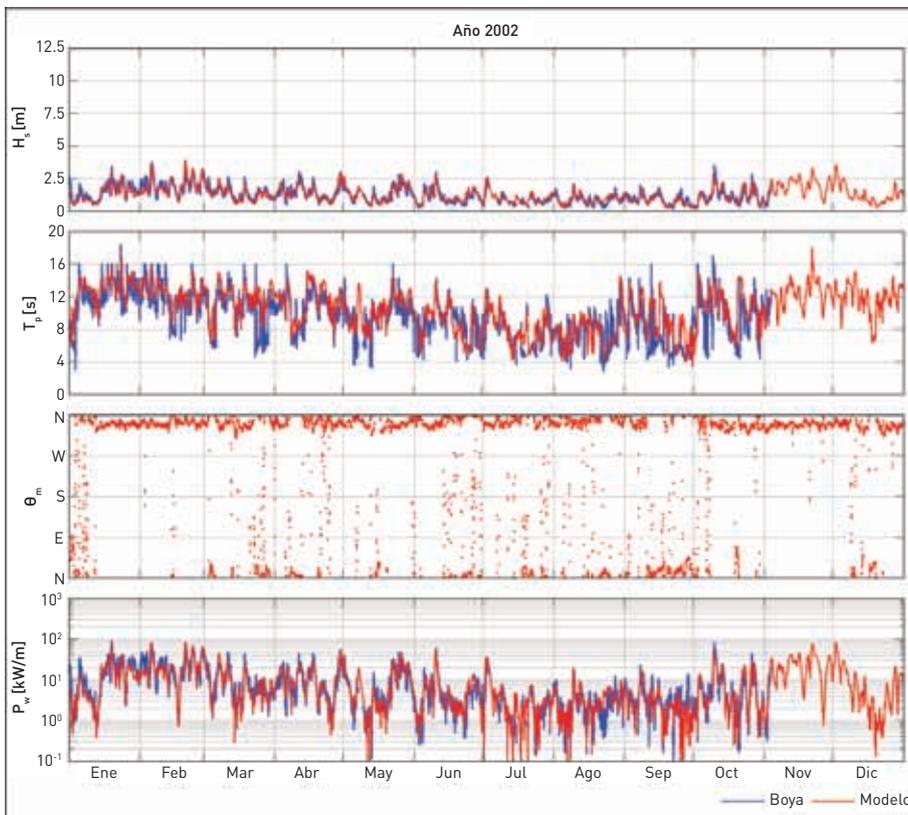
Validación Oleaje España

Boya Direccional Cost-Bilbao  
GOW 1.0 + DOW 1.0



GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico (0.1°x0.1°)  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G01 / M012 / D0121 (0.001°x0.0008°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

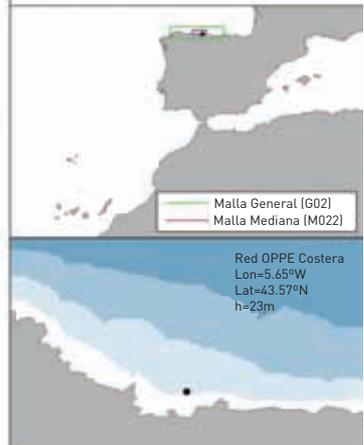
Elaborado el 16 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

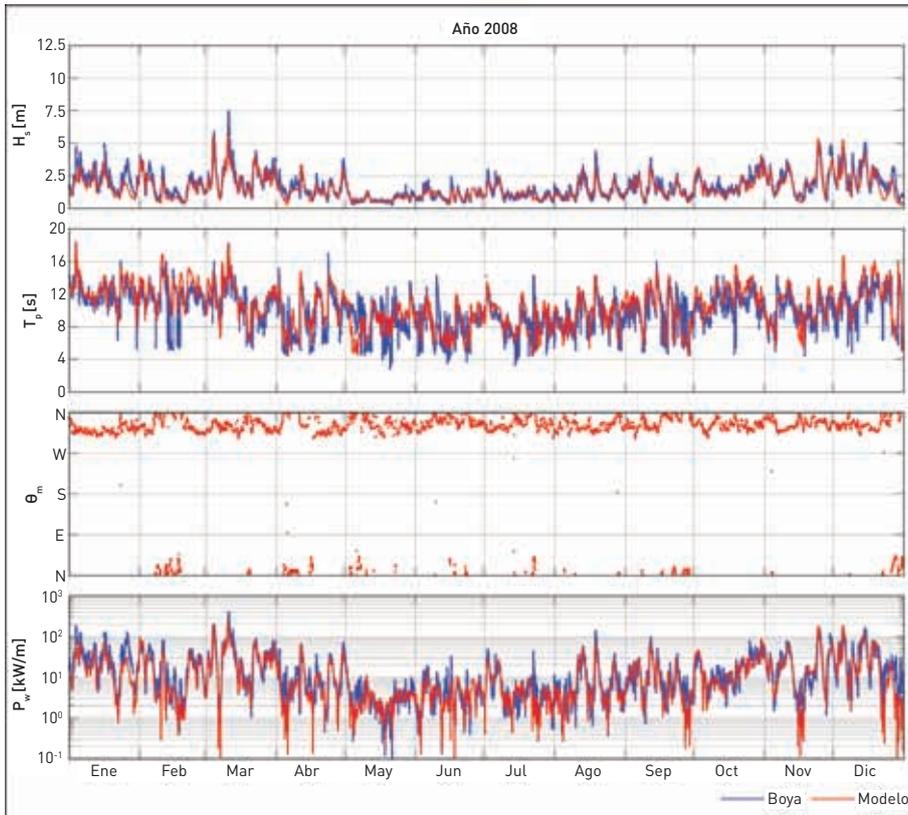
Validación Oleaje España

Boya Escalar Gijón I  
GOW 1.0 + DOW 1.0



GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico (0.1°x0.1°)  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G02 / M022 / D0221 (0.001°x0.0008°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 16 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

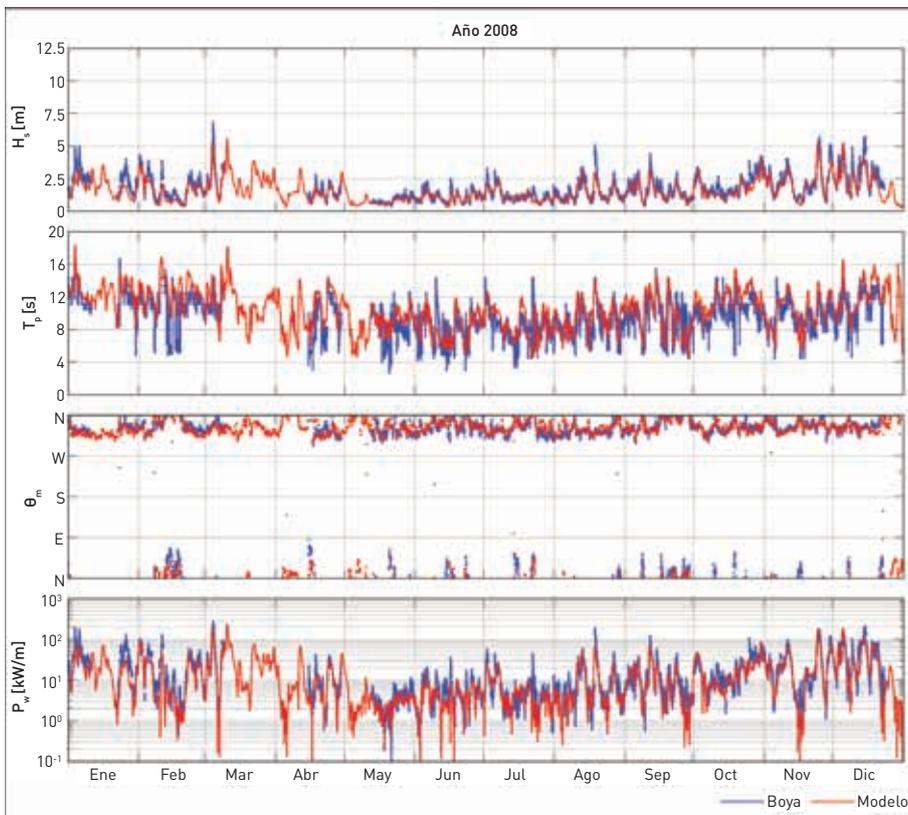
**Validación Oleaje España**

**Boya Escalar Gijón II**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

Red OPPE Costera  
Lon=5.67°W  
Lat=43.61°N  
h=43m

GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico [0.1°x0.1°]  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° [1948-2008]  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G02 / M022 / D0221 [0.001°x0.0008°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 19 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

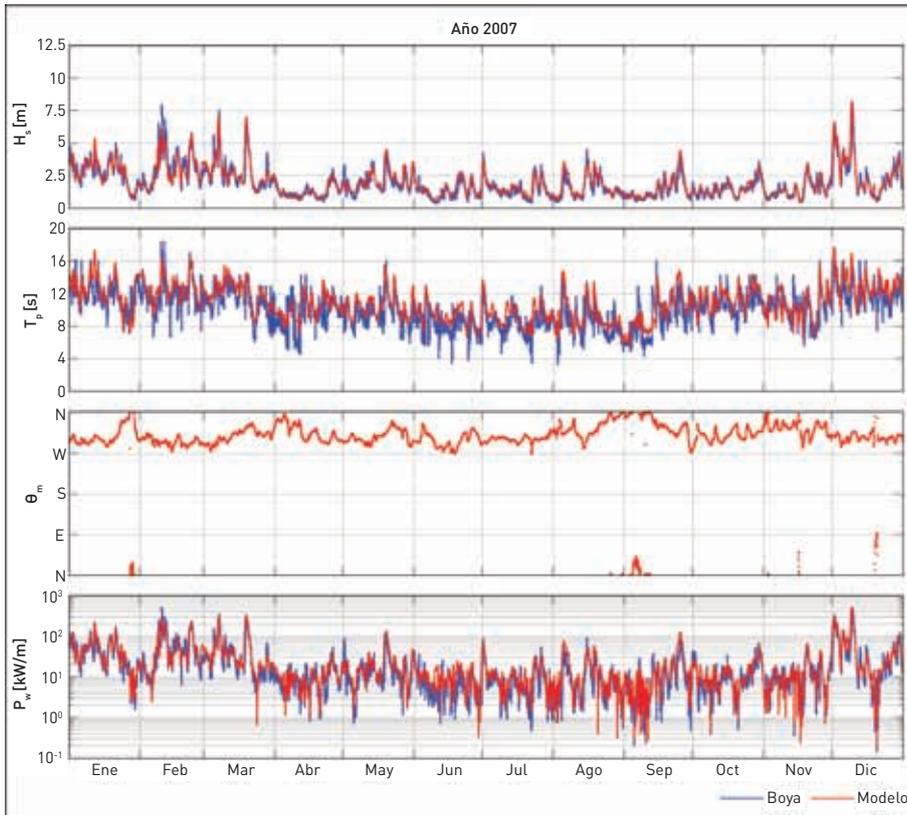
**Validación Oleaje España**

**Boya Direccional Cost-Gijón**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

Red OPPE Costera  
Lon=5.67°W  
Lat=43.61°N  
h=54m

GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico [0.1°x0.1°]  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° [1948-2008]  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G02 / M022 / D0221 [0.001°x0.0008°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

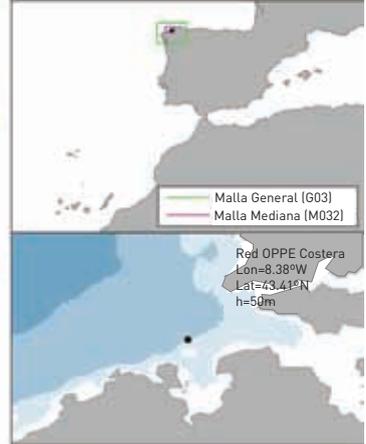
Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

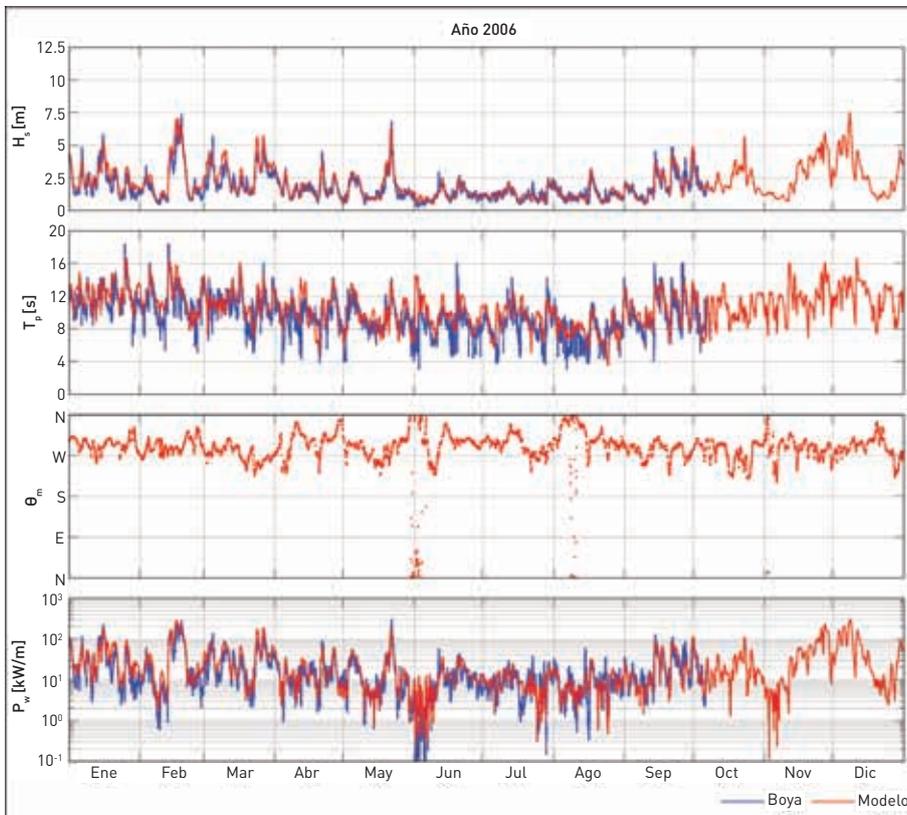
Validación Oleaje España

Boya Escalar La Coruña  
GOW 1.0 + DOW 1.0



GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico [0.1°x0.1°]  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° [1948-2008]  
Calibración  
Satélites [1992-2008]  
Direccional+Cuantiles+Potencial [Arco 1.5°]  
DOW 1.0 G03 / M032 / D0321 [0.001°x0.0008°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

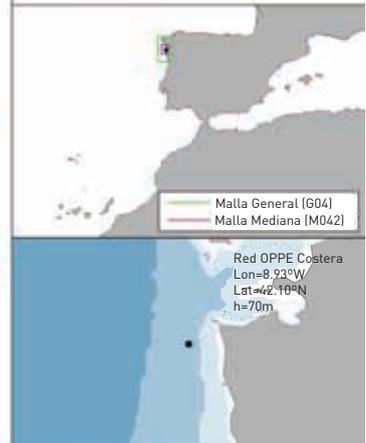
Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

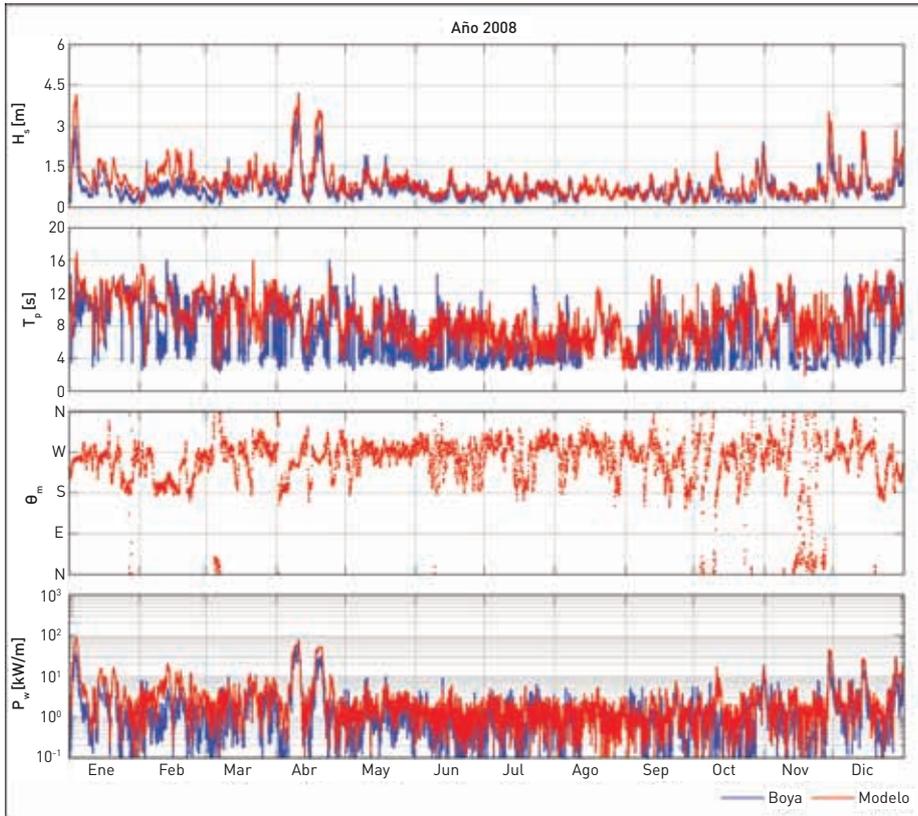
Validación Oleaje España

Boya Escalar Silleiro  
GOW 1.0 + DOW 1.0



GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico [0.1°x0.1°]  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° [1948-2008]  
Calibración  
Satélites [1992-2008]  
Direccional+Cuantiles+Potencial [Arco 1.5°]  
DOW 1.0 G04 / M042 / D0421 [0.001°x0.0008°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDAIE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Oleaje España**

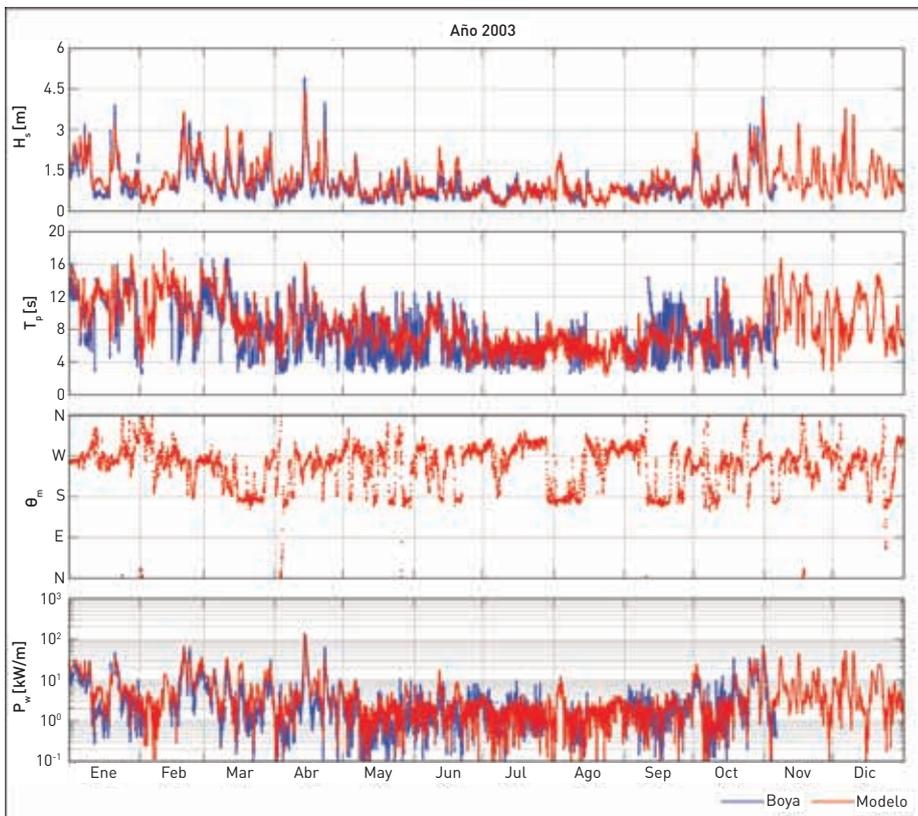
**Boya Escalar Sevilla**  
GOW 2.1 + DOW 2.1

Malla General (GM02)

Red OPPE Costera  
Lon=6.48°W  
Lat=36.74°N  
h=10m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km [1989-2008]  
Calibración  
Satélites [1992-2008]  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM02 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 19 de abril del 2010



**IDAIE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Oleaje España**

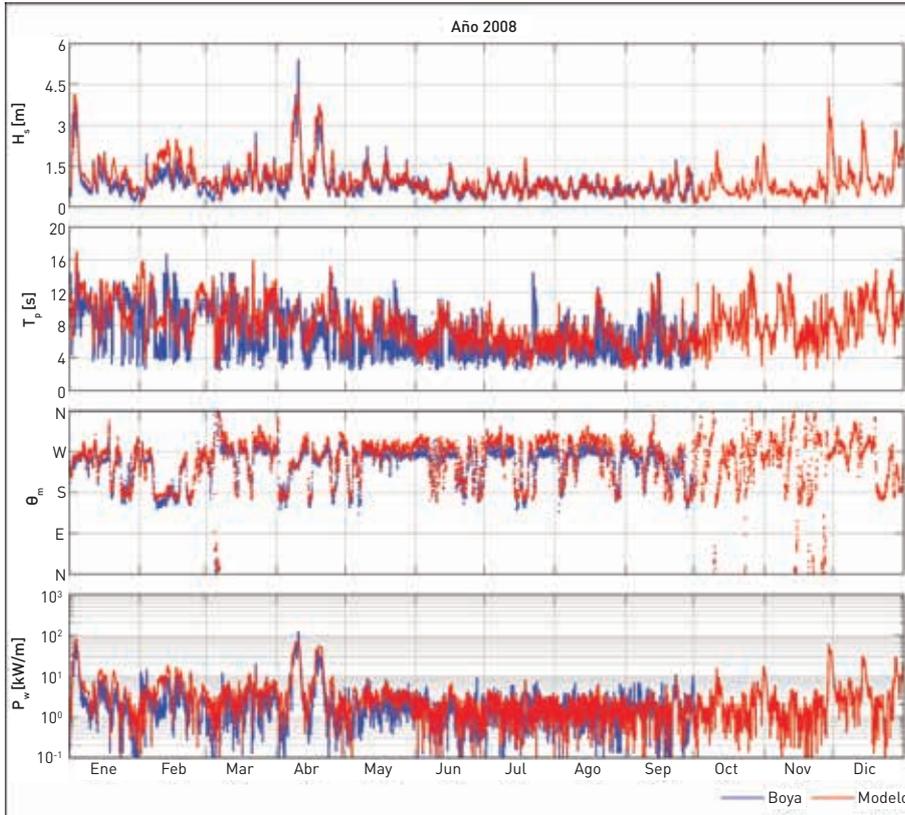
**Boya Escalar Cadiz**  
GOW 2.1 + DOW 2.1

Malla General (GM02)

Red OPPE Costera  
Lon=6.33°W  
Lat=36.50°N  
h=22m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15 km [1989-2008]  
Calibración  
Satélites [1992-2008]  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM02 / DM021 [0.0005°x0.0005°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

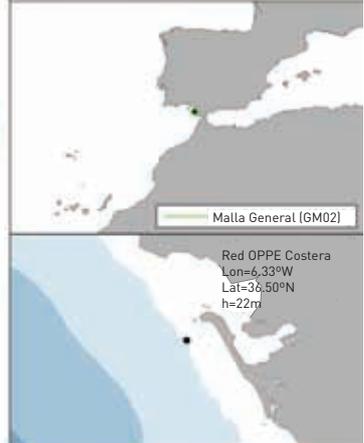
Elaborado el 20 de abril del 2010



**IDA3** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

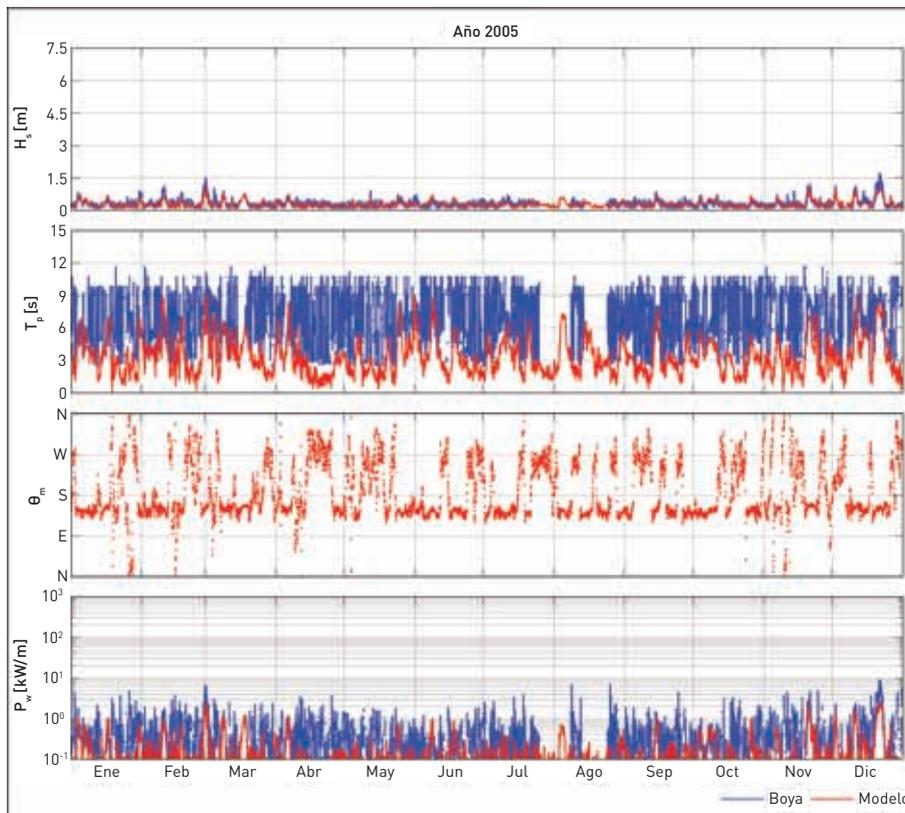
**Validación Oleaje España**

Boya Direccional Cost-Cádiz  
GOW 2.1 + DOW 2.1



GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial [Arco 1.0°]  
DOW 2.1 GM02 / DM021 [0.0005°x0.0005°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

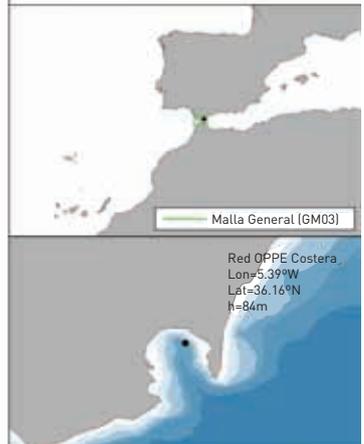
Elaborado el 20 de abril del 2010



**IDA3** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

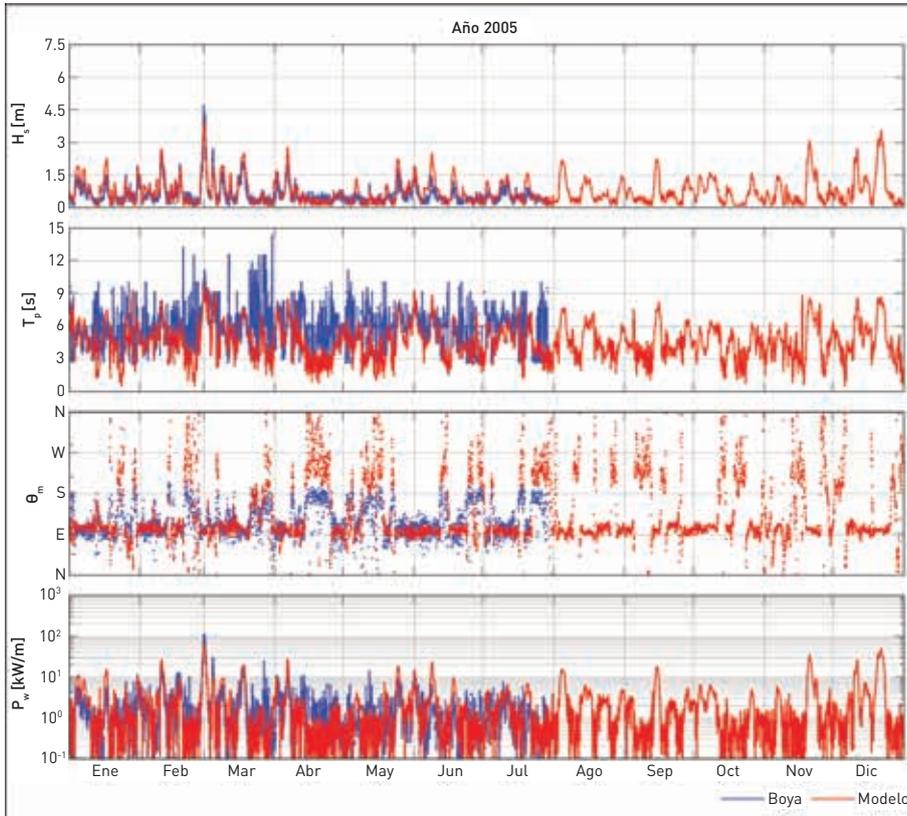
**Validación Oleaje España**

Boya Escalar Algeciras-Campamento  
GOW 2.1 + DOW 2.1



GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial [Arco 1.0°]  
DOW 2.1 GM03 / DM031 [0.0005°x0.0005°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

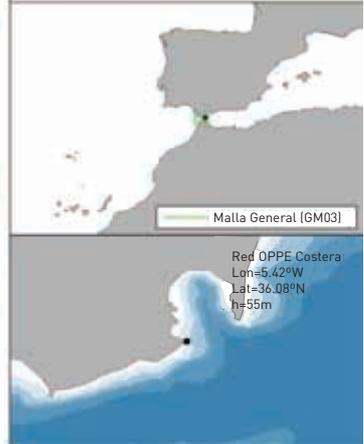
Elaborado el 20 de abril del 2010



**IDAIE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

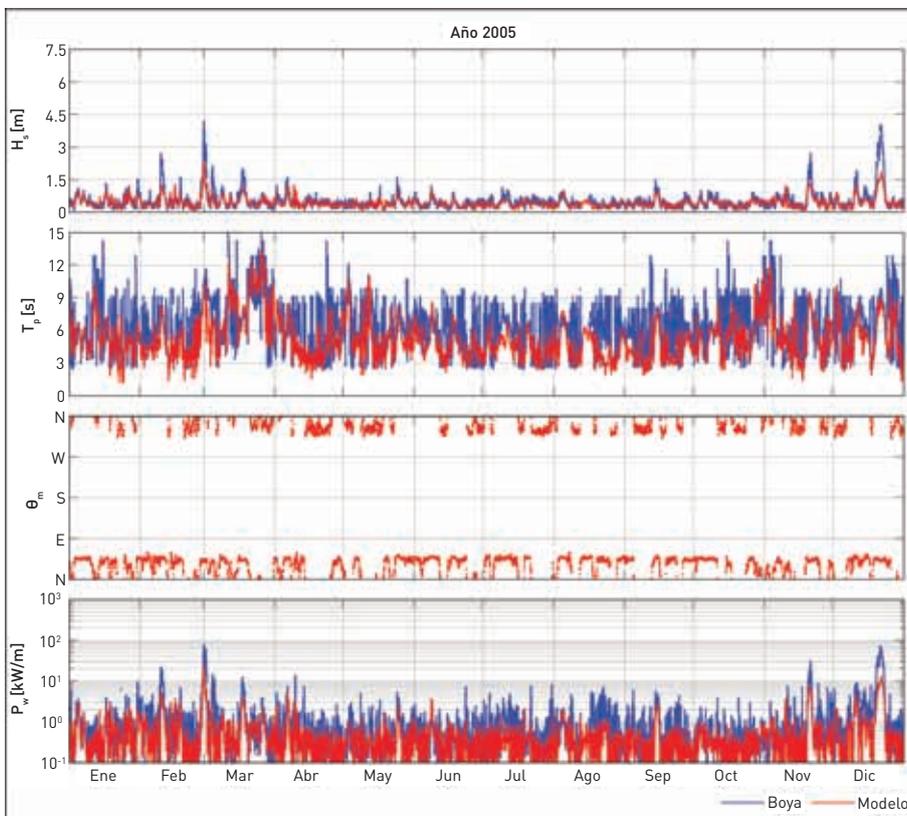
**Validación Oleaje España**

Boya Direccional Cost- Algeciras  
GOW 2.1 + DOW 2.1



GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km [1989-2008]  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM03 / DM031 [0.0005°x0.0005°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

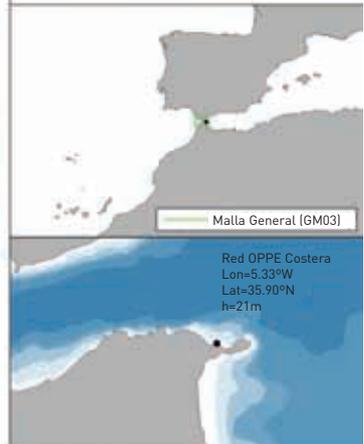
Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDAIE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

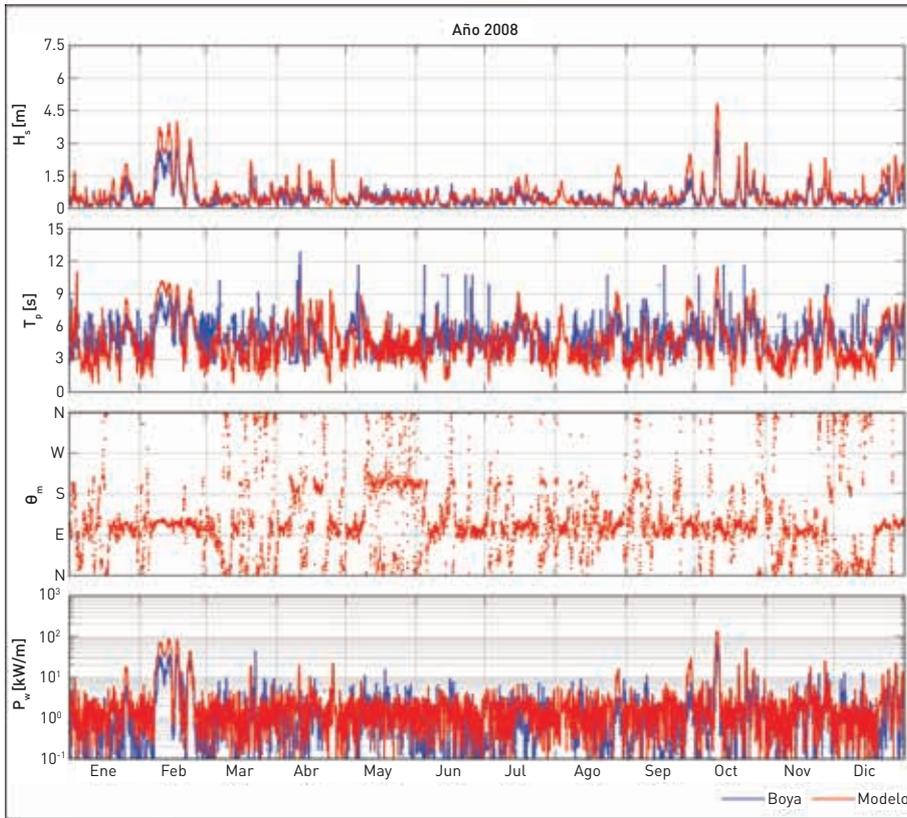
**Validación Oleaje España**

Boya Escalar Ceuta  
GOW 2.1 + DOW 2.1



GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km [1989-2008]  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM03 / DM032 [0.0005°x0.0005°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

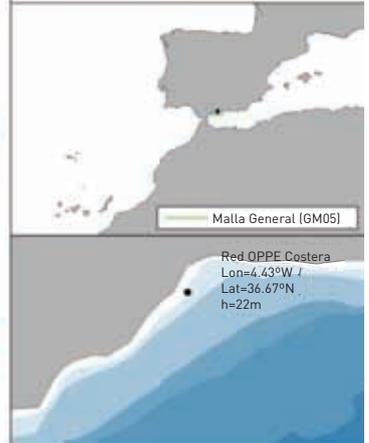
Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

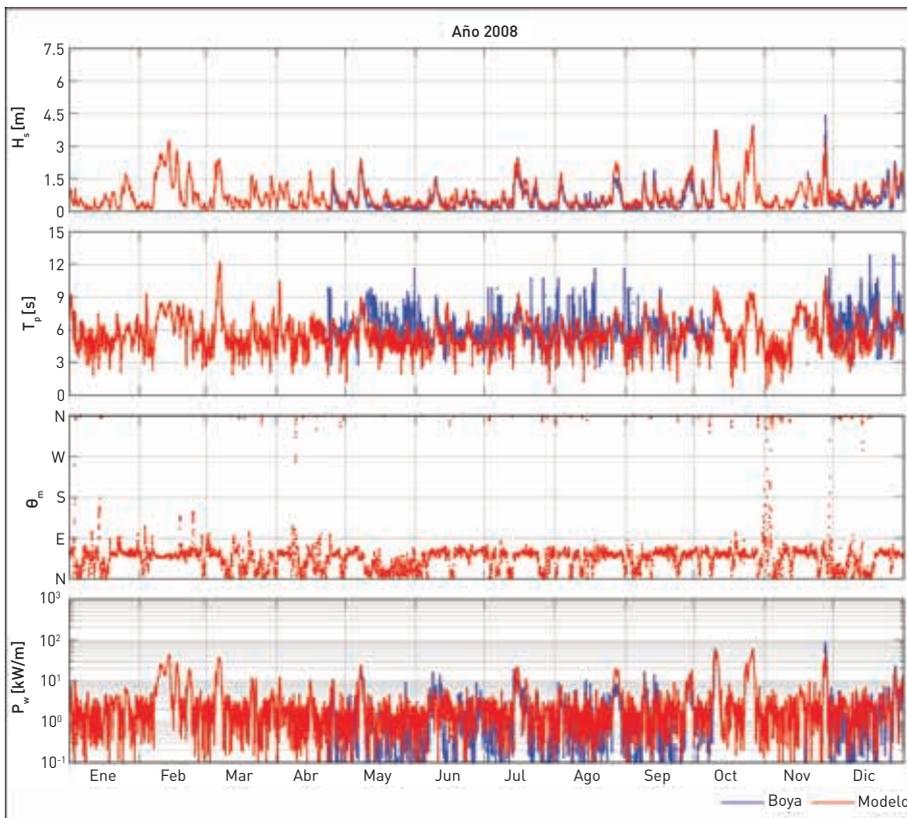
Validación Oleaje España

Boya Escalar Malaga  
GOW 2.1 + DOW 2.1



GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM05 / DM051 (0.0005°x0.0005°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

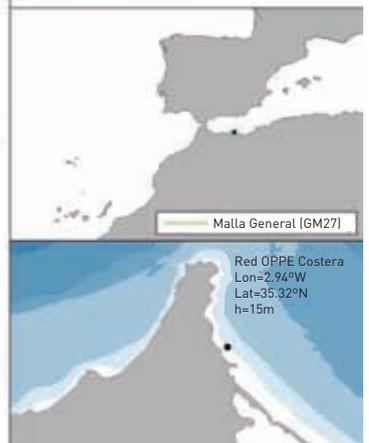
Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

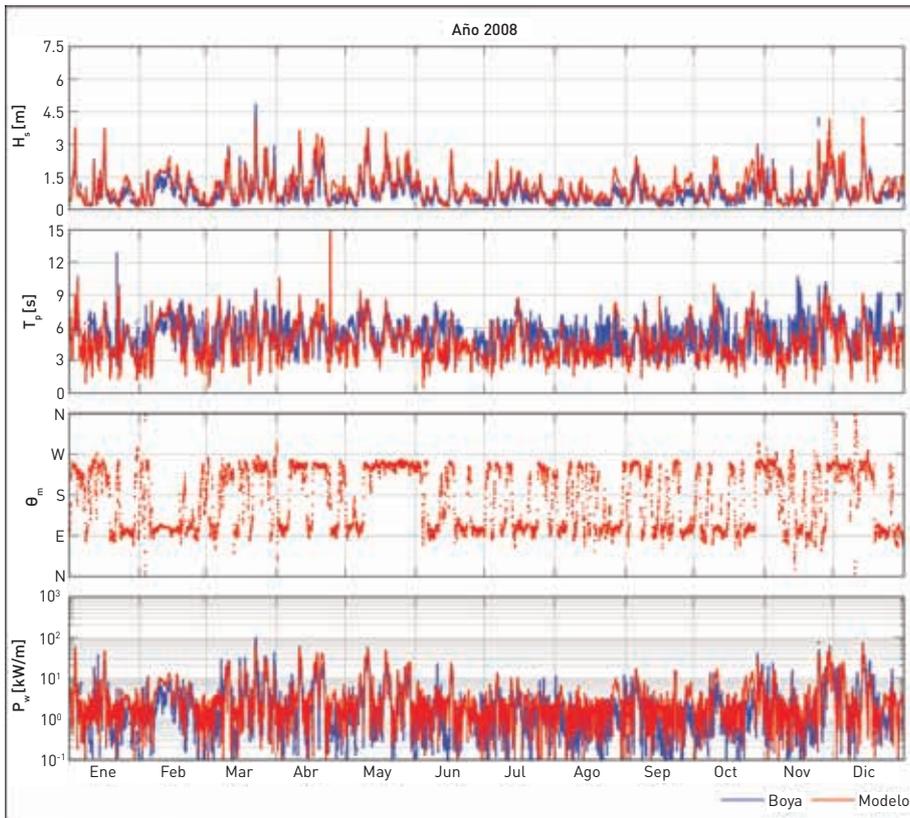
Validación Oleaje España

Boya Escalar Melilla  
GOW 2.1 + DOW 2.1



GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM27 / DM271 (0.0005°x0.0005°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Oleaje España**

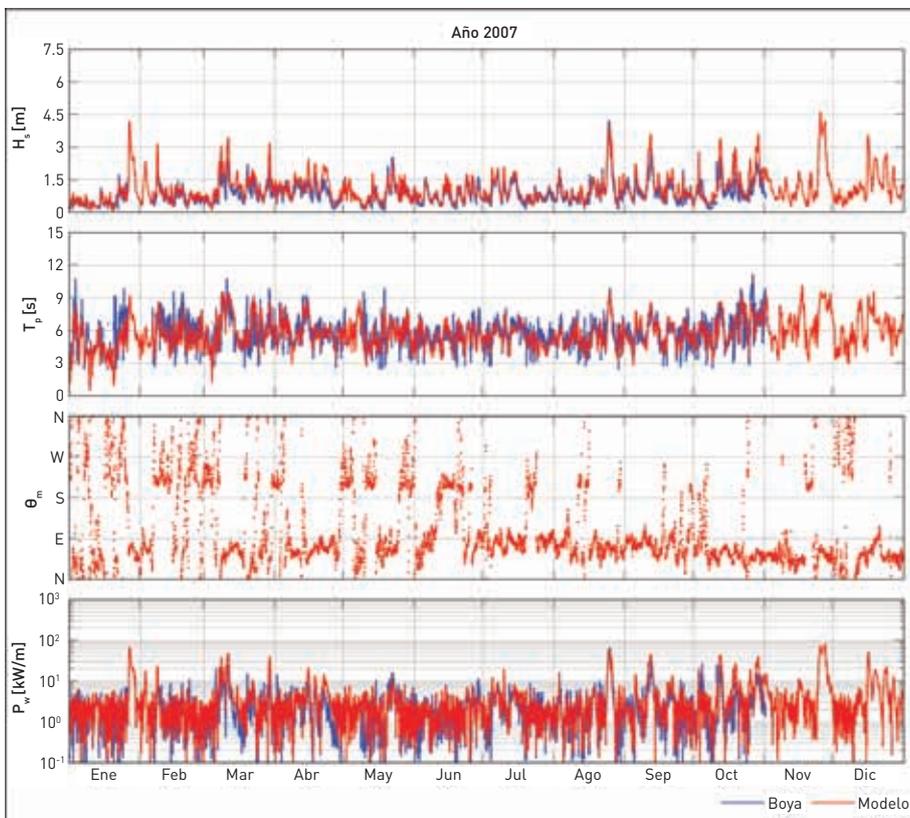
Boya Escalar Cabo de Gata  
GOW 2.1 + DOW 2.1

Malla General (GM08)

Red OPPE Costera  
Lon=-2.20°W  
Lat=36.71°N  
h=35m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM08 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Oleaje España**

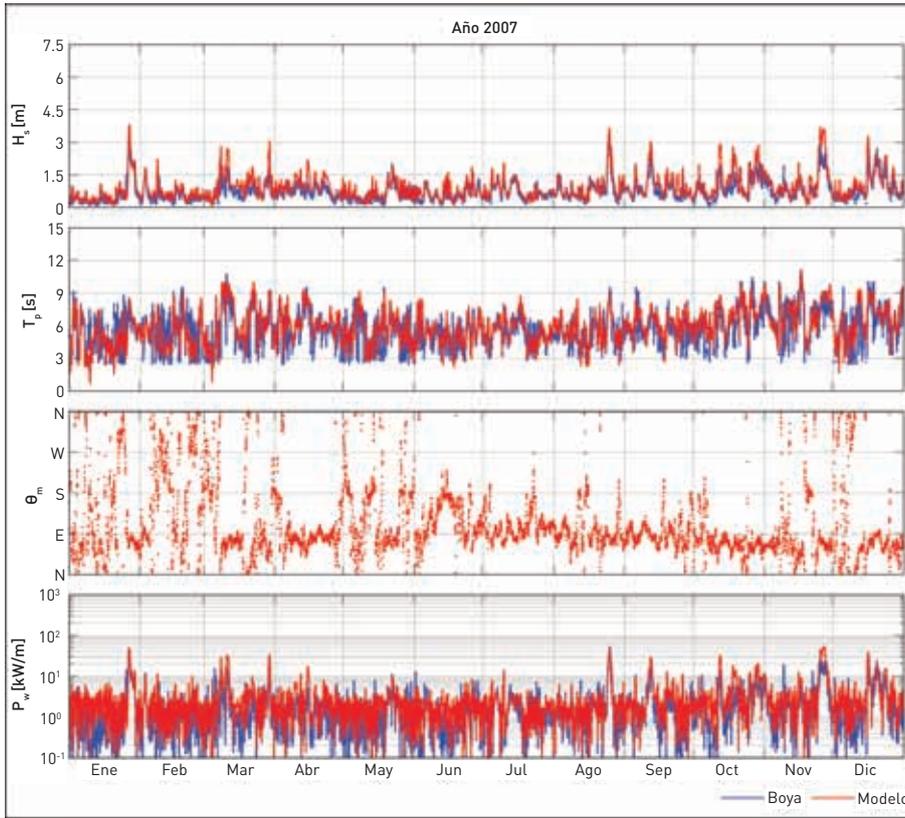
Boya Escalar Cabo de Palos  
GOW 2.1 + DOW 2.1

Malla General (GM11)

Red OPPE Costera  
Lon=0.64°W  
Lat=37.65°N  
h=67m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM11 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

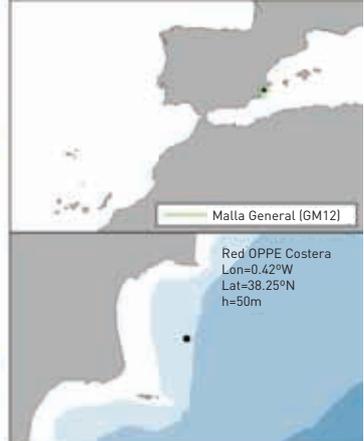
Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

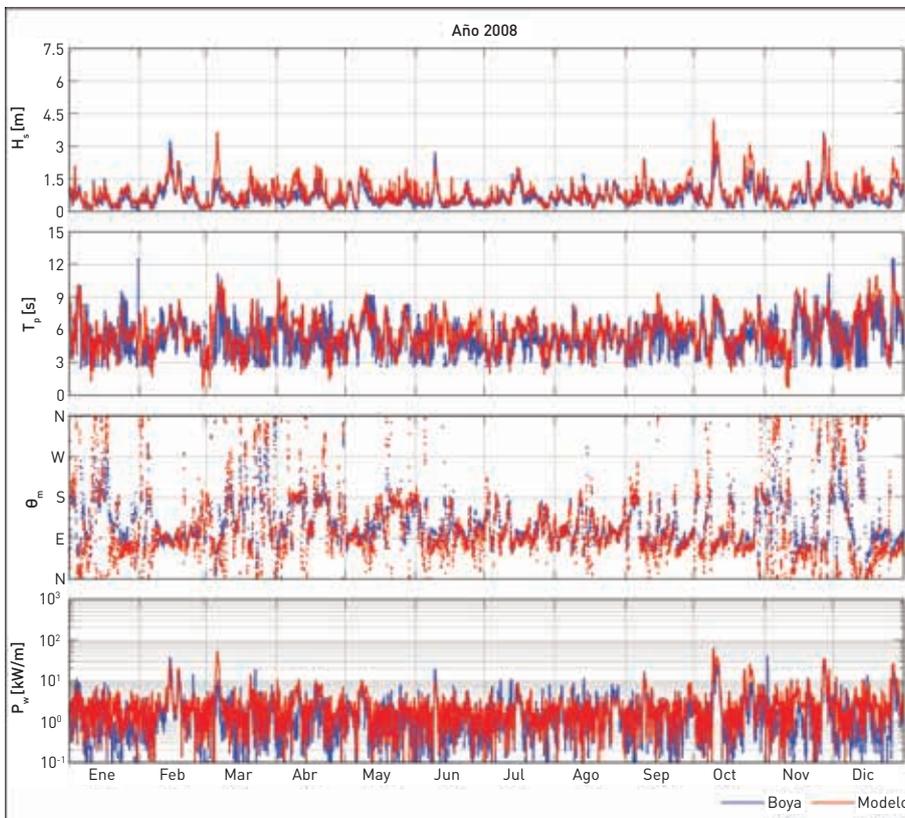
**Validación Oleaje España**

Boya Escalar Alicante  
GOW 2.1 + DOW 2.1



GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM12 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

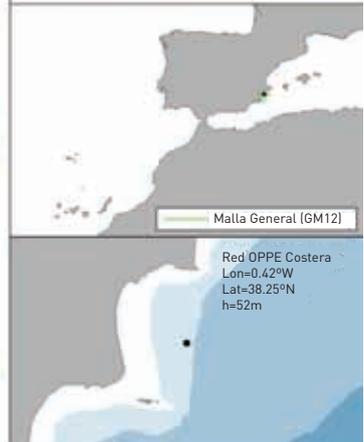
Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

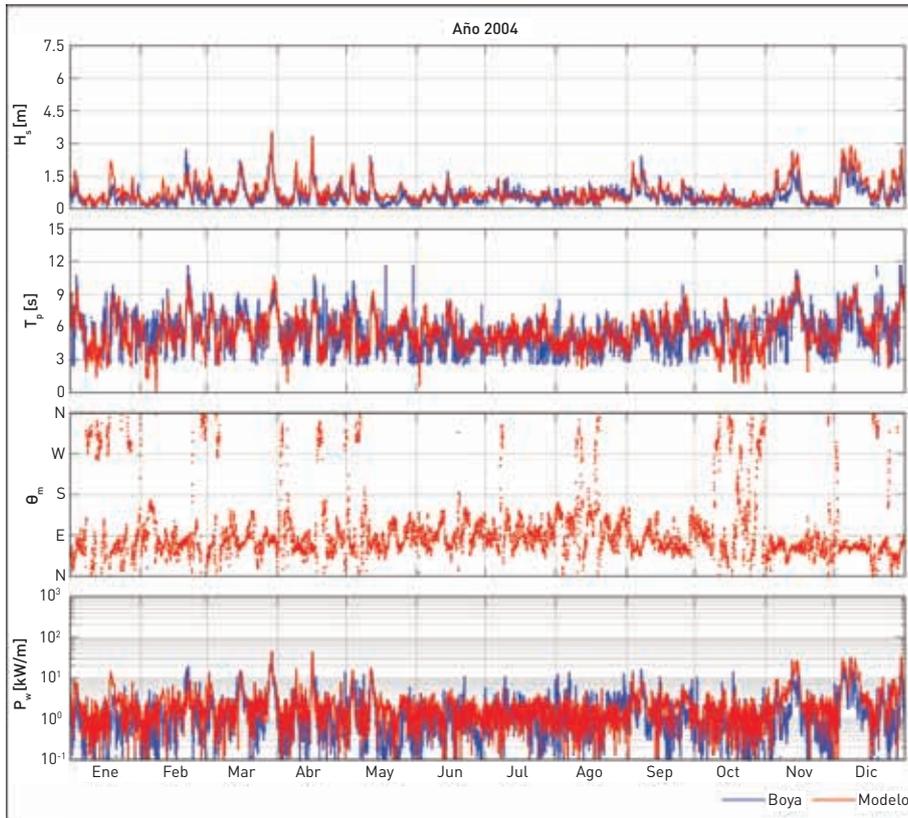
**Validación Oleaje España**

Boya Direccional Cost-Alicante  
GOW 2.1 + DOW 2.1



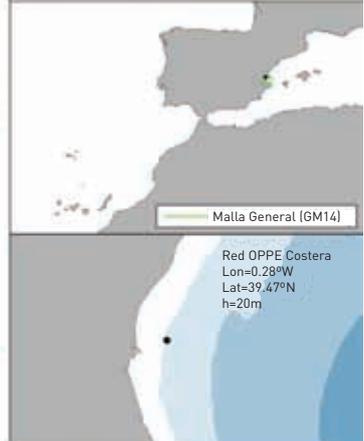
GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM12 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



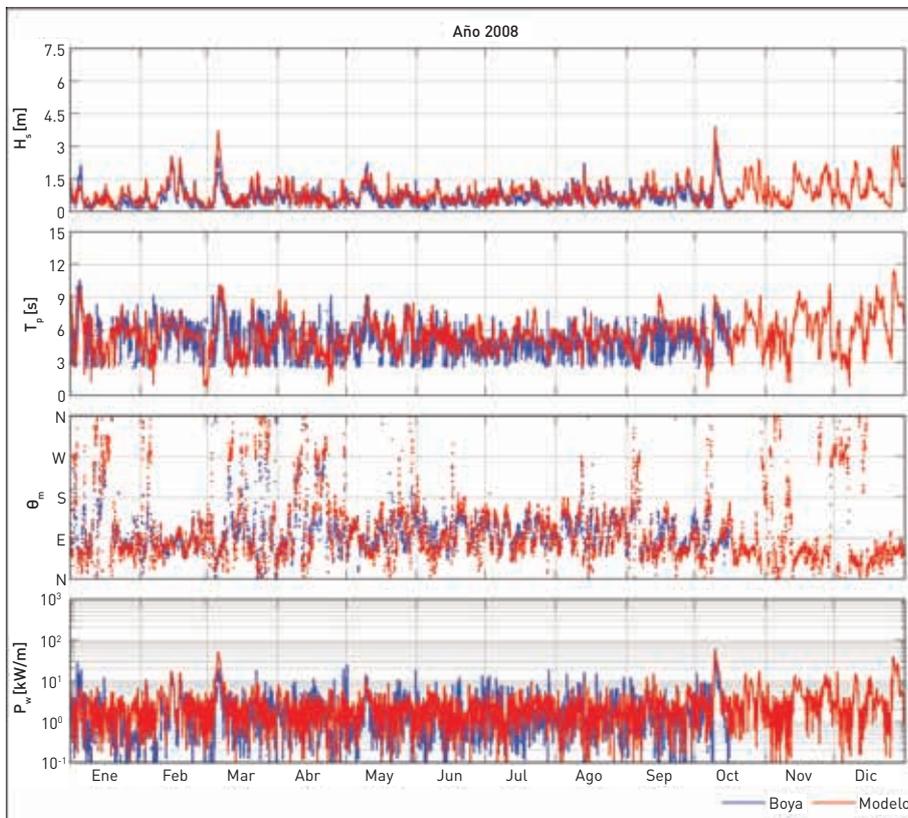
**Validación Oleaje España**

Boya Escalar Valencia  
GOW 2.1 + DOW 2.1



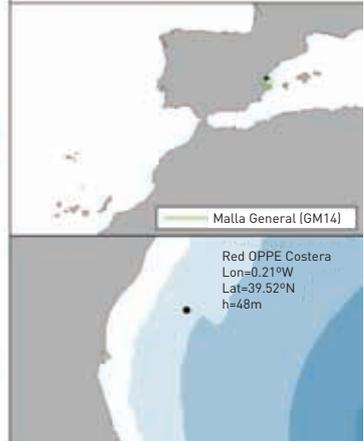
GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM14 / DM141 [0.0005°x0.0005°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



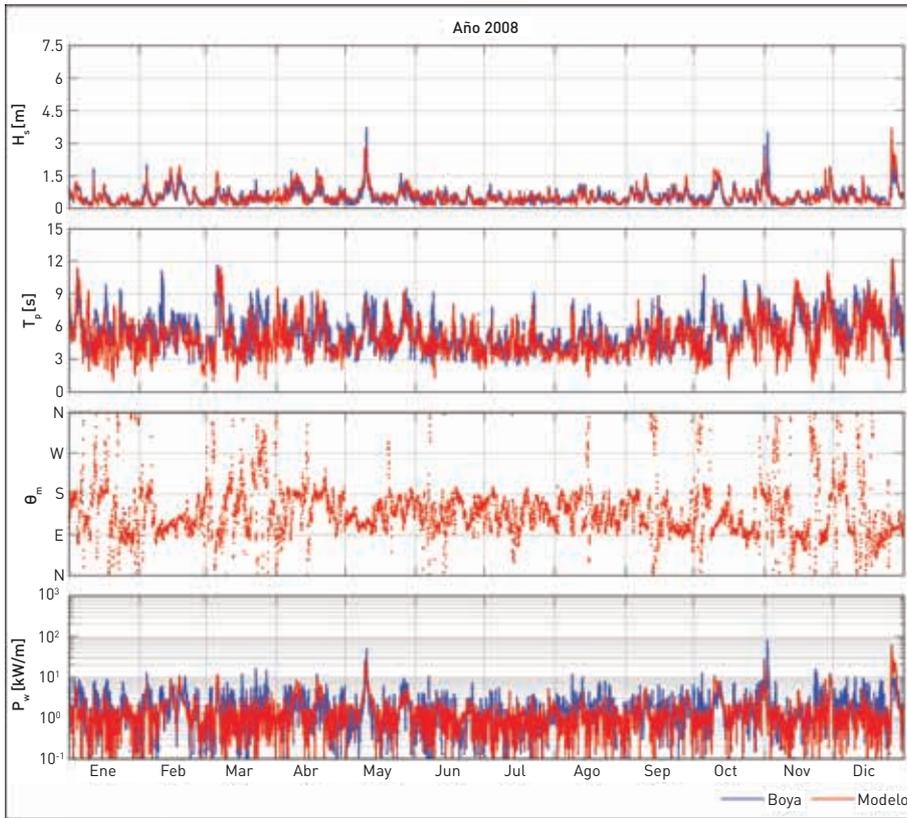
**Validación Oleaje España**

Boya Direccional Cost-Valencia II  
GOW 2.1 + DOW 2.1



GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM14 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

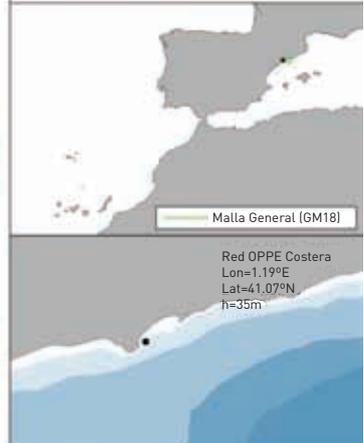
Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

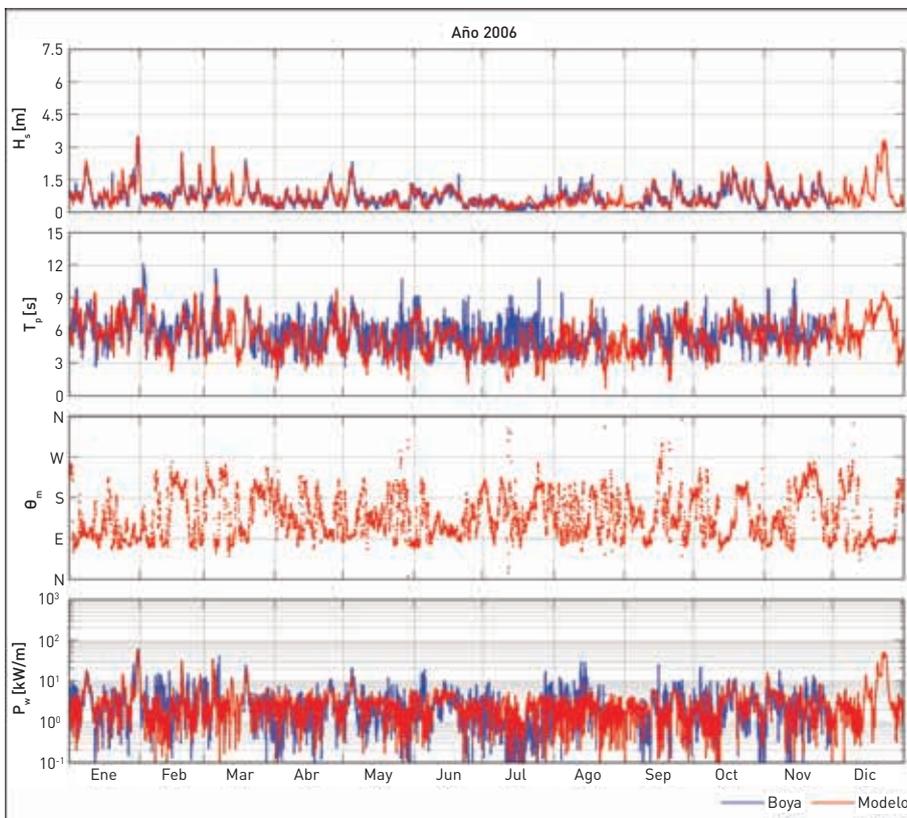
**Validación Oleaje España**

Boya Escalar Tarragona  
GOW 2.1 + DOW 2.1



GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM18 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

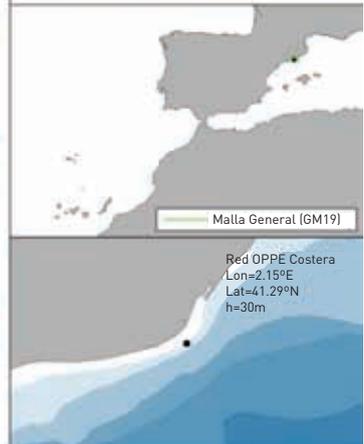
Elaborado el 16 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

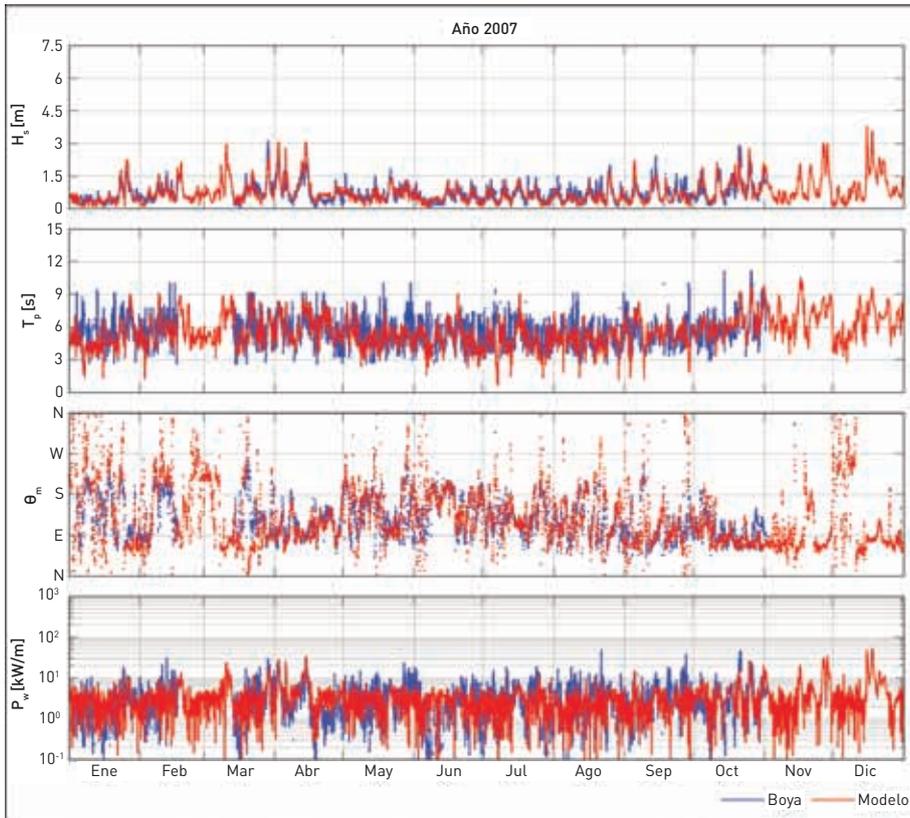
**Validación Oleaje España**

Boya Escalar Barcelona  
GOW 2.1 + DOW 2.1



GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM19 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDAIE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Oleaje España**

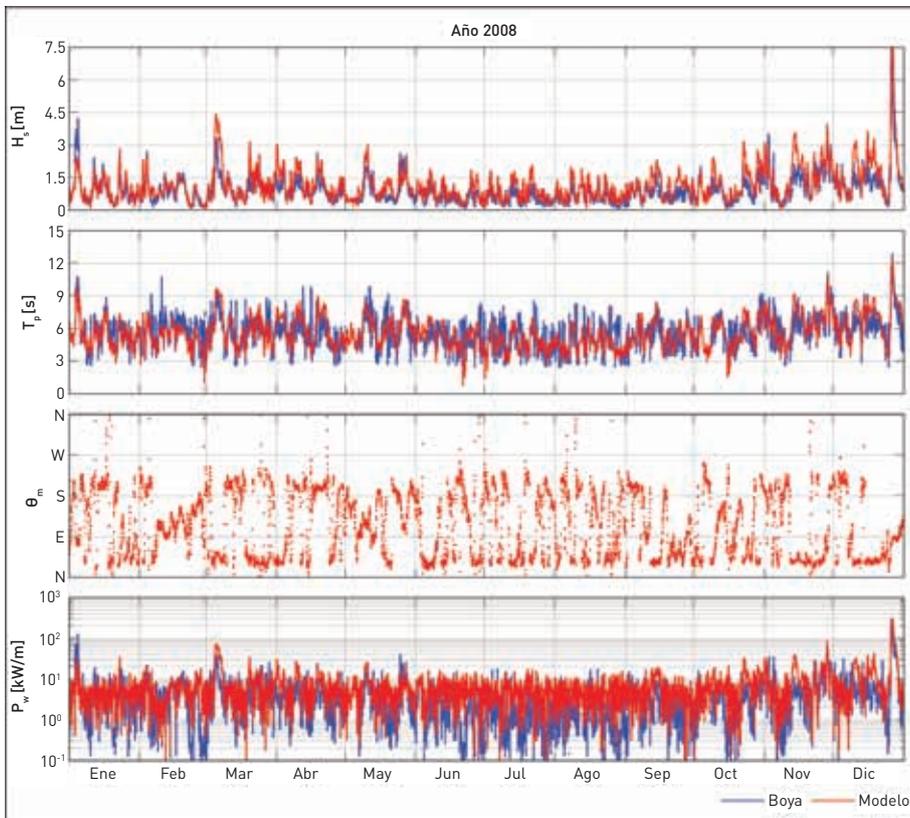
**Boya Direccional Cost-Barcelona**  
GOW 2.1 + DOW 2.1

Malla General (GM19)

Red OPPE Costera  
Lon=2.21°E  
Lat=41.32°N  
h=68m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM19 [0.0005°x0.0005°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDAIE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Oleaje España**

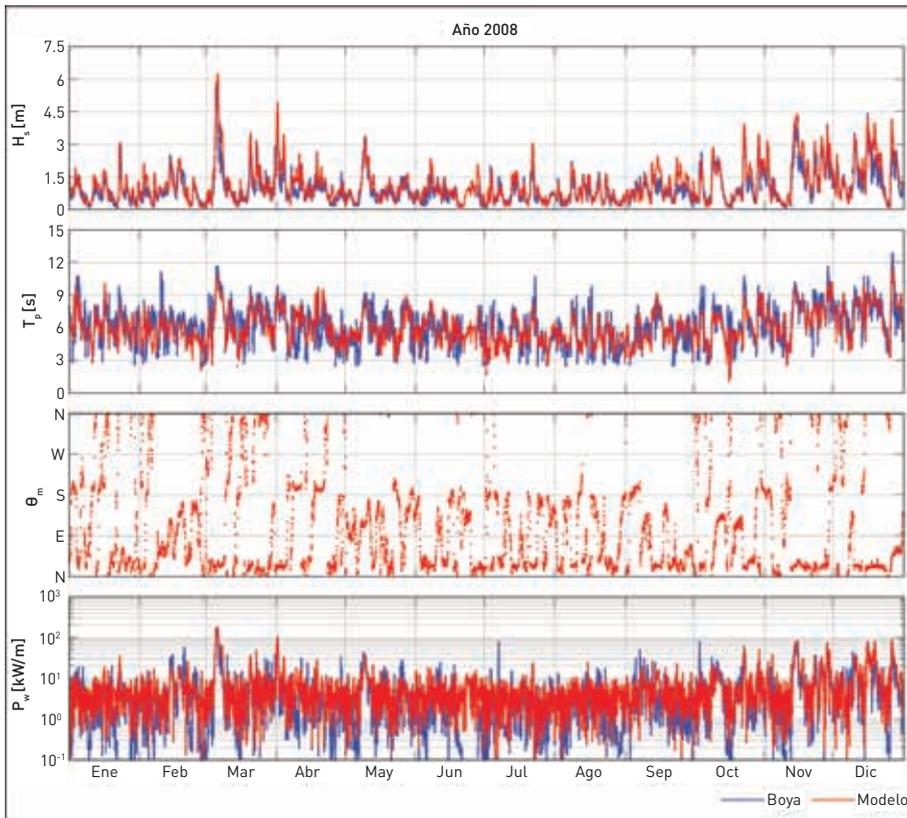
**Boya Escalar Palamos**  
GOW 2.1 + DOW 2.1

Malla General (GM21)

Red OPPE Costera  
Lon=3.19°E  
Lat=41.83°N  
h=90m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM21 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

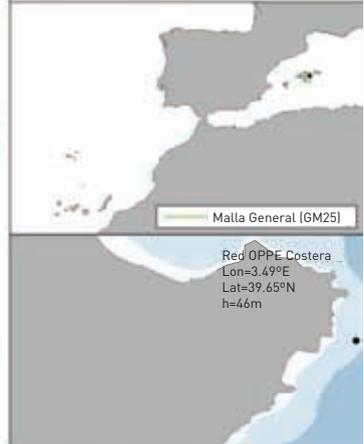
Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

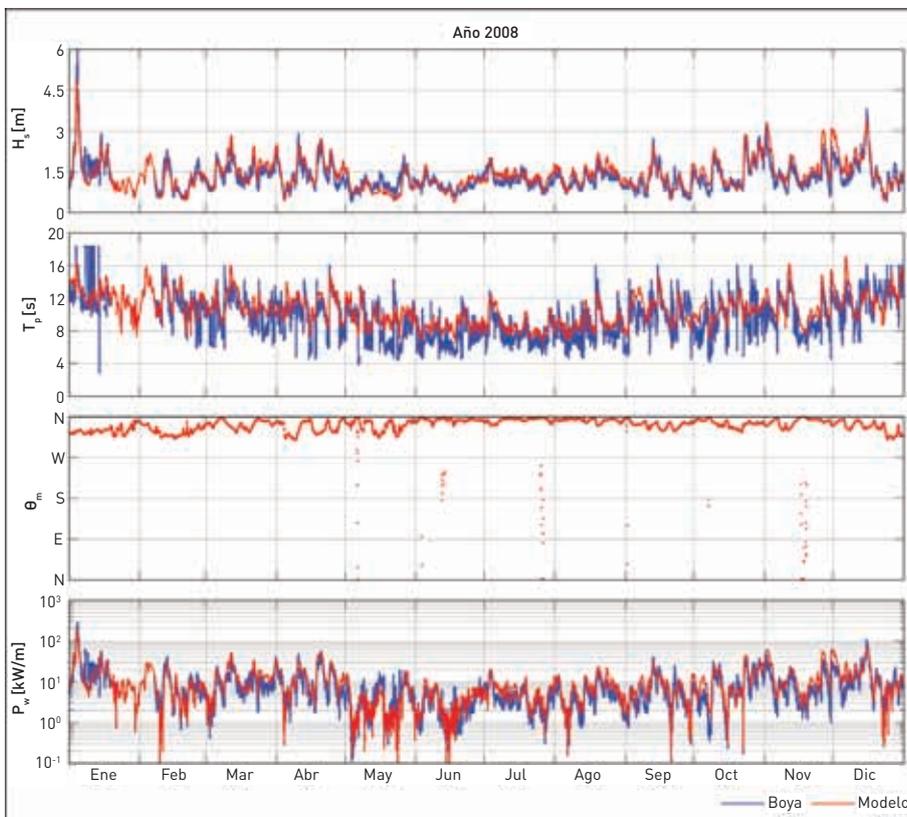
**Validación Oleaje España**

Boya Escalar Cap de Pera  
GOW 2.1 + DOW 2.1



GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. (0.125°x0.125°)  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15 km (1989-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM25 (0.0025°x0.0025°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

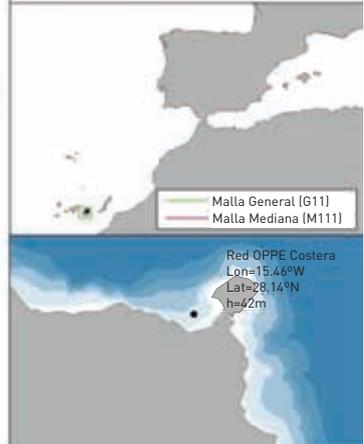
Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

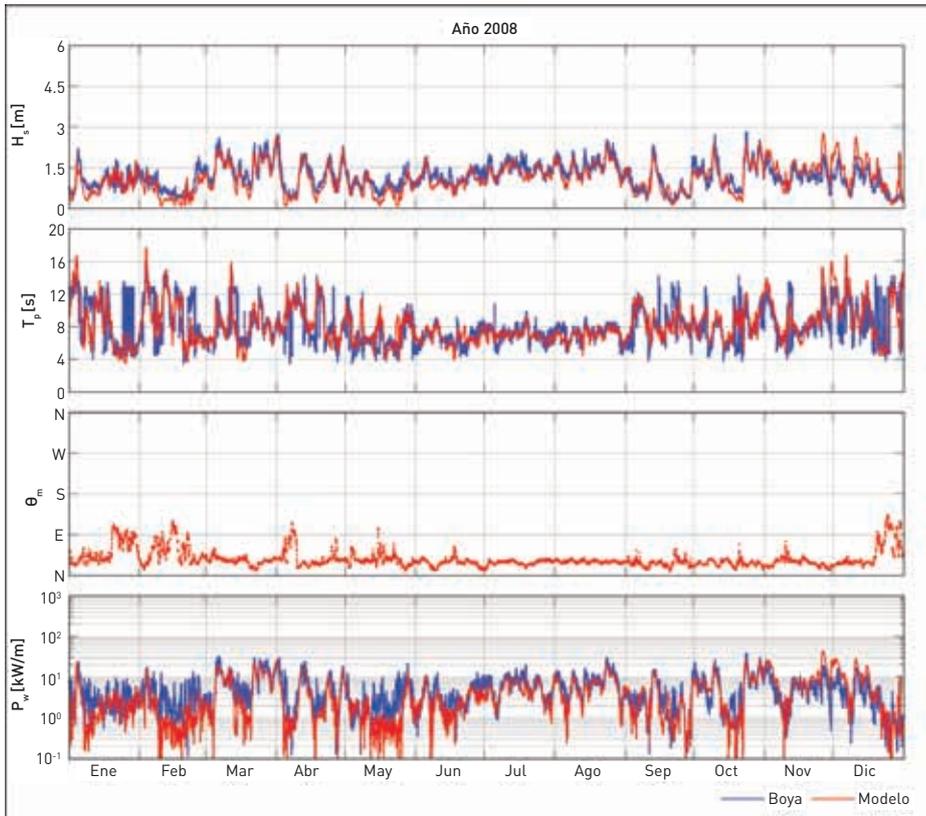
**Validación Oleaje España**

Boya Escalar Las Palmas I  
GOW 1.0 + DOW 1.0



GOW 1.0 Global / Canarias (0.1°x0.1°)  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G11 / M111 / D1111 (0.0005°x0.0004°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Oleaje España**

**Boya Escalar Las Palmas II**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

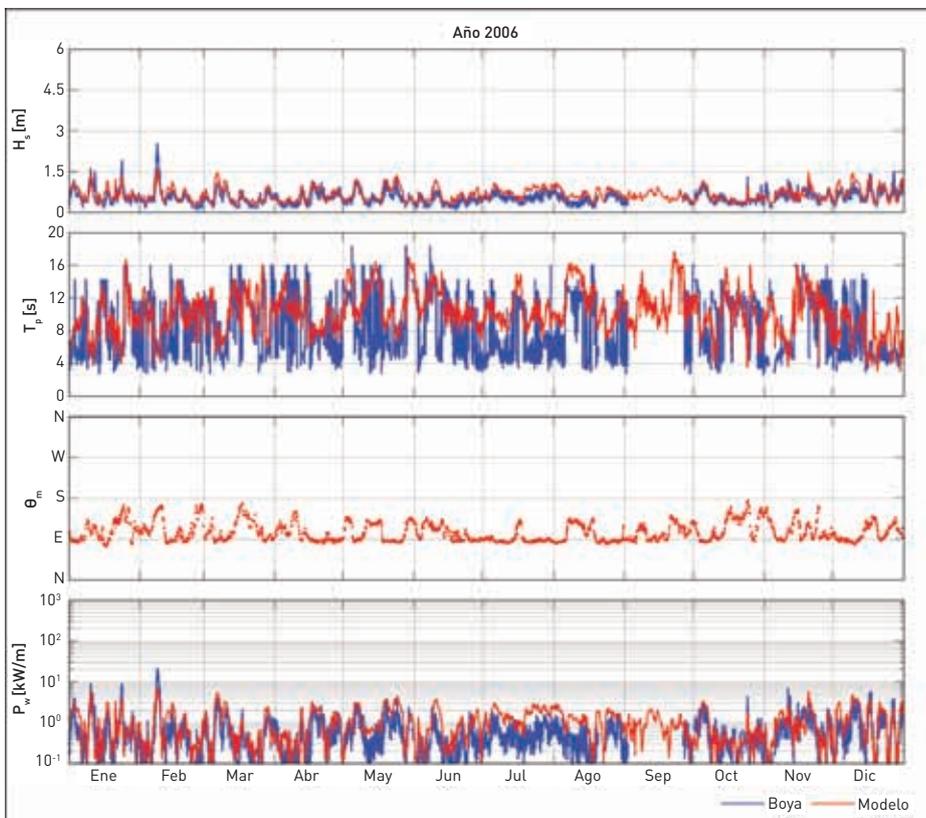
Red OPPE Costera  
L<sub>on</sub>=15.40°W  
Lat=28.07°N  
h=48m

GOW 1.0 Global / Canarias (0.1°x0.1°)  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)

Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)

DOW 1.0 G11 / M111 (0.0025°x0.002°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Oleaje España**

**Boya Escalar Tenerife**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

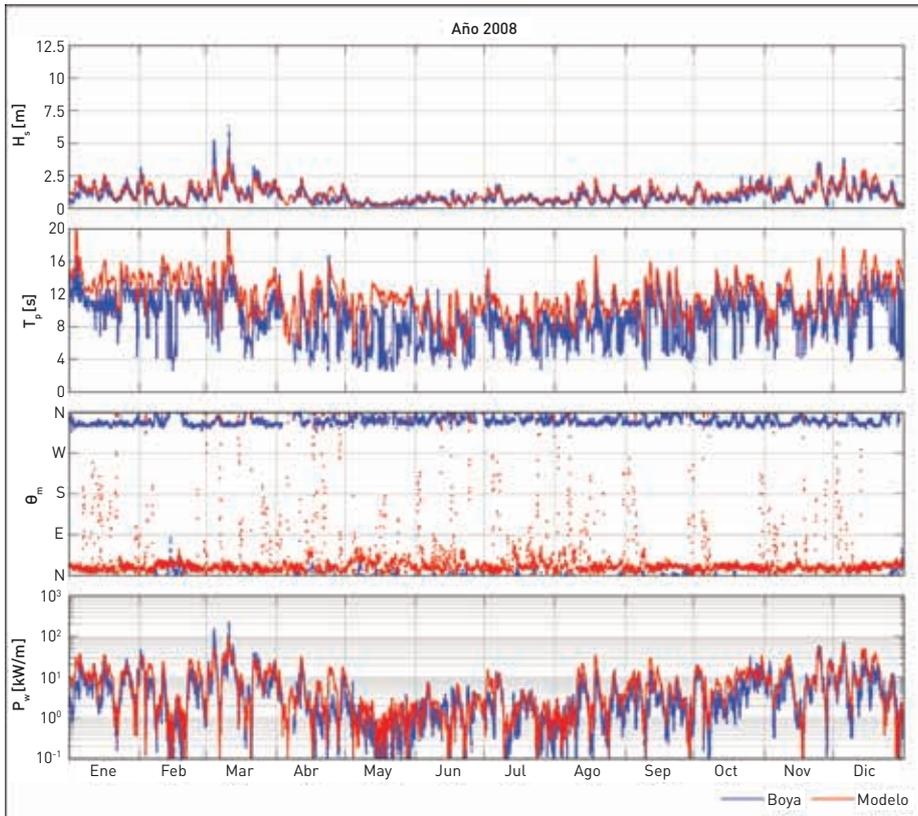
Red OPPE Costera  
L<sub>on</sub>=14.25°W  
Lat=28.45°N  
h=52m

GOW 1.0 Global / Canarias (0.1°x0.1°)  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)

Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)

DOW 1.0 G12 / M121 / D1211 (0.0005°x0.0004°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

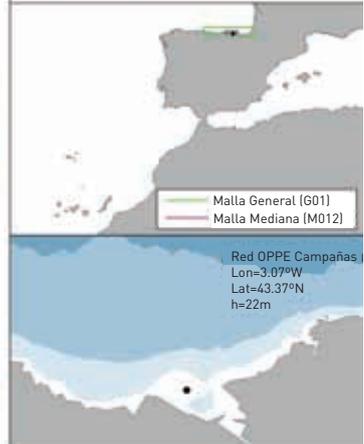
Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

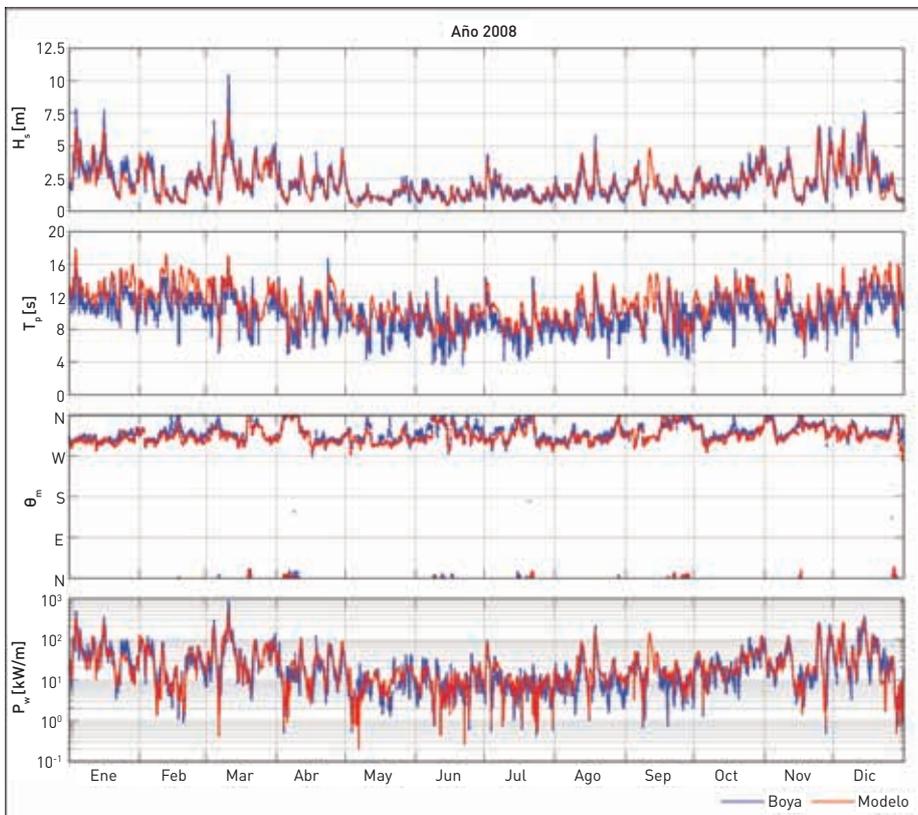
**Validación Oleaje España**

Boya Direccional Ciervana Cam  
GOW 1.0 + DOW 1.0



GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico (0.1°x0.1°)  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G01 / M012 / D0121 (0.001°x0.0008°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

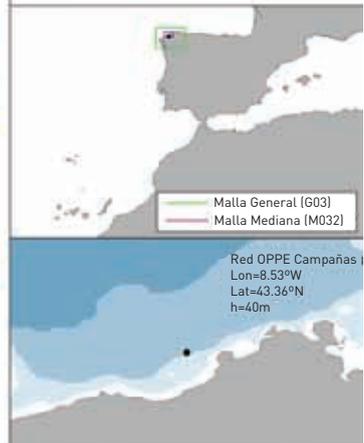
Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

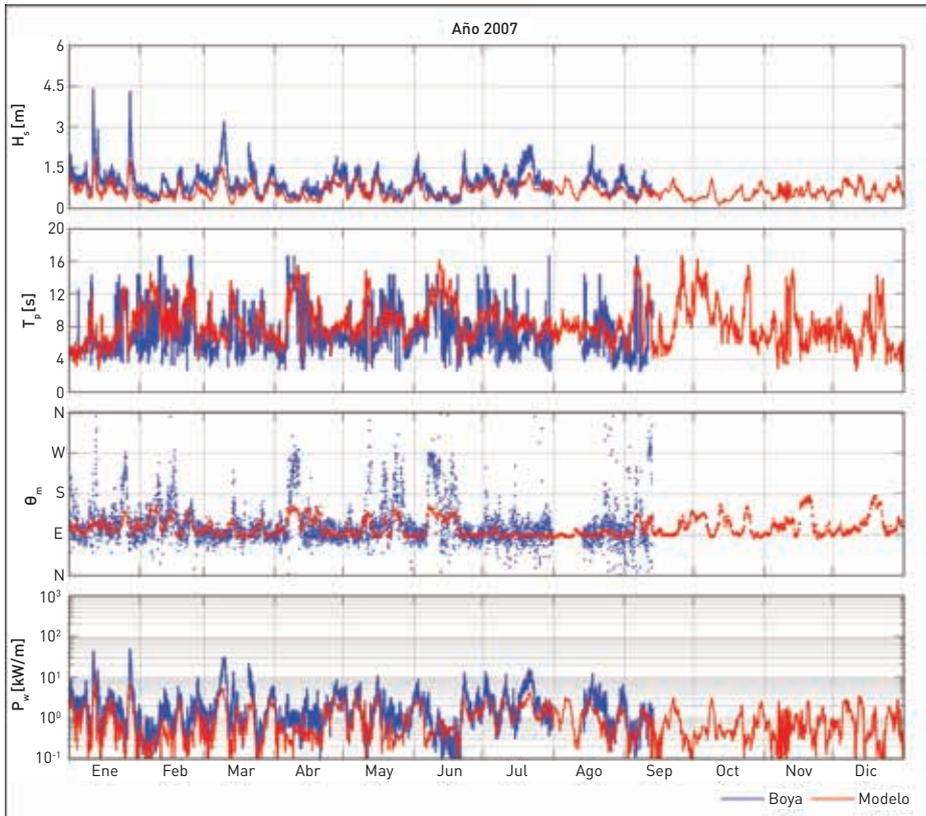
**Validación Oleaje España**

Boya Direccional Langosteira  
GOW 1.0 + DOW 1.0



GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico (0.1°x0.1°)  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G03 / M032 / D0321 (0.001°x0.0008°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

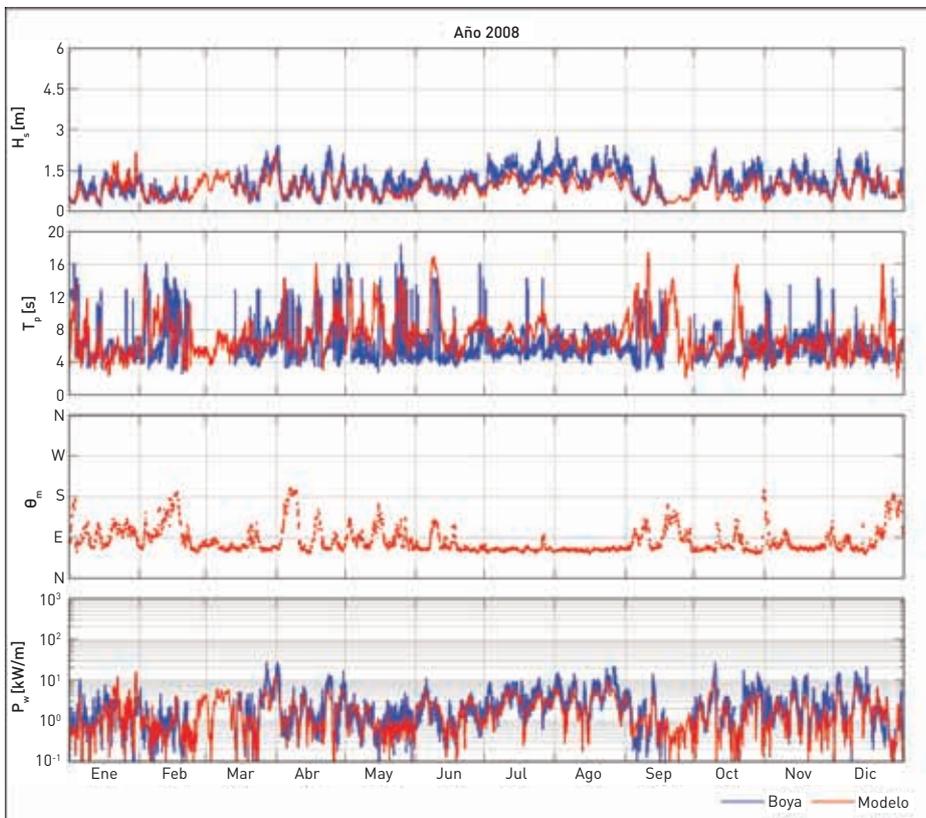
**Validación Oleaje España**

**Boya Direccional Santa Cruz**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

Red OPPE Campanas  
Lon=16.24°W  
Lat=28.47°N  
h=60m

GOW 1.0 Global / Canarias (0.1°x0.1°)  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G12 / M121 / D1211 (0.0005°x0.0004°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

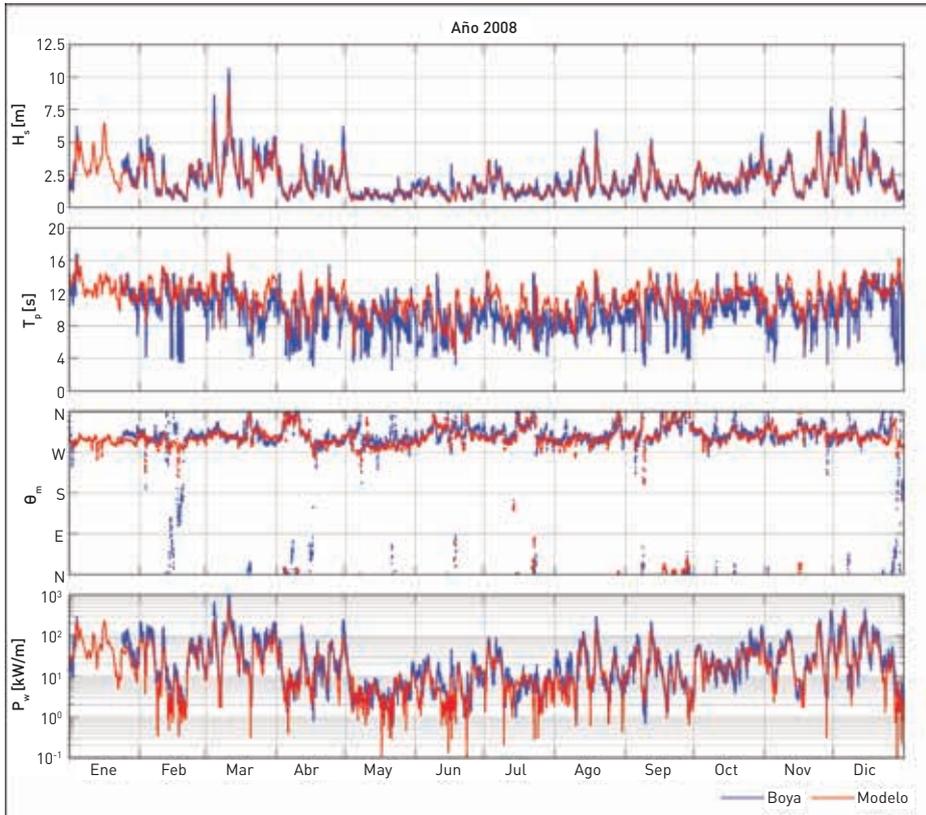
**Validación Oleaje España**

**Boya Escalar Granadilla**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

Red OPPE Campanas  
Lon=16.48°W  
Lat=28.09°N  
h=22m

GOW 1.0 Global / Canarias (0.1°x0.1°)  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G12 / M125 (0.0025°x0.002°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Oleaje España**

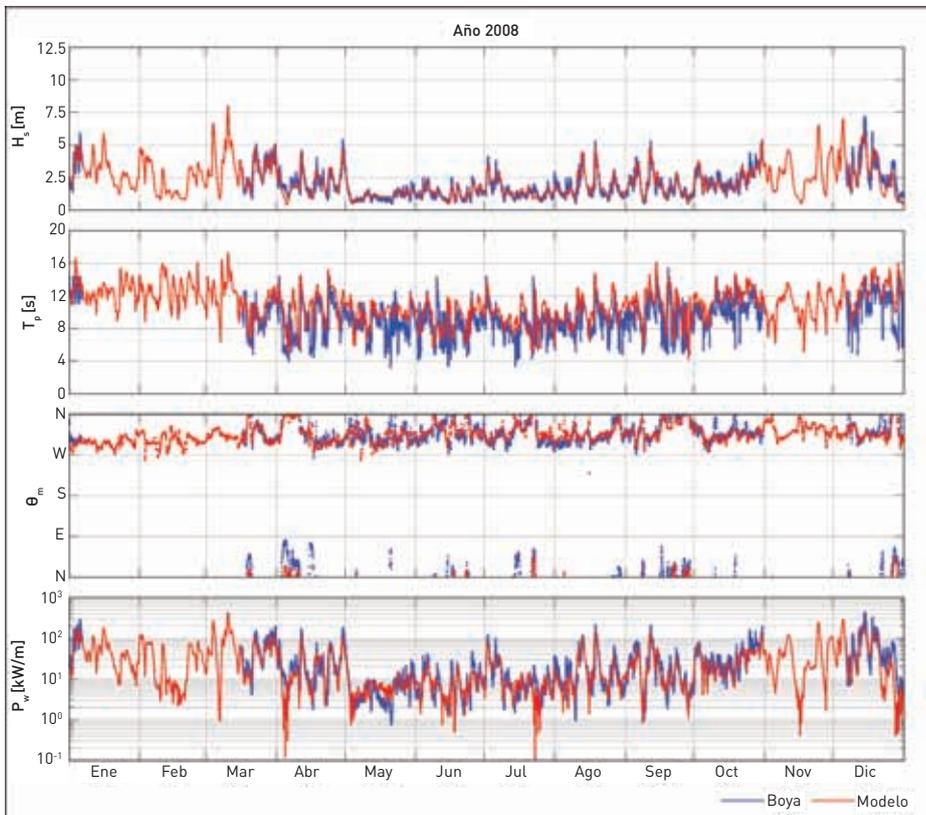
**Boya Direccional Bilbao-Vizcaya Ext  
GOW 1.0 + DOW 1.0**

Malla General (G01)

Red OPPE Exterior  
Lon=3.05°W  
Lat=43.64°N  
h=600m

GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico (0.1°x0.1°)  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G01 (0.01°x0.008°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Oleaje España**

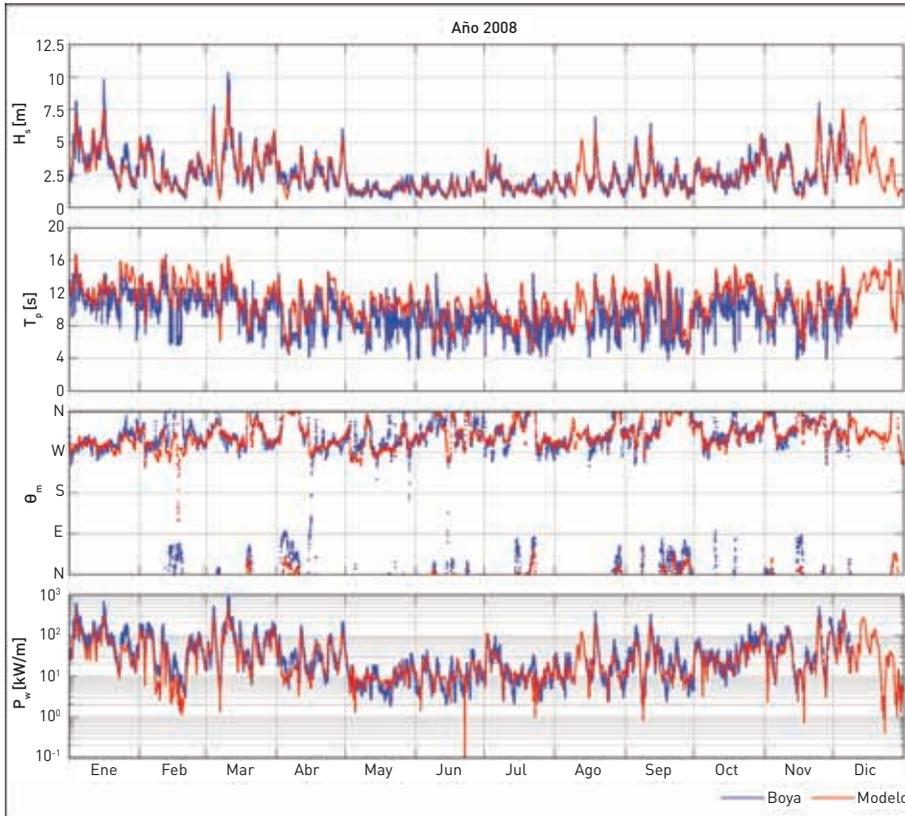
**Boya Direccional Cabo de Peñas Ext  
GOW 1.0 + DOW 1.0**

Malla General (G02)

Red OPPE Exterior  
Lon=6.17°W  
Lat=43.74°N  
h=450m

GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico (0.1°x0.1°)  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G02 (0.01°x0.008°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

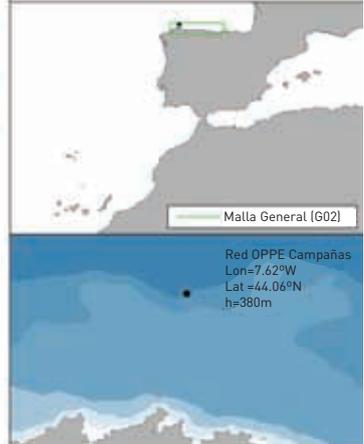
Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA-E** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

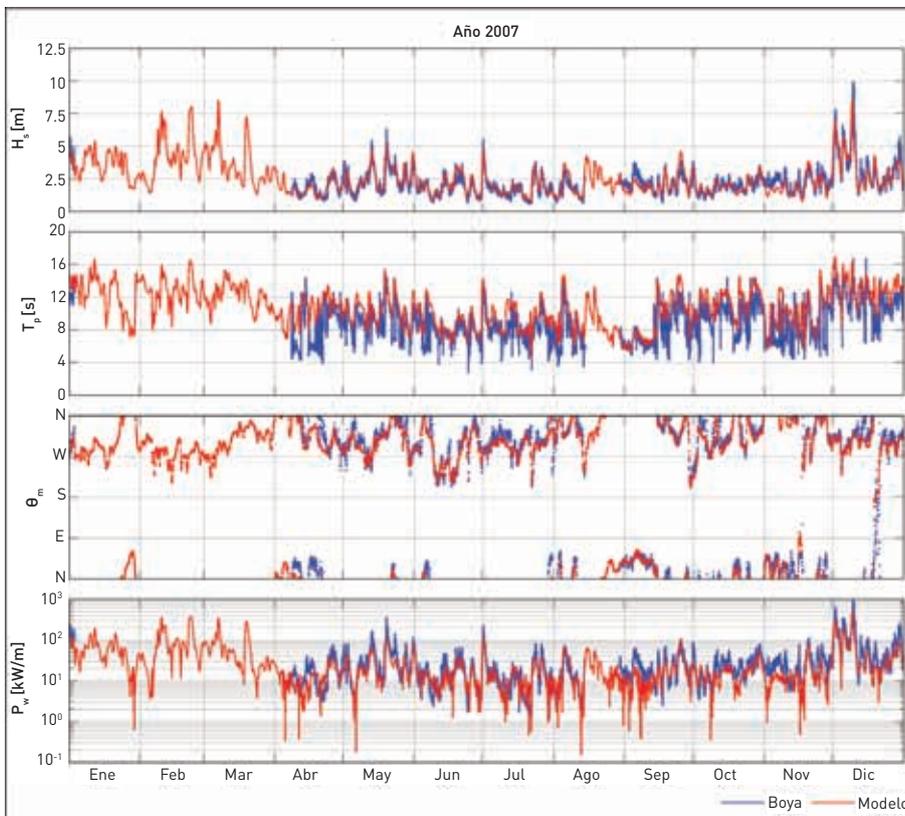
**Validación Oleaje España**

Boya Direccional Estaca de Bares Ext  
GOW 1.0 + DOW 1.0



GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico [0.1°x0.1°]  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° [1948-2008]  
Calibración Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G02 [0.01°x0.008°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

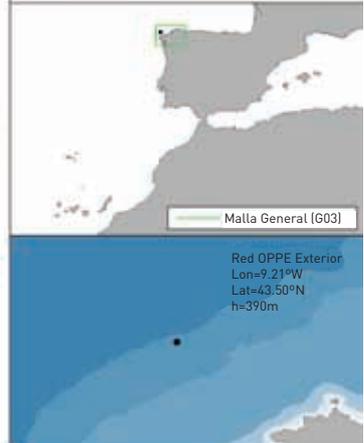
Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA-E** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

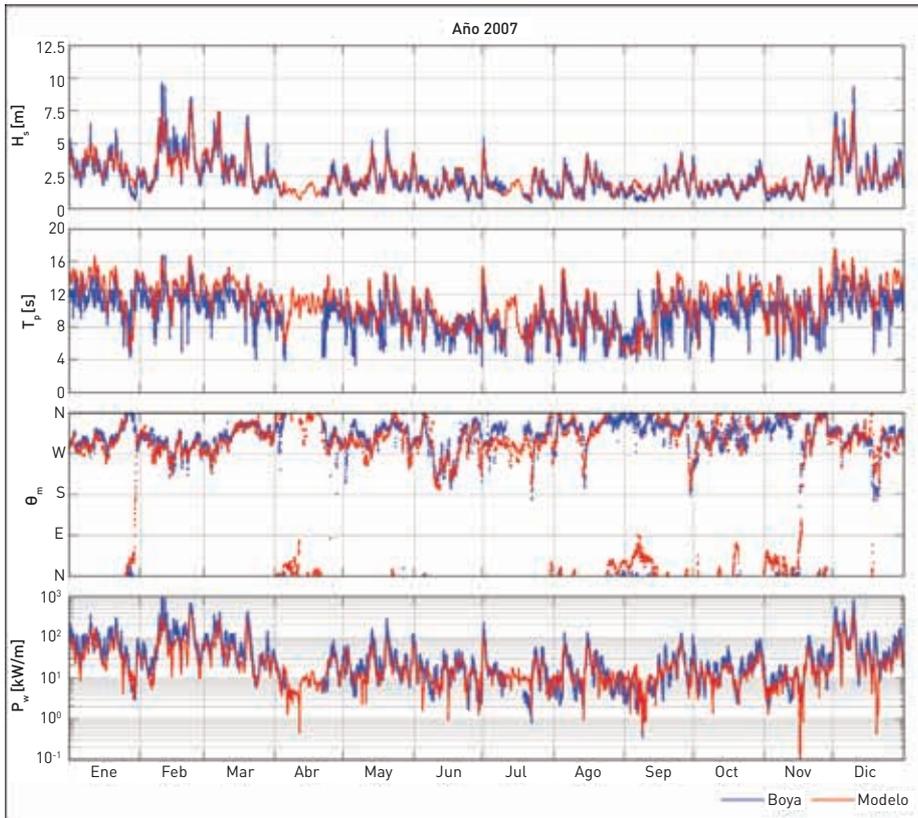
**Validación Oleaje España**

Boya Direccional Villano-Sisargas Ext  
GOW 1.0 + DOW 1.0



GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico [0.1°x0.1°]  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° [1948-2008]  
Calibración Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G03 [0.01°x0.008°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

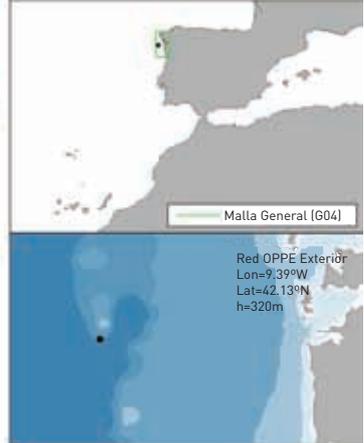
Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

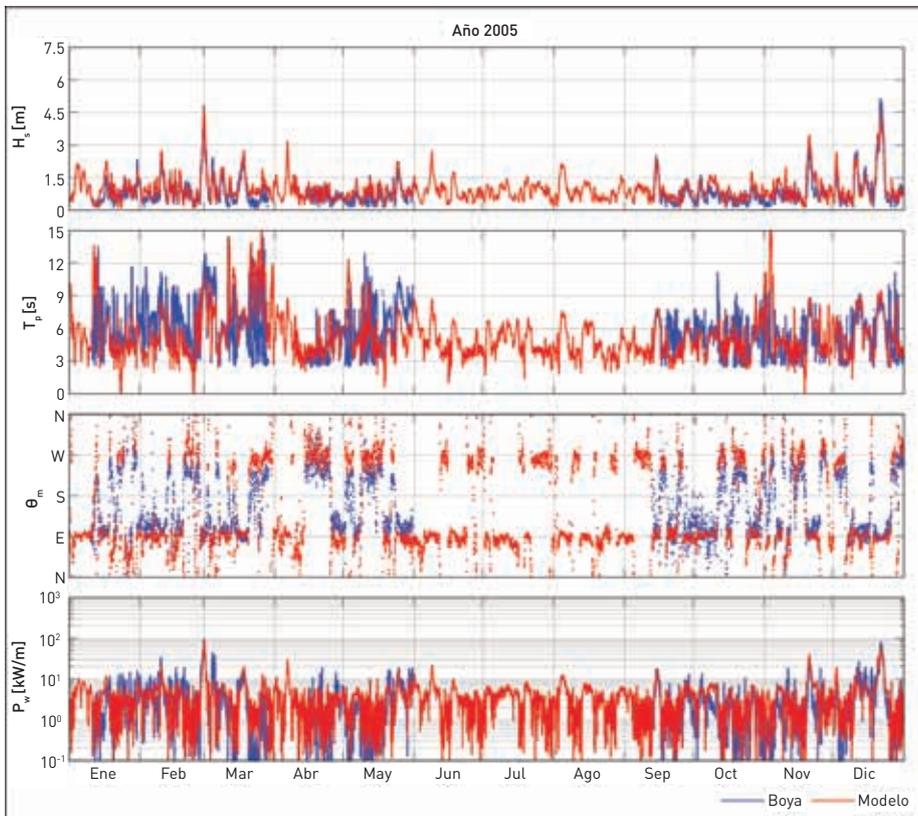
**Validación Oleaje España**

Boya Direccional Cabo Silleiro Ext  
GOW 1.0 + DOW 1.0



GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico (0.1°x0.1°)  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G04 (0.01°x0.008°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

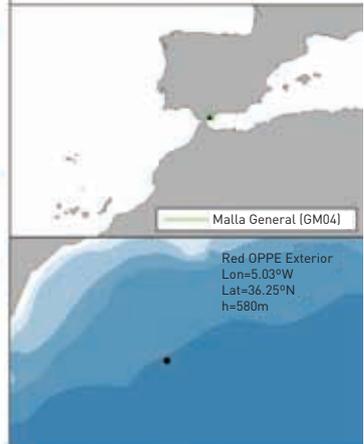
Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

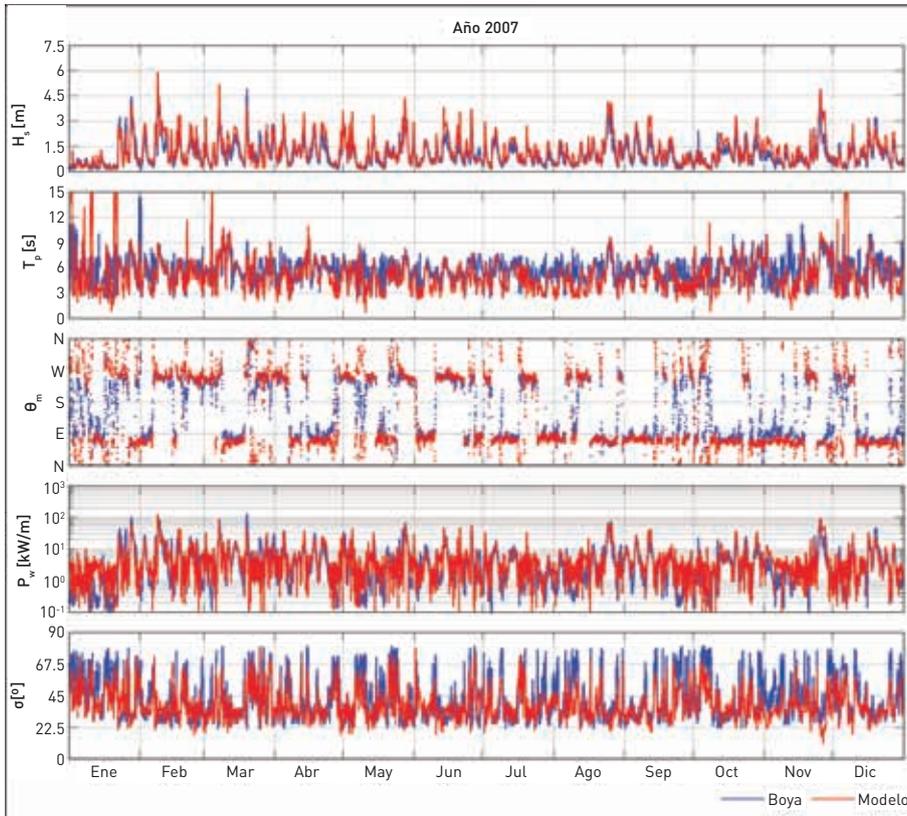
**Validación Oleaje España**

Boya Direccional Alboran Ext  
GOW 2.1 + DOW 2.1



GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. (0.125°x0.125°)  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM04 (0.0025°x0.0025°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

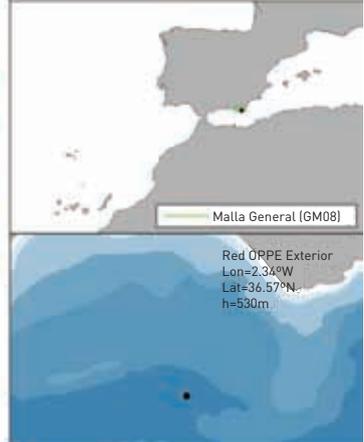
Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDAIE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

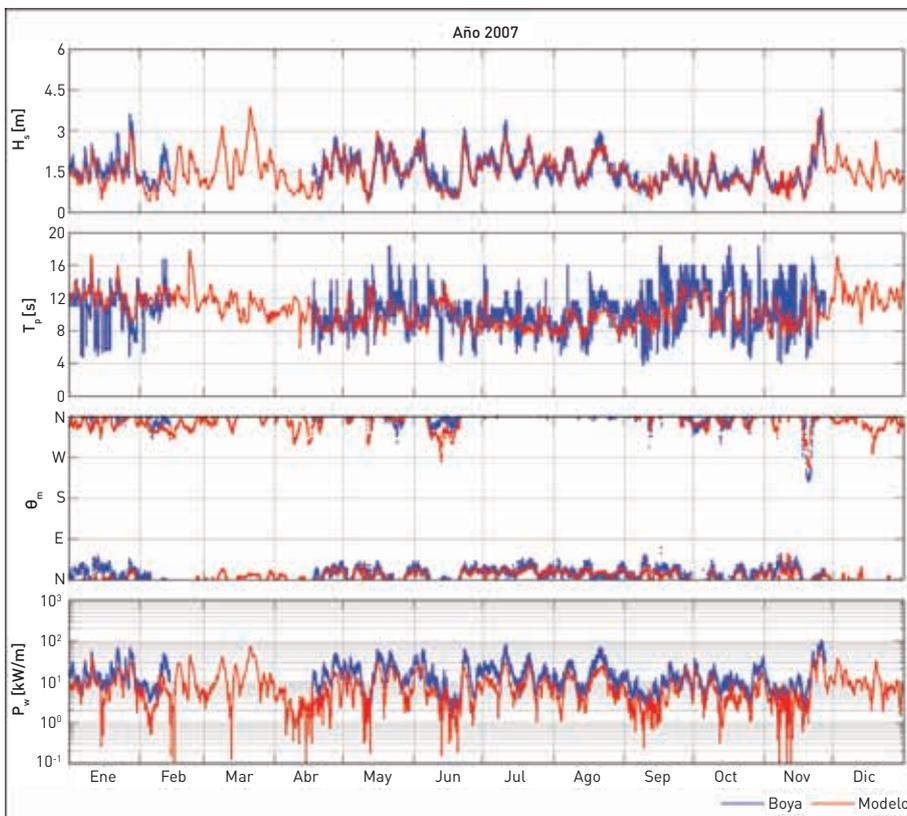
**Validación Oleaje España**

Boya Direccional Cabo de Gata Ext  
GOW 2.1 + DOW 2.1



GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. (0.125°x0.125°)  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM08 (0.0025°x0.0025°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

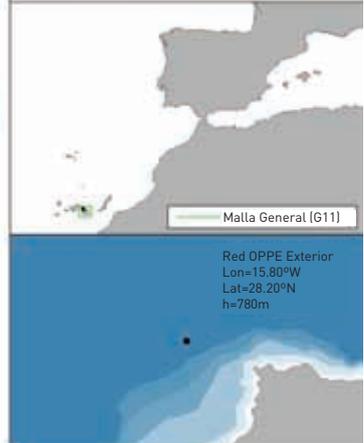
Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDAIE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

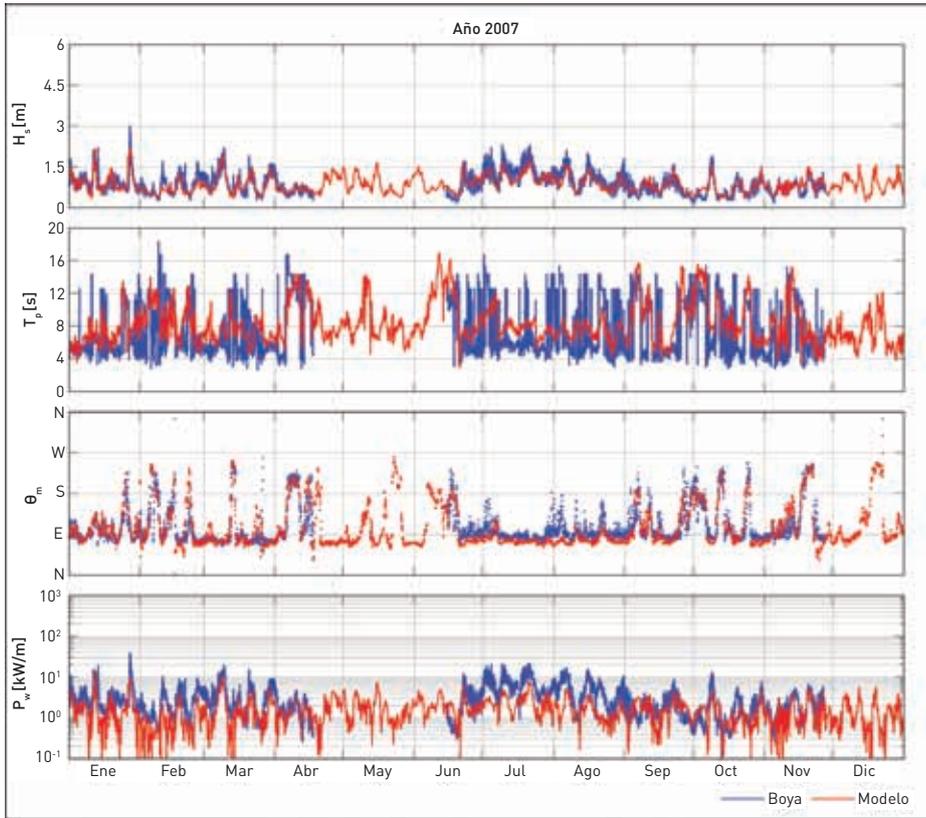
**Validación Oleaje España**

Boya Direccional Gran Canaria Ext  
GOW 1.0 + DOW 1.0



GOW 1.0 Global / Canarias (0.1°x0.1°)  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G11 (0.005°x0.004°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Oleaje España**

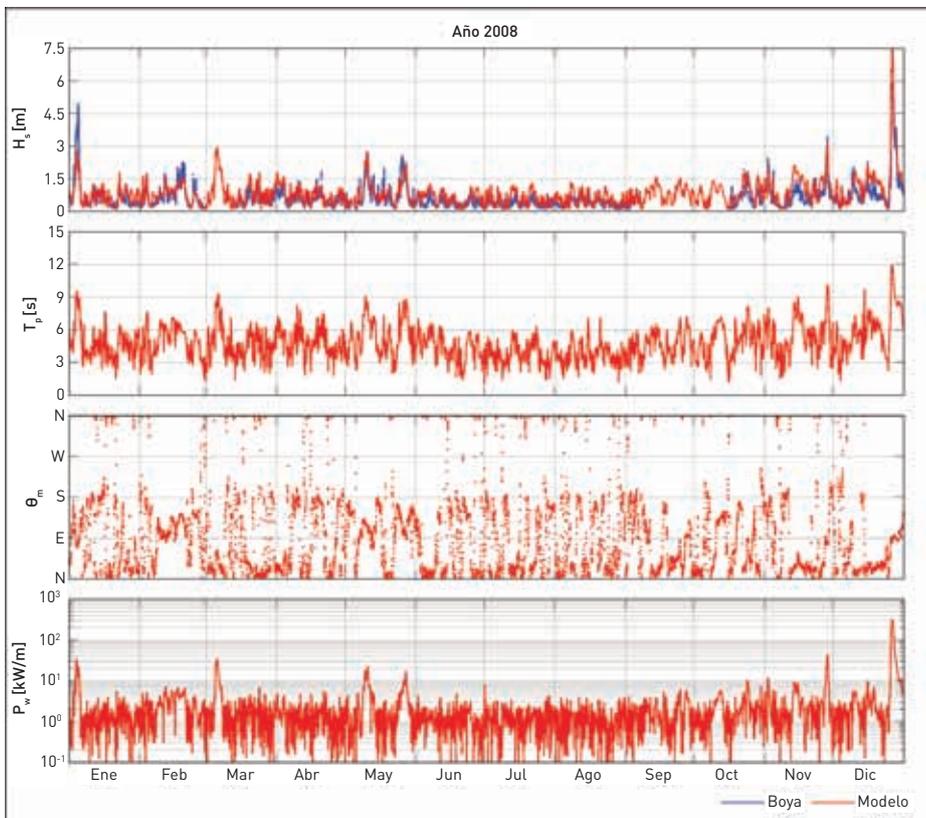
Boya Direccional Tenerife Ext  
GOW 1.0 + DOW 1.0

Malla General (G12)

Red OPPE Exterior  
Lon=16.58°W  
Lat=28.00°N  
h=710m

GOW 2.1 Global / Canarias (0.1°x0.1°)  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G12 (0.005°x0.004°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Oleaje España**

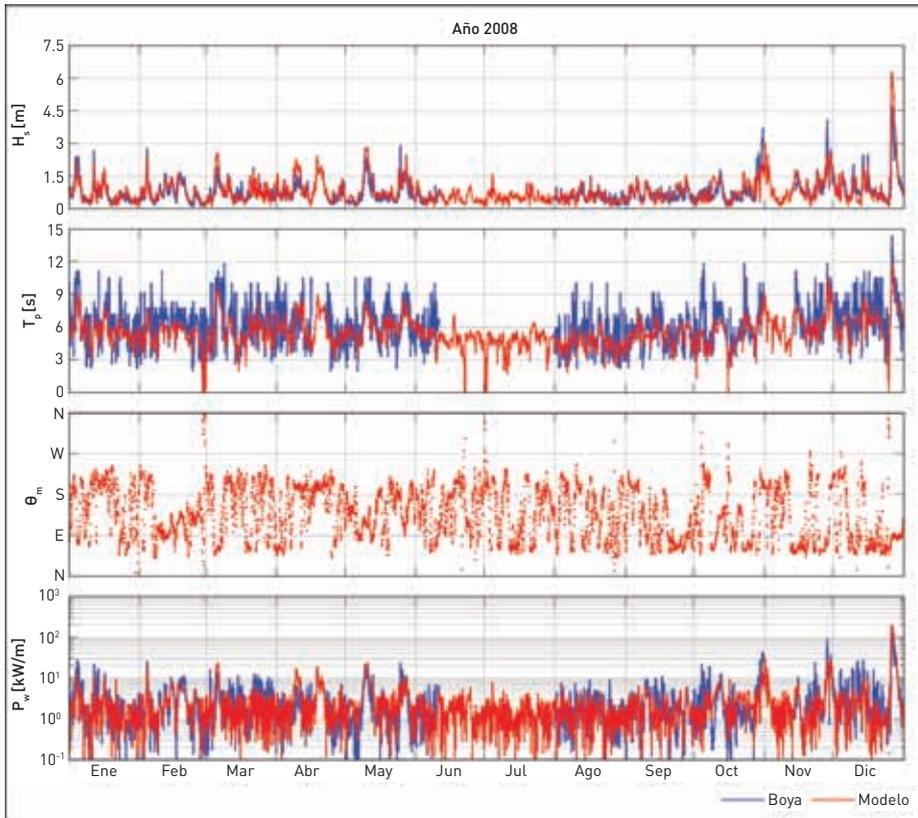
Boya Escalar Rosas Gen  
GOW 2.1 + DOW 2.1

Malla General (GM22)

Red XIOM Cataluña  
Lon=3.20°E  
Lat=42.18°N  
h=46m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. (0.125°x0.125°)  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM22 (0.0025°x0.0025°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDAIE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Oleaje España**

Boya Direccional Tordera Gen  
GOW 2.1 + DOW 2.1

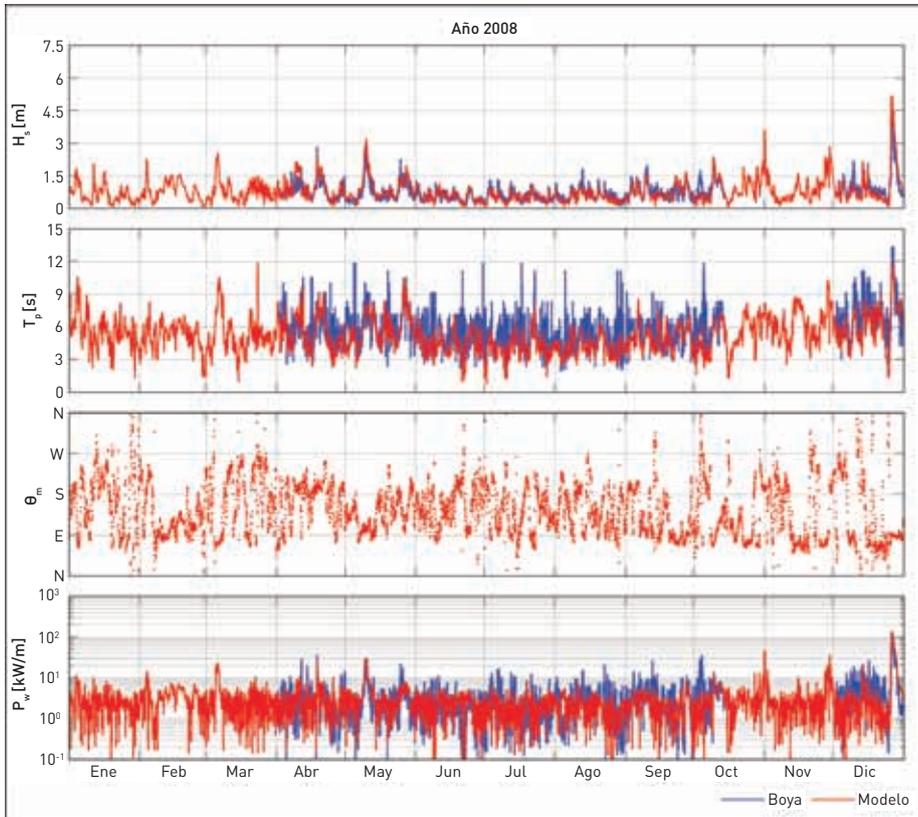
Malla General (GM20)

Red XIOM Cataluña  
Lon=2.82°E  
Lat=41.65°N  
h=74m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)

Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM20 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDAIE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Oleaje España**

Boya Direccional Llobregat Gen  
GOW 2.1 + DOW 2.1

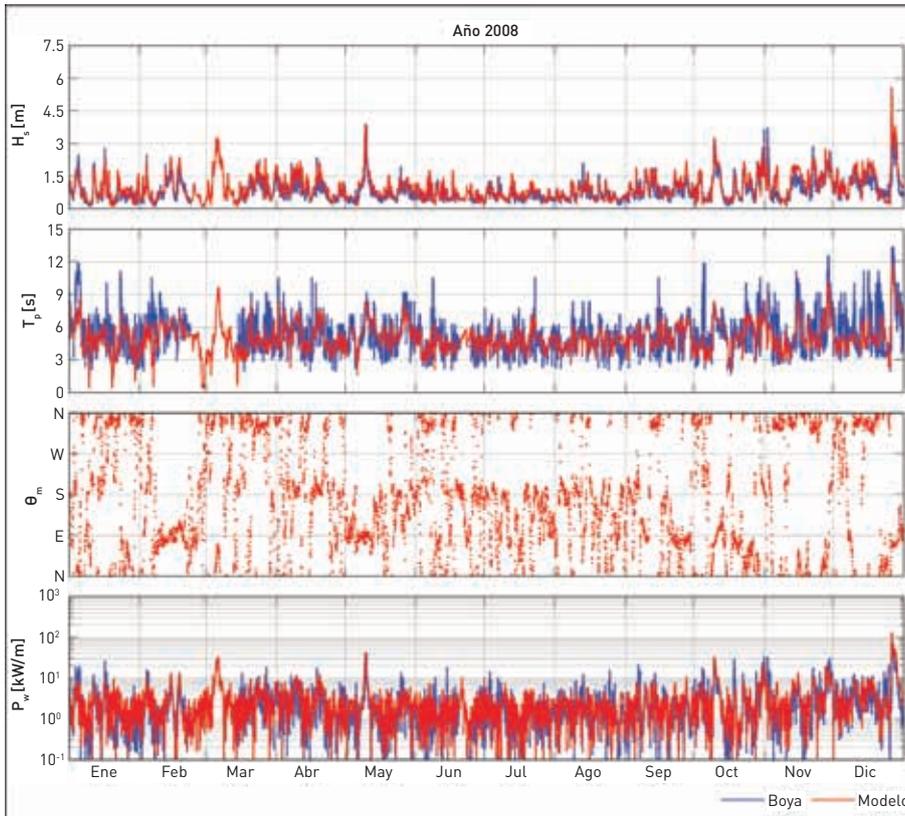
Malla General (GM19)

Red XIOM Cataluña  
Lon =2.14°E  
Lat=41.28°N  
h=45m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)

Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM19 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

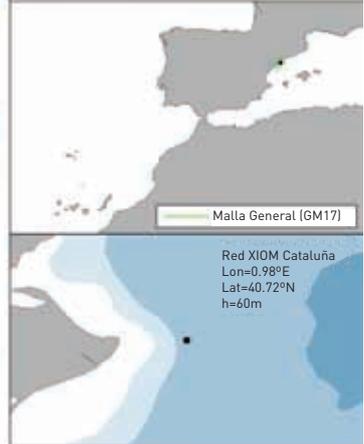
Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Oleaje España**

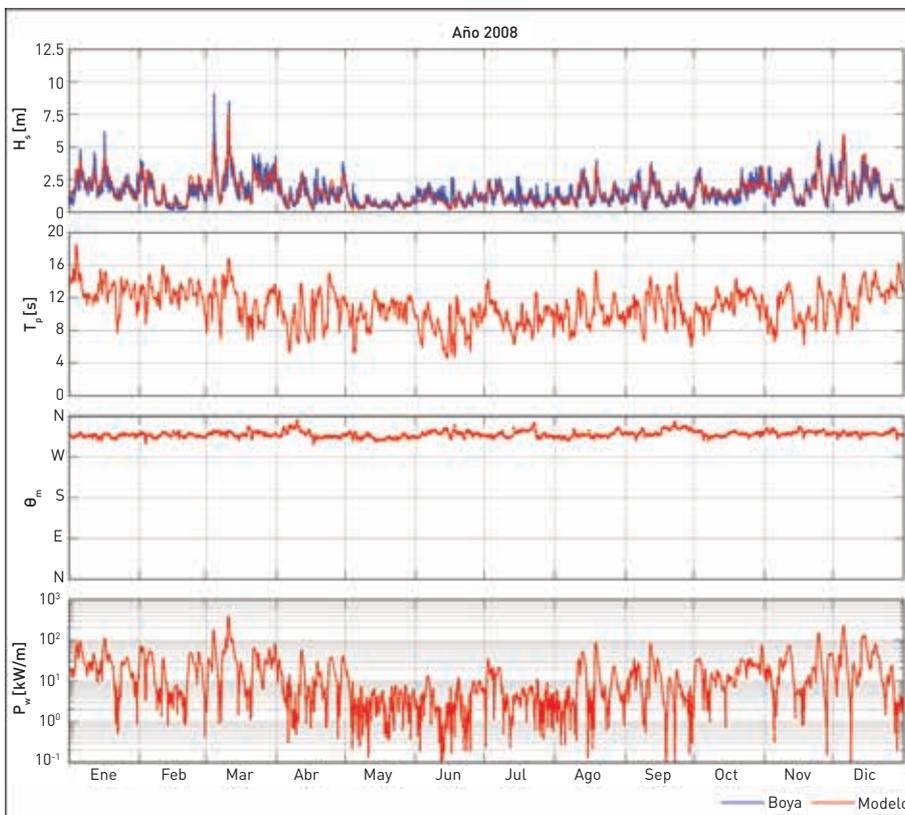
**Boya Direccional Tortosa Gen**  
GOW 2.1 + DOW 2.1



GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15 km (1989-2008)

Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM17 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

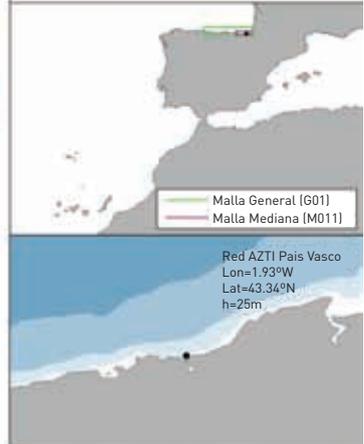
Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Oleaje España**

**Boya Escalar Pasaia**  
GOW 1.0 + DOW 1.0



GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico [0.1°x0.1°]  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° [1948-2008]

Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G01 / M011 / D0111 [0.001°x0.0008°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010

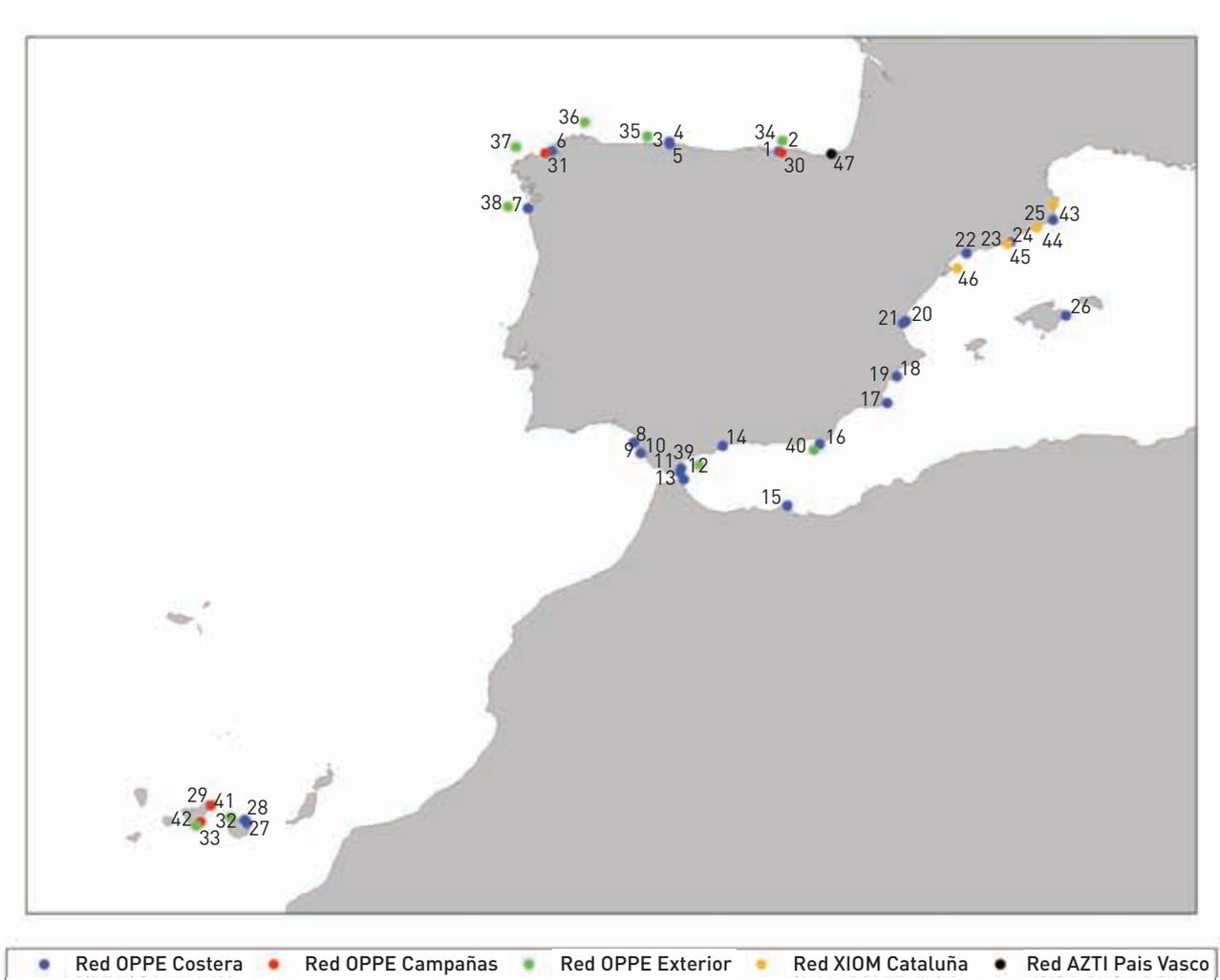
# **Anexo 2.**

# **Validación recurso**

# **energético**

En este Anexo se presenta la validación de la potencia del oleaje con las boyas presentadas en la Figura A2.1 y en la Tabla A2.1.

**Figura A2.1. Localización de las boyas utilizadas en la validación**



**Tabla A2.1. Descripción de las boyas utilizadas en la validación**

	Nombre	Fondeo (m)	Inicio fondeo	Final fondeo	Lat (°N)	Long (°E)	Red	Comentarios
1	Bilbao	50	1985	2005	43,400	-3,143	OPPE Costera	Escalar
2	Cost-Bilbao	53	2004	-	43,398	-3,132	OPPE Costera	Direccional
3	Gijón I	23	1981	2002	43,567	-5,650	OPPE Costera	Escalar
4	Gijón II	43	1994	-	43,612	-5,667	OPPE Costera	Escalar

(Continuación)

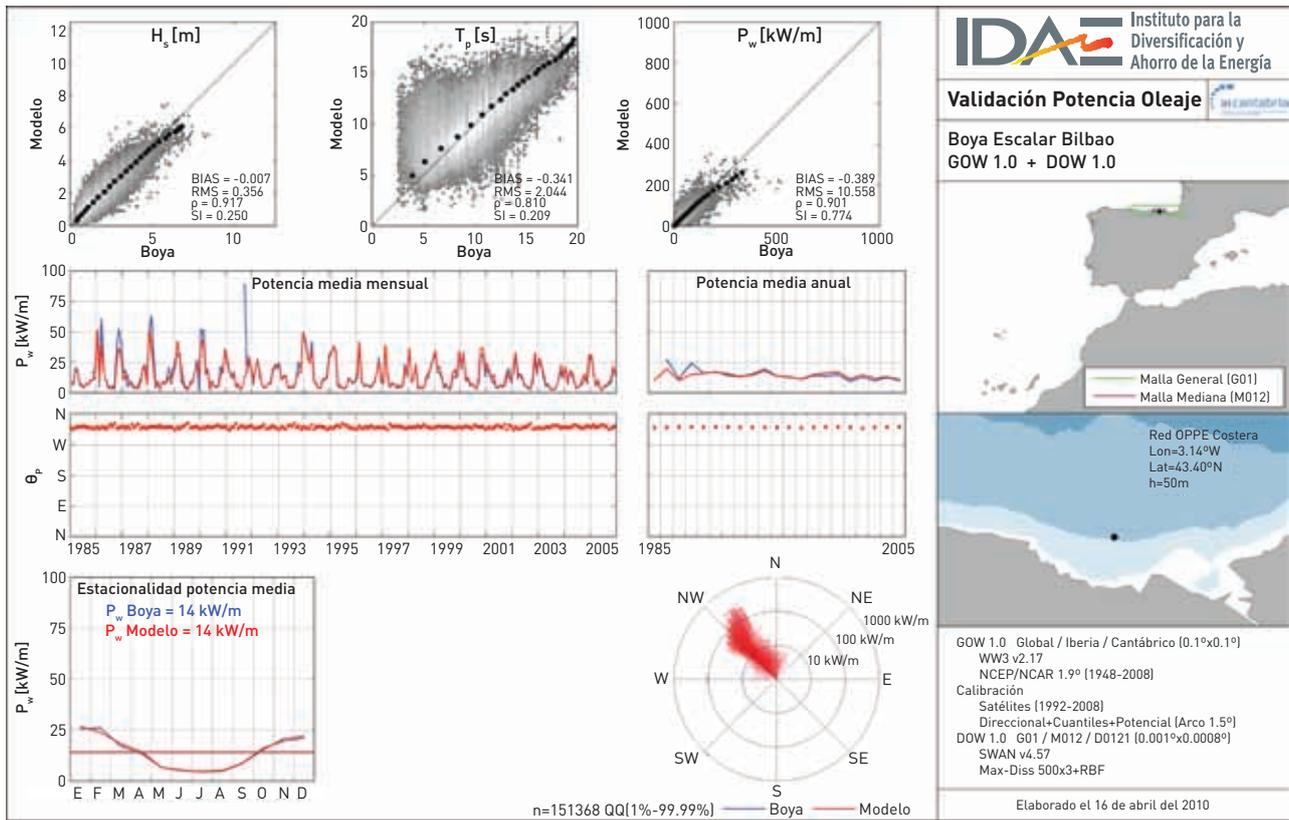
	Nombre	Fondeo (m)	Inicio fondeo	Final fondeo	Lat (°N)	Long (°E)	Red	Comentarios
5	Cost-Gijón	54	2001	-	43,613	-5,670	OPPE Costera	Direccional
6	La Coruña	50	1982	-	43,413	-8,383	OPPE Costera	Escalar
7	Silleiro	70	1991	2006	42,097	-8,930	OPPE Costera	Escalar
8	Sevilla	10	1983	-	36,740	-6,480	OPPE Costera	Escalar
9	Cádiz	22	1983	2003	36,500	-6,330	OPPE Costera	Escalar
10	Cost-Cádiz	22	2001	-	36,500	-6,330	OPPE Costera	Direccional
11	Algeciras-Campamento	84	1993	2006	36,160	-5,390	OPPE Costera	Escalar
12	Cost-Algeciras	55	2004	2005	36,080	-5,420	OPPE Costera	Direccional
13	Ceuta	21	1985	-	35,900	-5,330	OPPE Costera	Escalar
14	Málaga	22	1985	-	36,670	-4,430	OPPE Costera	Escalar
15	Melilla	15	2008	-	35,320	-2,940	OPPE Costera	Escalar
16	Cabo de Gata	35	1991	-	36,710	-2,200	OPPE Costera	Escalar
17	Cabo de Palos	67	1985	-	37,650	-0,640	OPPE Costera	Escalar
18	Alicante	50	1985	2007	38,250	-0,420	OPPE Costera	Escalar
19	Cost-Alicante	52	2006	-	38,250	-0,420	OPPE Costera	Direccional
20	Valencia	20	1985	2005	39,470	-0,280	OPPE Costera	Escalar
21	Cost-Valencia II	48	2005	-	39,520	-0,210	OPPE Costera	Direccional (Valencia Copa)
22	Tarragona	35	1992	-	41,070	1,190	OPPE Costera	Escalar
23	Barcelona	30	2003	2006	41,290	2,150	OPPE Costera	Escalar (Barcelona Sur)

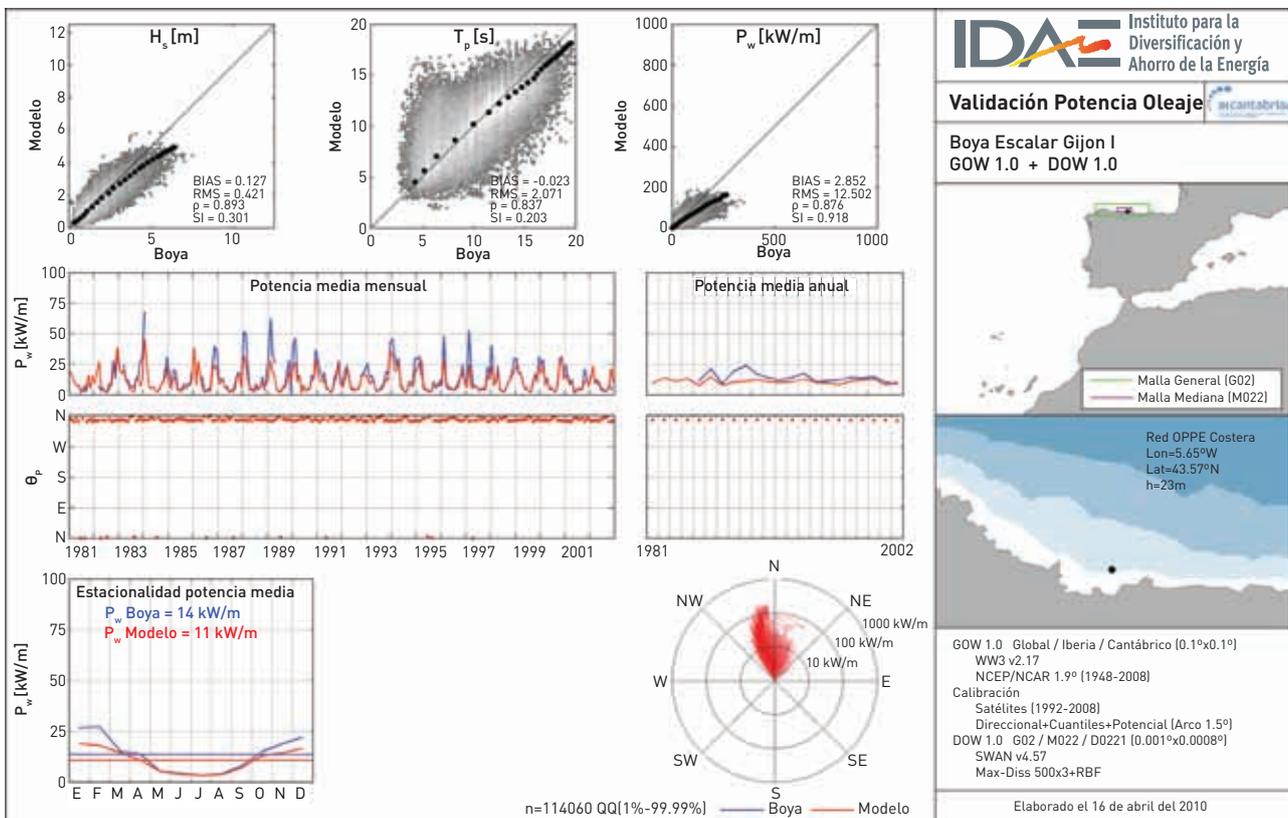
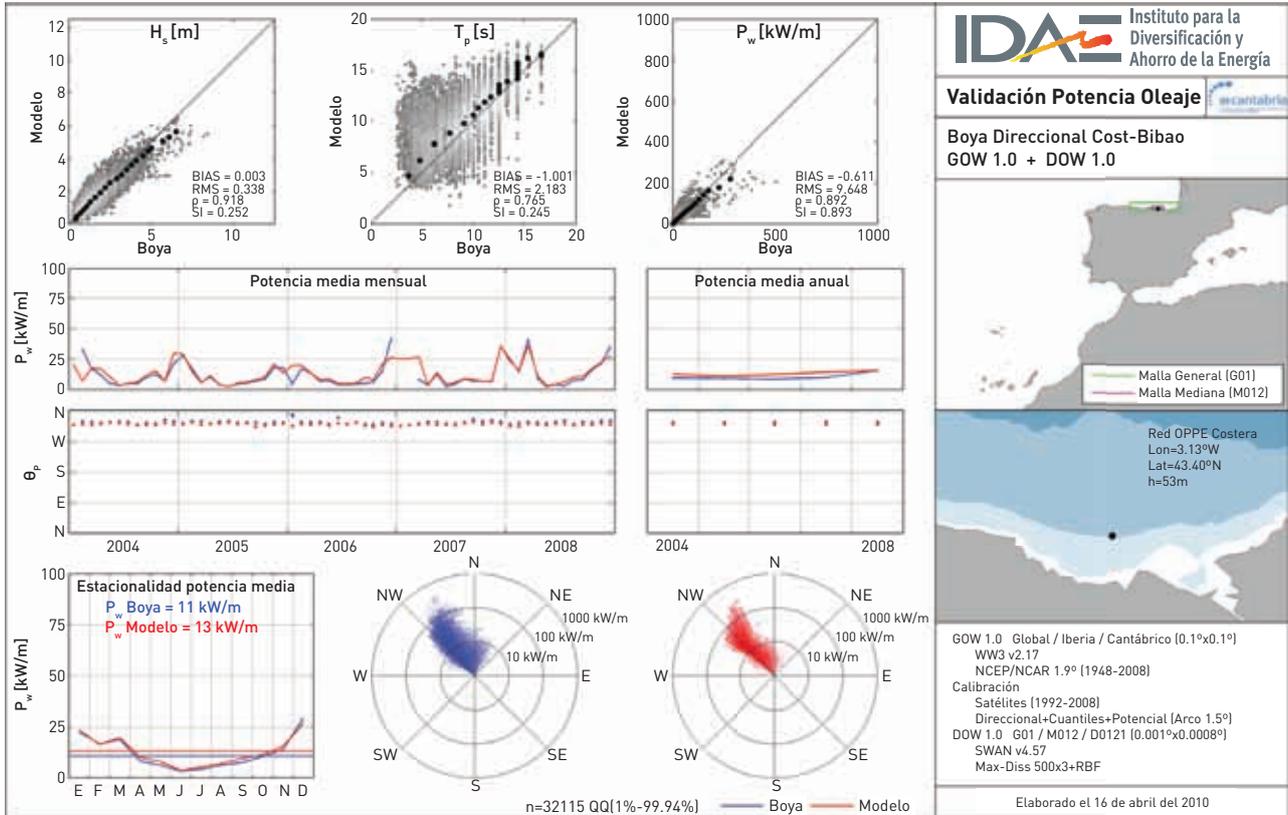
(Continuación)

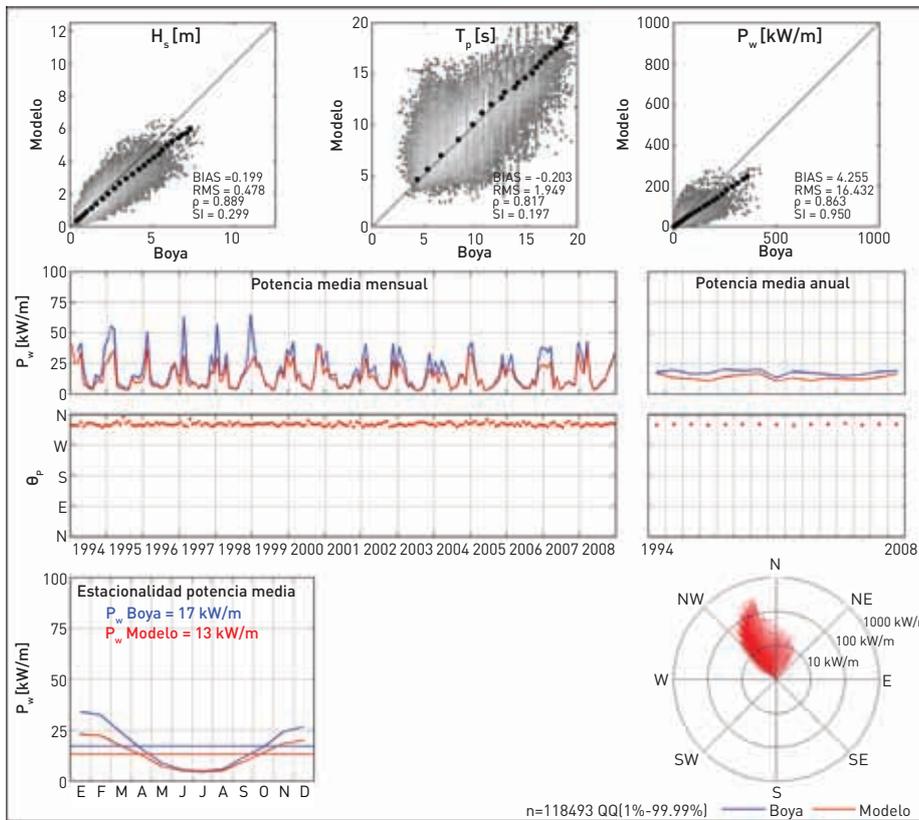
	Nombre	Fondeo (m)	Inicio fondeo	Final fondeo	Lat (°N)	Long (°E)	Red	Comentarios
24	Cost-Barcelona	68	2004	-	41,320	2,210	OPPE Costera	Direccional
25	Palamós	90	1988	-	41,830	3,190	OPPE Costera	Escalar
26	Cap de Pera	46	1989	-	39,650	3,490	OPPE Costera	Escalar
27	Las Palmas I	42	1982	-	28,142	-15,458	OPPE Costera	Escalar
28	Las Palmas II	48	1992	-	28,067	-15,397	OPPE Costera	Escalar (Las Palmas Este)
29	Tenerife	52	1981	2007	28,455	-16,248	OPPE Costera	Escalar
30	Ciérvana Cam	22	2001	-	43,370	-3,070	OPPE Campañas	Direccional
31	Langosteira	40	1998	-	43,360	-8,530	OPPE Campañas	Direccional
32	Santa Cruz	60	2006	-	28,470	-16,240	OPPE Campañas	Direccional
33	Granadilla	22	2007	-	28,090	-16,477	OPPE Campañas	Escalar
34	Bilbao-Vizcaya Ext	600	1990	-	43,640	-3,050	OPPE Exterior	Direccional
35	Cabo de Peñas Ext	450	1997	-	43,740	-6,170	OPPE Exterior	Direccional
36	Estaca de Bares Ext	380	1996	-	44,060	-7,620	OPPE Exterior	Escalar 1997 Direccional
37	Villano-Sisargas Ext	390	1998	-	43,500	-9,210	OPPE Exterior	Direccional
38	Cabo Silleiro Ext	320	1998	-	42,130	-9,390	OPPE Exterior	Escalar 2003 Direccional
39	Alborán Ext	580	1997	2006	36,250	-5,030	OPPE Exterior	Escalar 2003 Direccional
40	Cabo de Gata Ext	530	1998	-	36,570	-2,340	OPPE Exterior	Escalar 2003 Direccional
41	Gran Canaria Ext	780	1997	-	28,200	-15,800	OPPE Exterior	Escalar 2003 Direccional
42	Tenerife Ext	710	1998	-	28,000	-16,580	OPPE Exterior	Escalar 2003 Direccional

(Continuación)

	Nombre	Fondeo (m)	Inicio fondeo	Final fondeo	Lat (°N)	Long (°E)	Red	Comentarios
43	Rosas Gen	46	1990	-	42,180	3,200	XIOM Cataluña	Escalar
44	Tordera Gen	74	1984	-	41,650	2,820	XIOM Cataluña	Escalar 2007 Direccional
45	Llobregat Gen	45	1984	-	41,278	2,140	XIOM Cataluña	Escalar 2004 Direccional
46	Tortosa Gen	60	1990	-	40,720	0,980	XIOM Cataluña	Direccional
47	Pasaia	25	2003	-	43,338	-1,925	AZTI País Vasco	Escalar







**IDAIE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

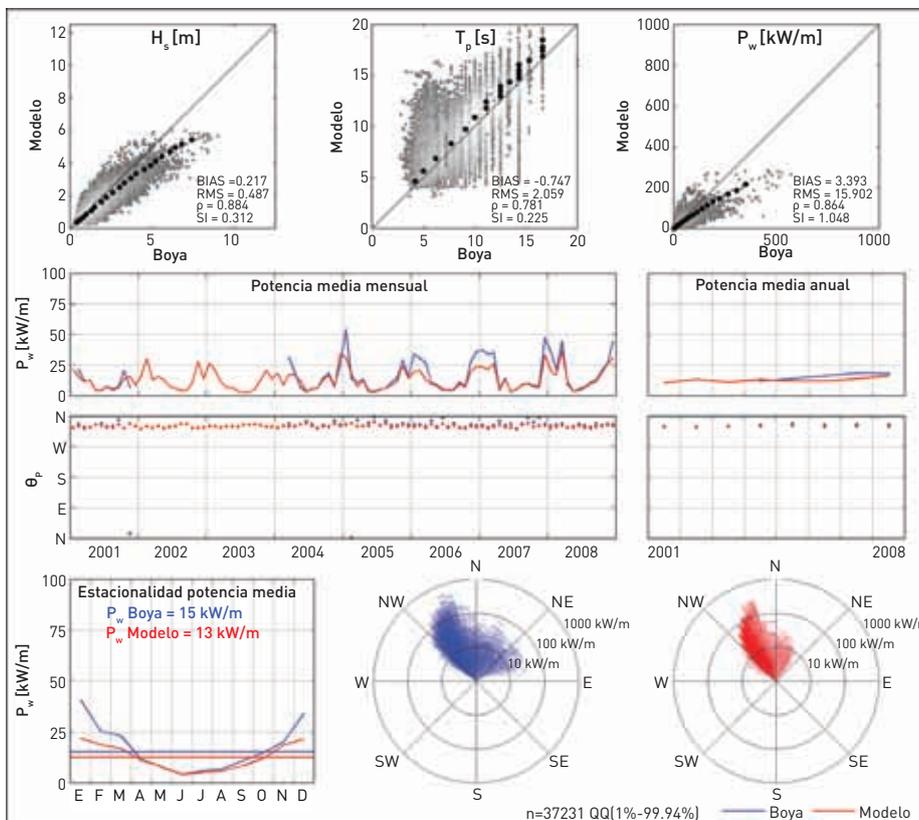
**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Escalar Gijón II**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

Red OPPE Costera  
Lon=5.67°W  
Lat=43.61°N  
h=43m

GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico [0.1°x0.1°]  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° [1948-2008]  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G02 / M022 / D0221 [0.001°x0.0008°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 19 de abril del 2010



**IDAIE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

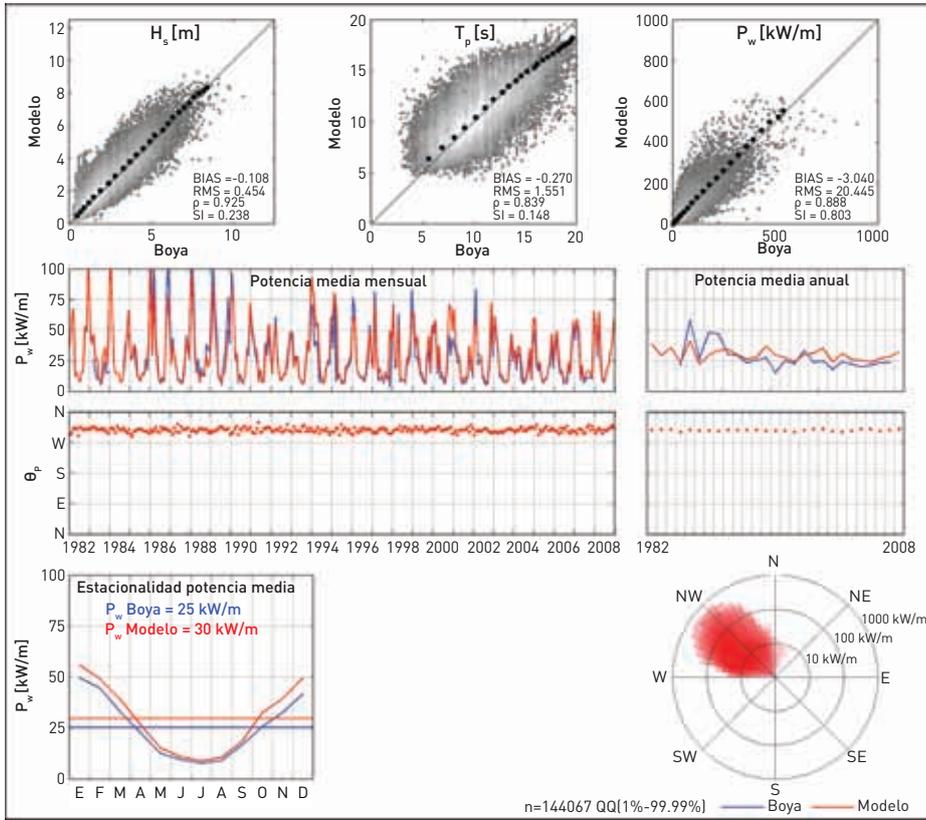
**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Direccional Cost-Gijón**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

Red OPPE Costera  
Lon=5.67°W  
Lat=43.61°N  
h=54m

GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico [0.1°x0.1°]  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° [1948-2008]  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G02 / M022 / D0221 [0.001°x0.0008°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA E** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

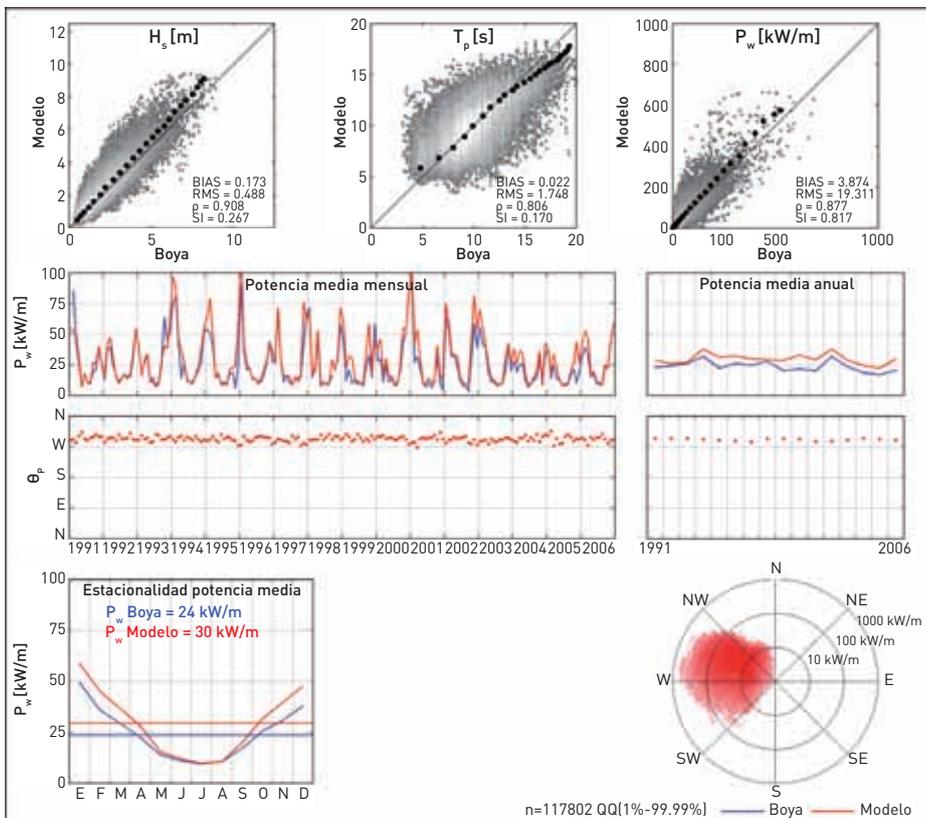
**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Escalar La Coruña**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

Red OPPE Costera  
Lon=8.38°W  
Lat=43.41°N  
h=50m

GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico [0.1°x0.1°]  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G03 / M032 / D0321 [0.001°x0.0008°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA E** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

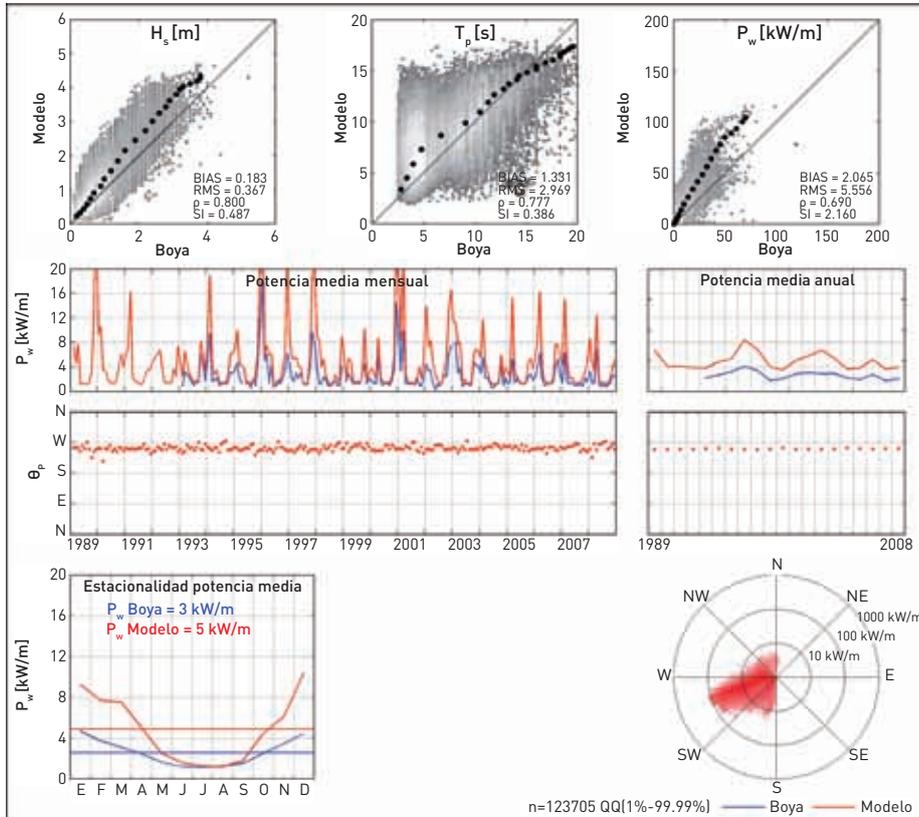
**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Escalar Silleiro**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

Red OPPE Costera  
Lon=8.93°W  
Lat=42.10°N  
h=70m

GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico [0.1°x0.1°]  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G04 / M042 / D0421 [0.001°x0.0008°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

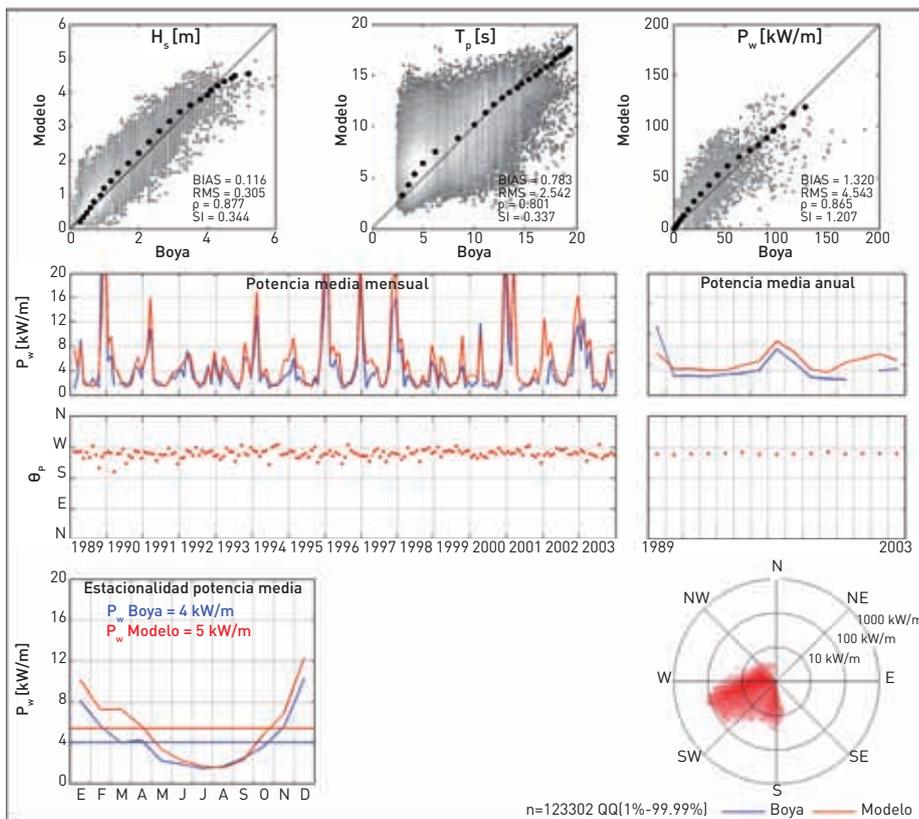
**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Escalar Sevilla**  
GOW 2.1 + DOW 2.1

Red OPPE Costera  
Lon=6.48°W  
Lat=36.74°N  
h=10m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM02 (0.0025°x0.0025°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 20 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

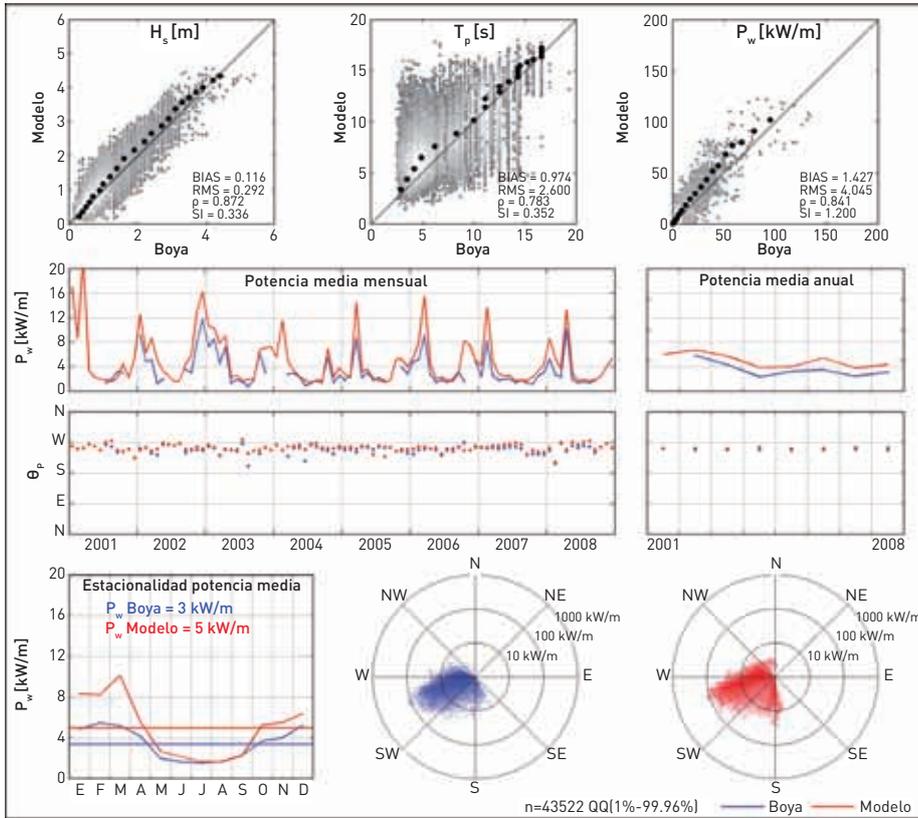
**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Escalar Cadiz**  
GOW 2.1 + DOW 2.1

Red OPPE Costera  
Lon=6.33°W  
Lat=36.50°N  
h=22m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM02 / DM021 (0.0005°x0.0005°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 20 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Direccional Cost-Cadiz GOW 2.1 + DOW 2.1**

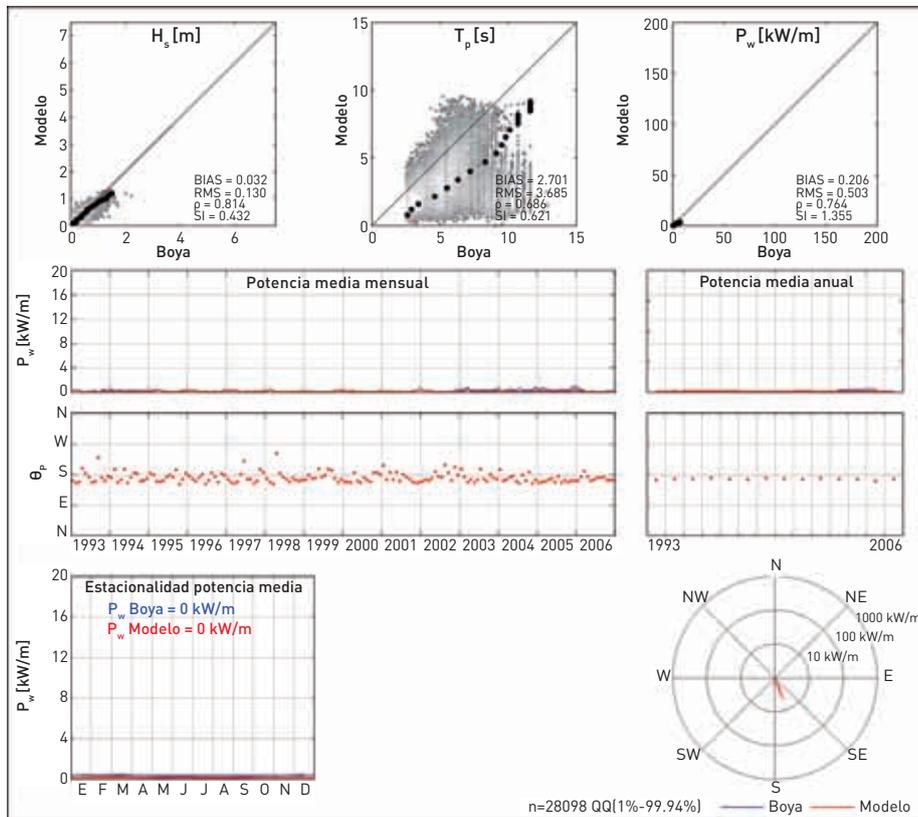
Red OPPE Costera  
 Lon=6.33°W  
 Lat=36.50°N  
 h=22m

Malla General (GM02)

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. (0.125°x0.125°)  
 WW3 v2.17  
 ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)

Calibración  
 Satélites (1992-2008)  
 Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
 DOW 2.1 GM02 / DM021 (0.0005°x0.0005°)  
 SWAN v4.57  
 Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 20 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Escalar Algeciras-Campamento GOW 2.1 + DOW 2.1**

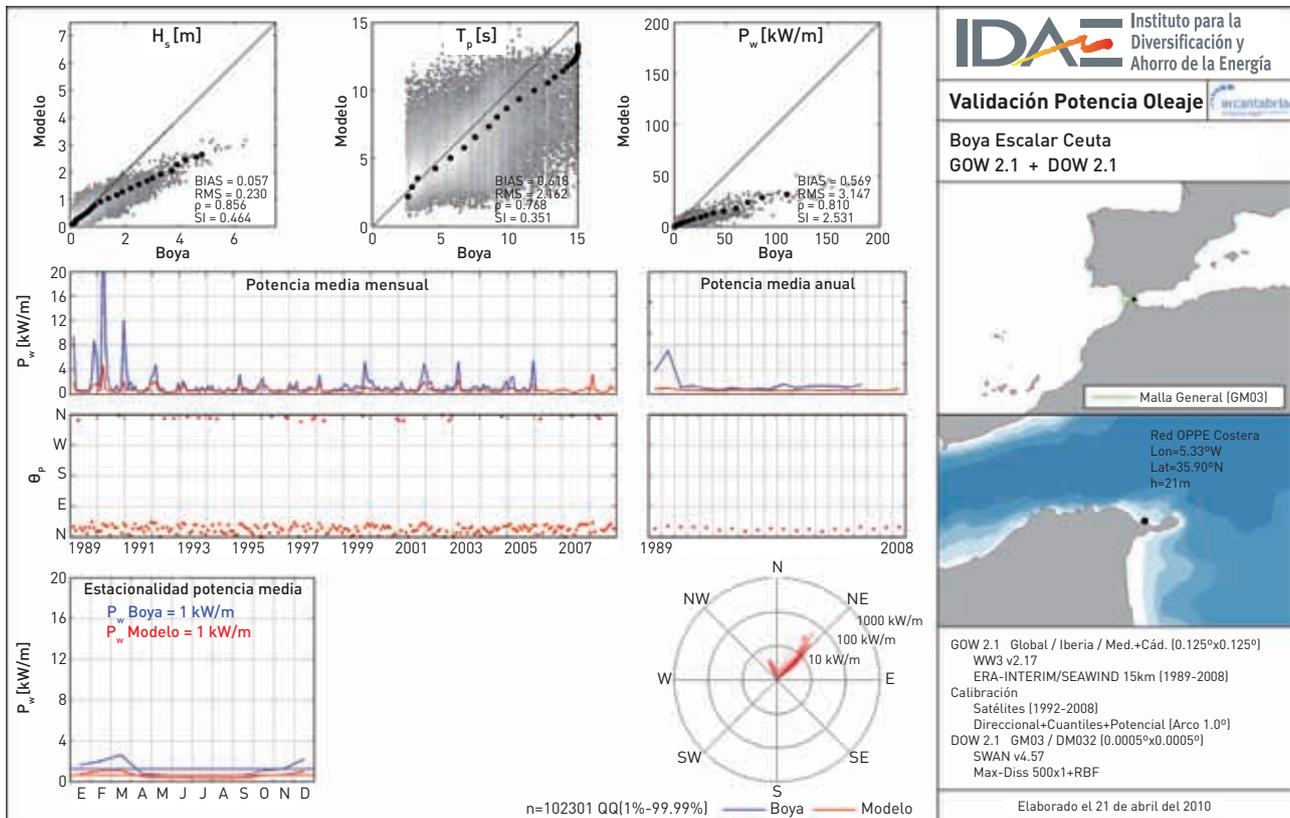
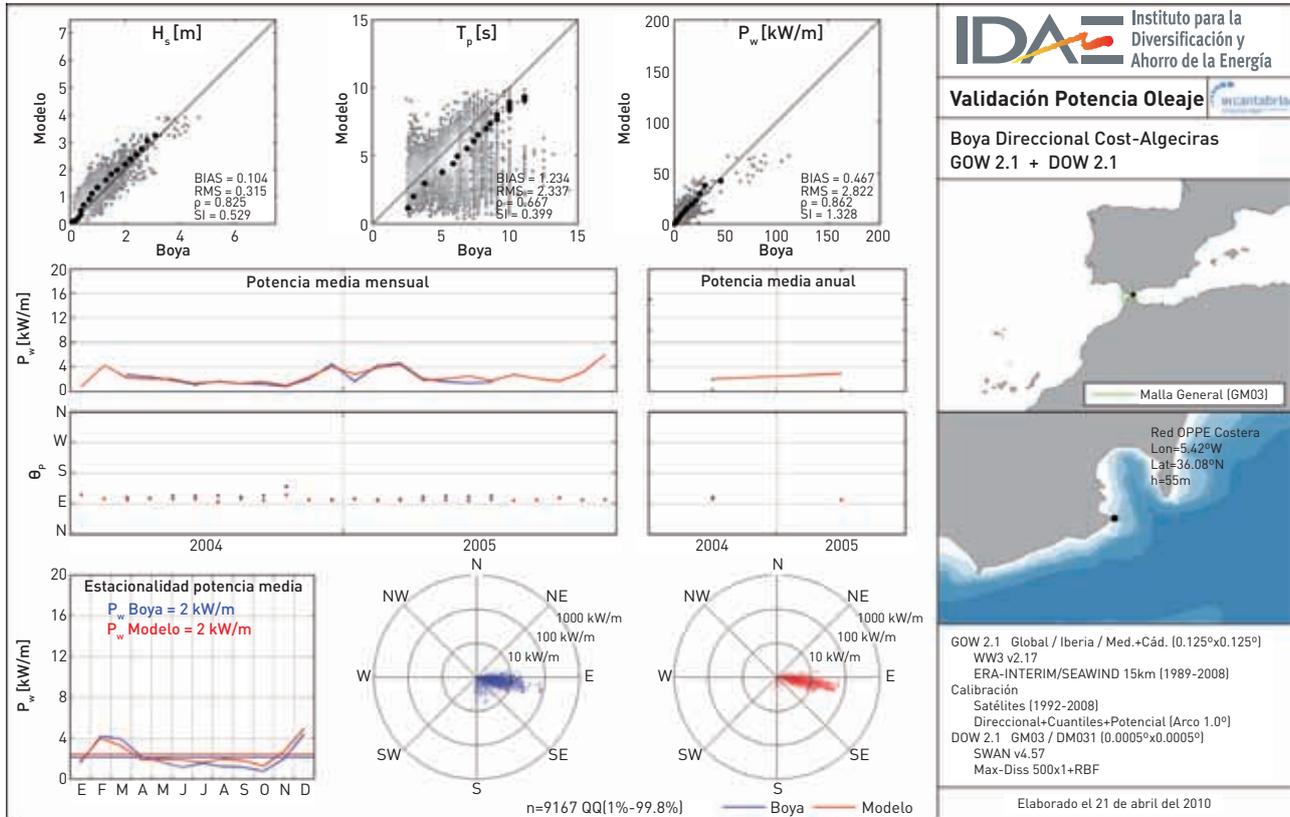
Red OPPE Costera  
 Lon=5.39°W  
 Lat=36.16°N  
 h=84m

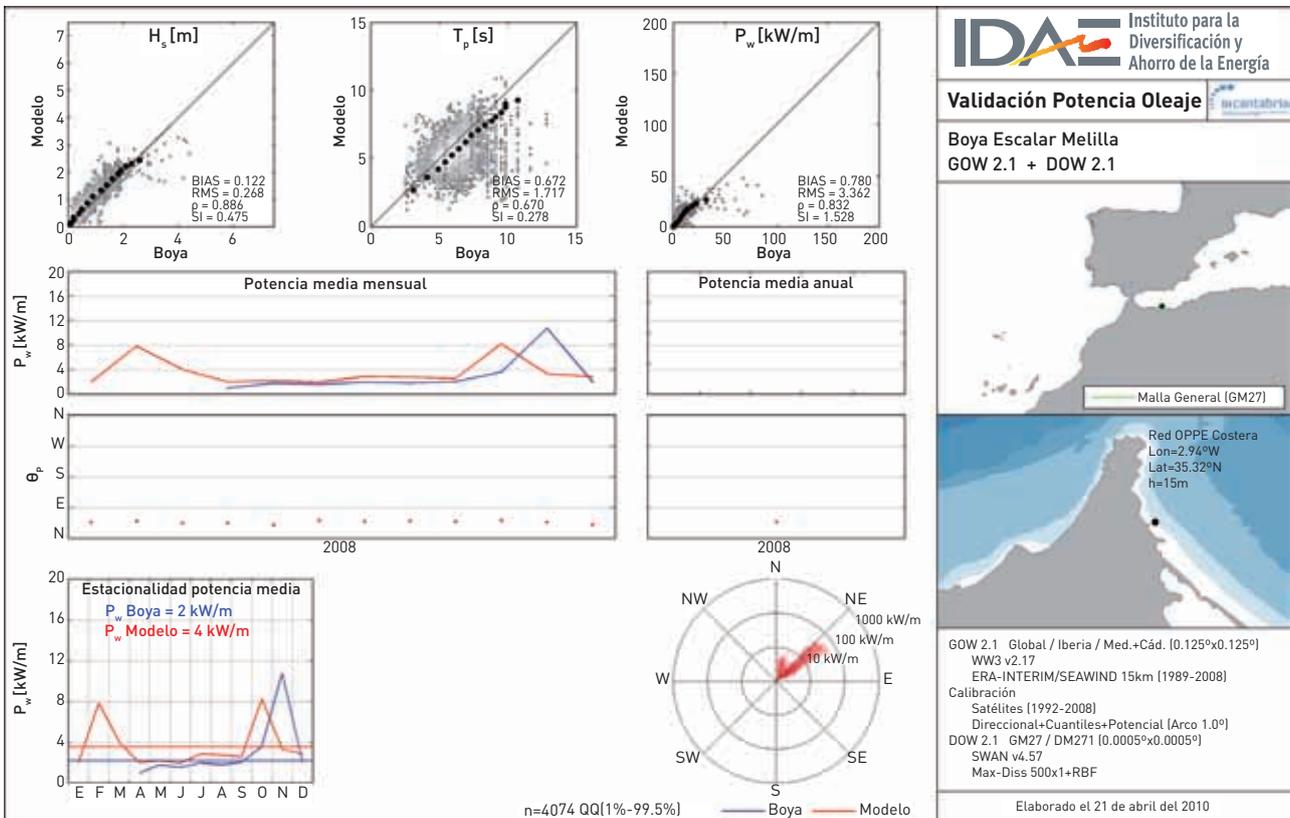
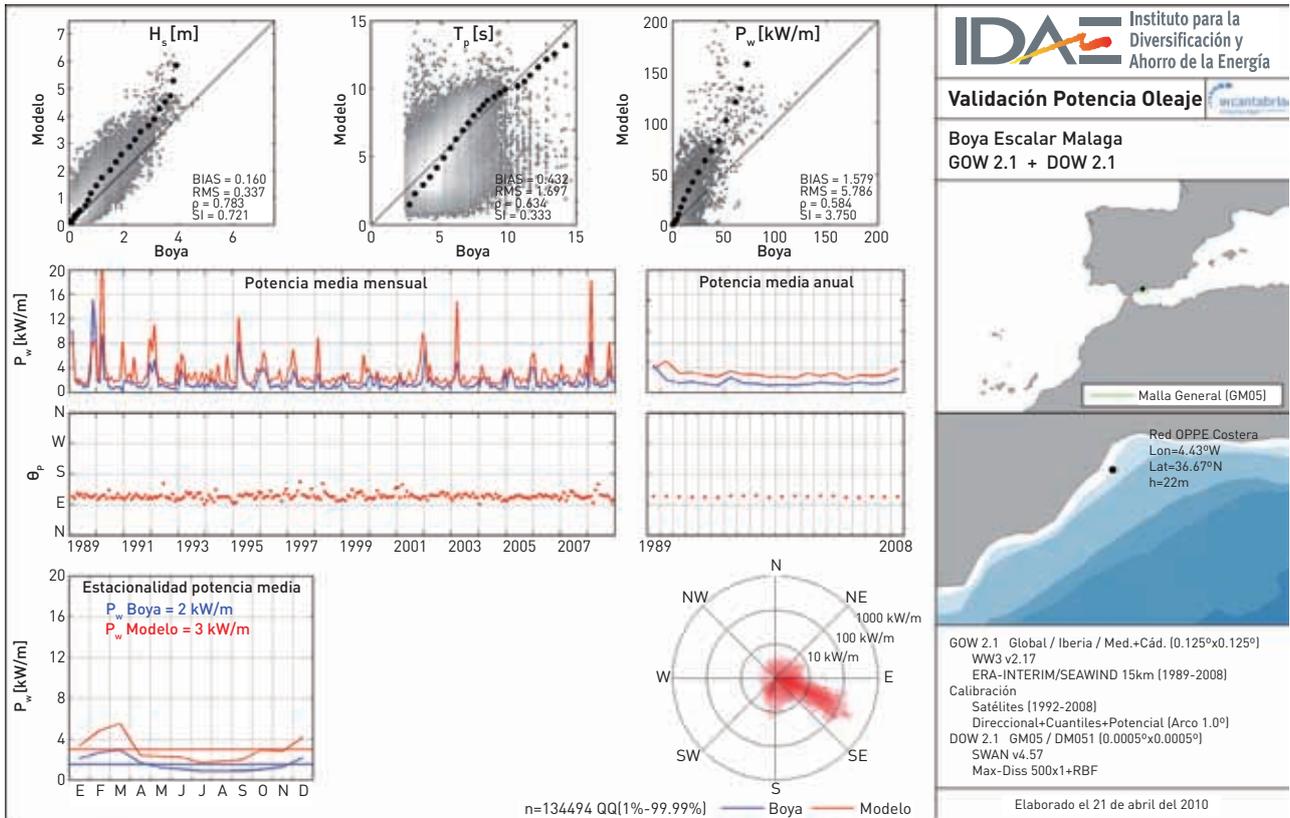
Malla General (GM03)

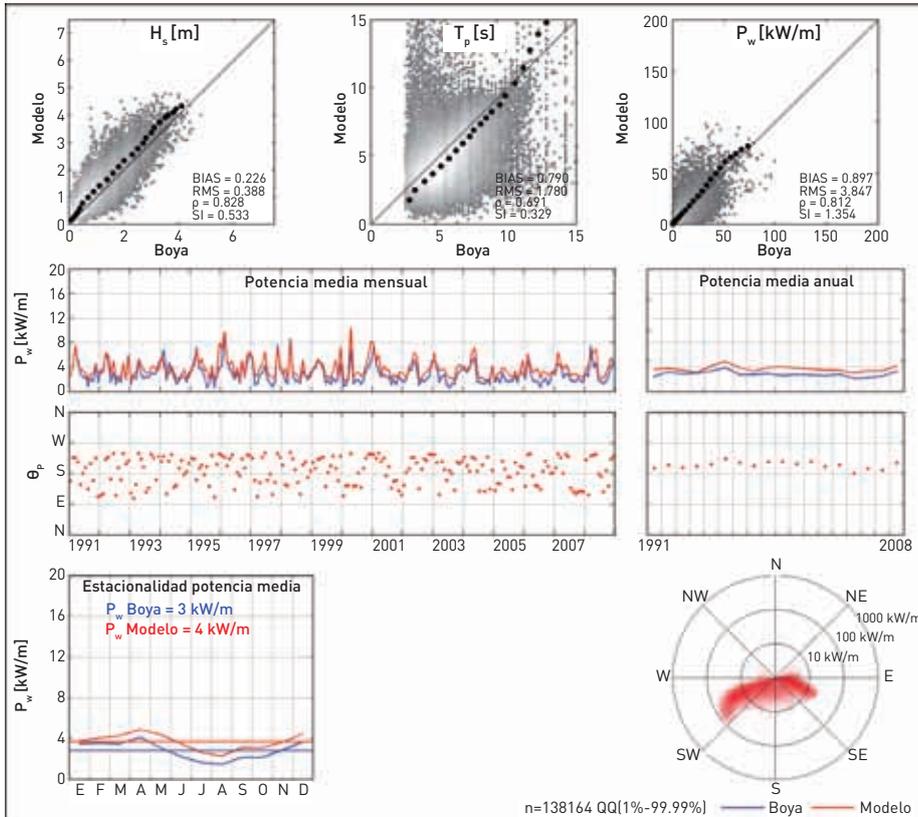
GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. (0.125°x0.125°)  
 WW3 v2.17  
 ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)

Calibración  
 Satélites (1992-2008)  
 Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
 DOW 2.1 GM03 / DM031 (0.0005°x0.0005°)  
 SWAN v4.57  
 Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010







**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

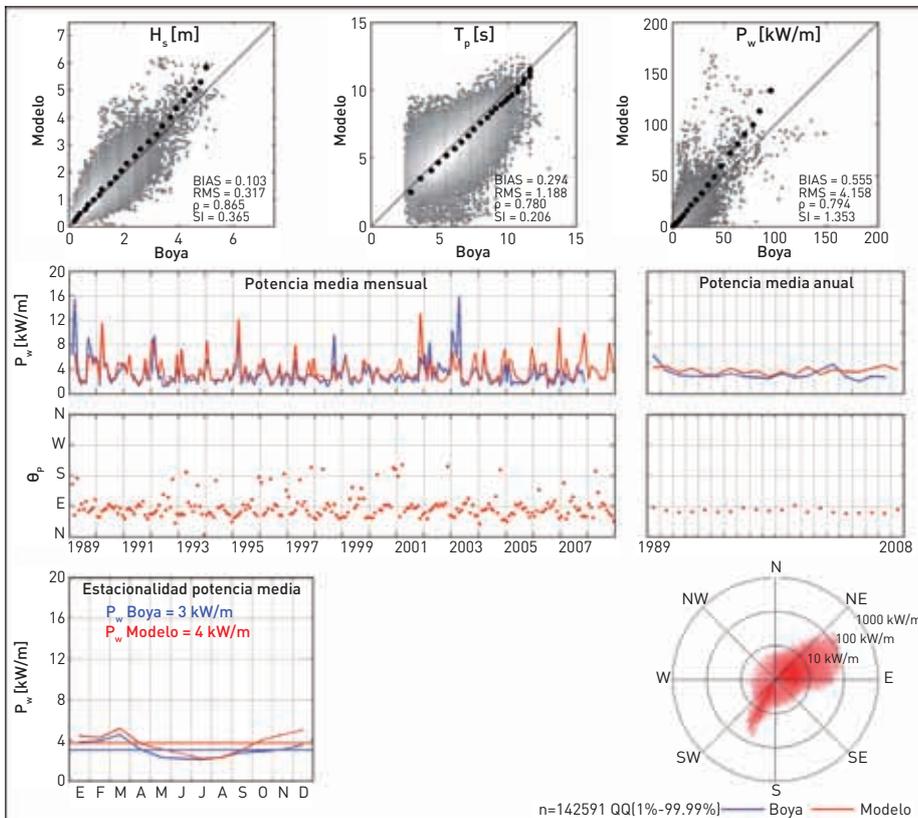
**Boya Escalar Cabo de Gata**  
**GOW 2.1 + DOW 2.1**

Malla General (GM08)

Red OPPE Costera  
 Lon=2.20°W  
 Lat=36.71°N  
 h=35m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. (0.125°x0.125°)  
 WW3 v2.17  
 ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
 Calibración Satélites (1992-2008)  
 Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
 DOW 2.1 GM08 (0.0025°x0.0025°)  
 SWAN v4.57  
 Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

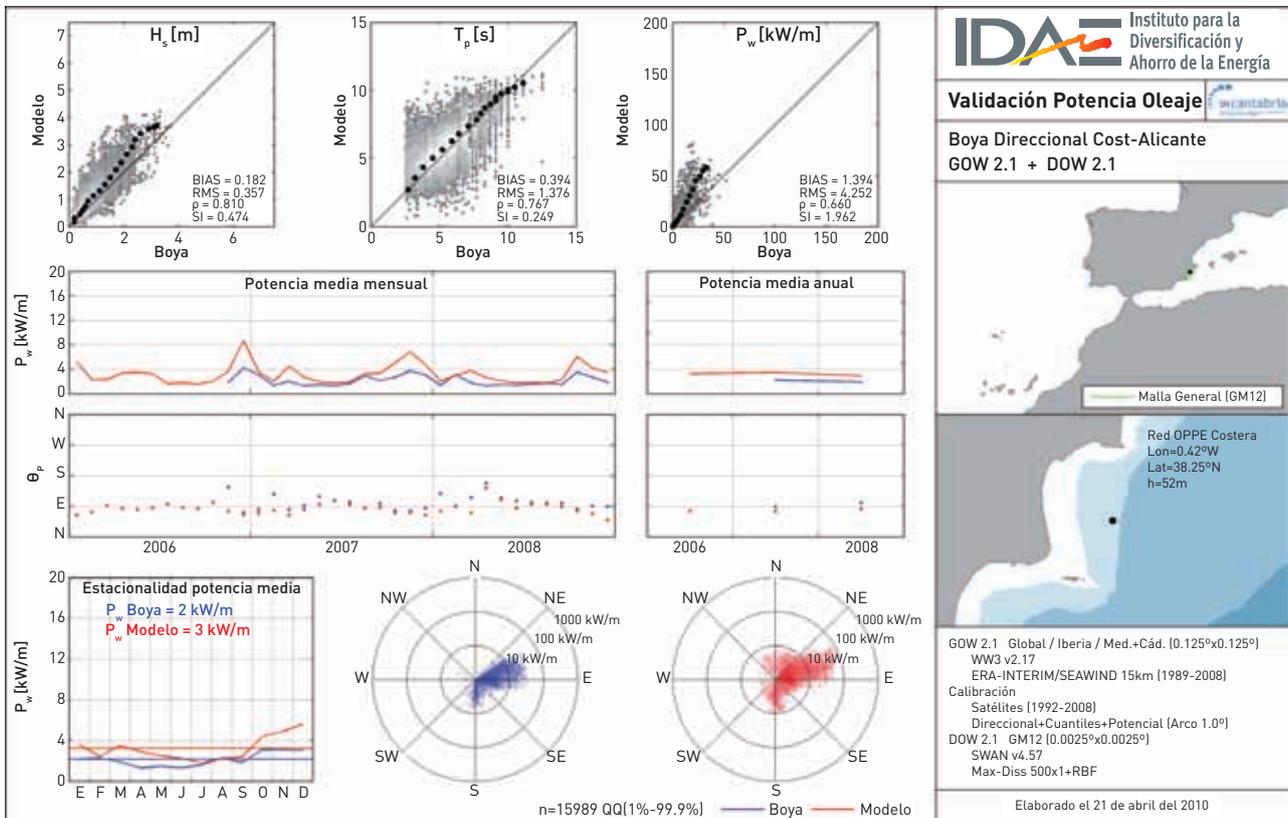
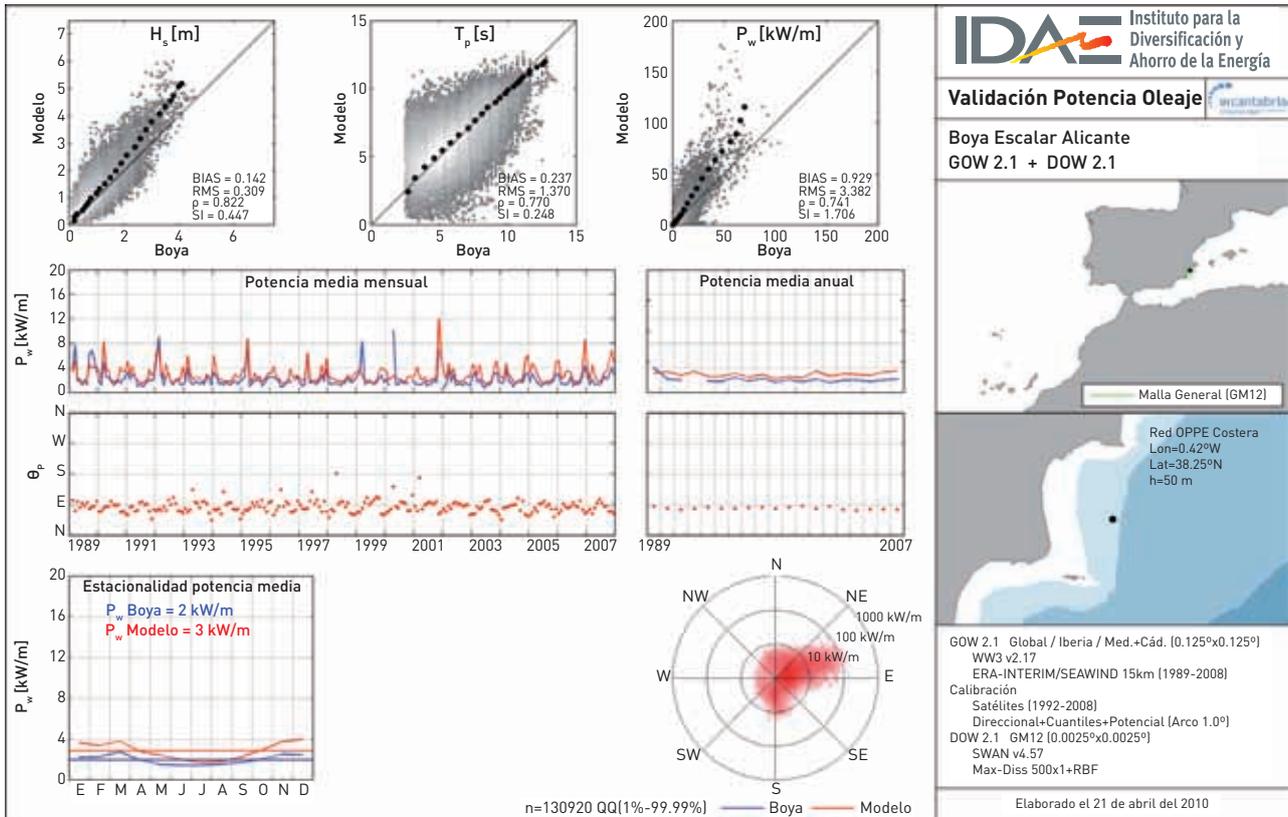
**Boya Escalar Cabo de Palos**  
**GOW 2.1 + DOW 2.1**

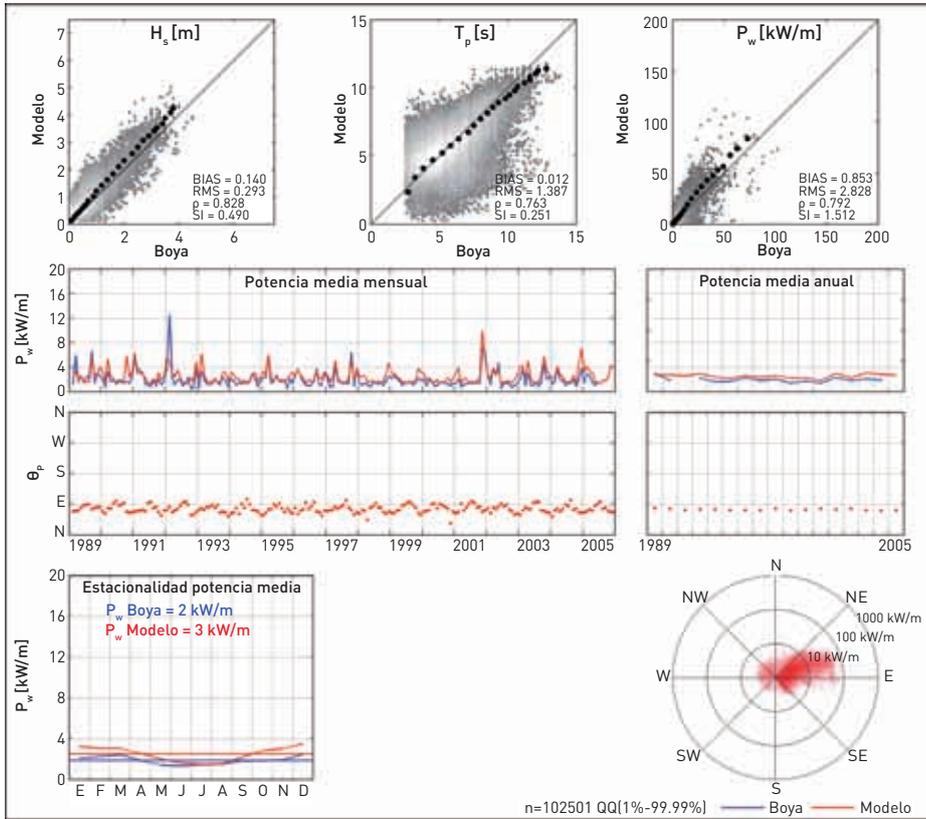
Malla General (GM11)

Red OPPE Costera  
 Lon=0.64°W  
 Lat=37.65°N  
 h=67m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. (0.125°x0.125°)  
 WW3 v2.17  
 ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
 Calibración Satélites (1992-2008)  
 Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
 DOW 2.1 GM11 (0.0025°x0.0025°)  
 SWAN v4.57  
 Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010





**IDAIE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

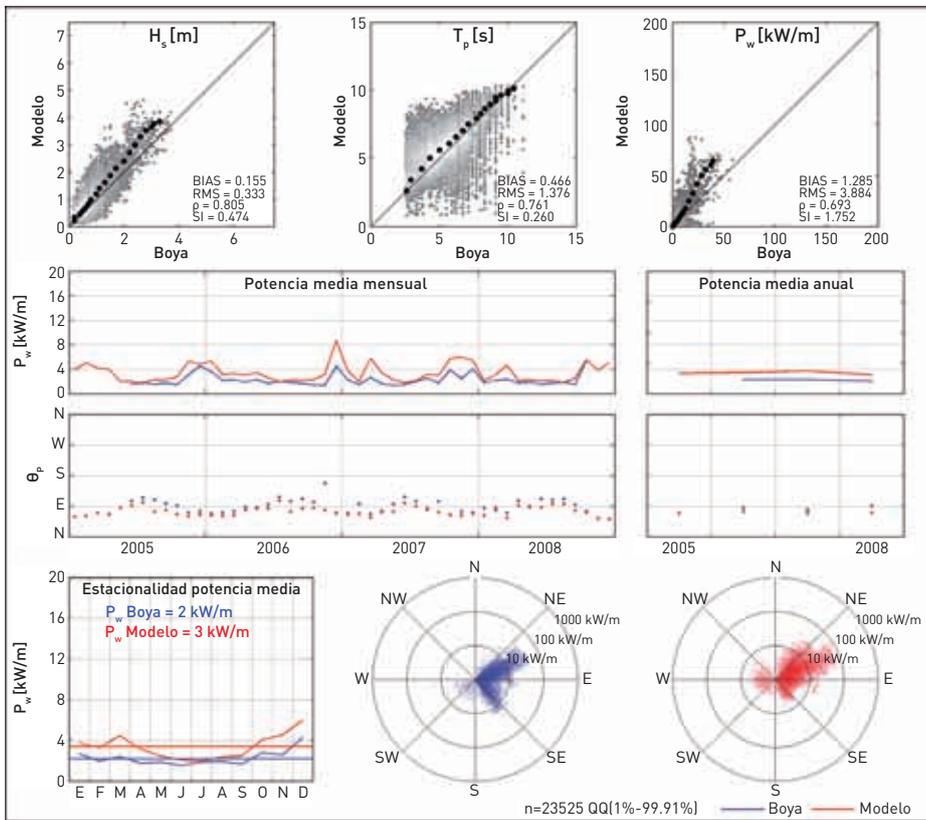
**Boya Escalar Valencia GOW 2.1 + DOW 2.1**

Red OPPE Costera  
Lon=0.28°W  
Lat=39.47°N  
h=20m

Malla General (GM14)

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM//SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM14 / DM141 [0.0005°x0.0005°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDAIE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

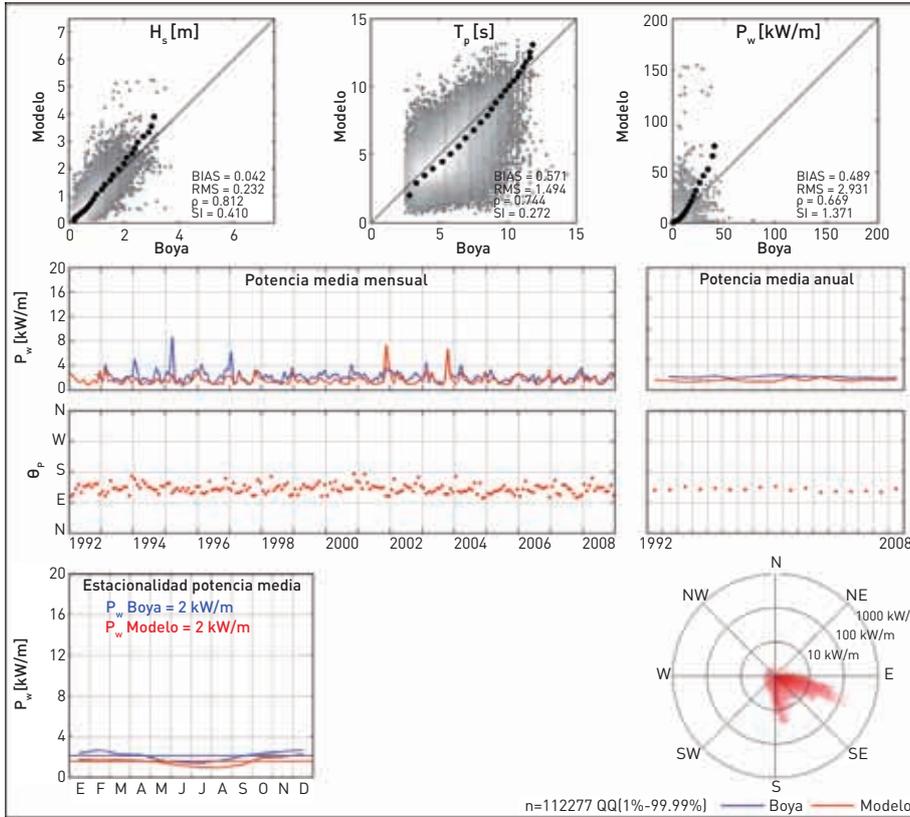
**Boya Direccional Cost-Valencia II GOW 2.1 + DOW 2.1**

Red OPPE Costera  
Lon=0.21°W  
Lat=39.52°N  
h=48m

Malla General (GM14)

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM//SEAWIND 15km (1989-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
DOW 2.1 GM14 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Escalar Tarragona**  
 GOW 2.1 + DOW 2.1

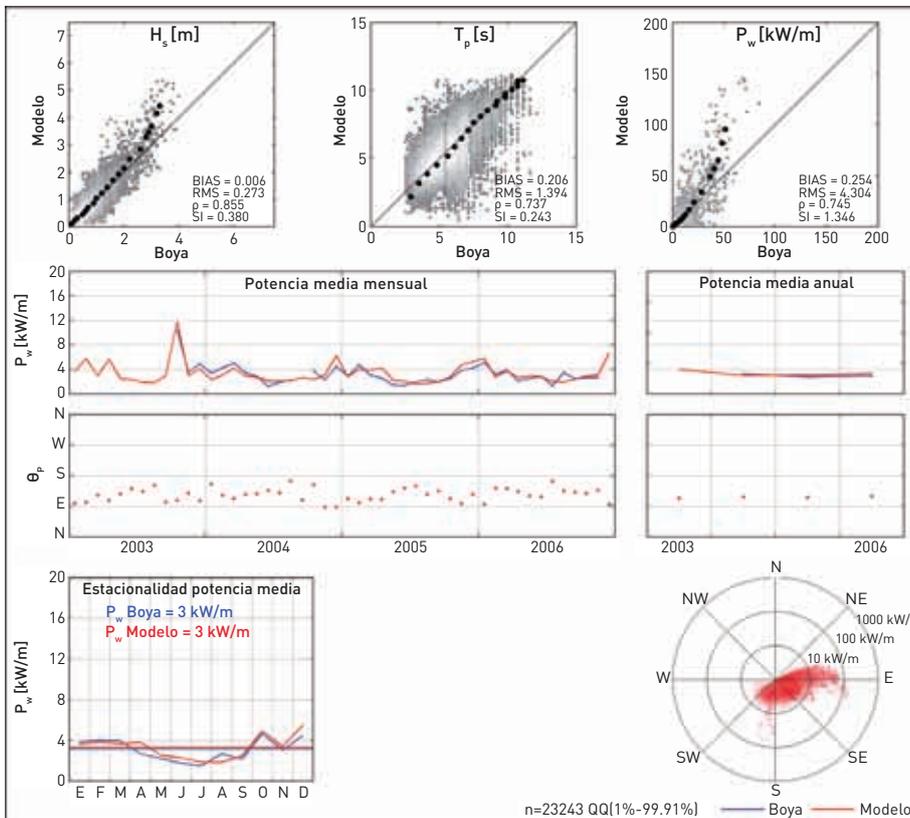
Red OPPE Costera  
 Lon=1.19°E  
 Lat=41.07°N  
 h=35m

Malla General (GM18)

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád (0.125°x0.125°)  
 WW3 v2.17  
 ERA-INTERIM//SEAWIND 15km (1989-2008)

Calibración  
 Satélites (1992-2008)  
 Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
 DOW 2.1 GM18 (0.0025°x0.0025°)  
 SWAN v4.57  
 Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 16 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Escalar Barcelona**  
 GOW 2.1 + DOW 2.1

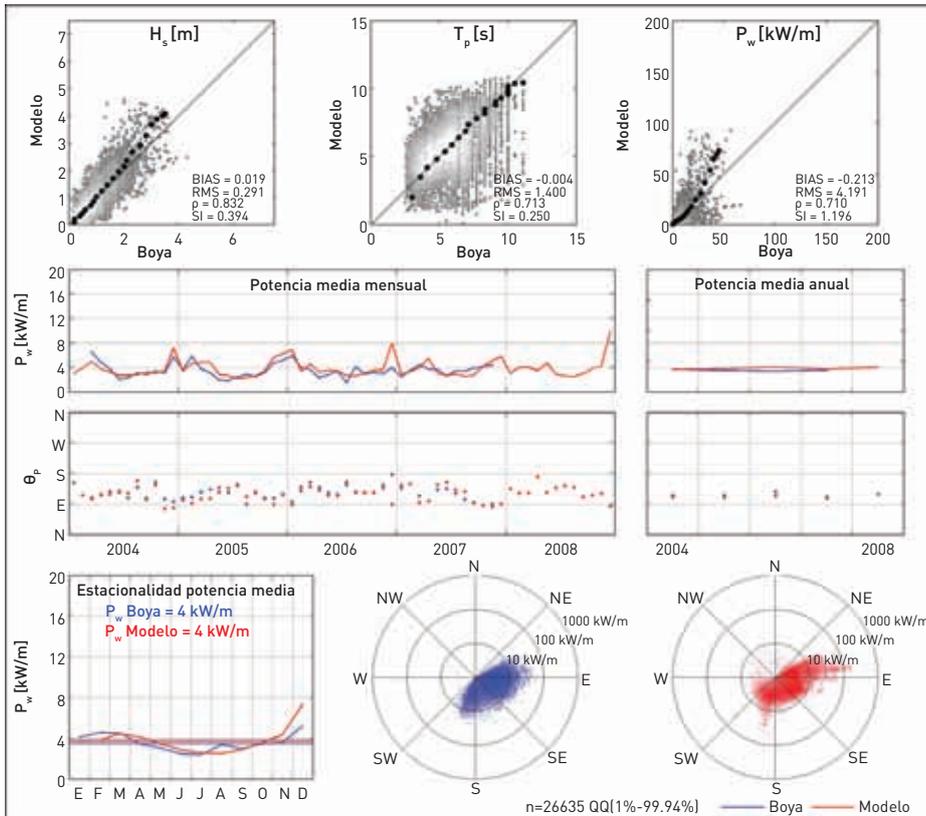
Red OPPE Costera  
 Lon=2.15°E  
 Lat=41.29°N  
 h=30m

Malla General (GM19)

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád (0.125°x0.125°)  
 WW3 v2.17  
 ERA-INTERIM//SEAWIND 15km (1989-2008)

Calibración  
 Satélites (1992-2008)  
 Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
 DOW 2.1 GM19 (0.0025°x0.0025°)  
 SWAN v4.57  
 Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

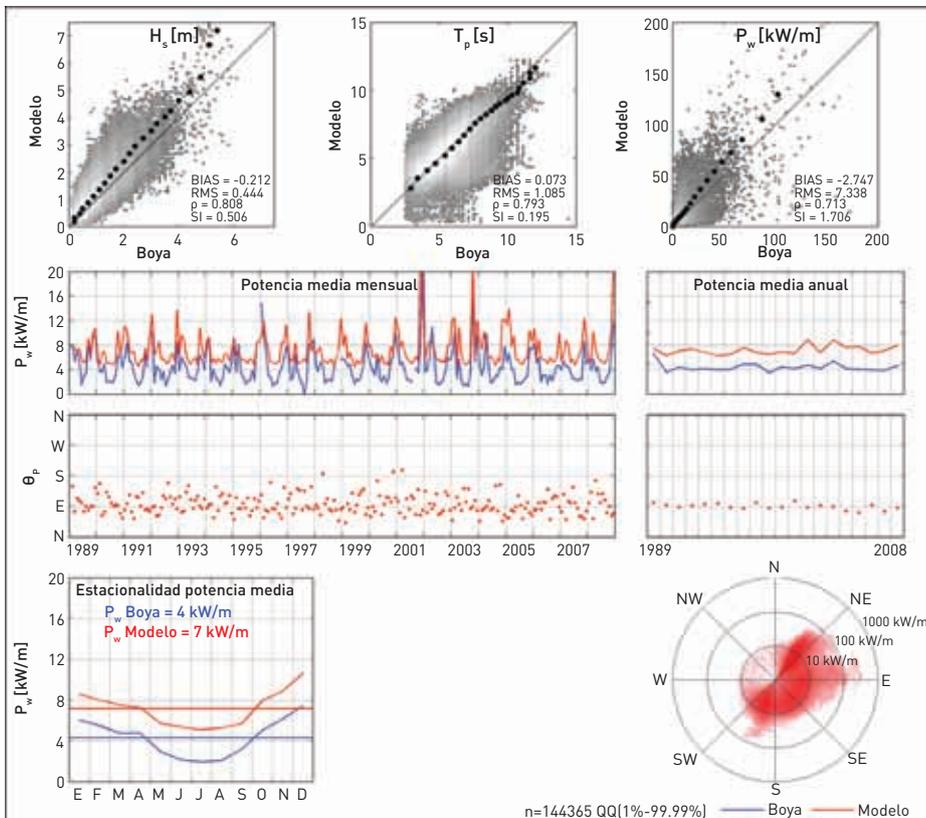
**Boya Direccional Cost-Barcelona**  
GOW 2.1 + DOW 2.1

Red OPPE Costera  
Lon=2.21°E  
Lat=41.32°N  
h=68m

Malla General (GM19)

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. (0.125°x0.125°)  
 WW3 v2.17  
 ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
 Calibración Satélites (1992-2008)  
 Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
 DOW 2.1 GM19 / DM191 (0.0005°x0.0005°)  
 SWAN v4.57  
 Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

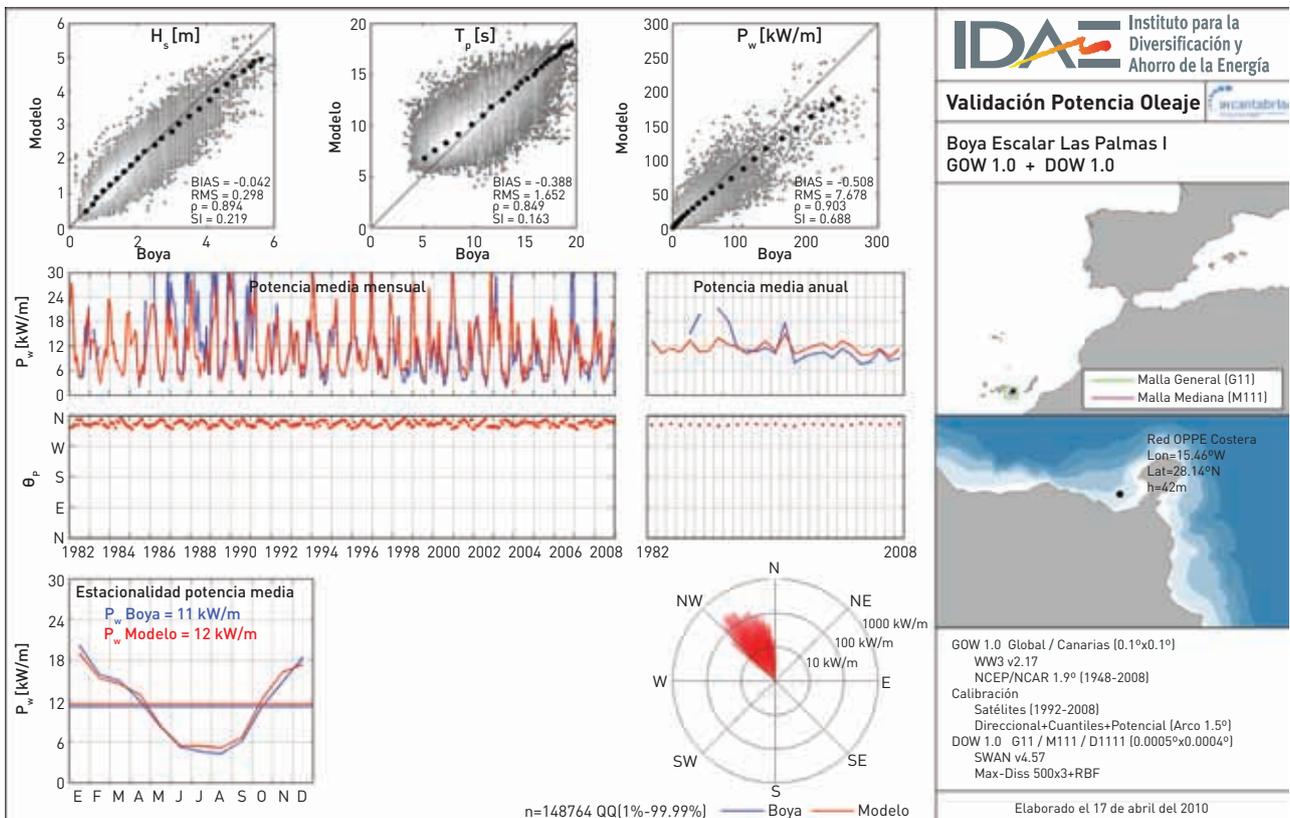
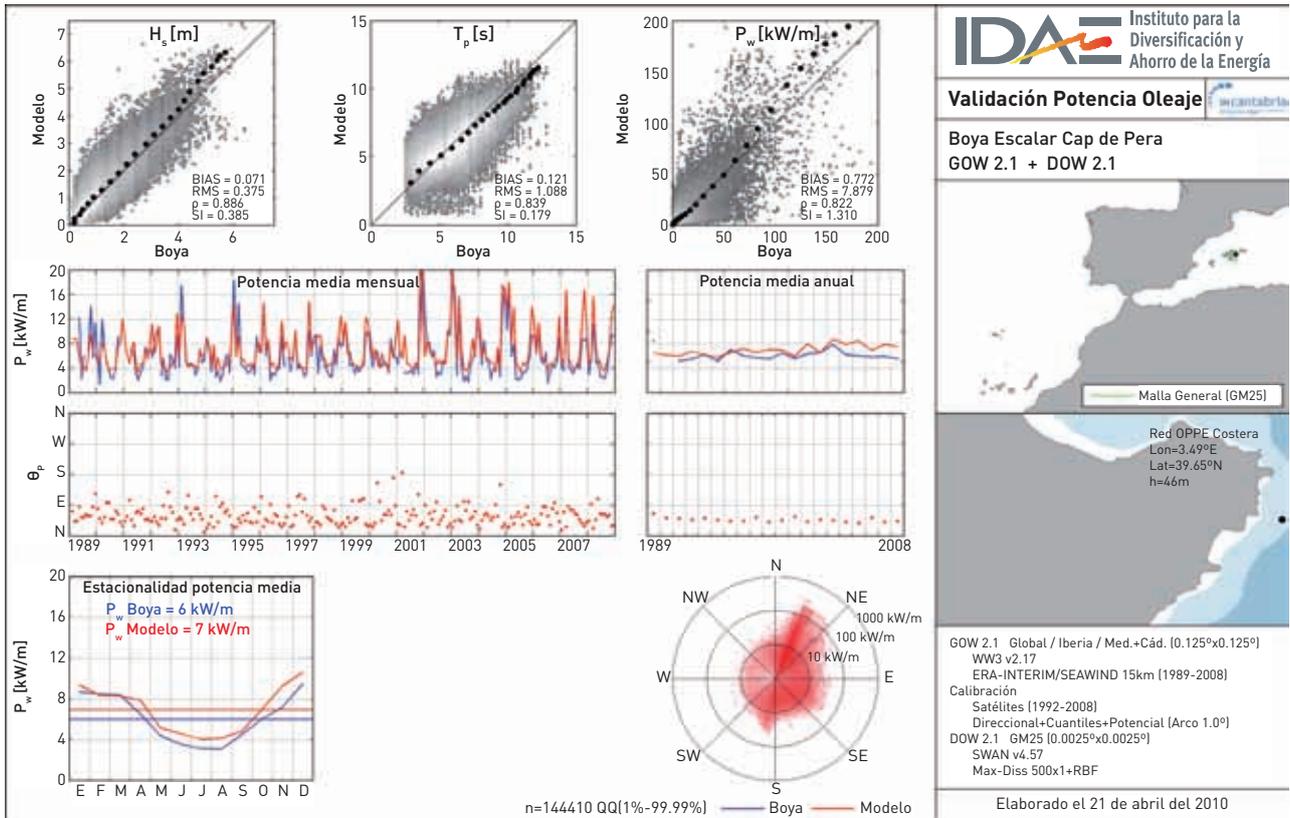
**Boya Escalar Palamos**  
GOW 2.1 + DOW 2.1

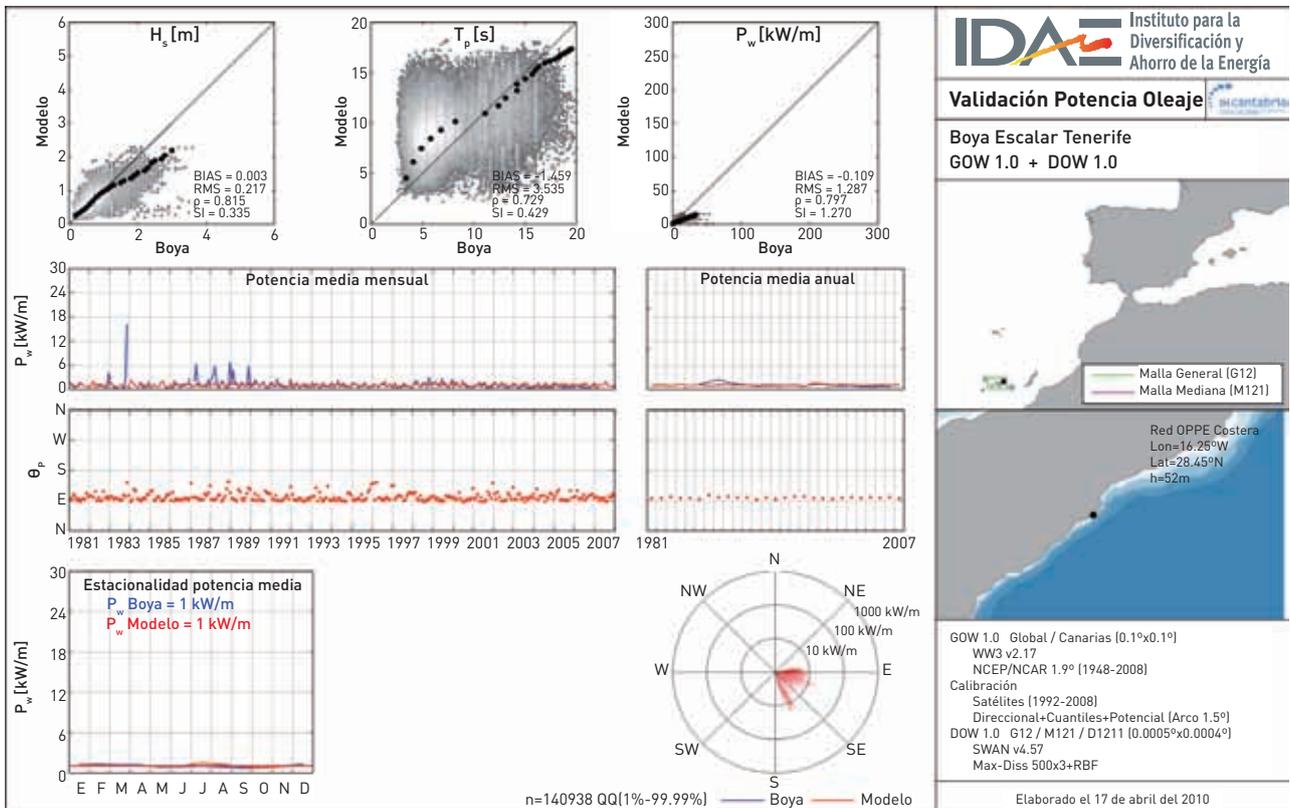
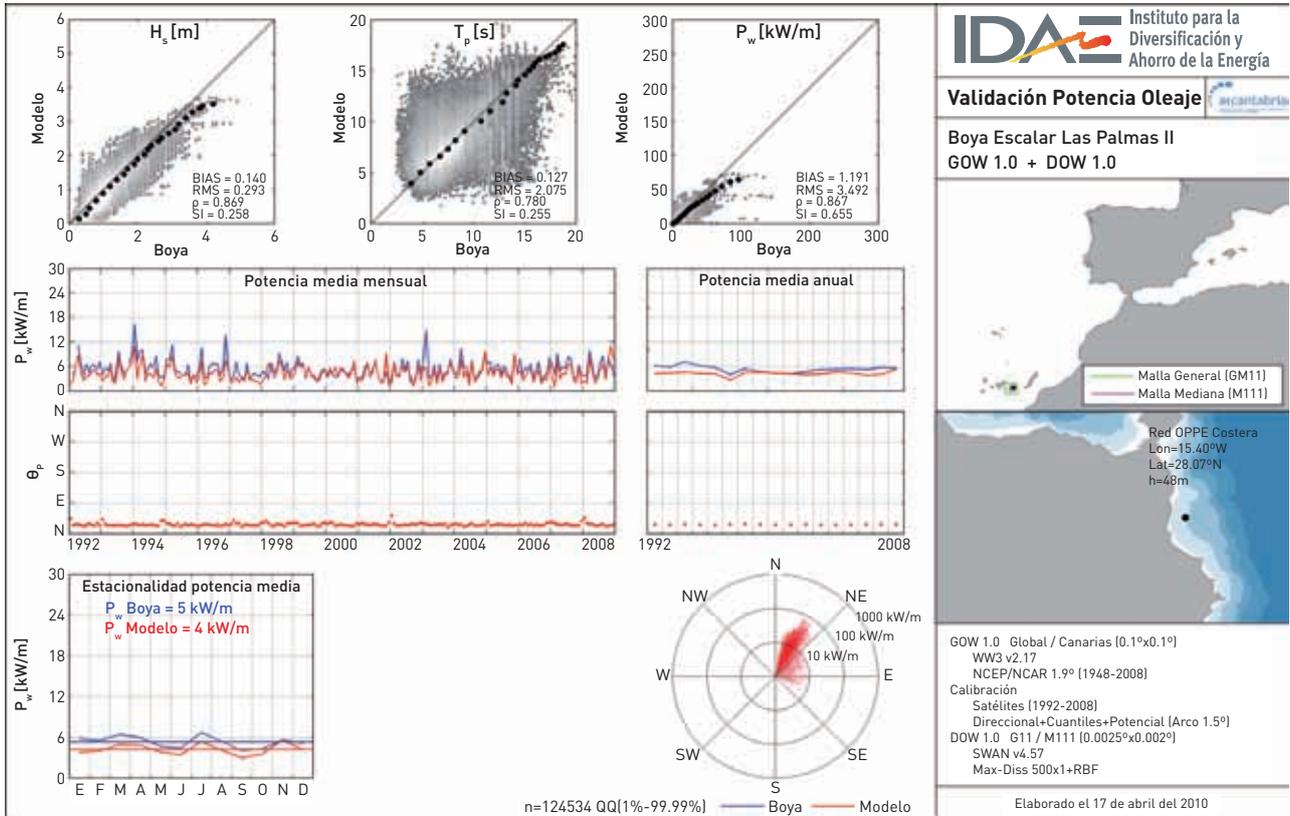
Red OPPE Costera  
Lon=3.19°E  
Lat=41.83°N  
h=90m

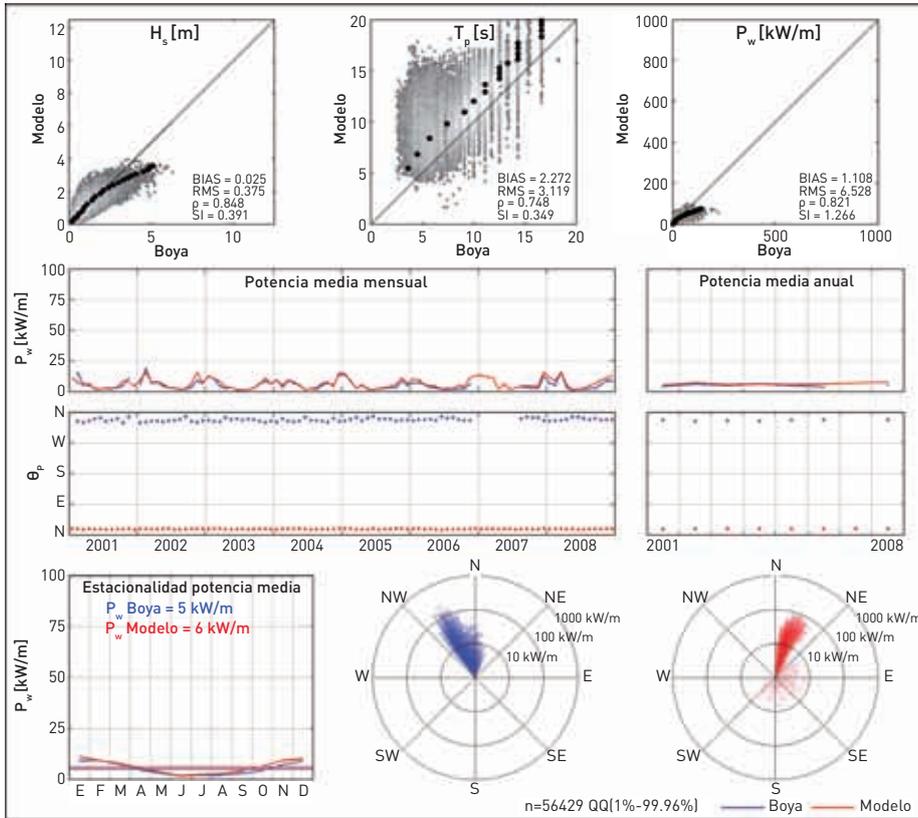
Malla General (GM21)

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. (0.125°x0.125°)  
 WW3 v2.17  
 ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
 Calibración Satélites (1992-2008)  
 Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
 DOW 2.1 GM21 (0.0025°x0.0025°)  
 SWAN v4.57  
 Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010







**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

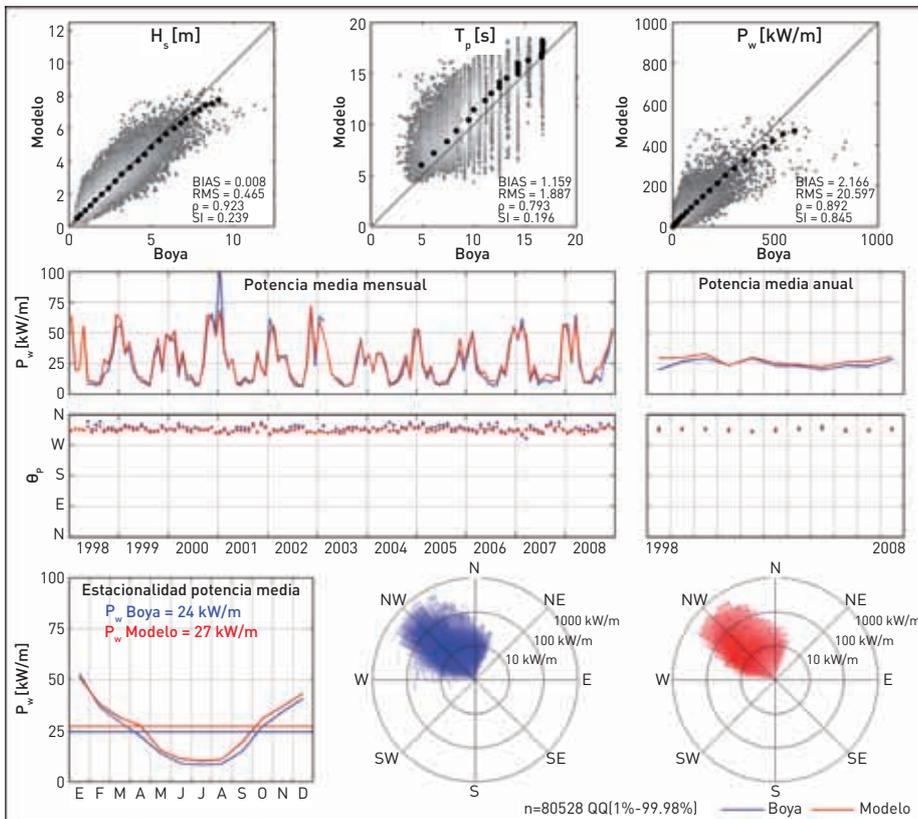
**Boya Direccional Ciervana Cam**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

Red OPPE Campañas  
Lon=3.07°W  
Lat=43.37°N  
h=22m

Malla General (G01)  
Malla Mediana (M012)

GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico (0.1°x0.1°)  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G01 / M012 / D0121 (0.001°x0.0008°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

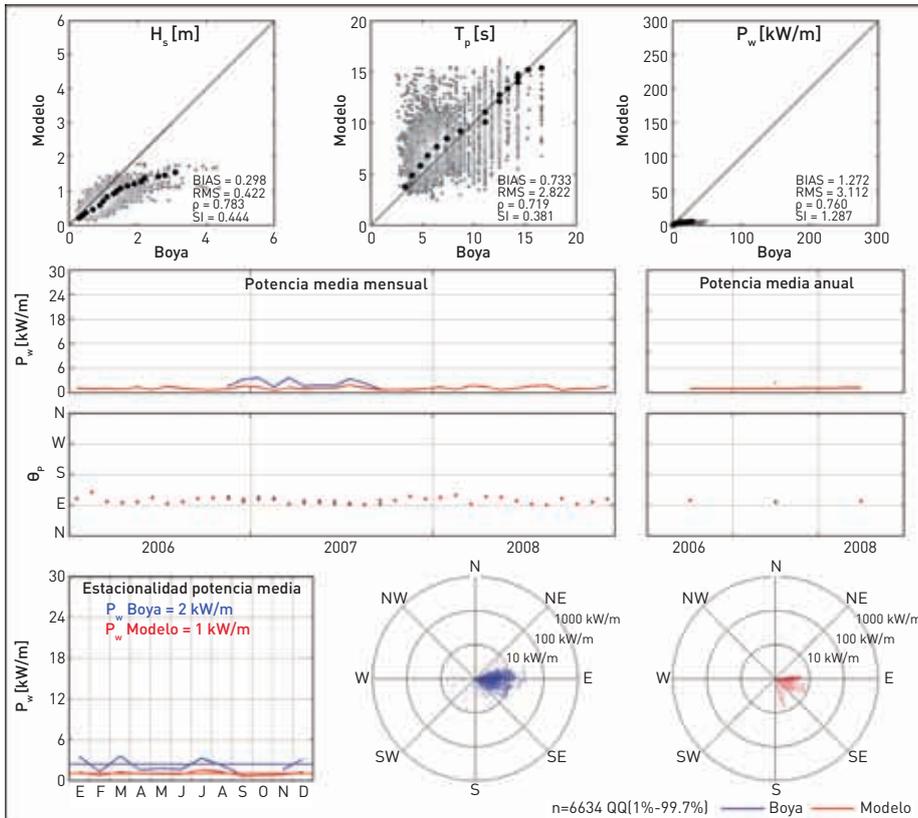
**Boya Direccional Langosteira**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

Red OPPE Campañas  
Lon=8.53°W  
Lat=43.36°N  
h=40m

Malla General (G03)  
Malla Mediana (M032)

GOW 2.1 Global / Iberia / Cantábrico (0.1°x0.1°)  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G03 / M032 / D0321 (0.001°x0.0008°)  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

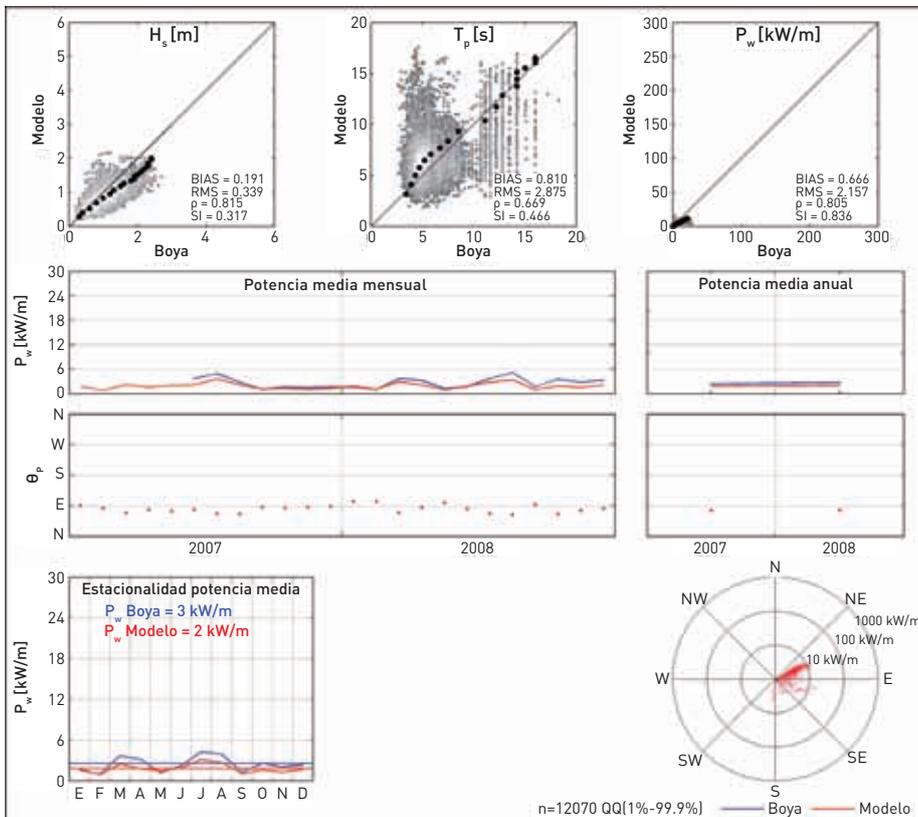
**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Direccional Santa Cruz**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

Red OPPE Campañas  
Lon=16.24°W  
Lat=28.47°N  
h=60m

GOW 1.0 Global / Canarias [0.1°x0.1°]  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G12 / M121 / D1211 [0.0005°x0.0004°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

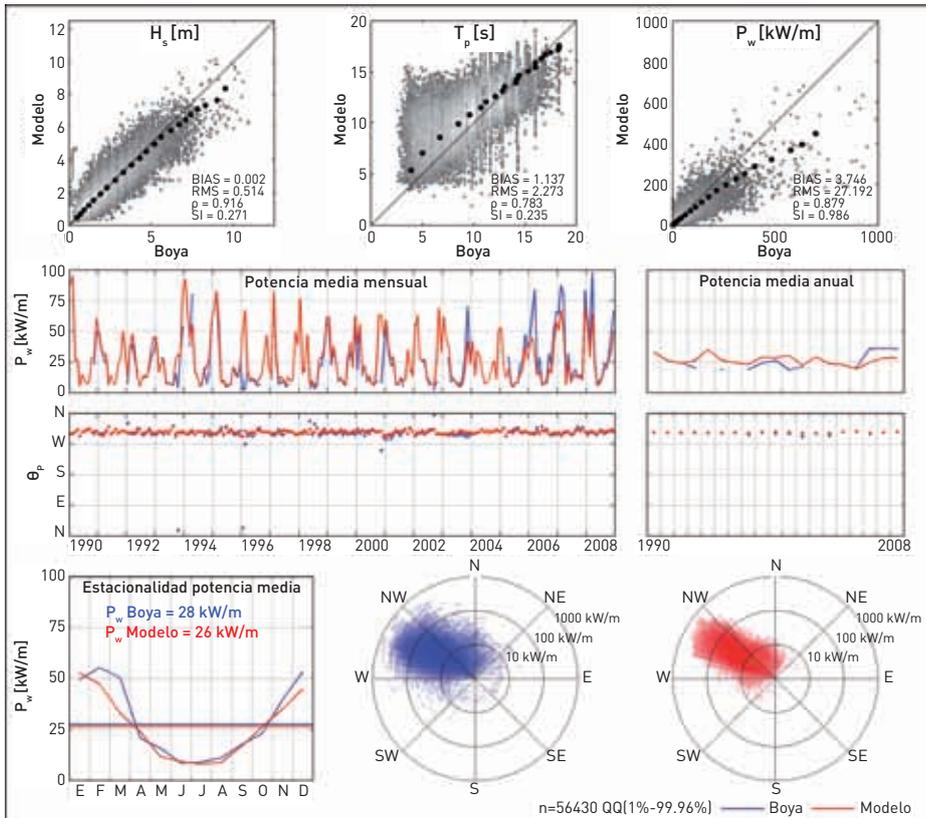
**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Escalar Granadilla**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

Red OPPE Campañas  
Lon=16.48°W  
Lat=28.09°N  
h=22m

GOW 1.0 Global / Canarias [0.1°x0.1°]  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G12 / M125 [0.0025°x0.002°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

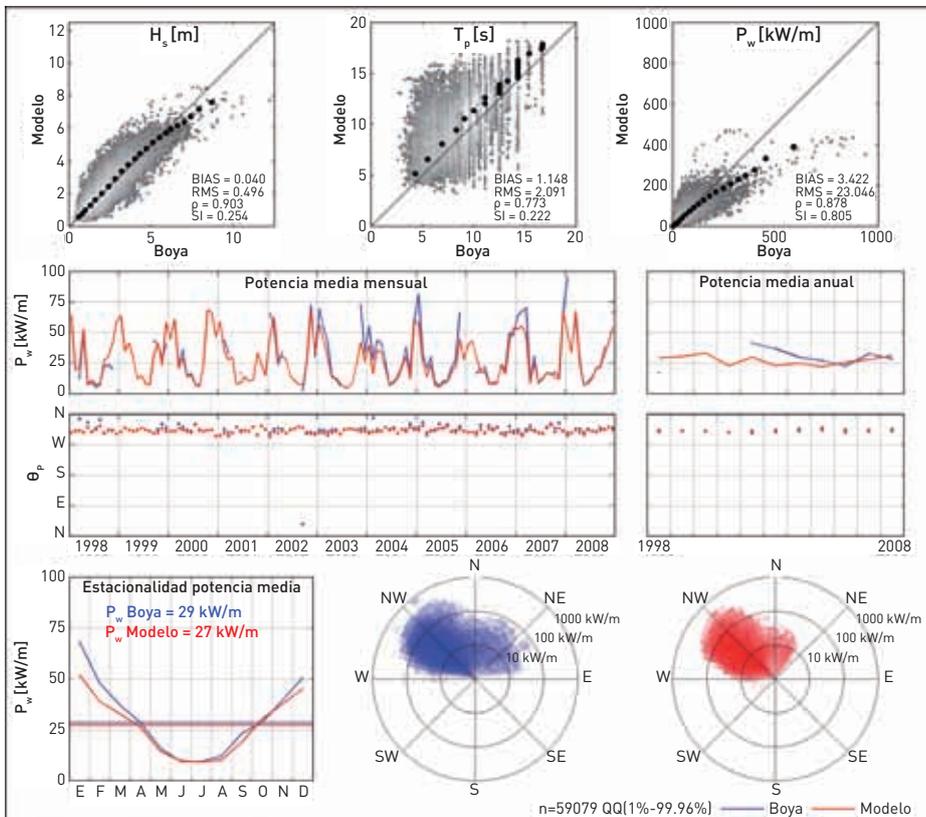
**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Direccional Bilbao-Vizcaya Ext  
GOW 1.0 + DOW 1.0**

Red OPPE Exterior  
Lon= 3.05°W  
Lat=43.64°N  
h=600m

GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico [0.1°x0.1°]  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G01 [0.01°x0.008°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

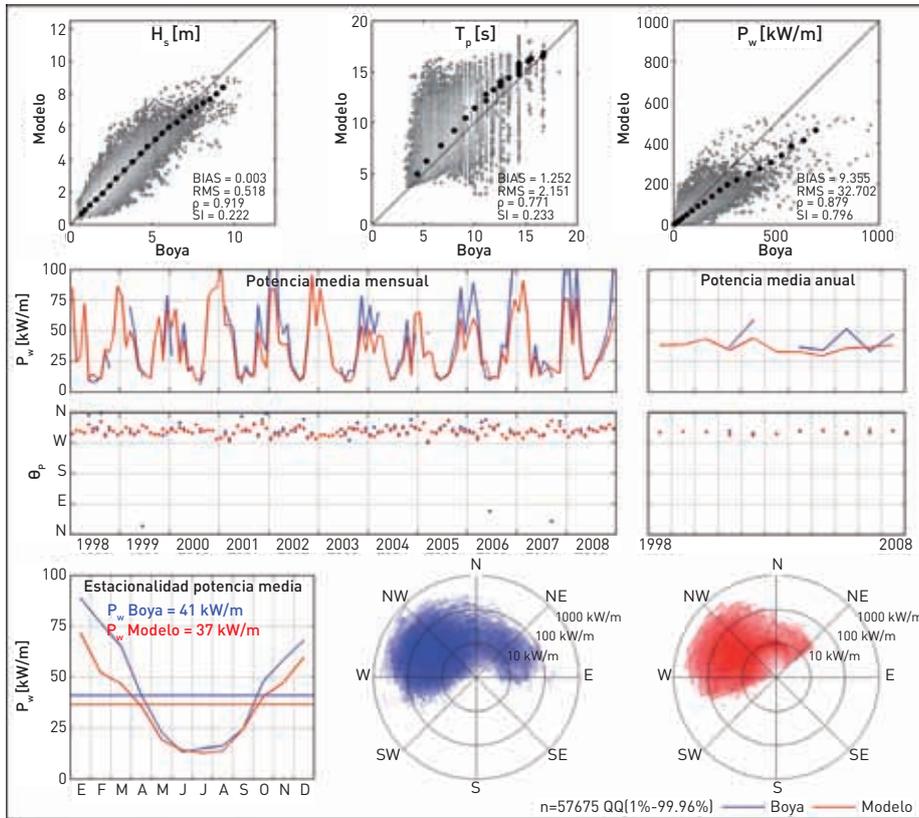
**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Direccional Cabo de Peñas Ext  
GOW 1.0 + DOW 1.0**

Red OPPE Exterior  
Lon=6.17°W  
Lat=43.74°N  
h=450m

GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico [0.1°x0.1°]  
WW3 v2.17  
NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
DOW 1.0 G02 [0.01°x0.008°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

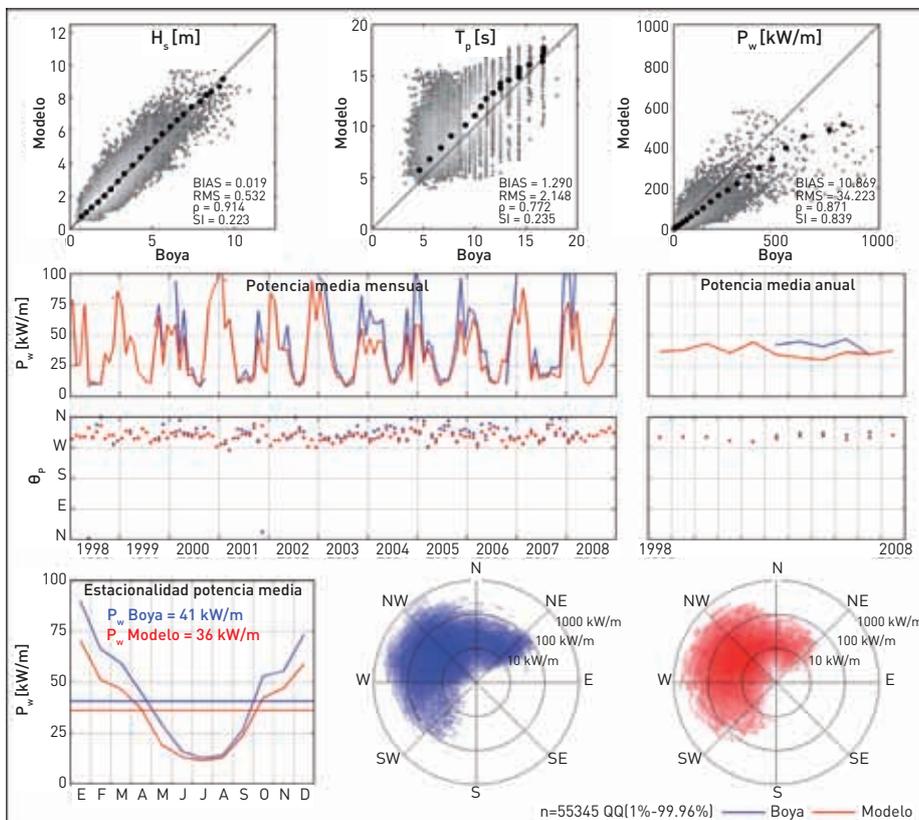
**Boya Direccional Estaca de Bares Ext**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

Red OPPE Exterior  
Lon=7.62°W  
Lat=44.06°N  
h=380m

Malla General (G02)

GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico (0.1°x0.1°)  
 WW3 v2.17  
 NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
 Calibración  
 Satélites (1992-2008)  
 Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
 DOW 1.0 G02 (0.01°x0.008°)  
 SWAN v4.57  
 Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

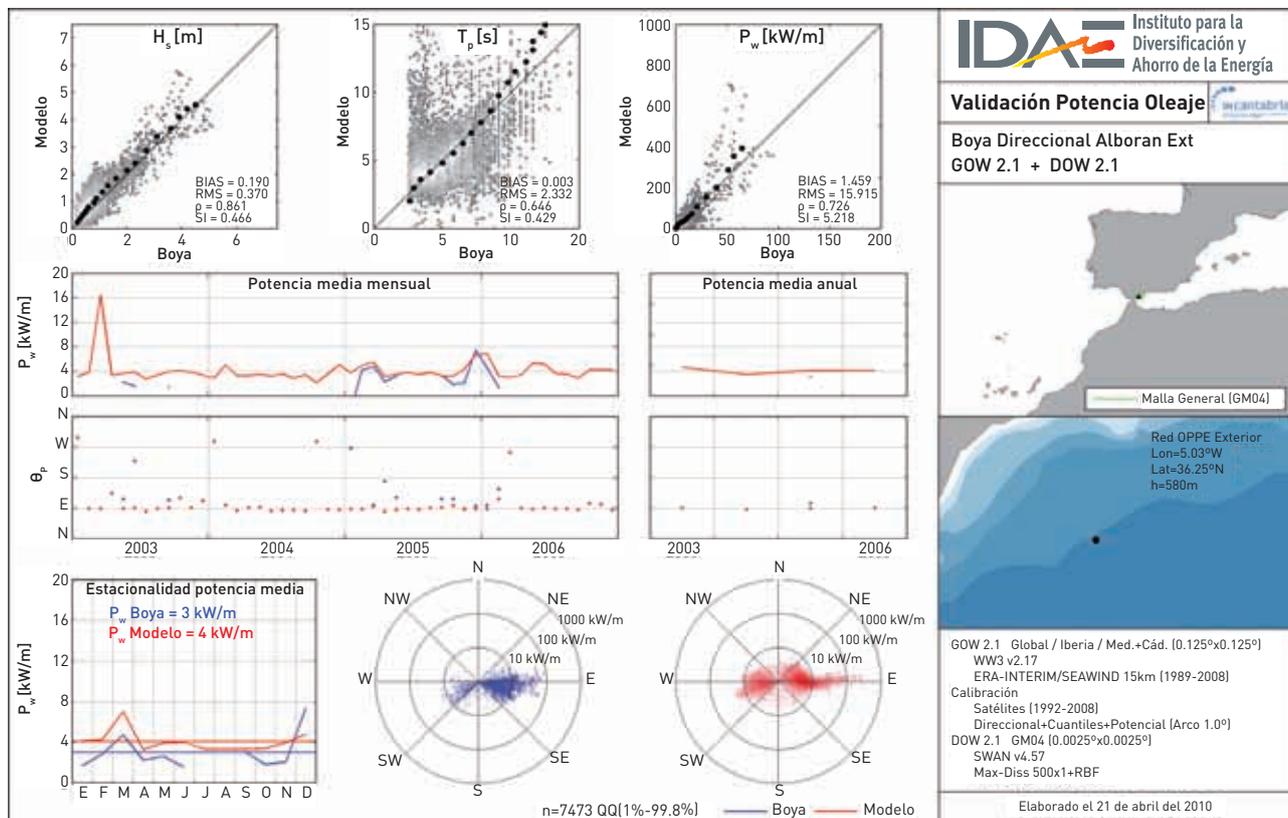
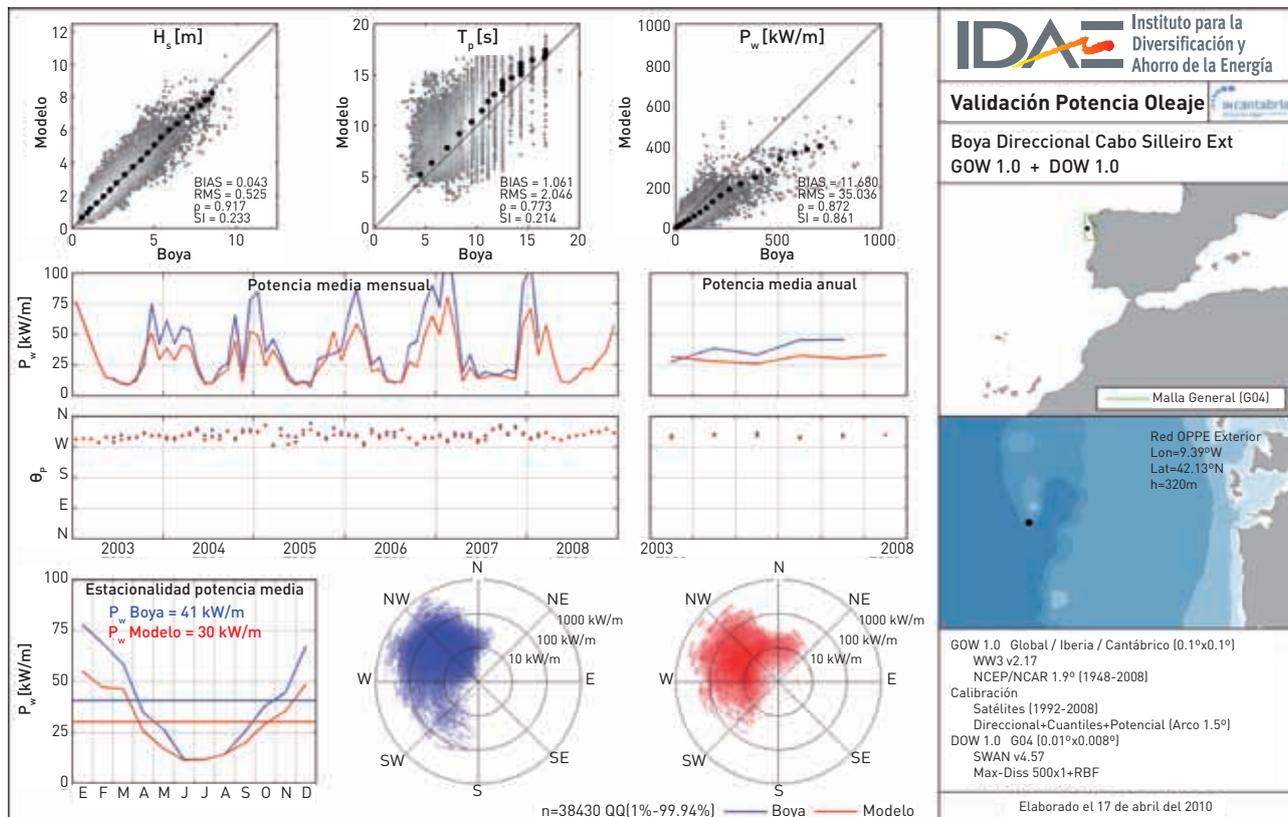
**Boya Direccional Villano-Sisargas Ext**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

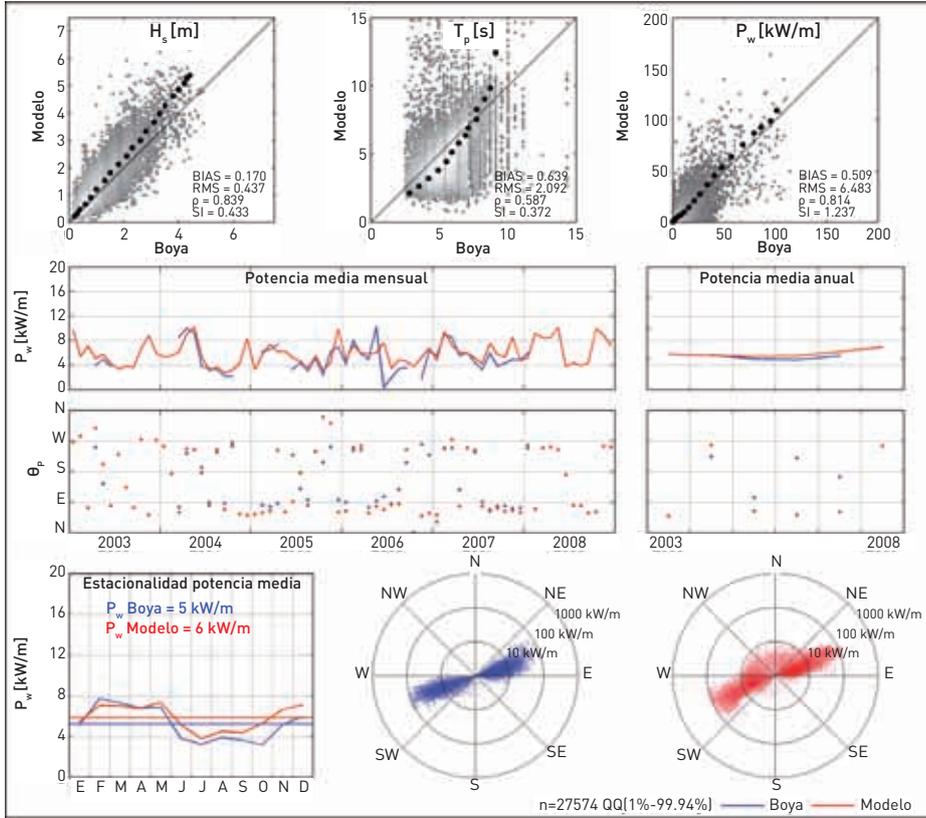
Red OPPE Exterior  
Lon=9.21°W  
Lat=43.50°N  
h=390m

Malla General (G03)

GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico (0.1°x0.1°)  
 WW3 v2.17  
 NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
 Calibración  
 Satélites (1992-2008)  
 Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
 DOW 1.0 G03 (0.01°x0.008°)  
 SWAN v4.57  
 Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010





**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

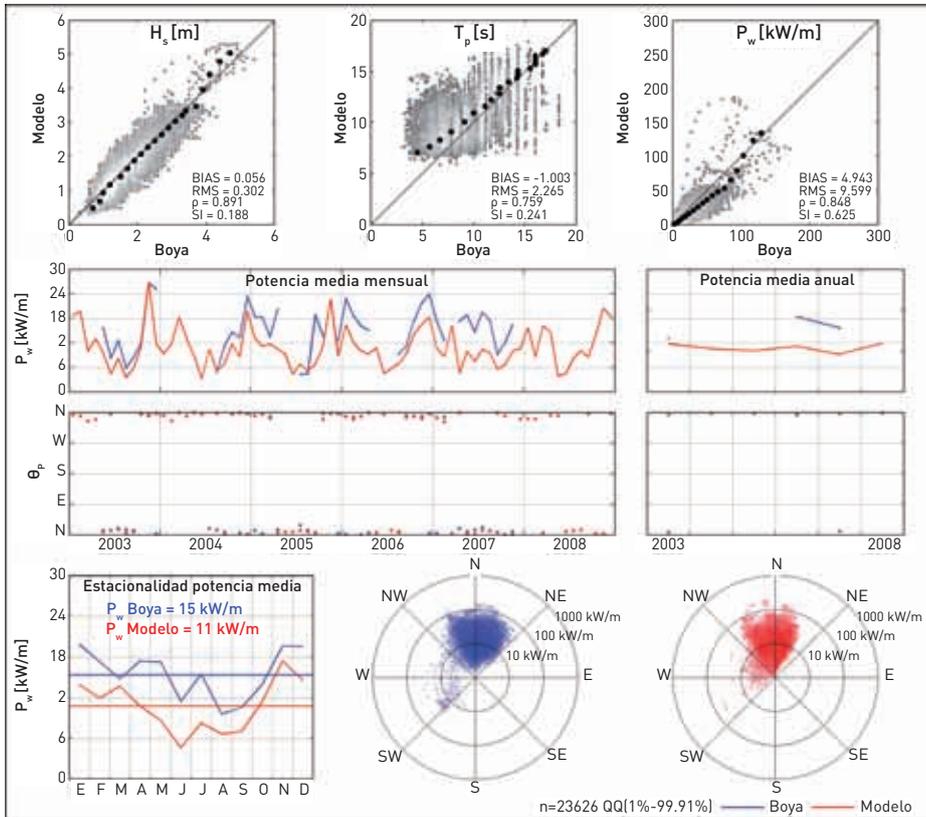
**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Direccional Cabo de Gata Ext**  
GOW 2.1 + DOW 2.1

Mapa de localización: Red OPPE Exterior, Lon=2.34°W, Lat=36.57°N, h=530m

**GOW 2.1** Global / Iberia / Med.+Cád. (0.125°x0.125°)  
 WW3 v2.17  
 ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
 Calibración Satélites (1992-2008)  
 Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
**DOW 2.1** GM08 (0.0025°x0.0025°)  
 SWAN v4.57  
 Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

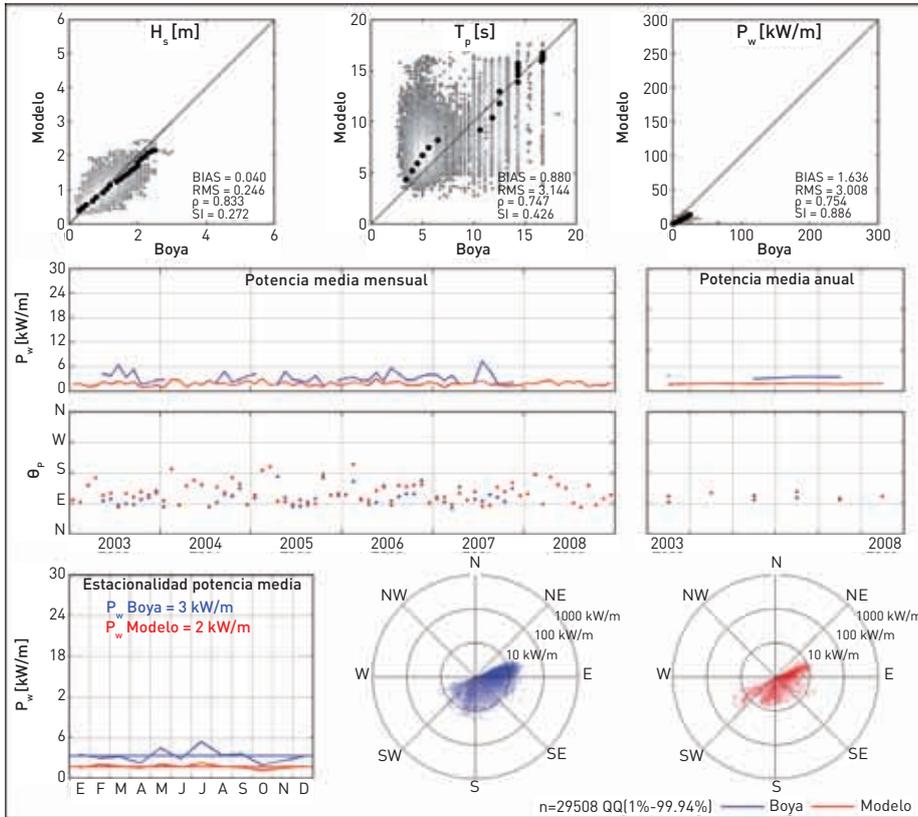
**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Direccional Gran Canaria Ext**  
GOW 1.0 + DOW 1.0

Mapa de localización: Red OPPE Exterior, Lon=15.80°W, Lat=28.20°N, h=780m

**GOW 1.0** Global / Canarias (0.1°x0.1°)  
 WW3 v2.17  
 NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
 Calibración Satélites (1992-2008)  
 Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
**DOW 1.0** G11 (0.005°x0.004°)  
 SWAN v4.57  
 Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Direccional Tenerife Ext**  
**GOW 1.0 + DOW 1.0**

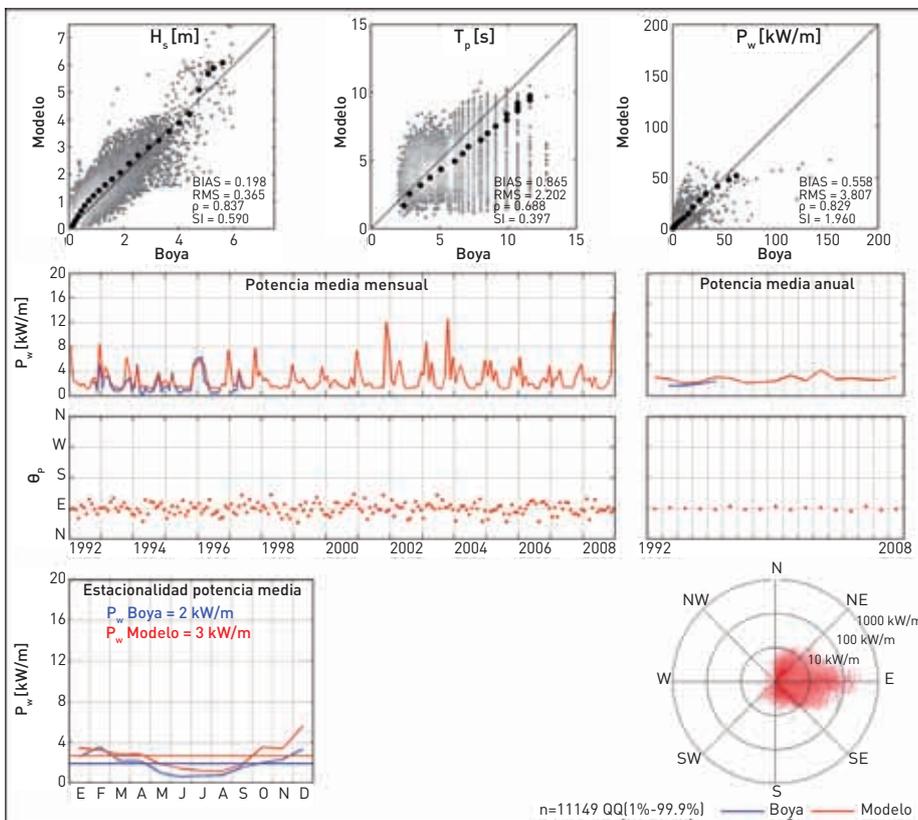
Red OPPE Exterior  
 Lon=14.58°W  
 Lat=28.00°N  
 h=710m

Malla General (G12)

GOW 1.0 Global / Canarias (0.1°x0.1°)  
 WW3 v2.17  
 NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)

Calibración  
 Satélites (1992-2008)  
 Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
 DOW 1.0 G12 (0.005°x0.004°)  
 SWAN v4.57  
 Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Escalar Rosas Gen**  
**GOW 2.1 + DOW 2.1**

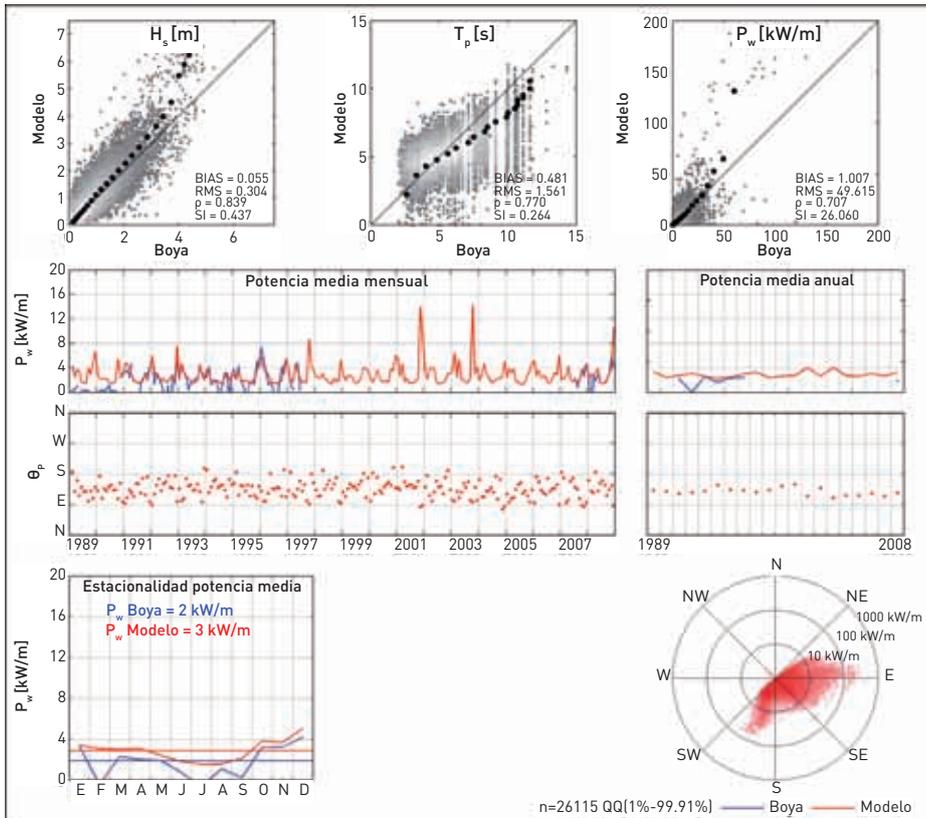
Red XIOM Cataluña  
 Lon=3.20°E  
 Lat=42.18°N  
 h=46m

Malla General (GM22)

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. (0.125°x0.125°)  
 WW3 v2.17  
 ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)

Calibración  
 Satélites (1992-2008)  
 Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
 DOW 2.1 GM22 (0.0025°x0.0025°)  
 SWAN v4.57  
 Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Direccional Tordera Gen**  
GOW 2.1 + DOW 2.1

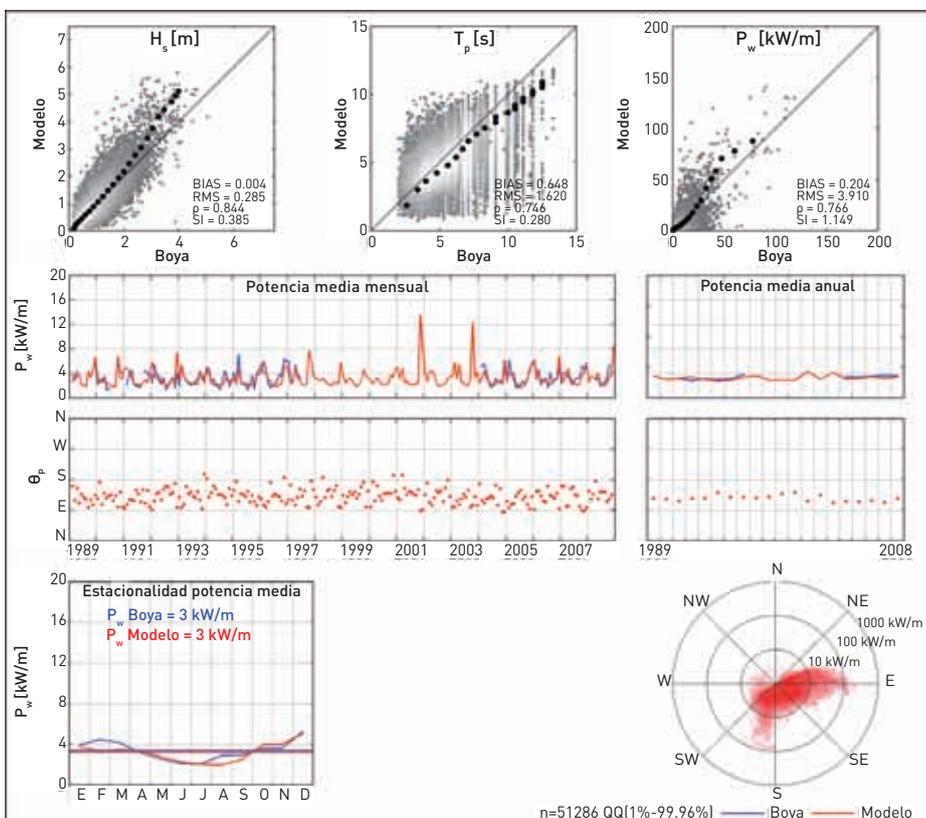
Red XIOM Cataluña  
Lon=2.82°E  
Lat=41.65°N  
h=74m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)

Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)

DOW 2.1 GM20 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



**IDAE** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Direccional Llobregat Gen**  
GOW 2.1 + DOW 2.1

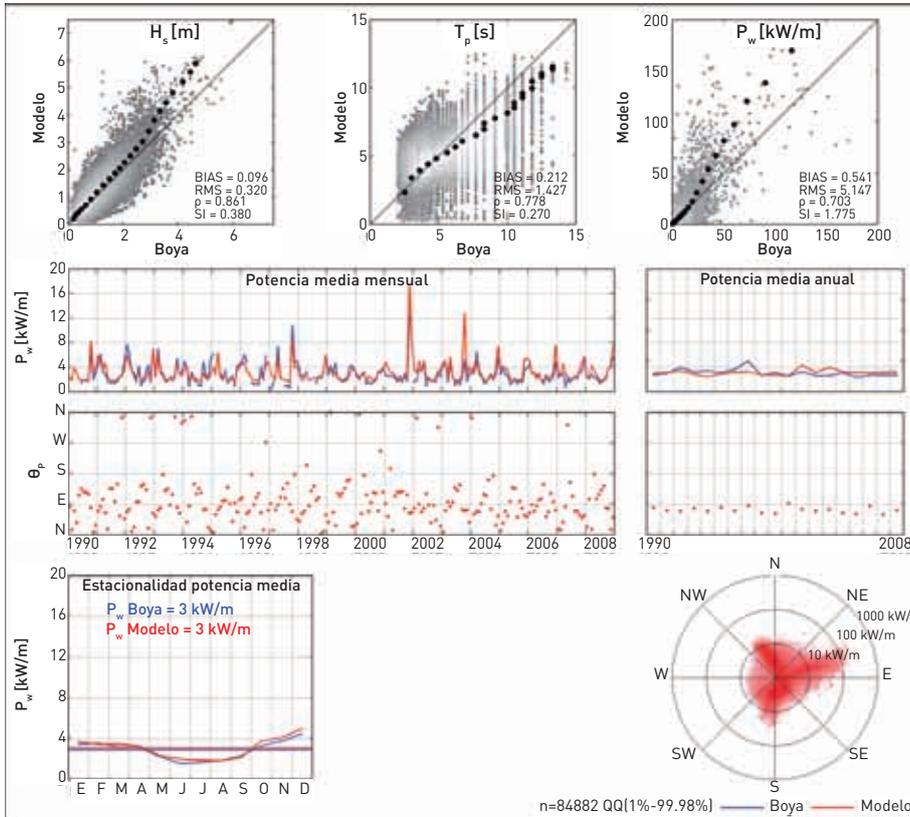
Red XIOM Cataluña  
Lon=2.14°E  
Lat=41.28°N  
h=45m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)

Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)

DOW 2.1 GM19 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



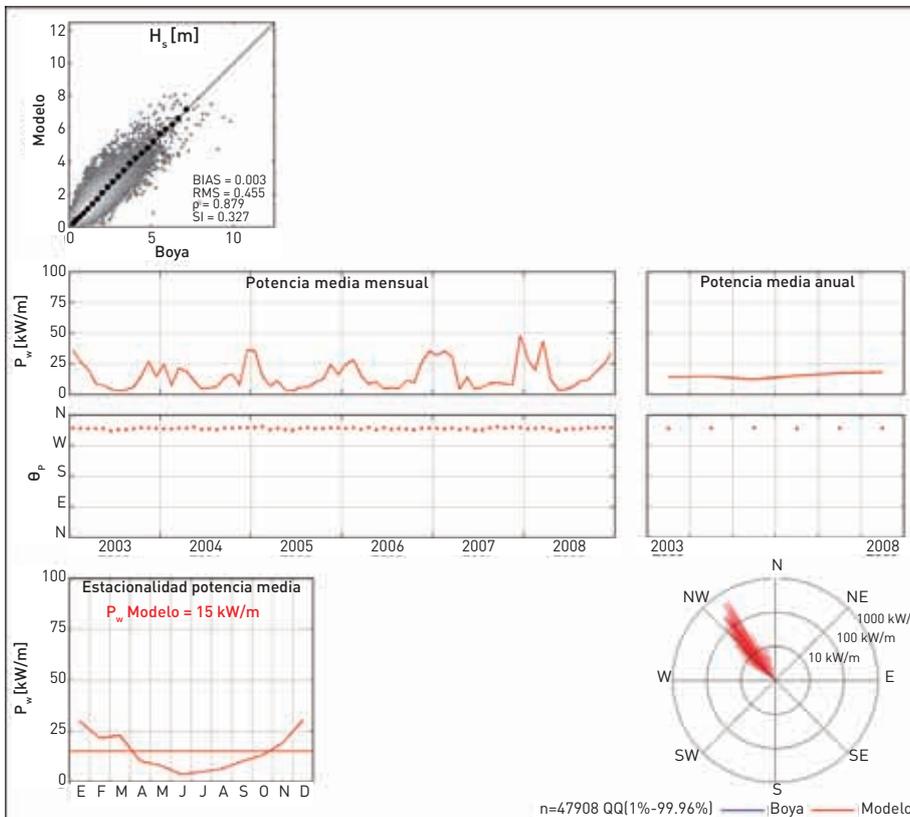
**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía  
**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Direccional Tortosa Gen**  
**GOW 2.1 + DOW 2.1**

Malla General [GM17]  
 Red XIOM Cataluña  
 Lon=0.98°E  
 Lat=40.72°N  
 h=60m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. (0.125°x0.125°)  
 WW3 v2.17  
 ERA-INTERIM/SEAWIND 15km (1989-2008)  
 Calibración Satélites (1992-2008)  
 Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.0°)  
 DOW 2.1 GM17 (0.0025°x0.0025°)  
 SWAN v4.57  
 Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010



**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía  
**Validación Potencia Oleaje**

**Boya Escalar Pasaia**  
**GOW 1.0 + DOW 1.0**

Malla General [G01]  
 Malla Mediana [M011]  
 Red AZTI Pais Vasco  
 Lon=1.93°W  
 Lat=43.34°N  
 h=25m

GOW 1.0 Global / Iberia / Cantábrico (0.1°x0.1°)  
 WW3 v2.17  
 NCEP/NCAR 1.9° (1948-2008)  
 Calibración Satélites (1992-2008)  
 Direccional+Cuantiles+Potencial (Arco 1.5°)  
 DOW 1.0 G01 / M011 / D0111 (0.001°x0.0008°)  
 SWAN v4.57  
 Max-Diss 500x3+RBF

Elaborado el 17 de abril del 2010

# **Anexo 3.**

## **Mapas de la potencia media del oleaje a lo largo del litoral español**

Figura A3.1. Mallas de cálculo en el Cantábrico

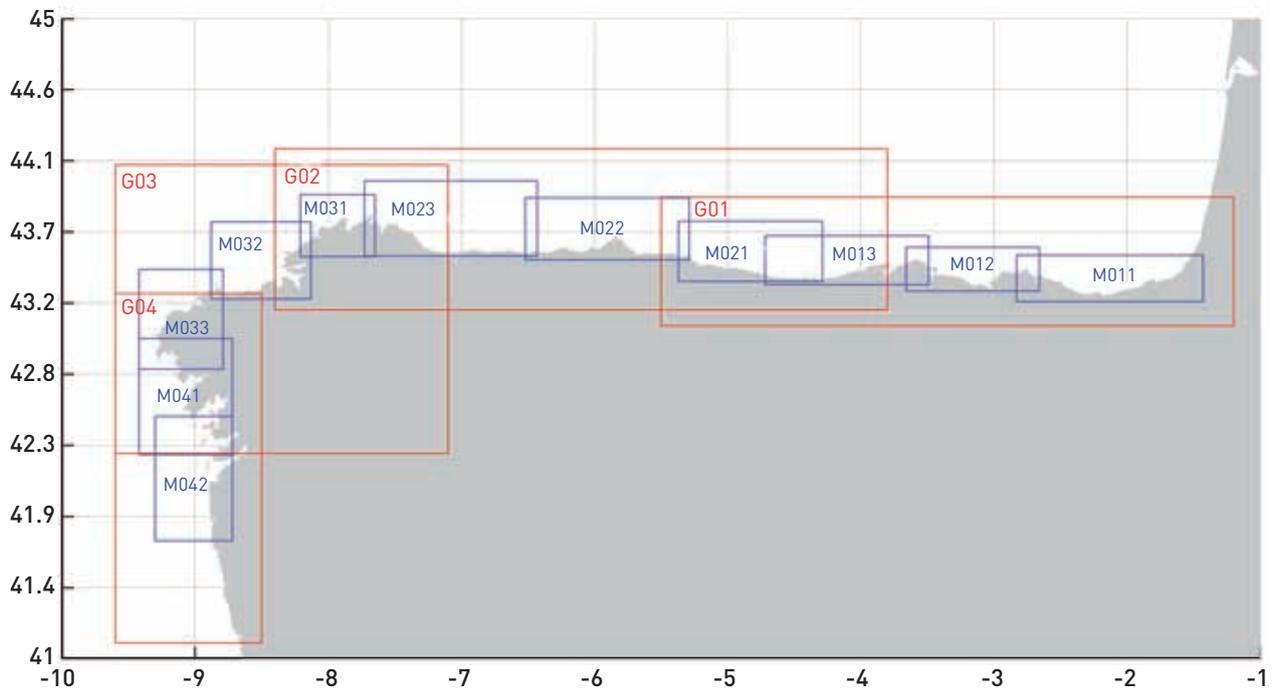


Figura A3.2. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo G01

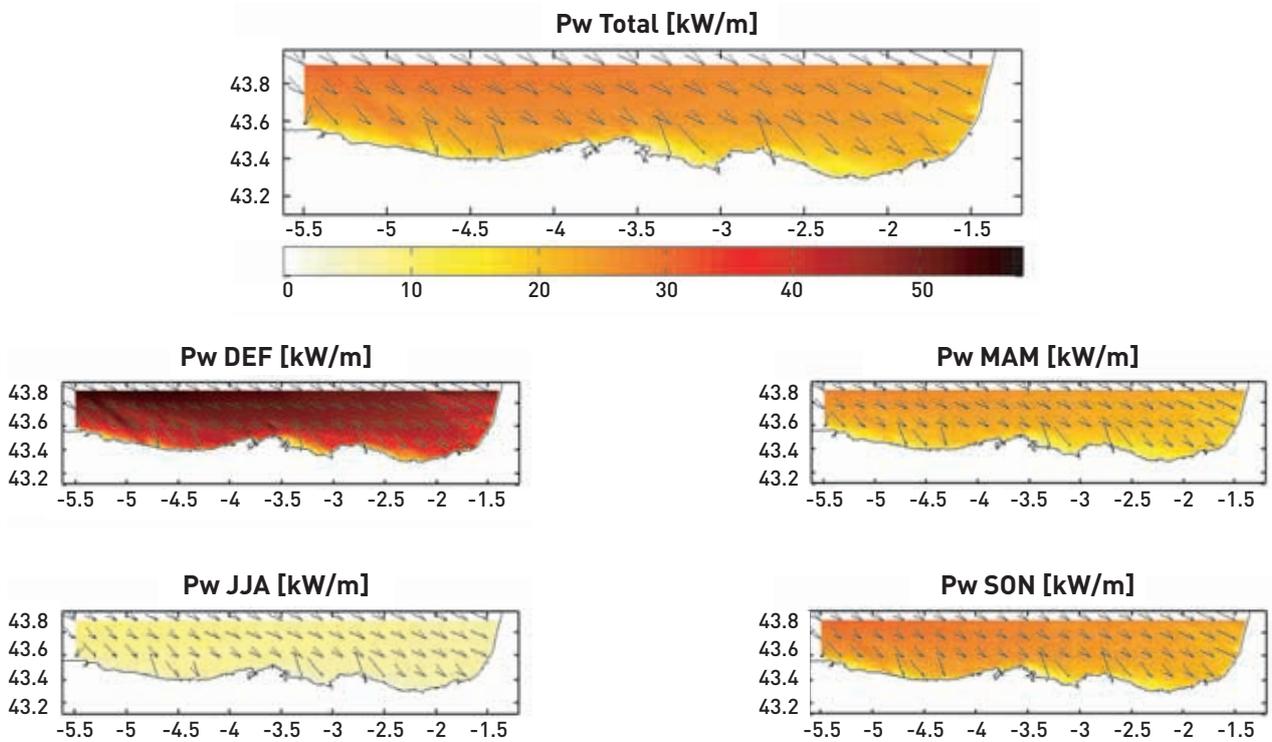


Figura A3.3. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo G02

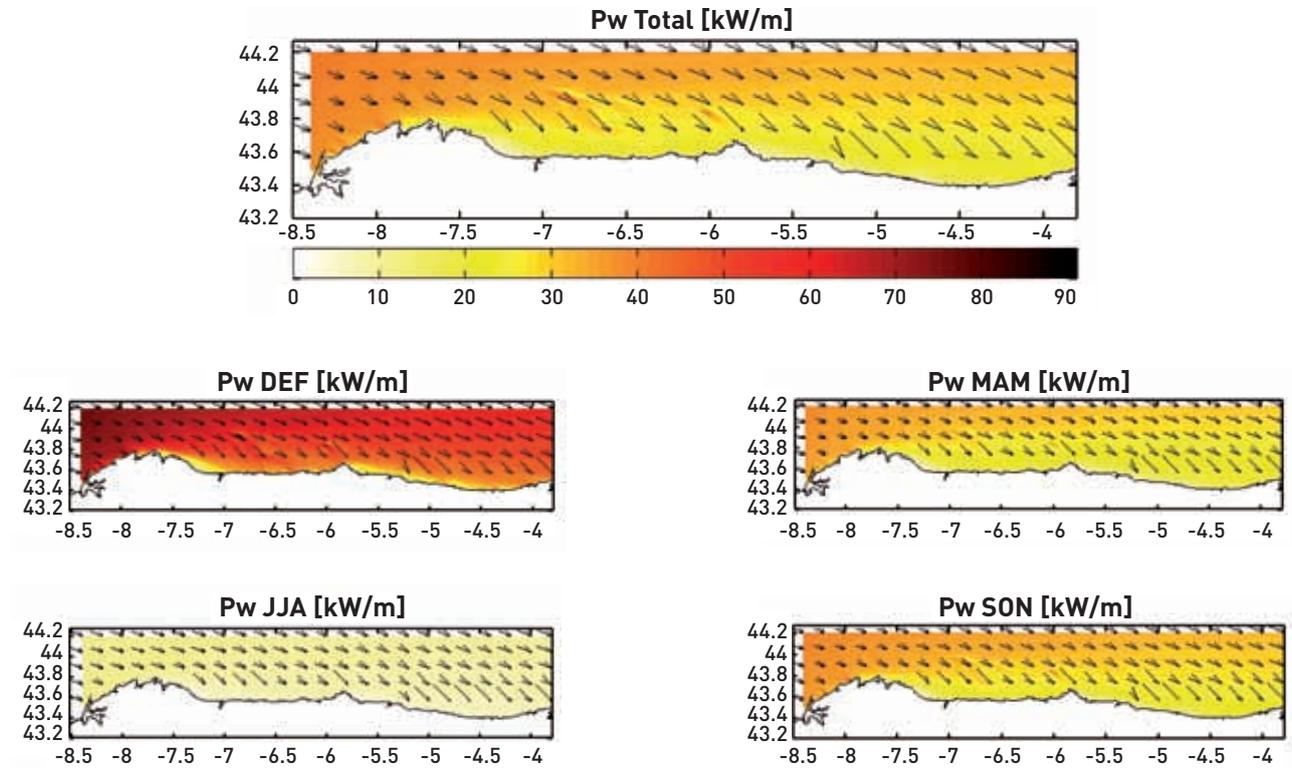


Figura A3.4. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo G03

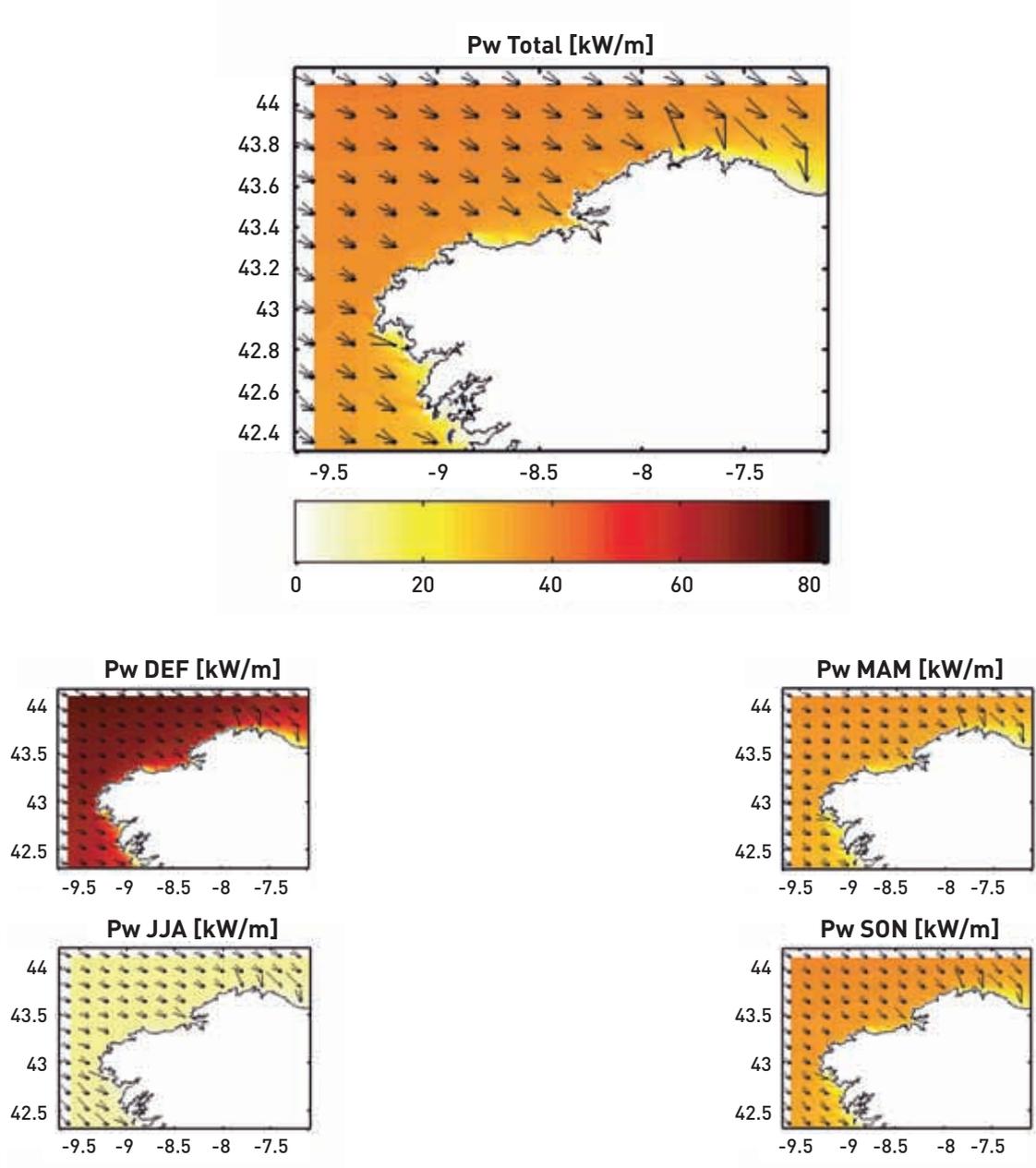


Figura A3.5. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo G04

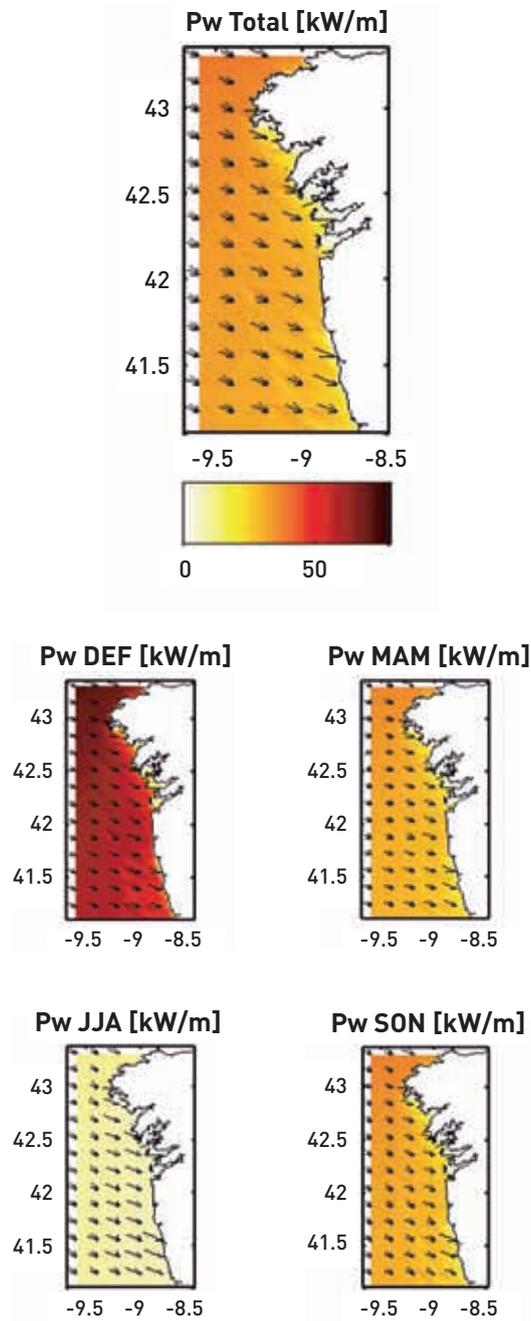


Figura A3.6. Mallas de cálculo de Canarias

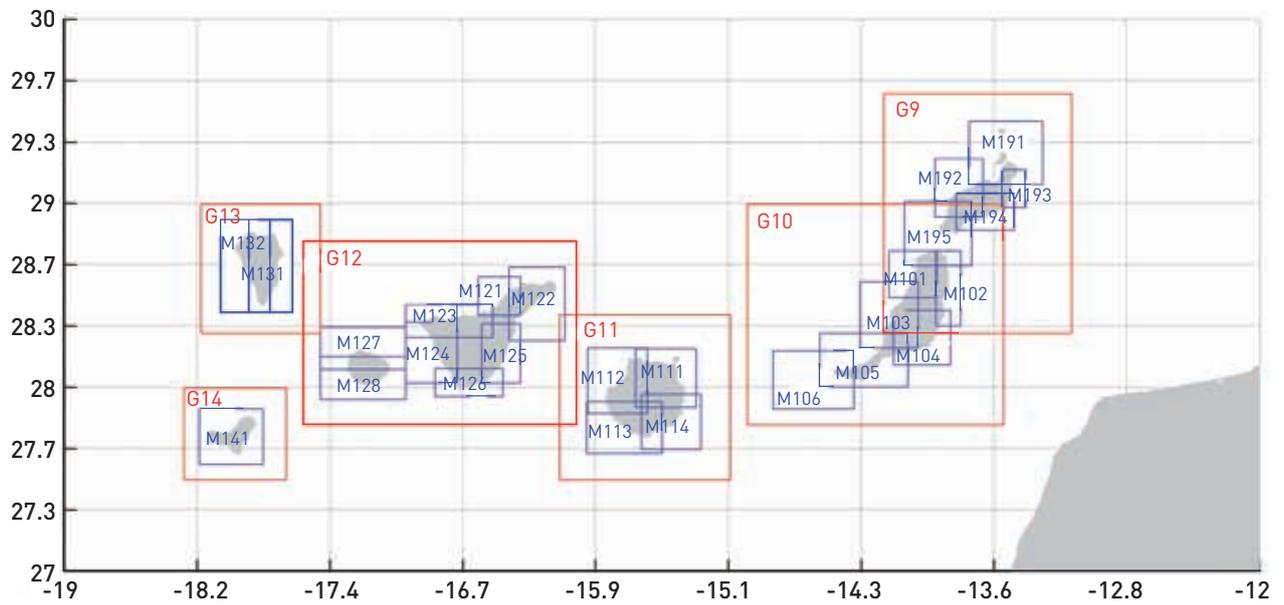


Figura A3.7. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo G09

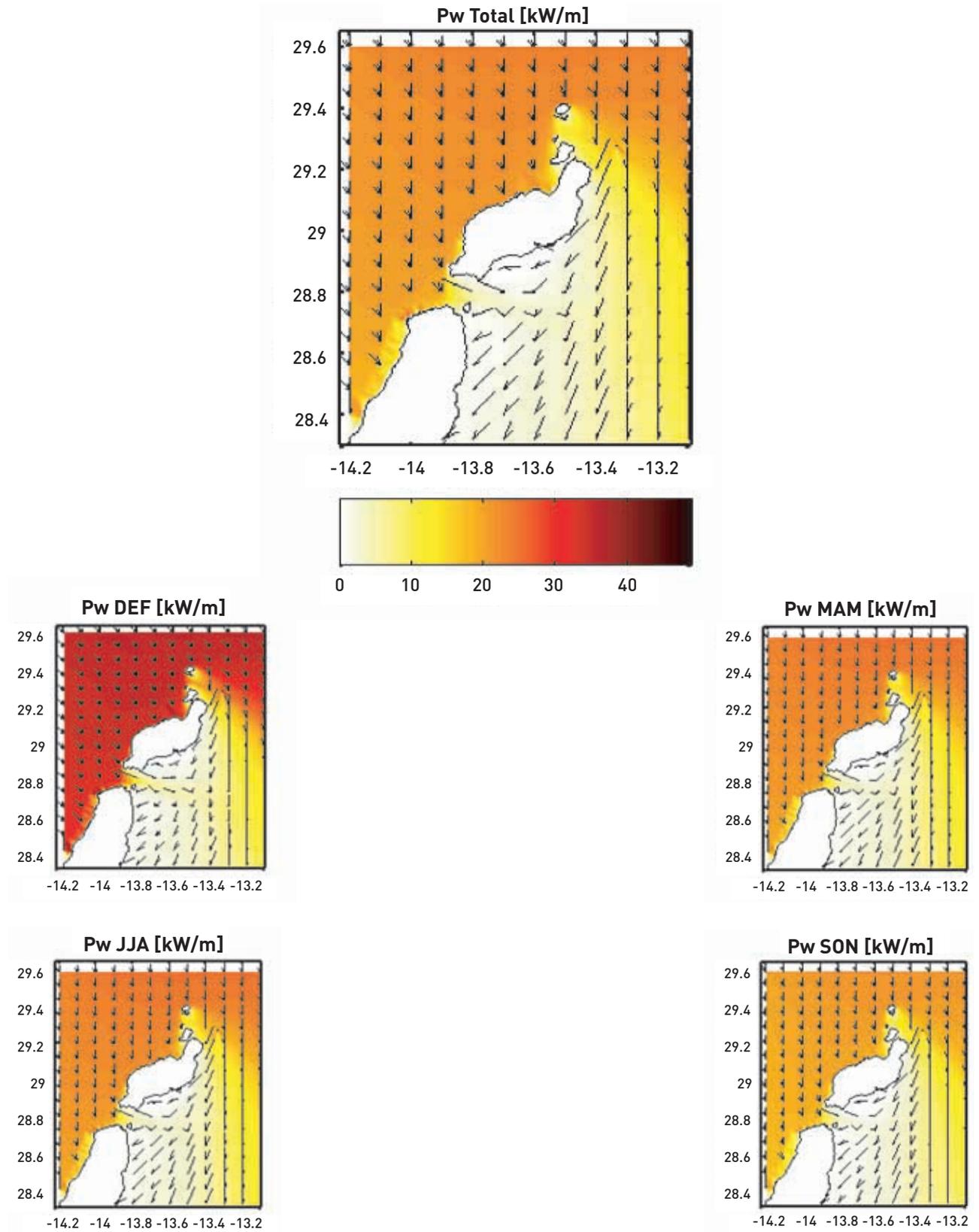


Figura A3.8. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo G10

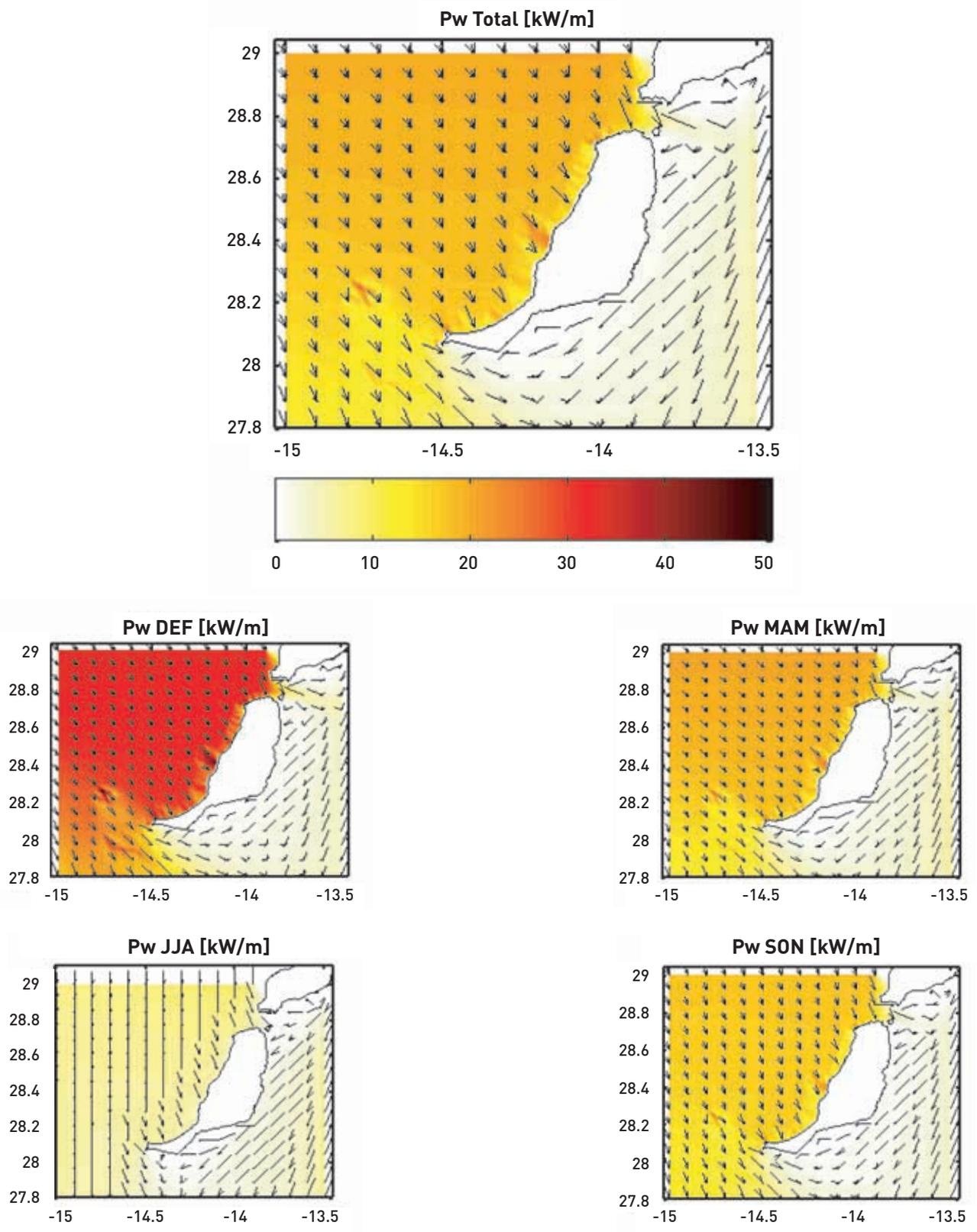


Figura A3.9. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo G11

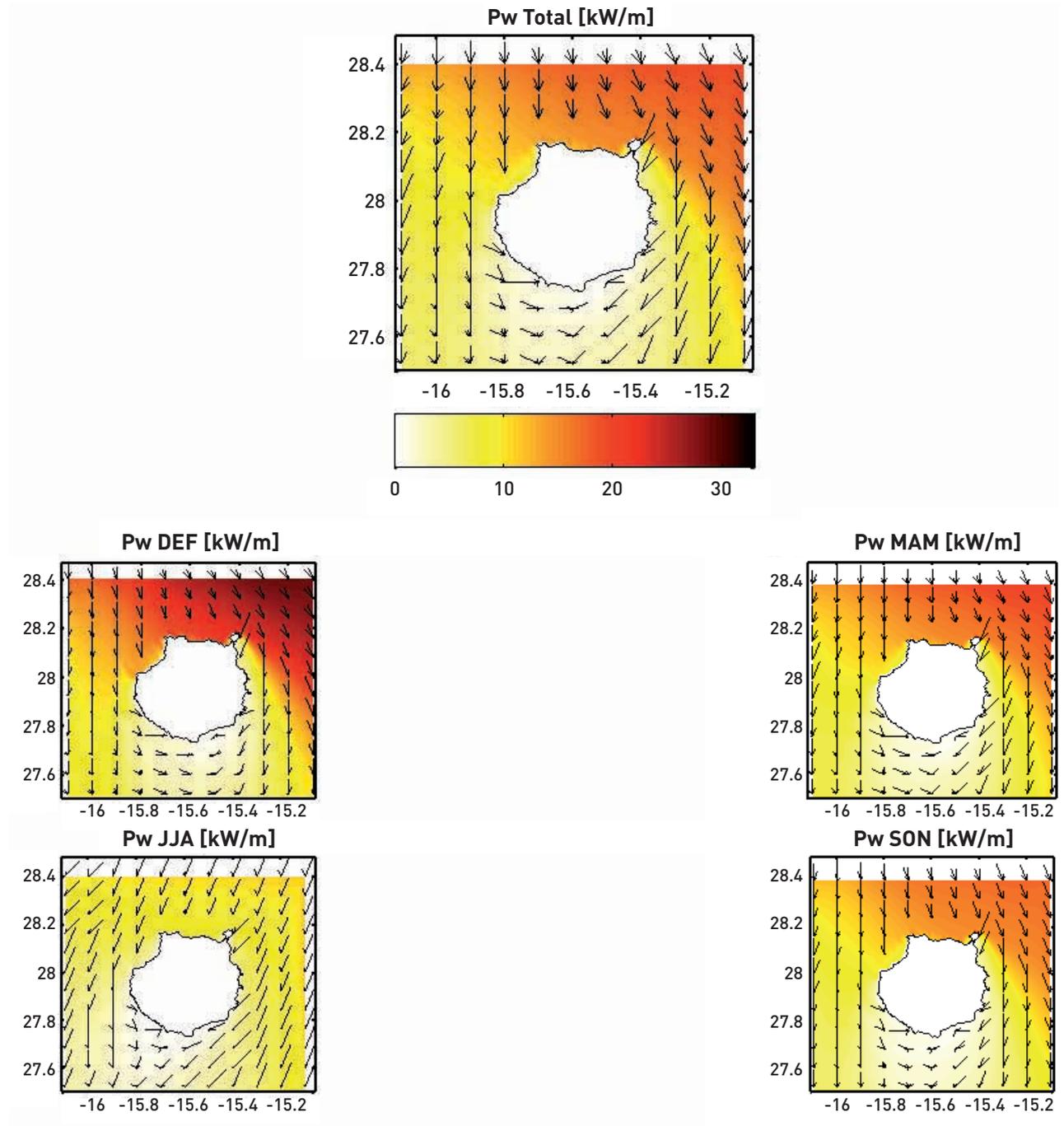


Figura A3.10. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo G12

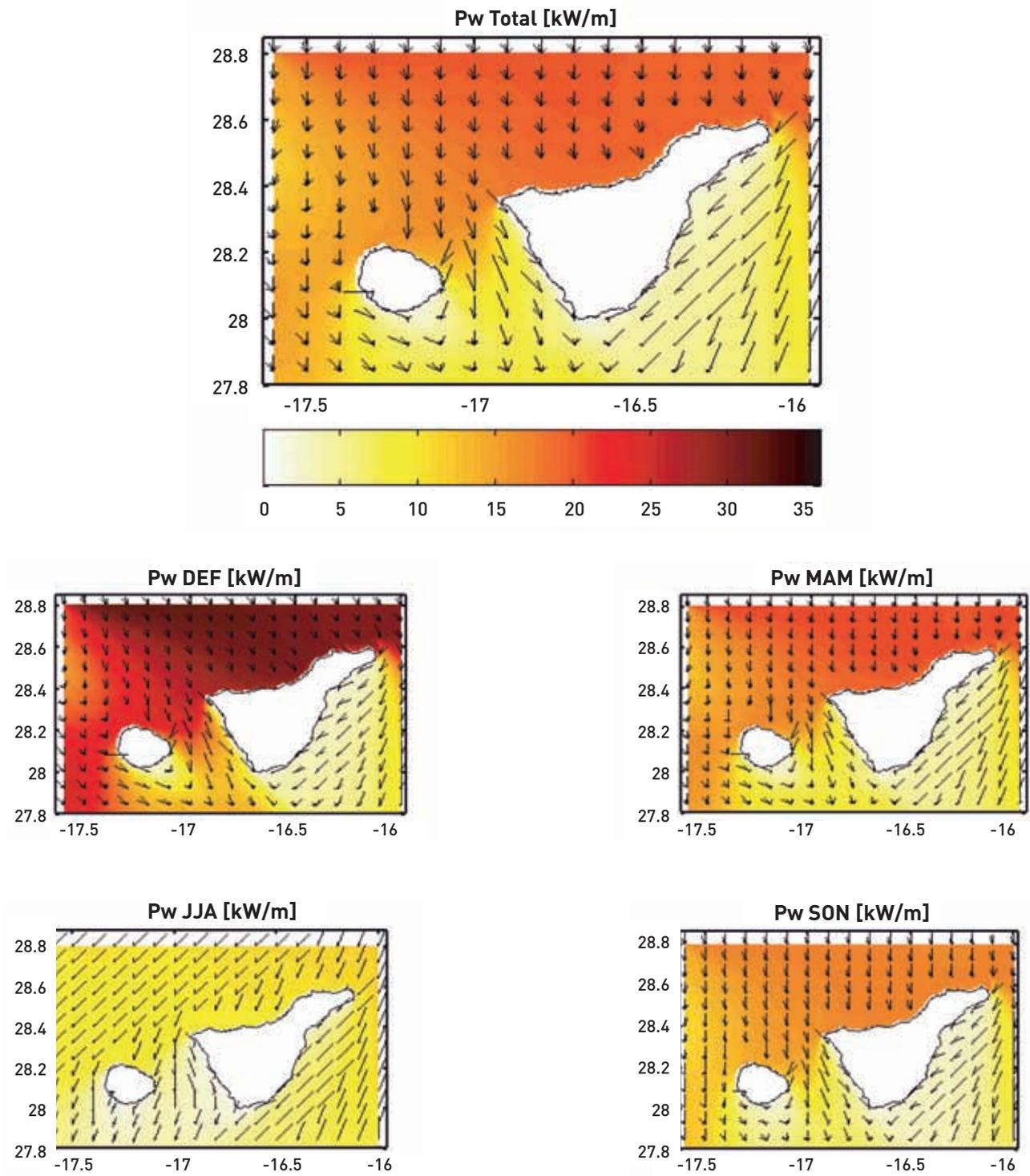


Figura A3.11. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo G13

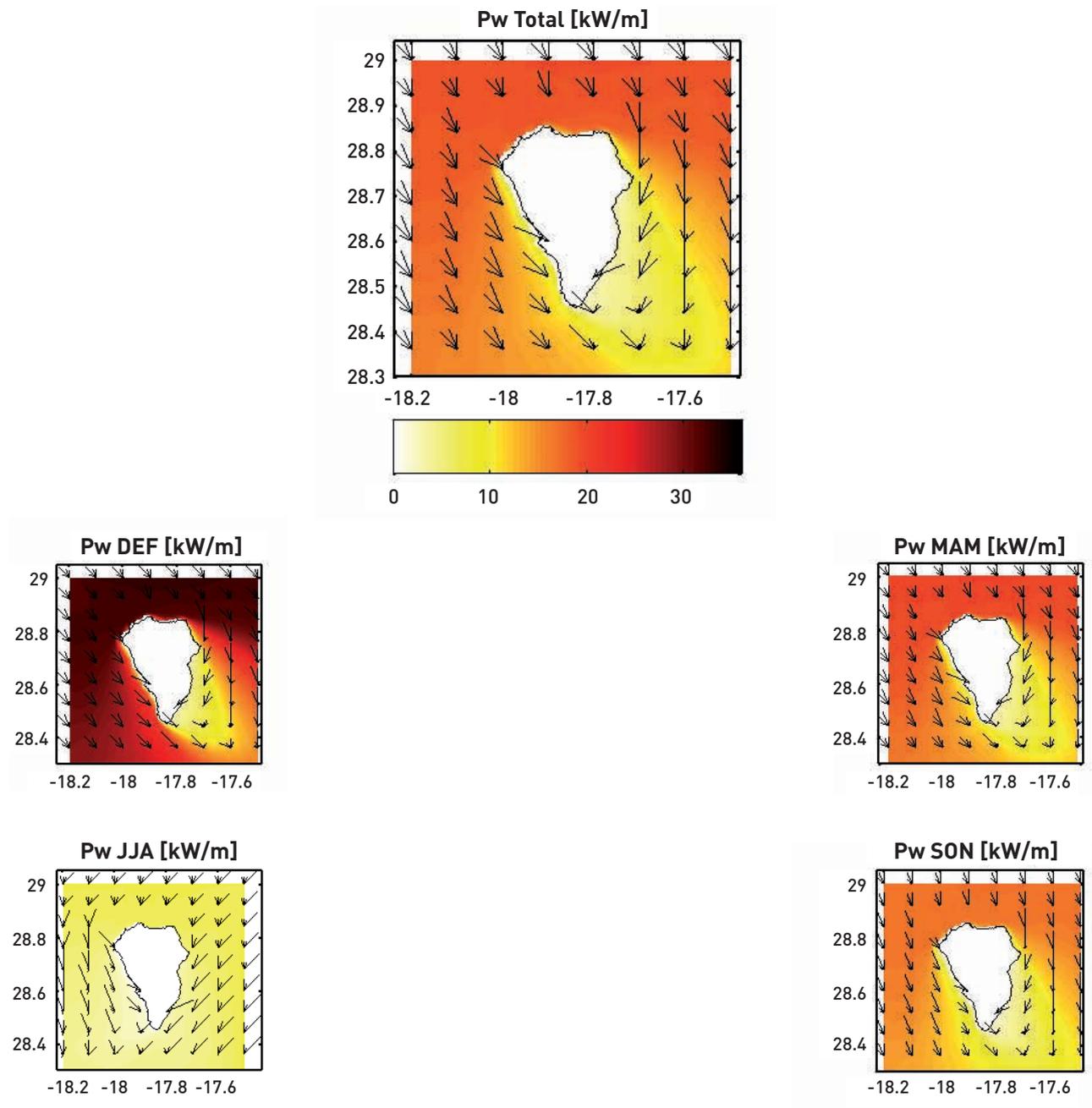


Figura A3.12. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo G14

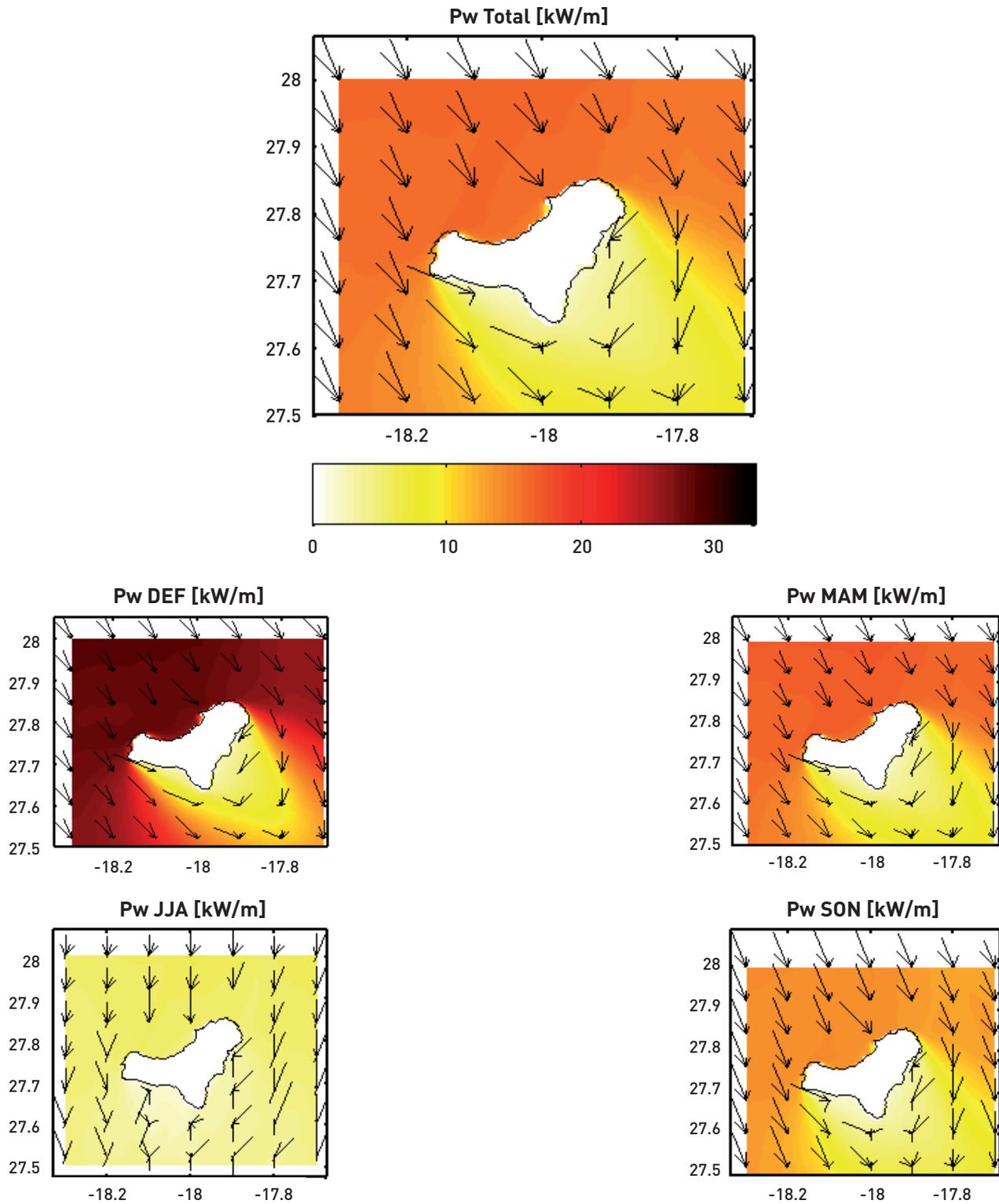


Figura A3.13. Mallas de cálculo del Atlántico Sur y Mediterráneo

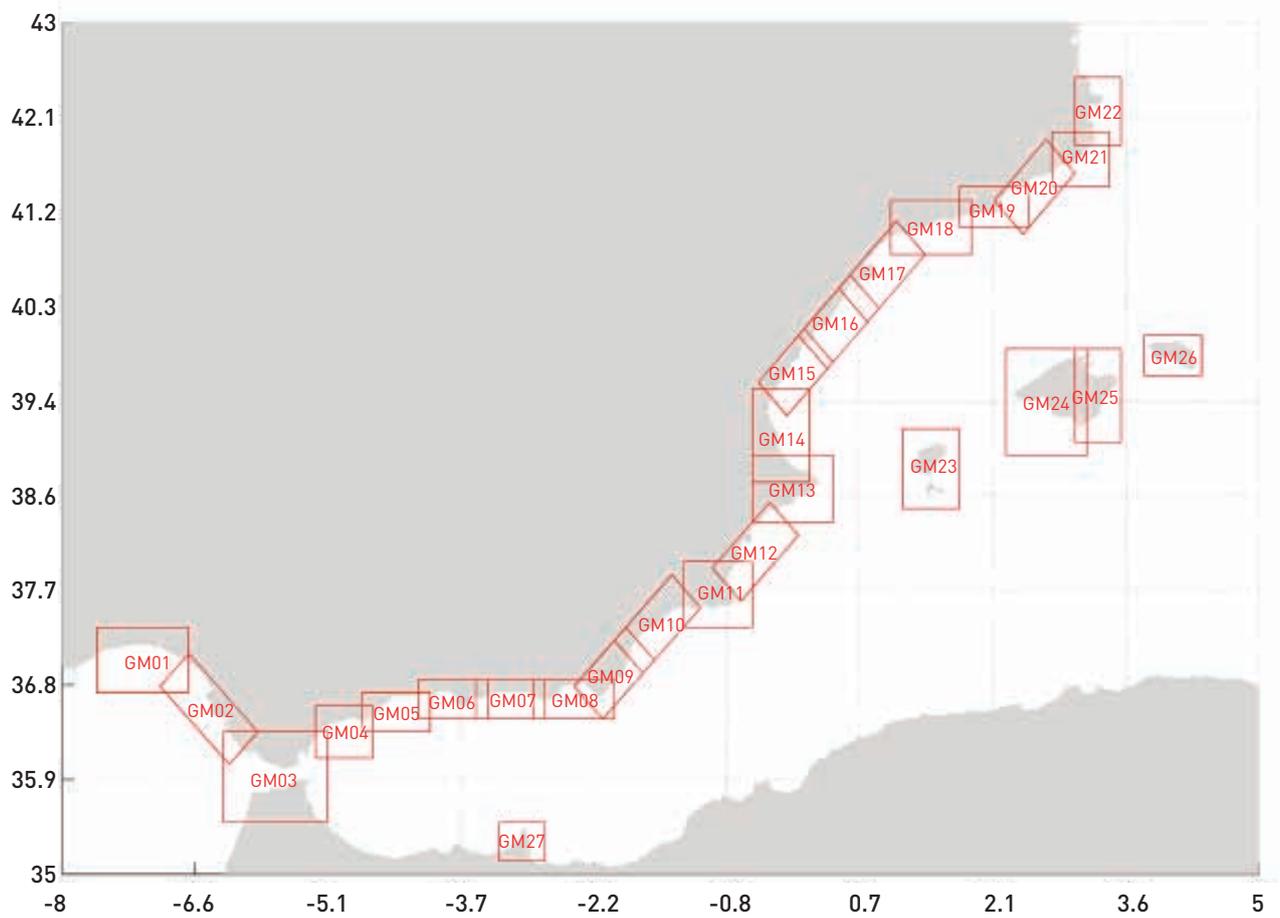


Figura A3.14. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM01

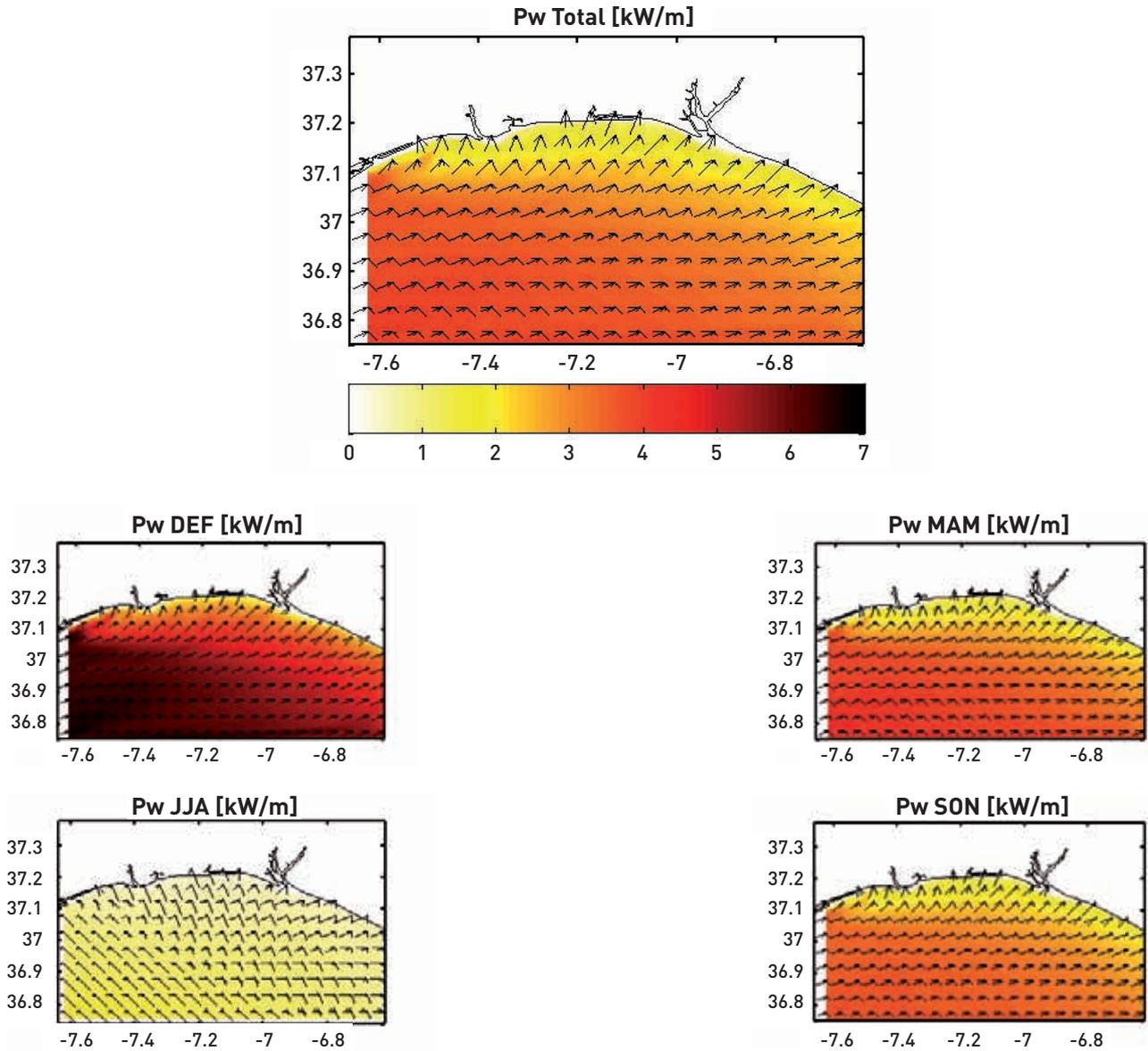


Figura A3.15. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM02

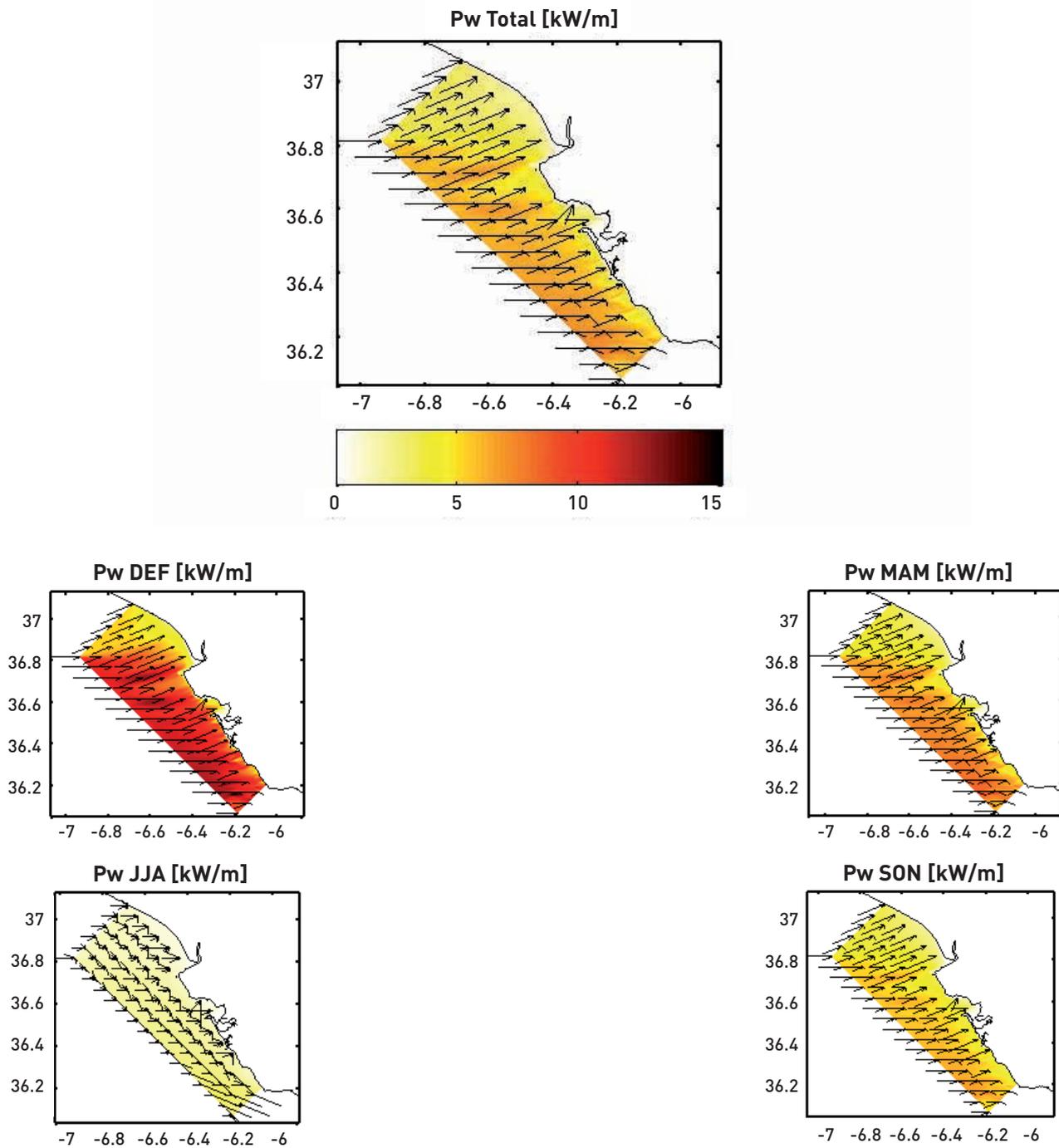


Figura A3.16. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM03

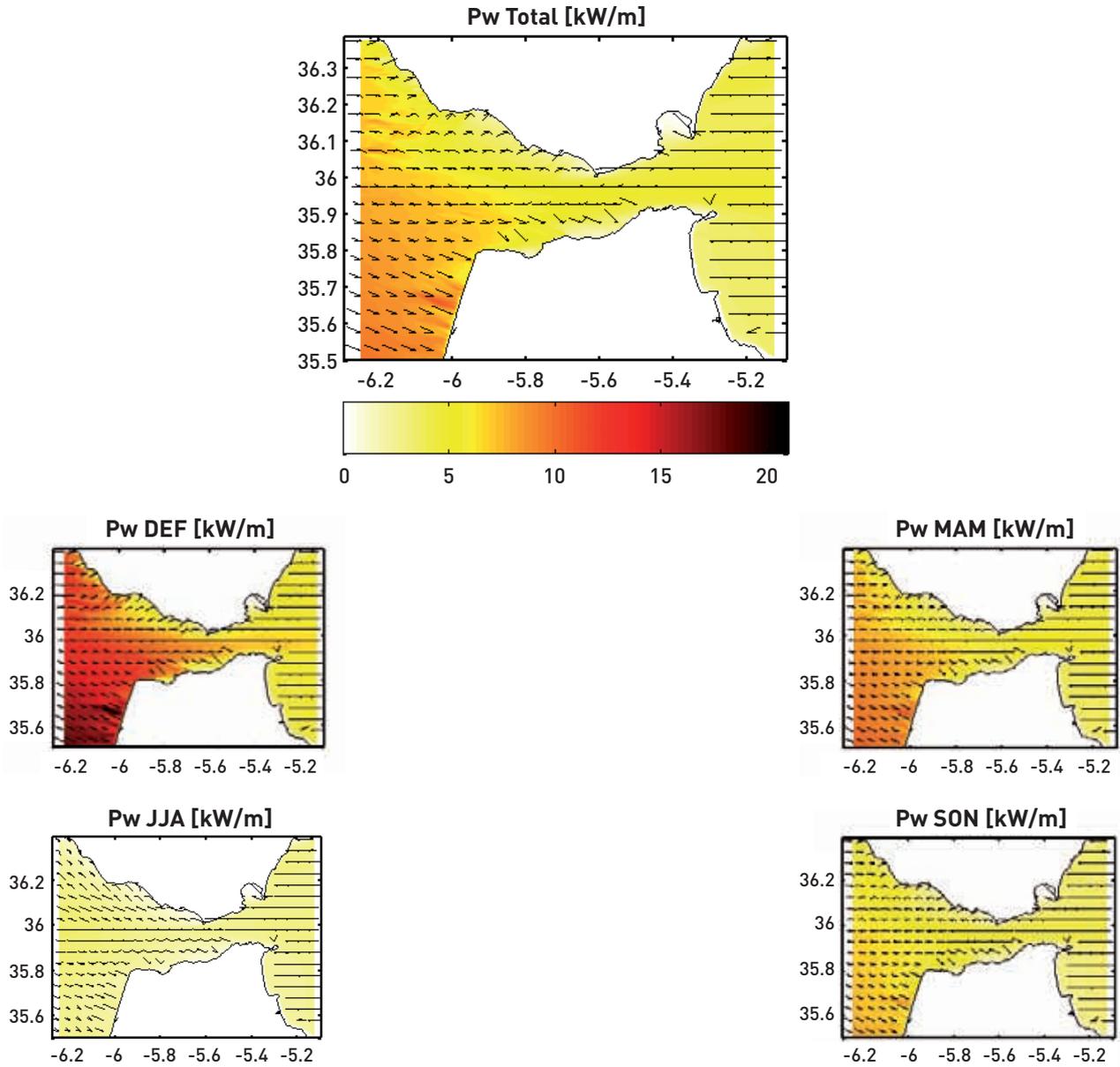


Figura A3.17. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM04

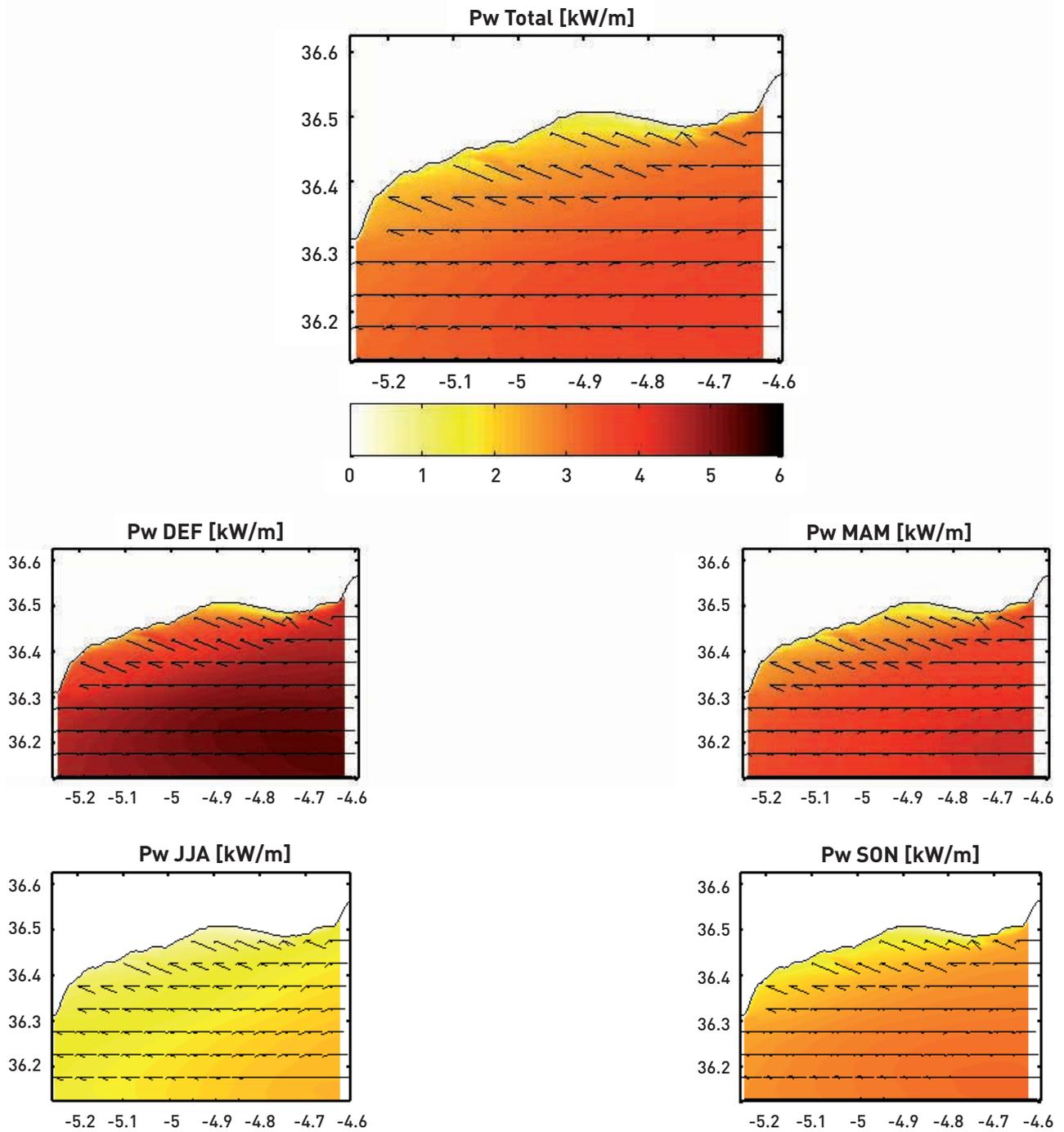


Figura A3.18. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM05

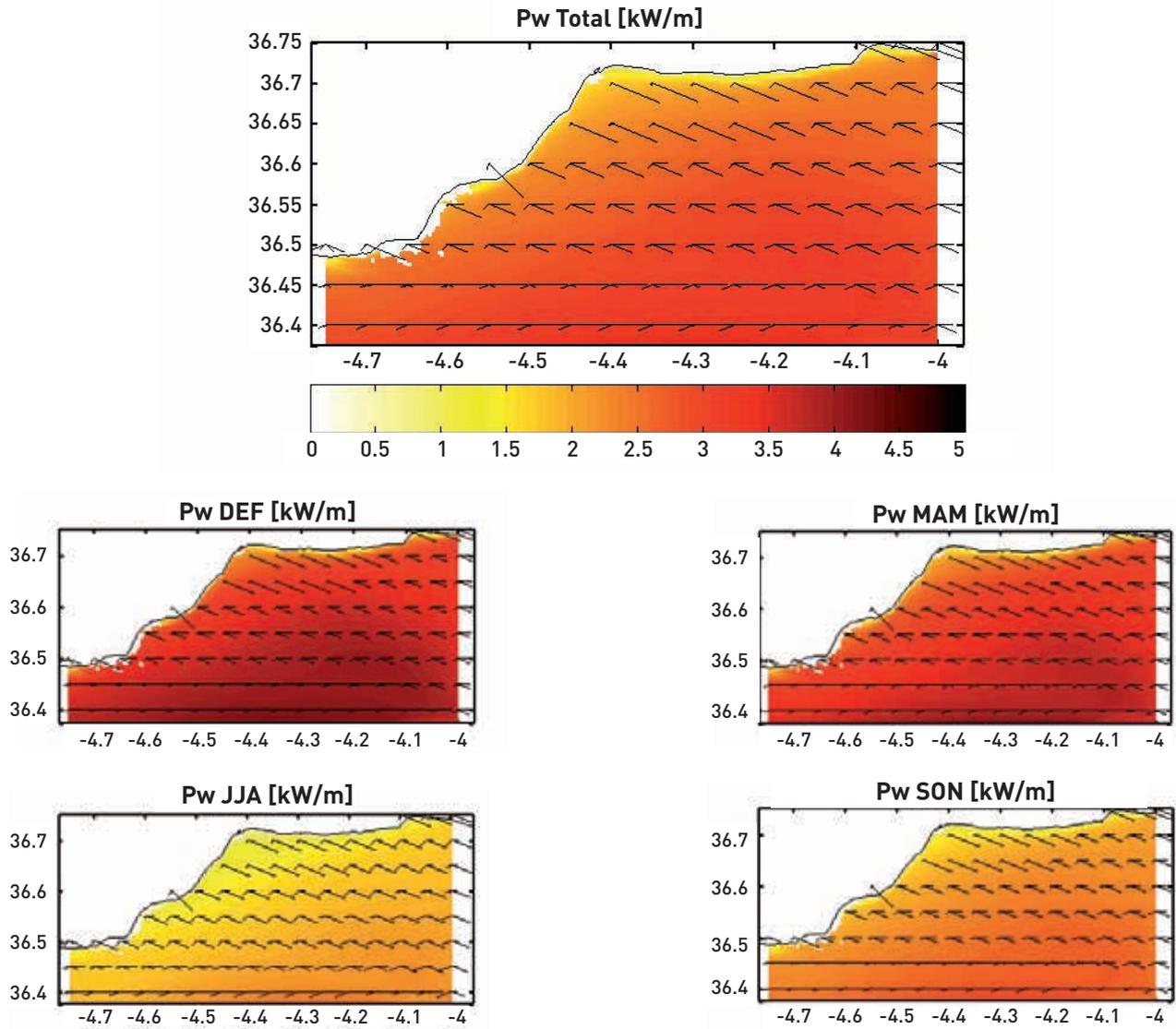


Figura A3.19. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM06

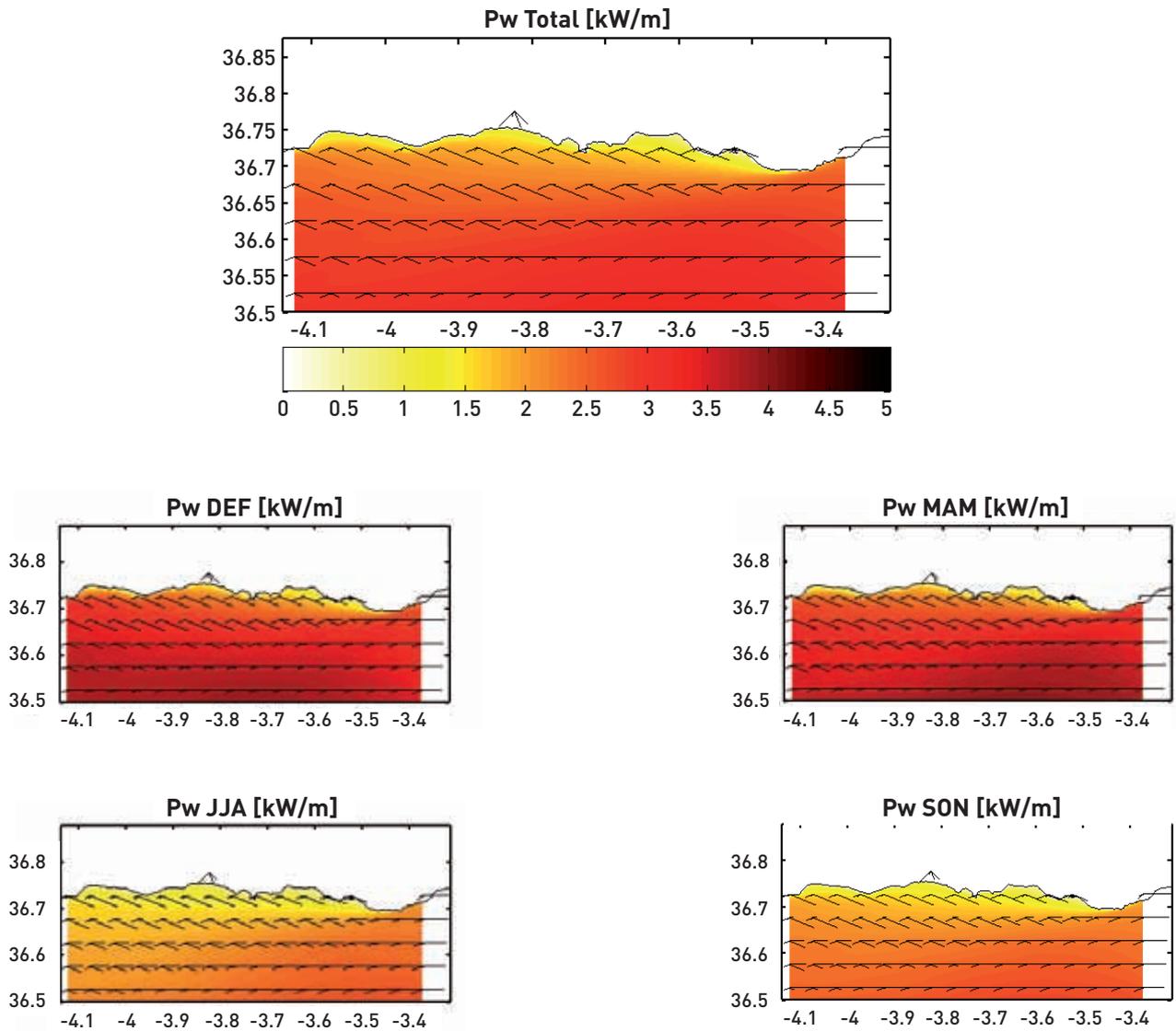
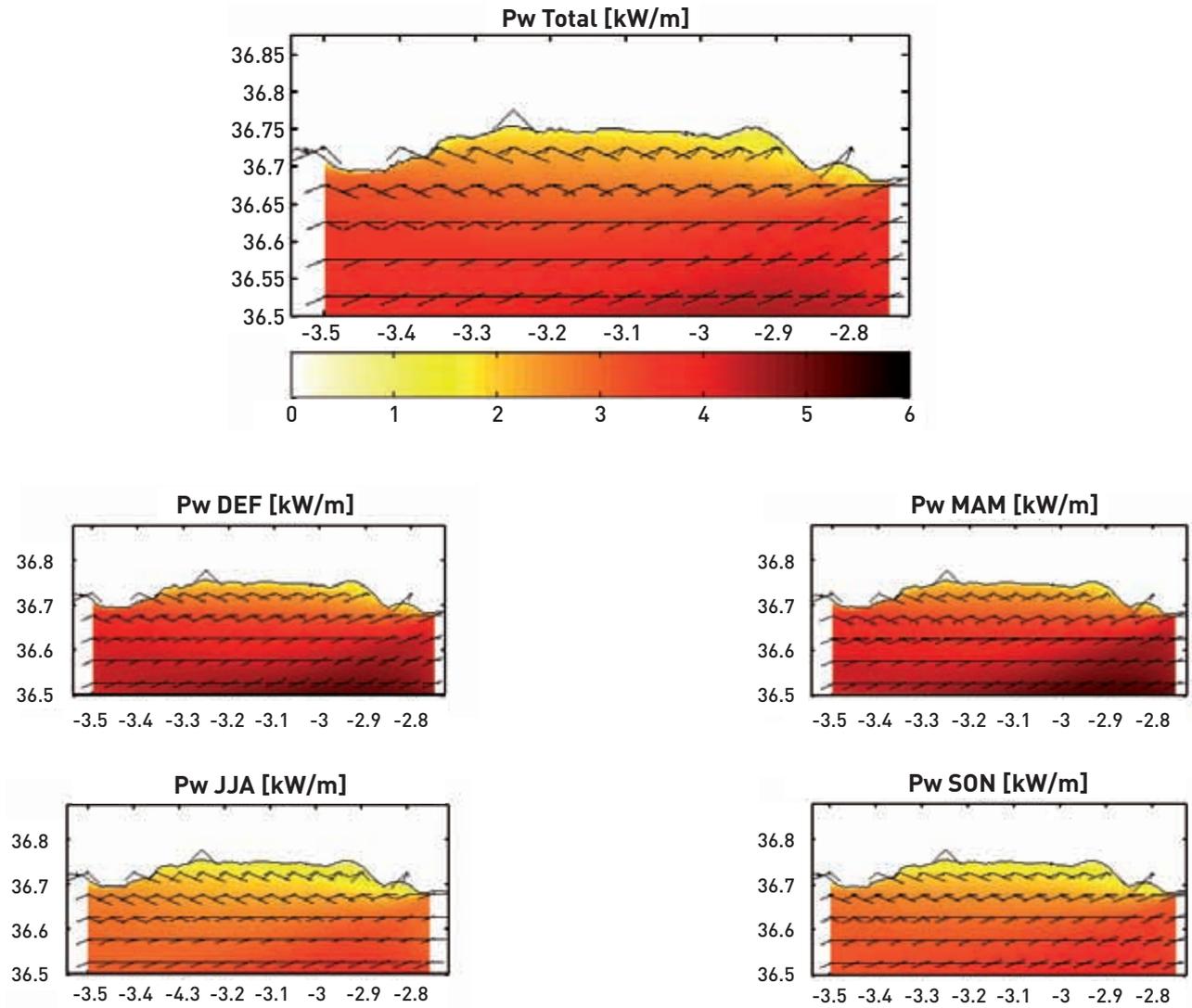


Figura A3.20. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM07



**Figura A3.21. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM08**

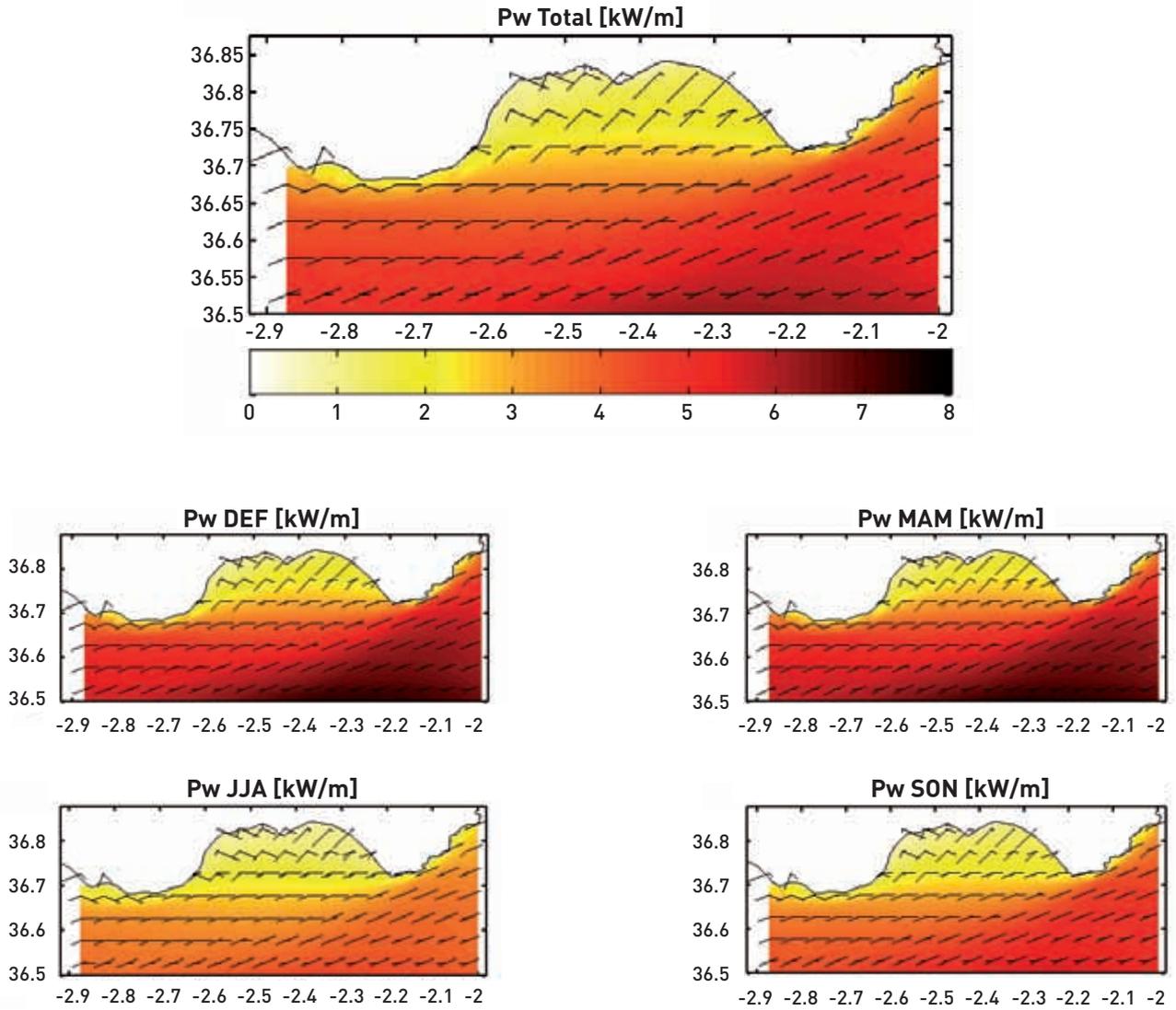


Figura A3.22. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM09

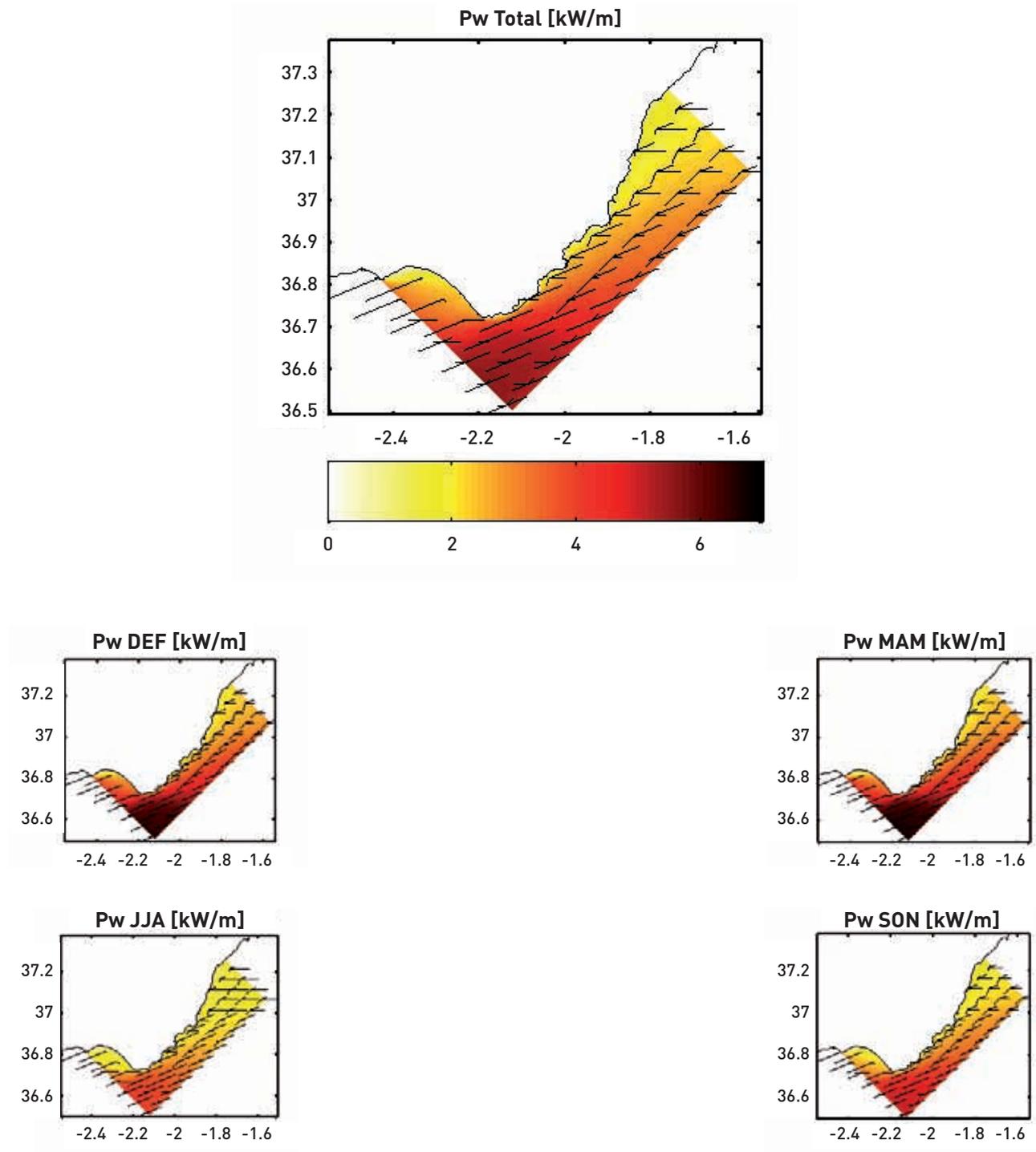


Figura A3.23. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM10

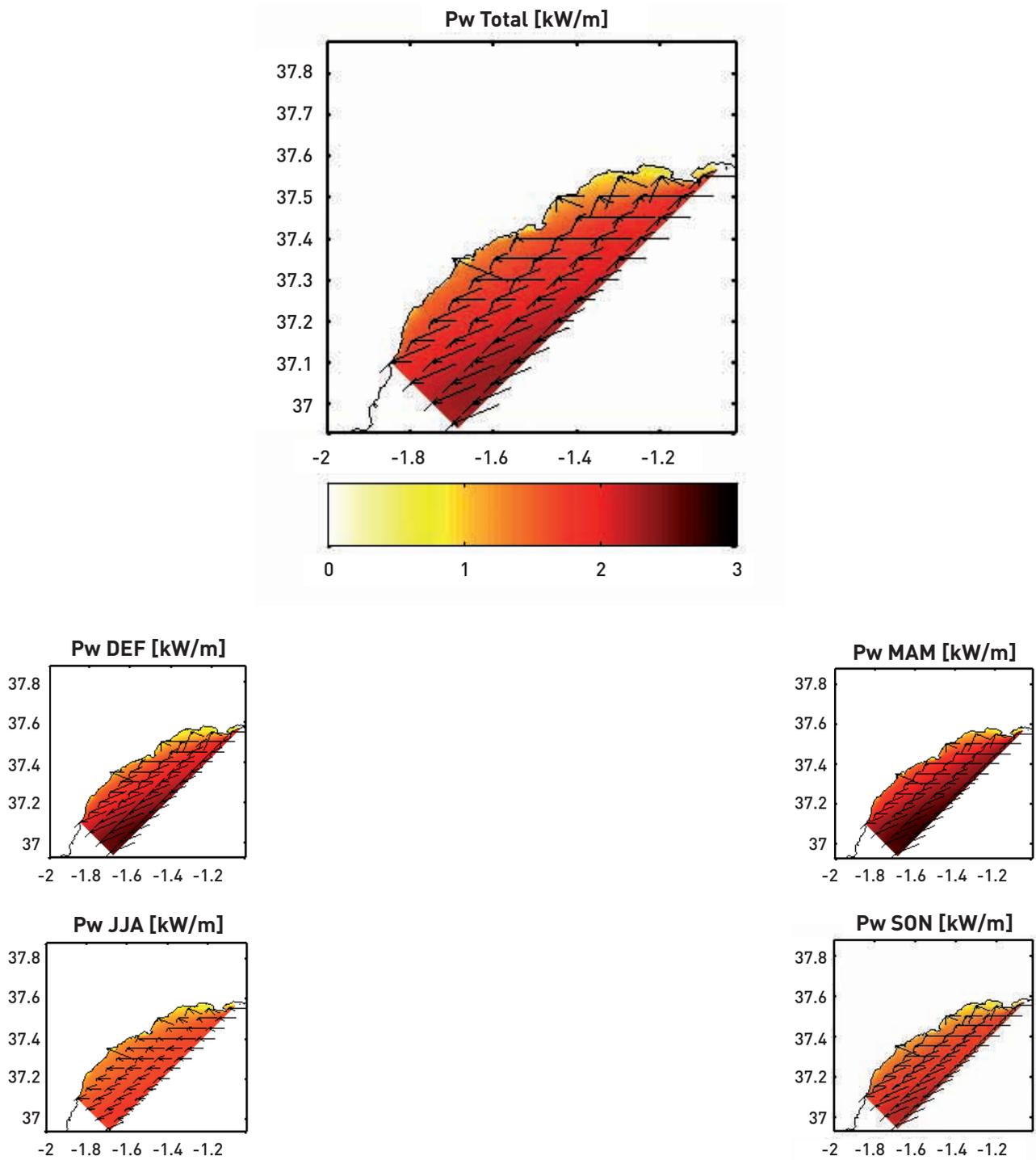


Figura A3.24. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM11

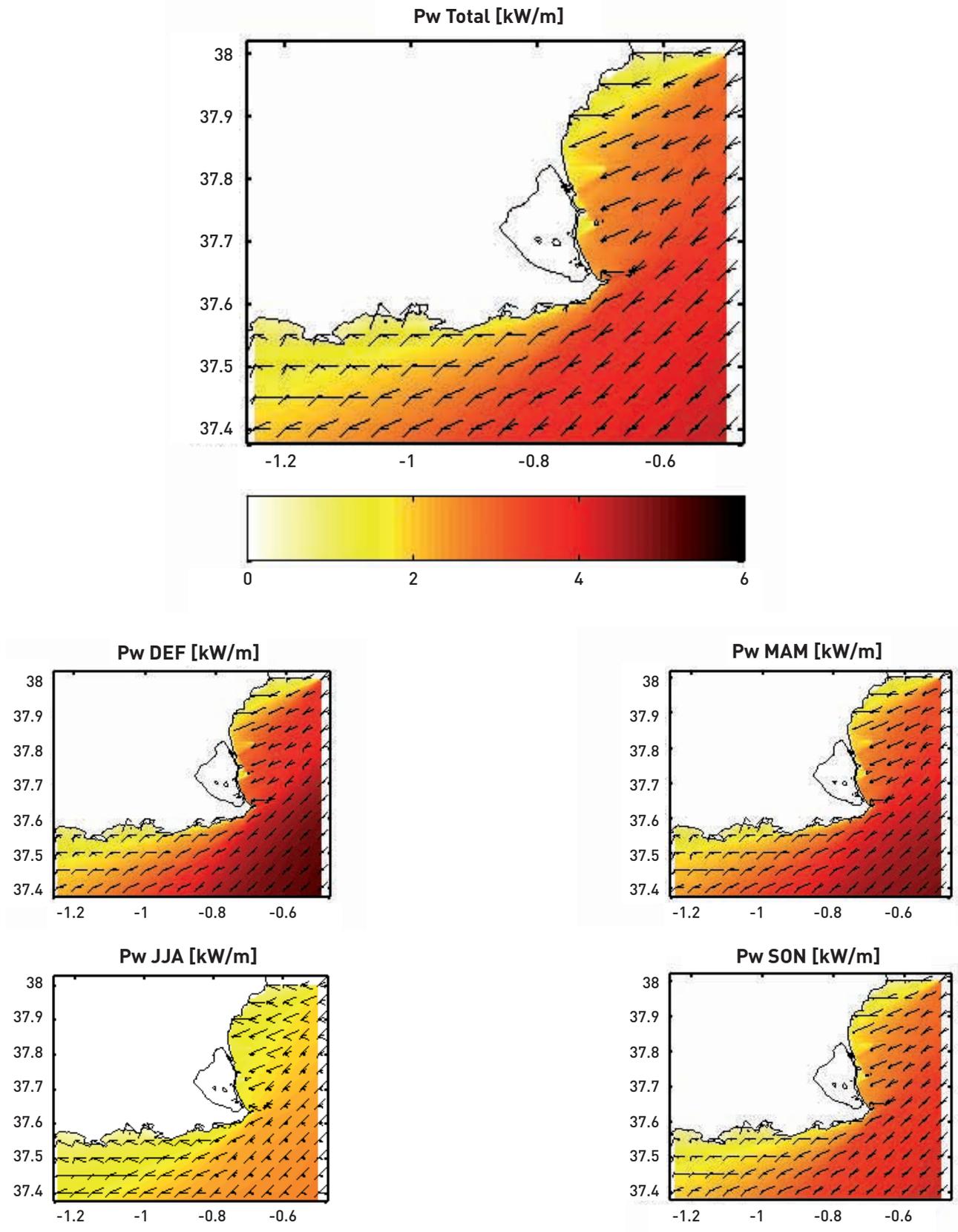


Figura A3.25. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM12

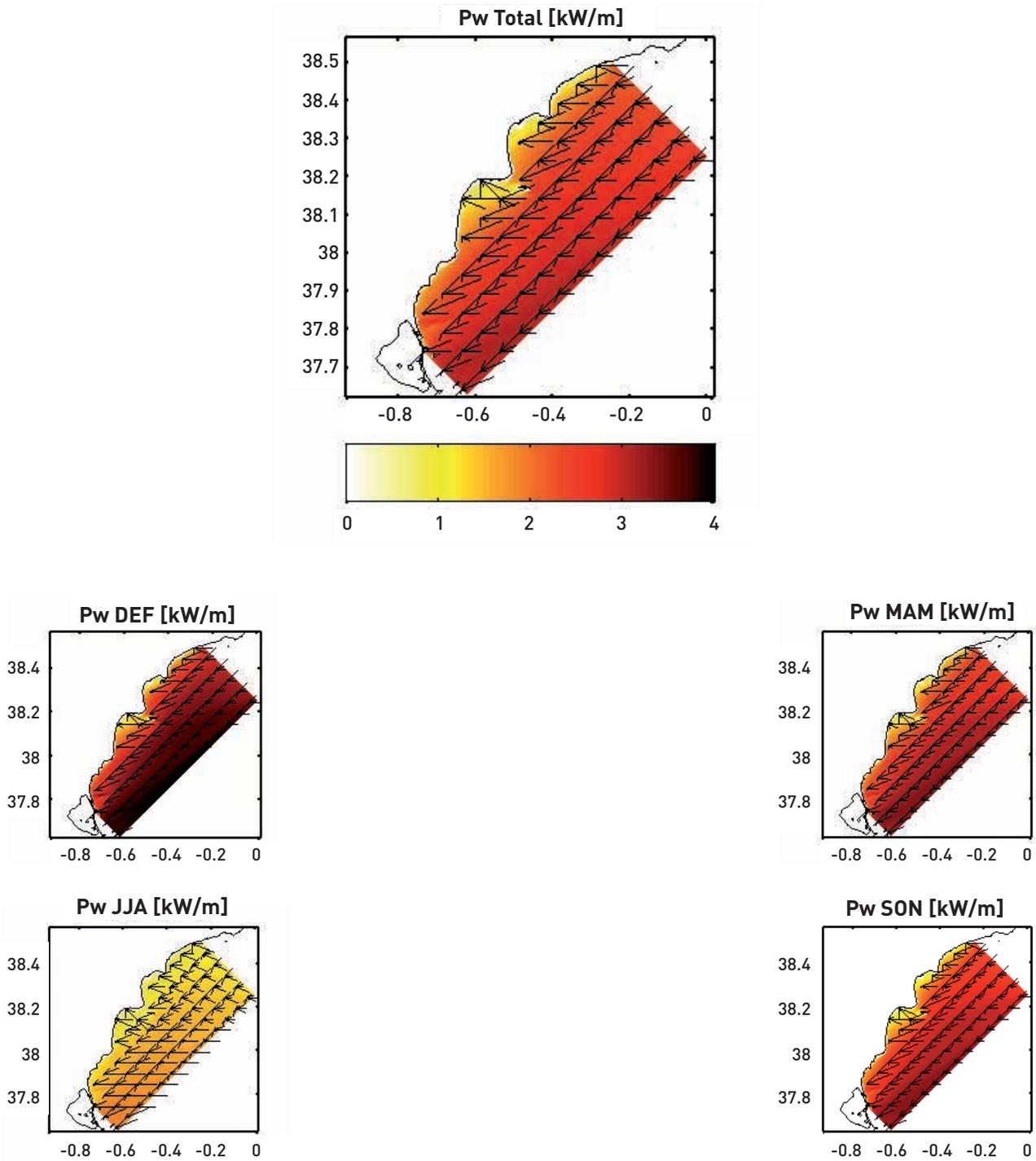


Figura A3.26. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM13

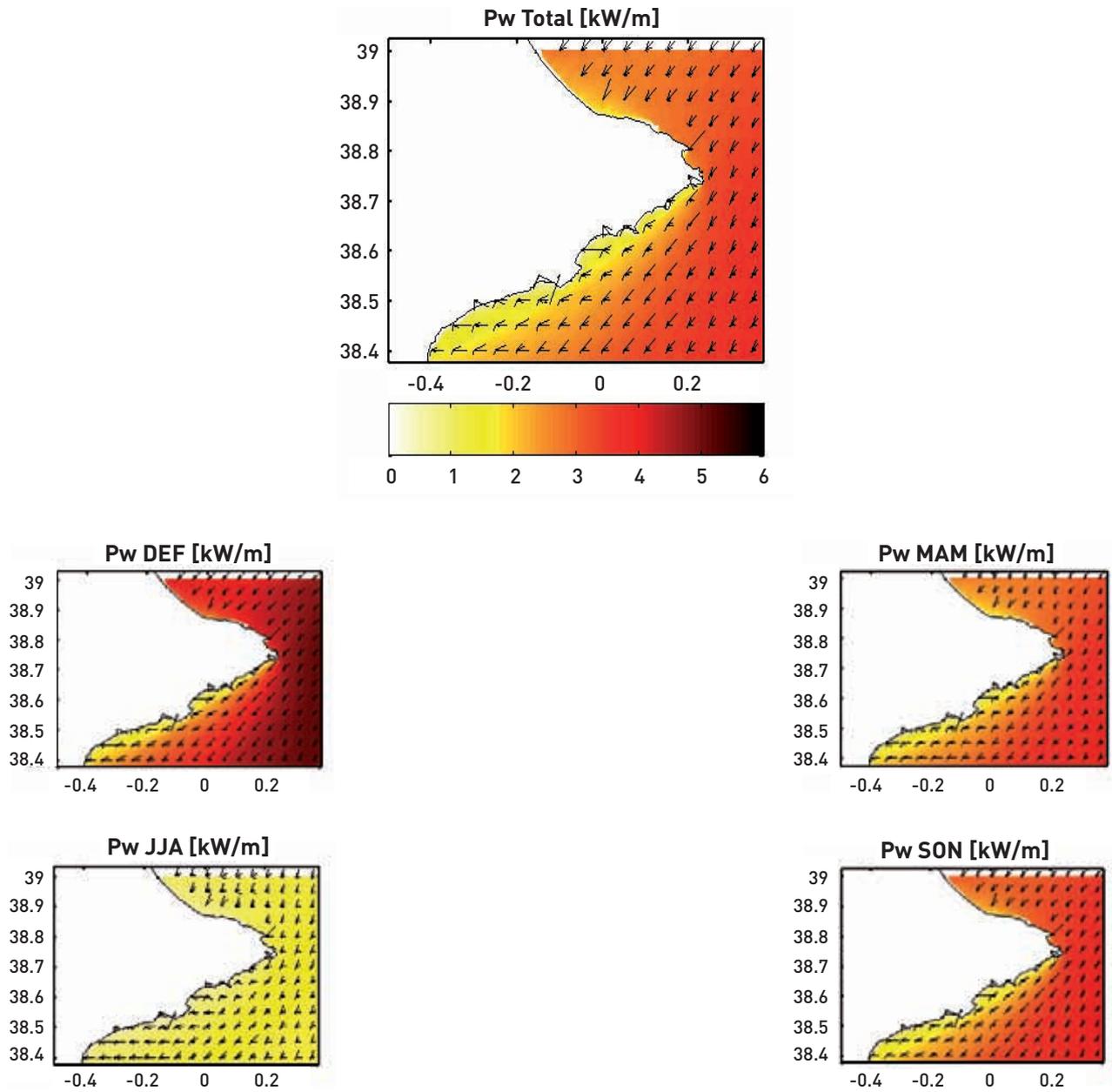


Figura A3.27. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM14

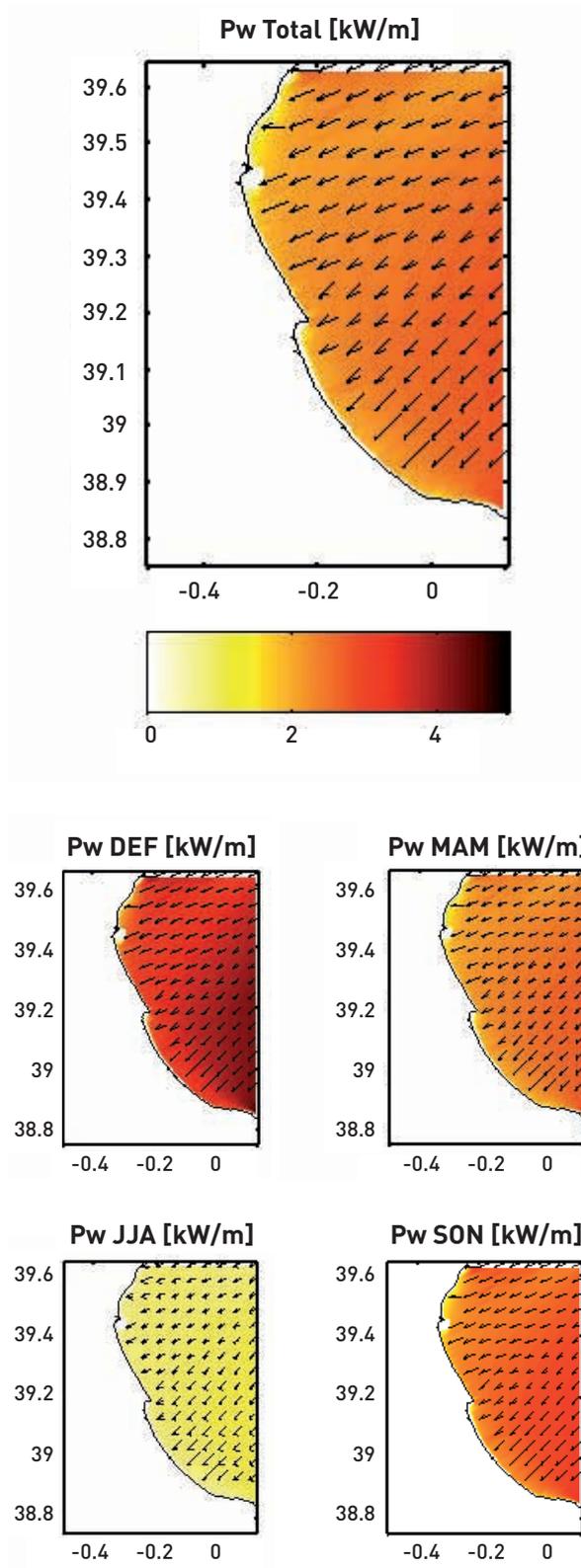


Figura A3.28. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM15

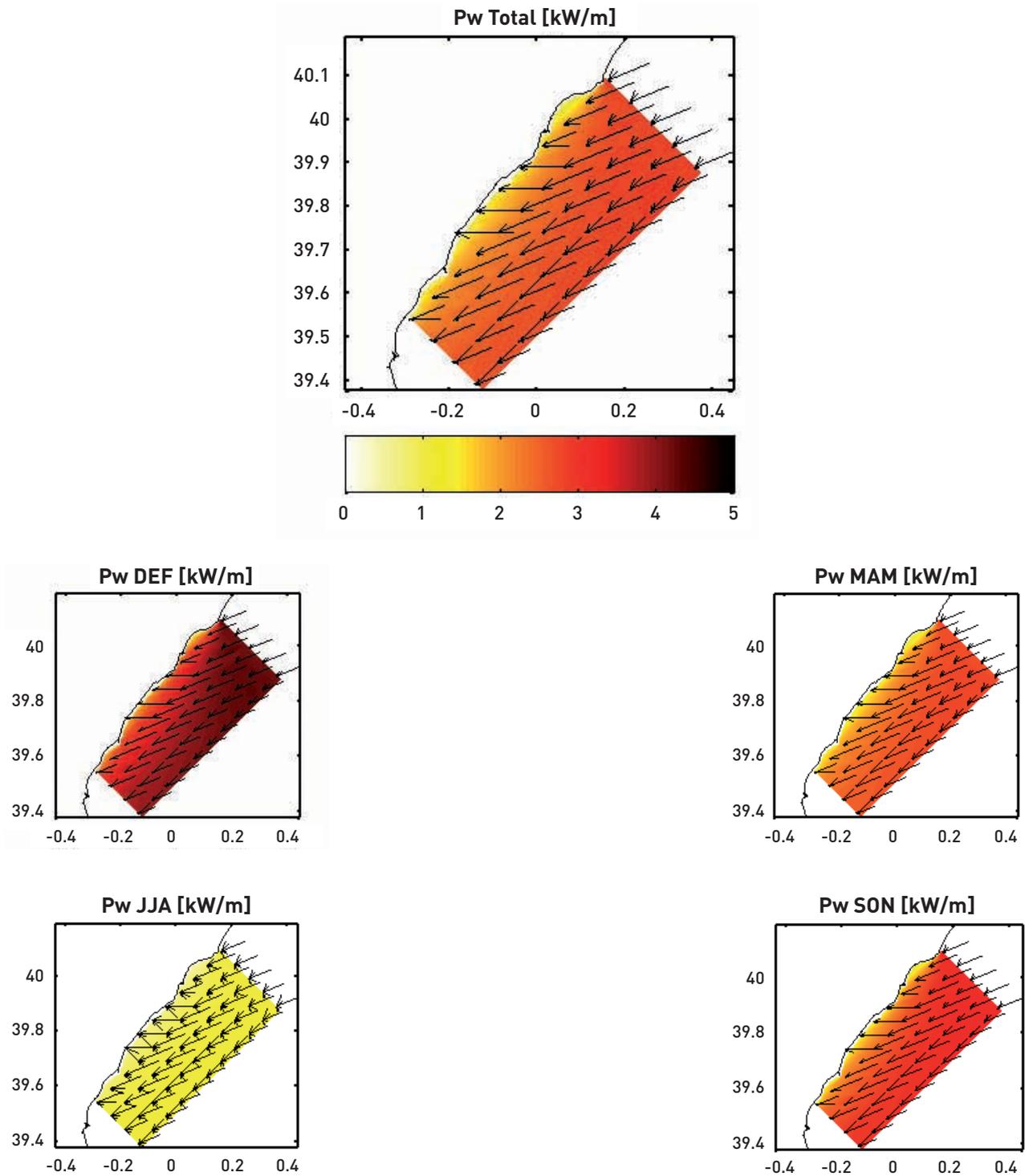


Figura A3.29. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM16

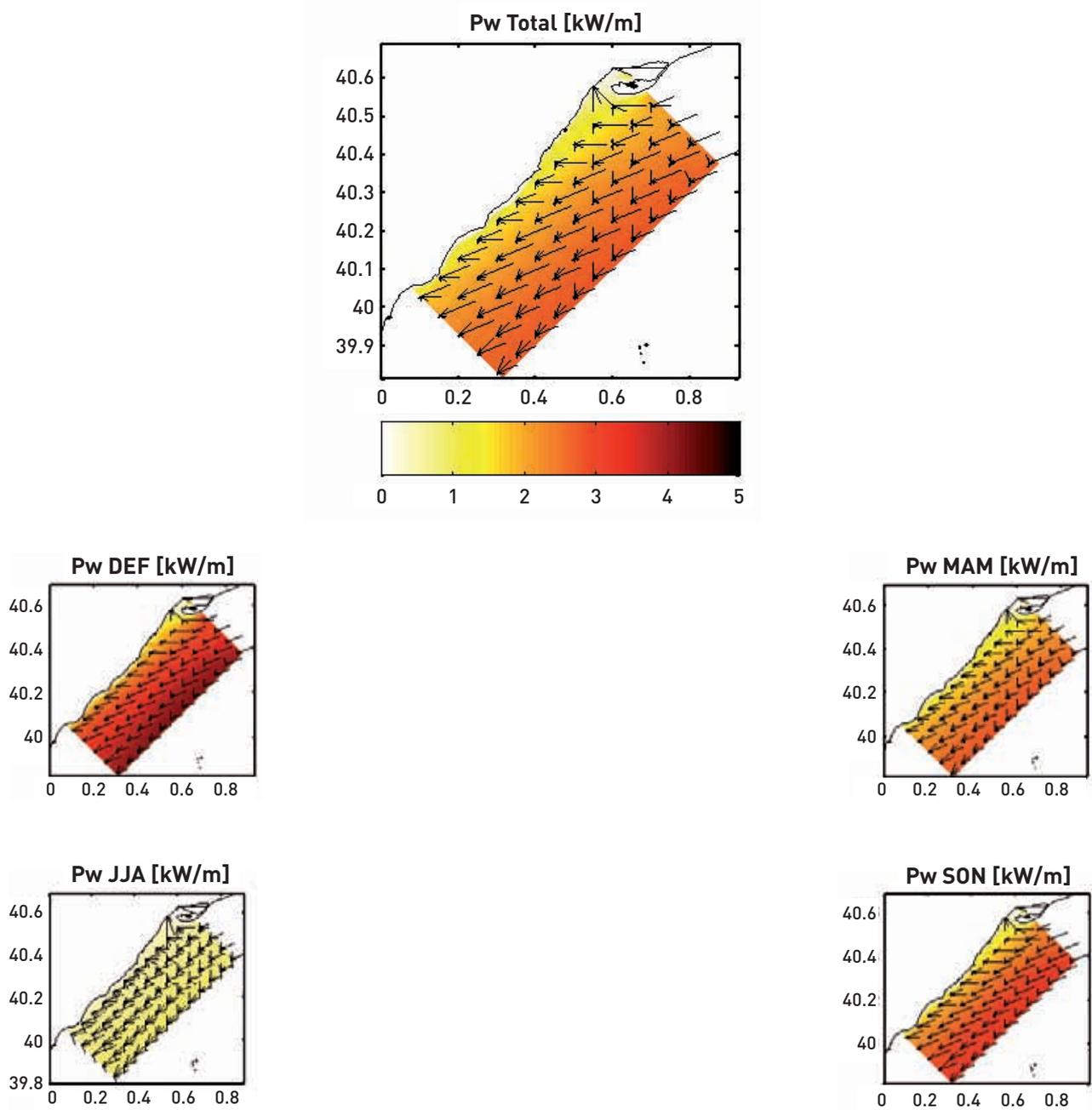


Figura A3.30. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM17

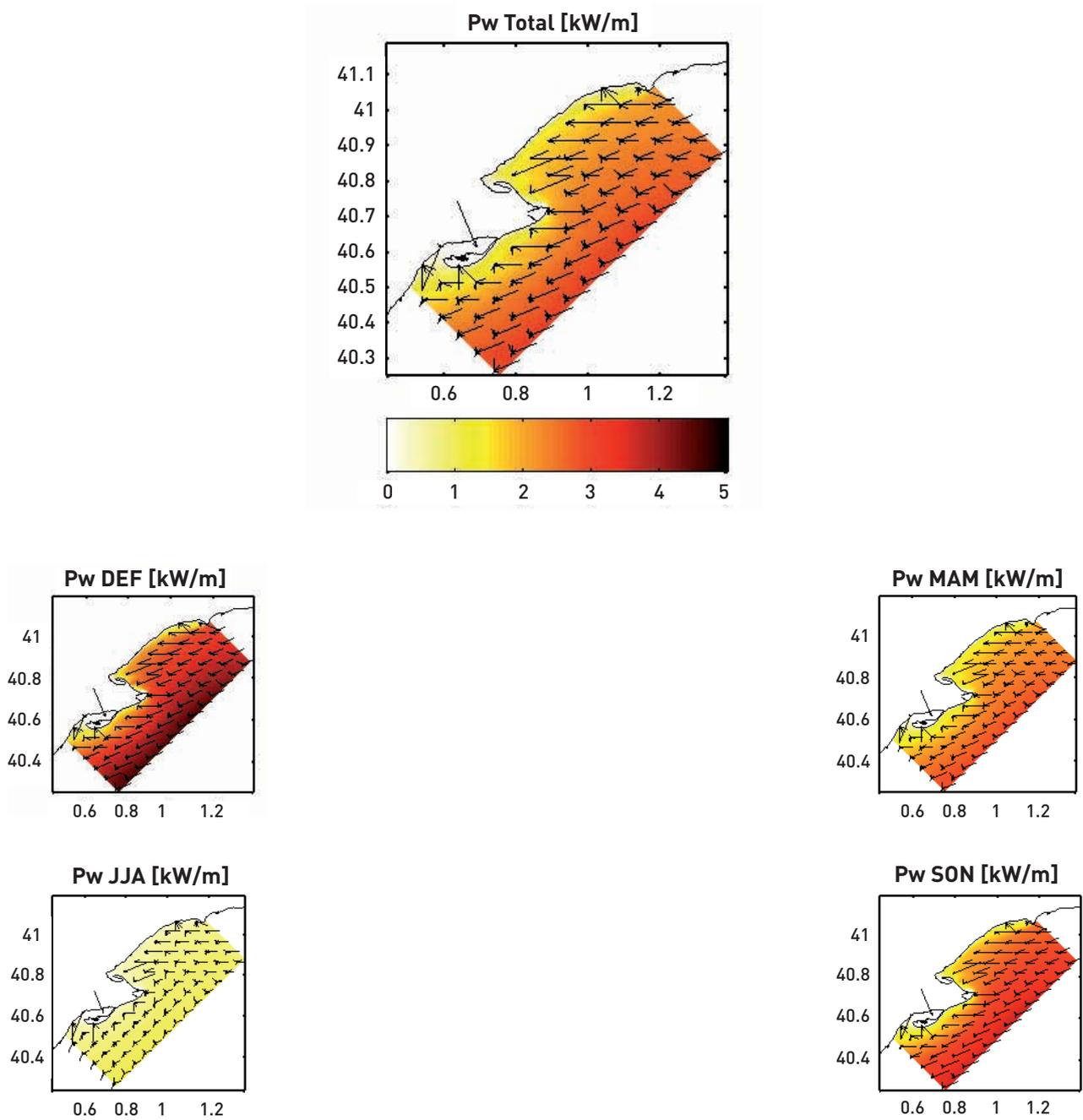


Figura A3.31. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM18

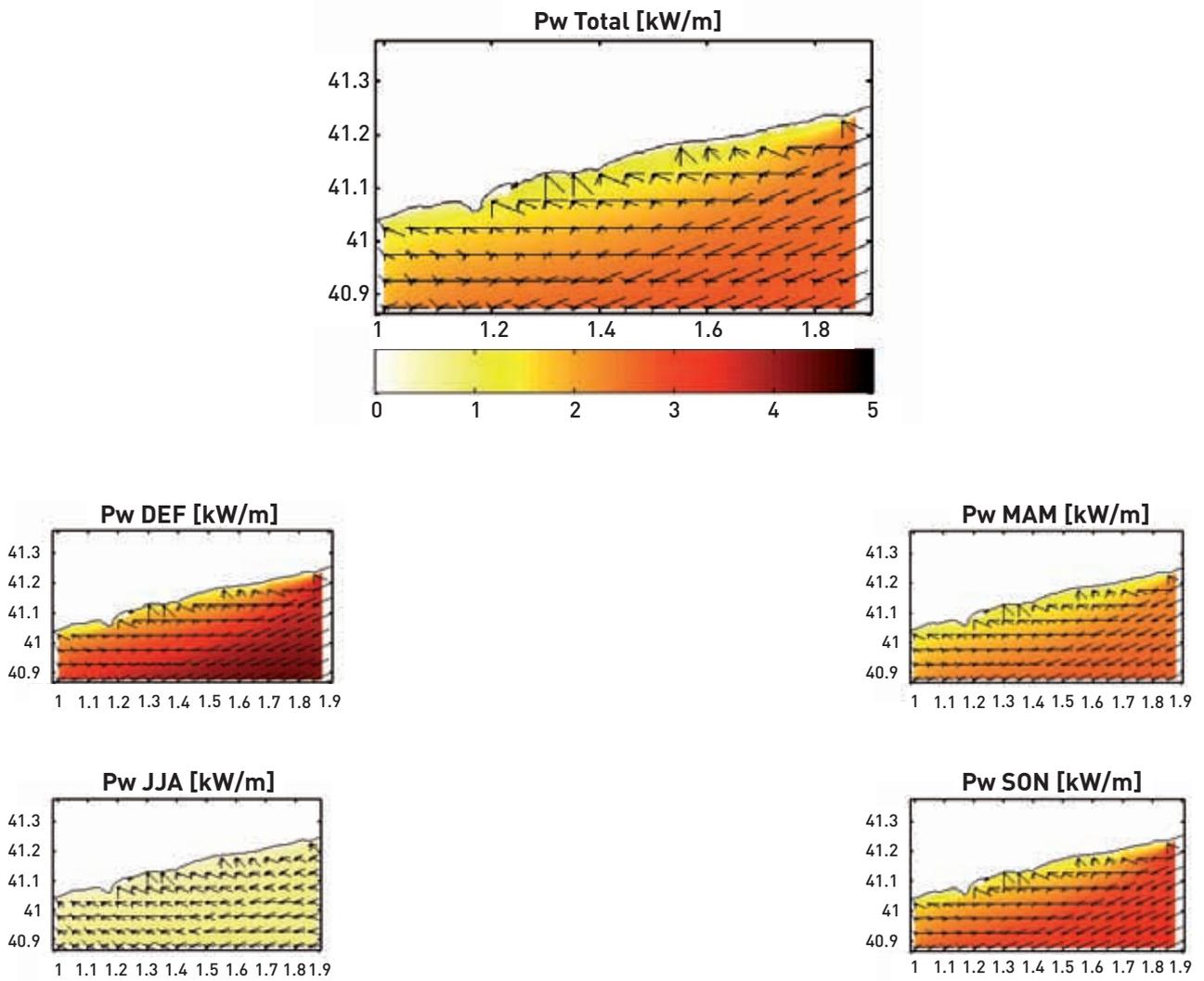


Figura A3.32. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM19

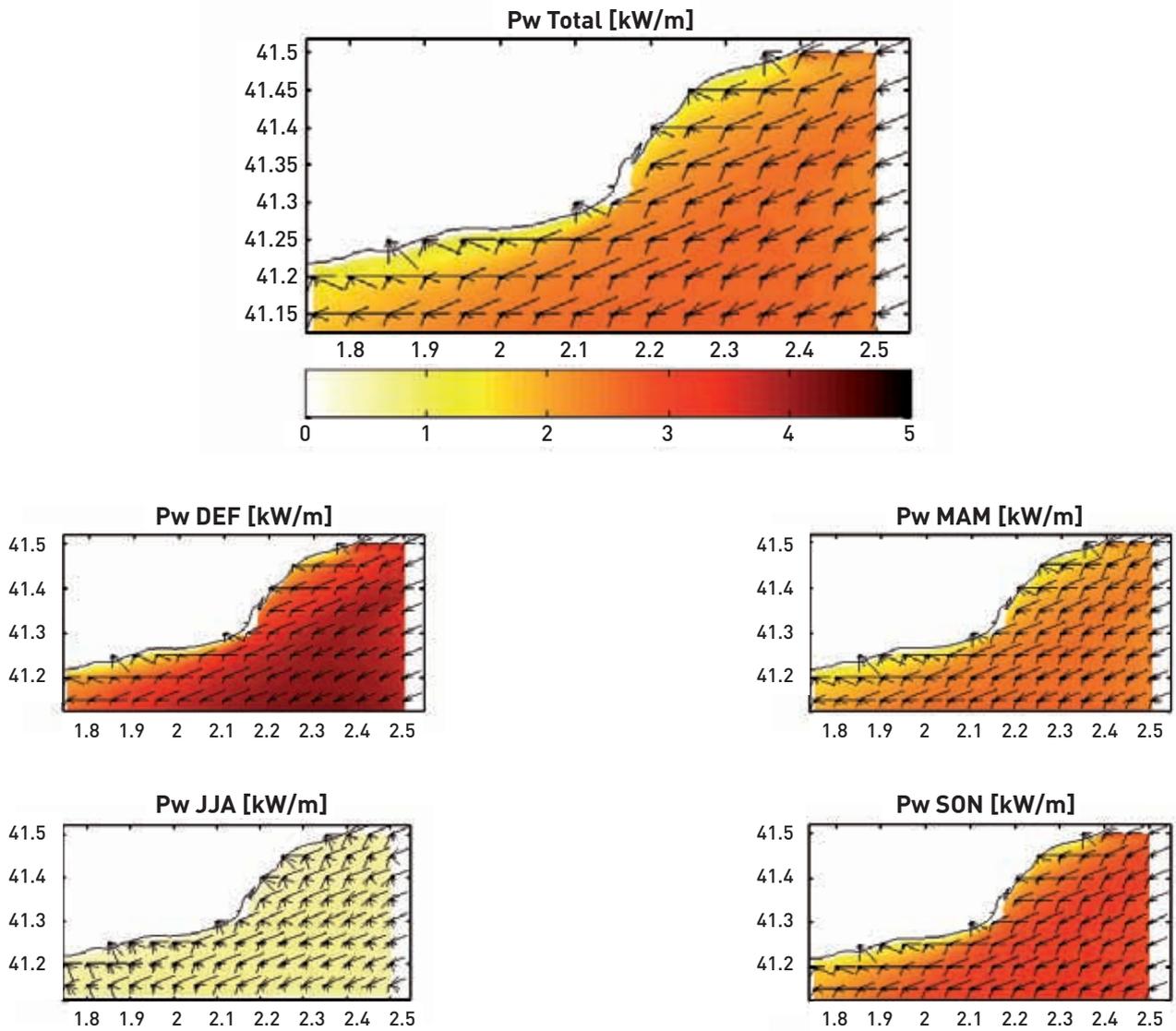


Figura A3.33. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM20

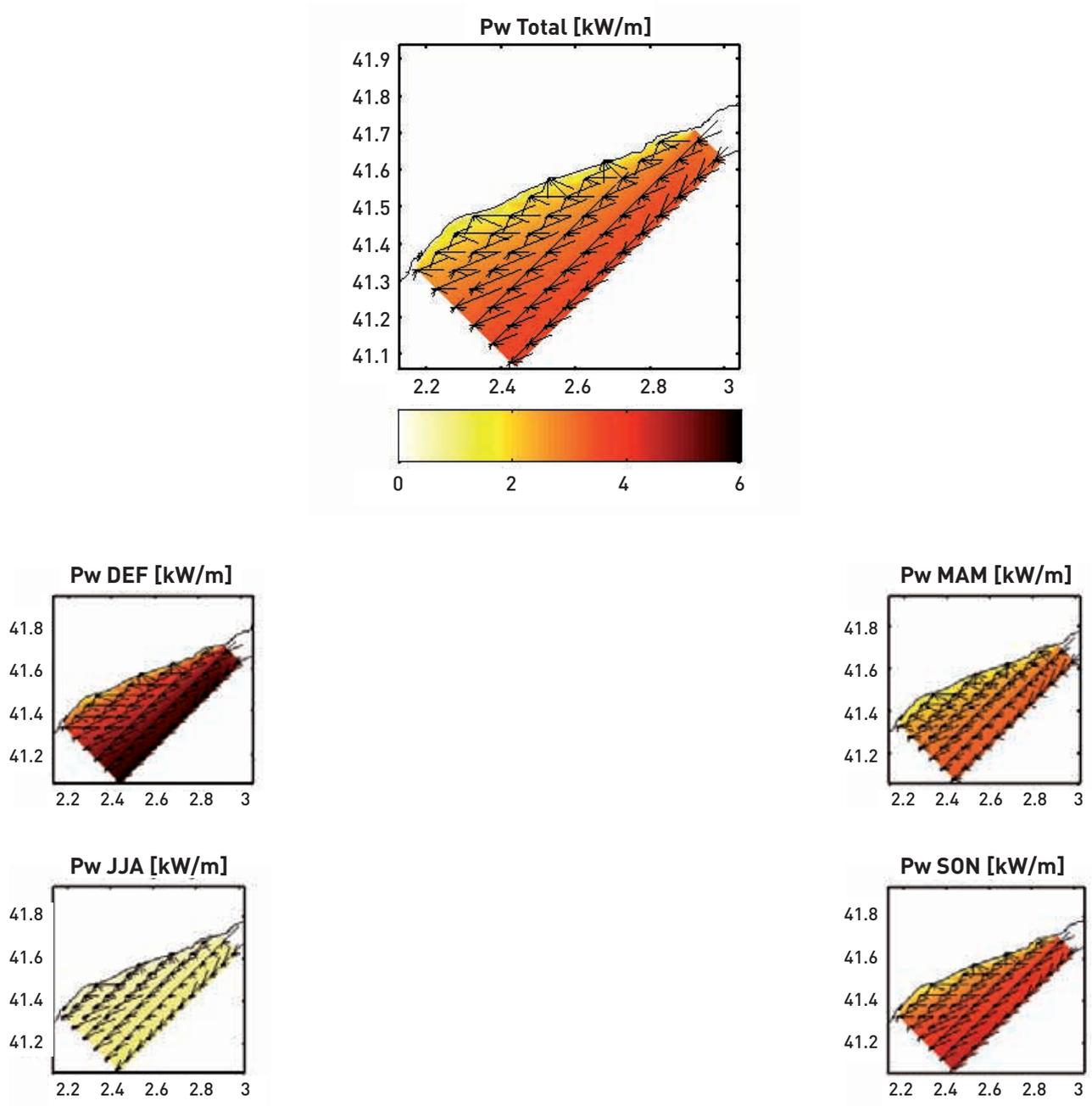


Figura A3.34. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM21

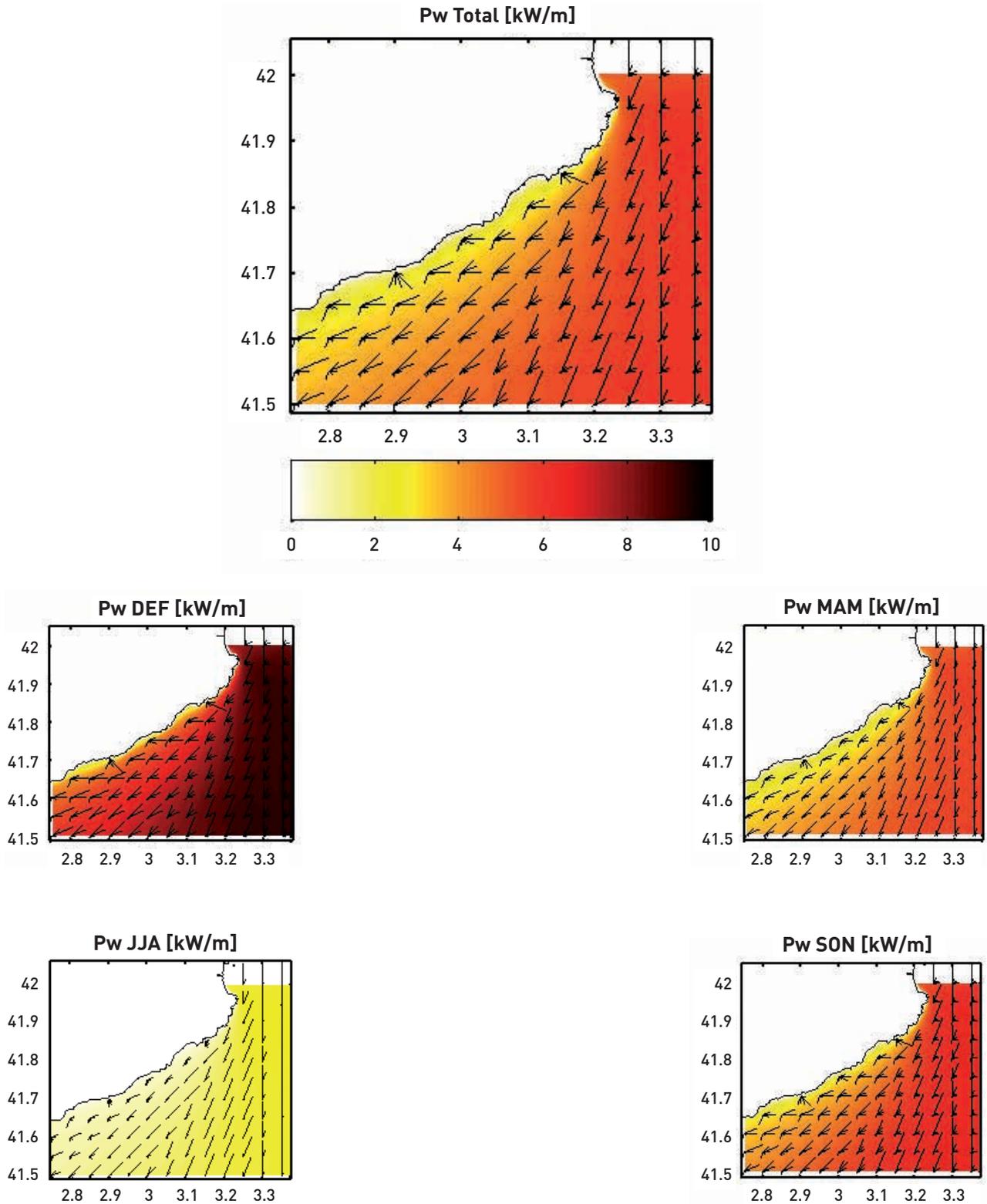


Figura A3.35. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM22

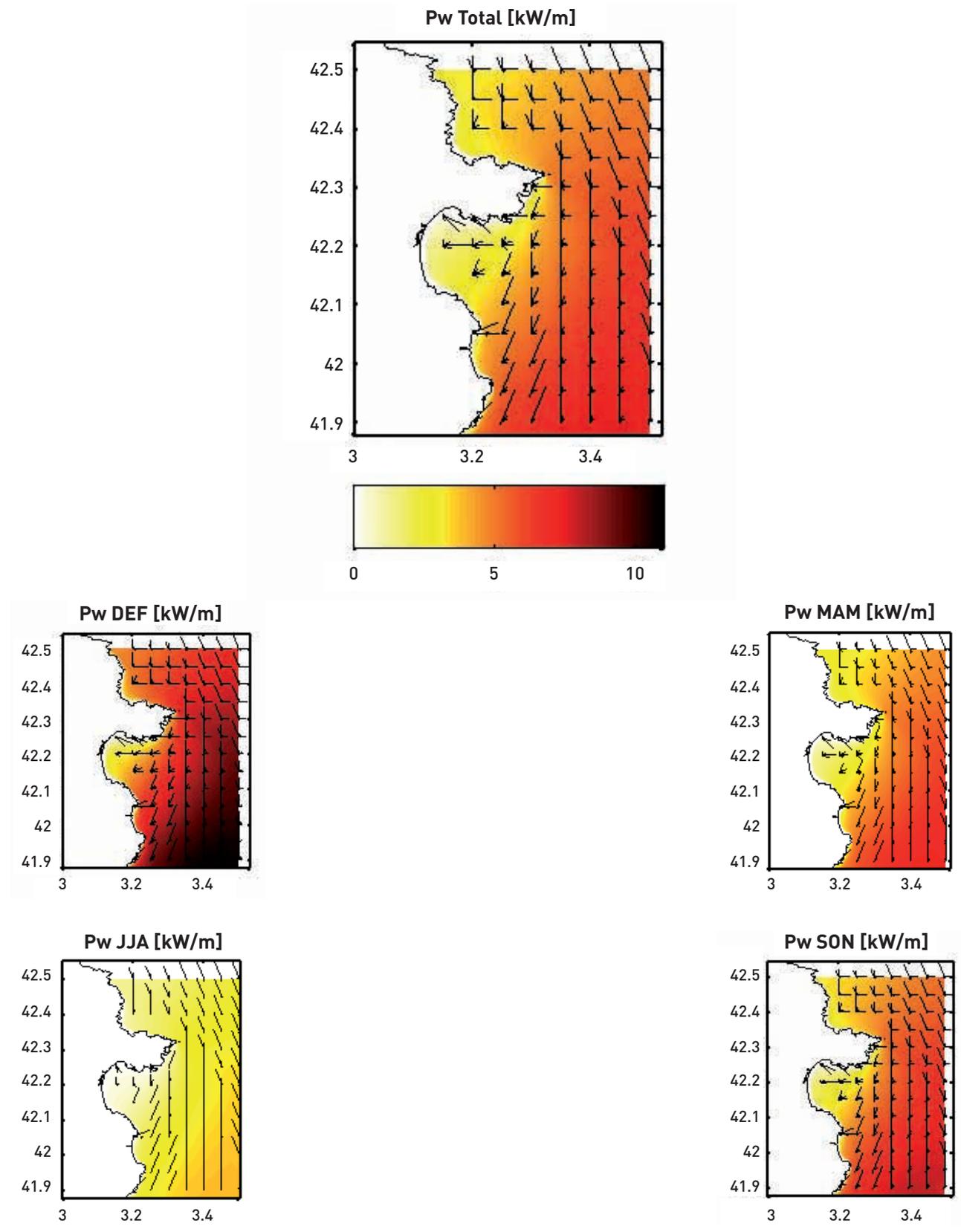


Figura A3.36. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM23

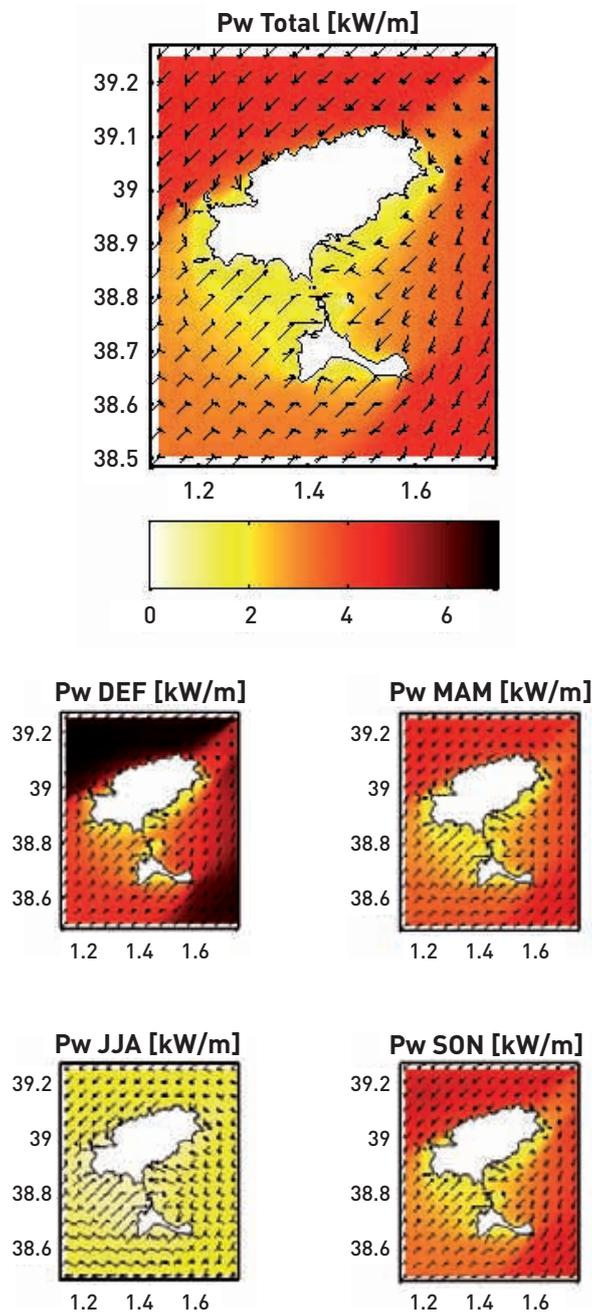


Figura A3.37. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM24

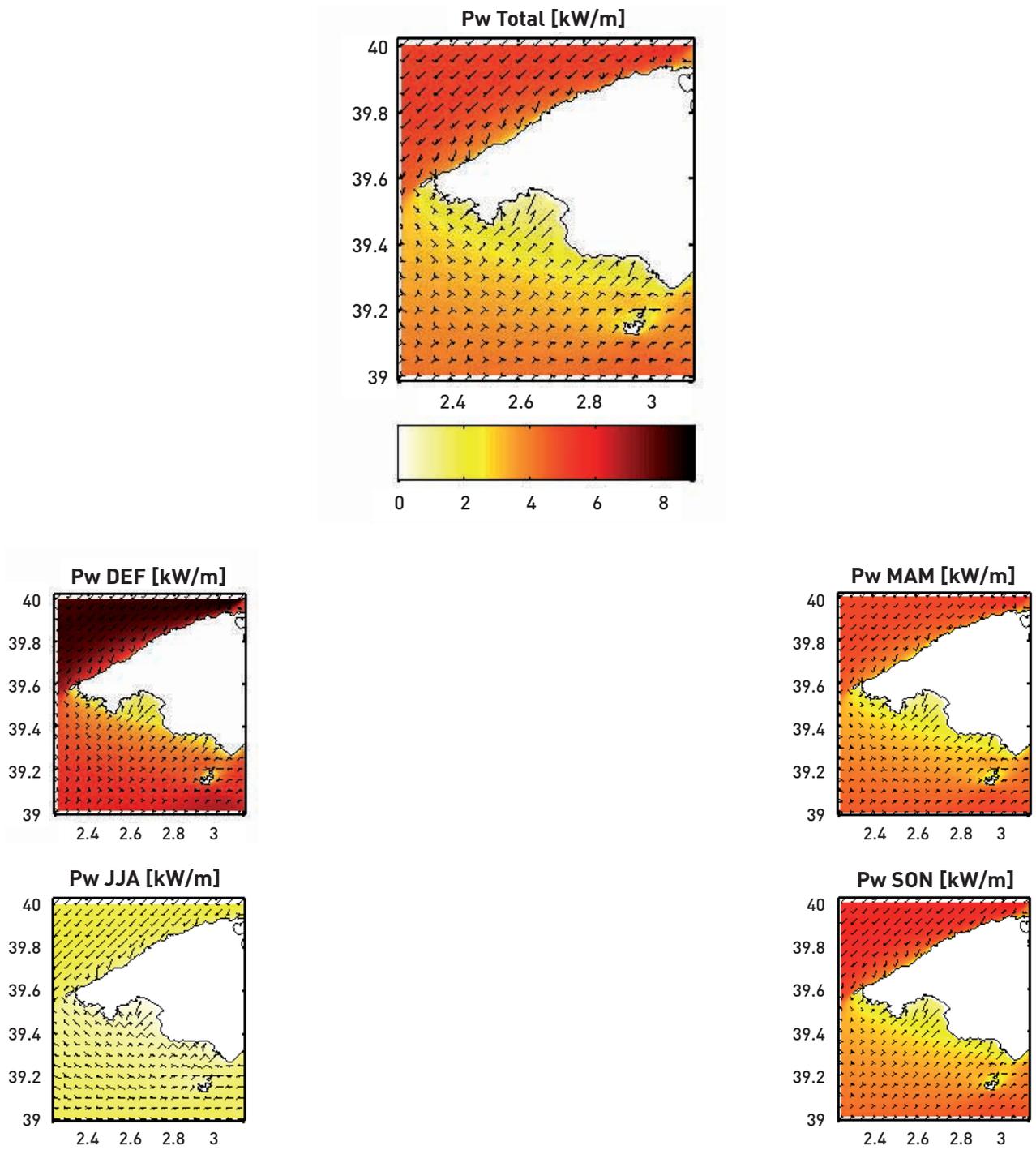


Figura A3.38. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM25

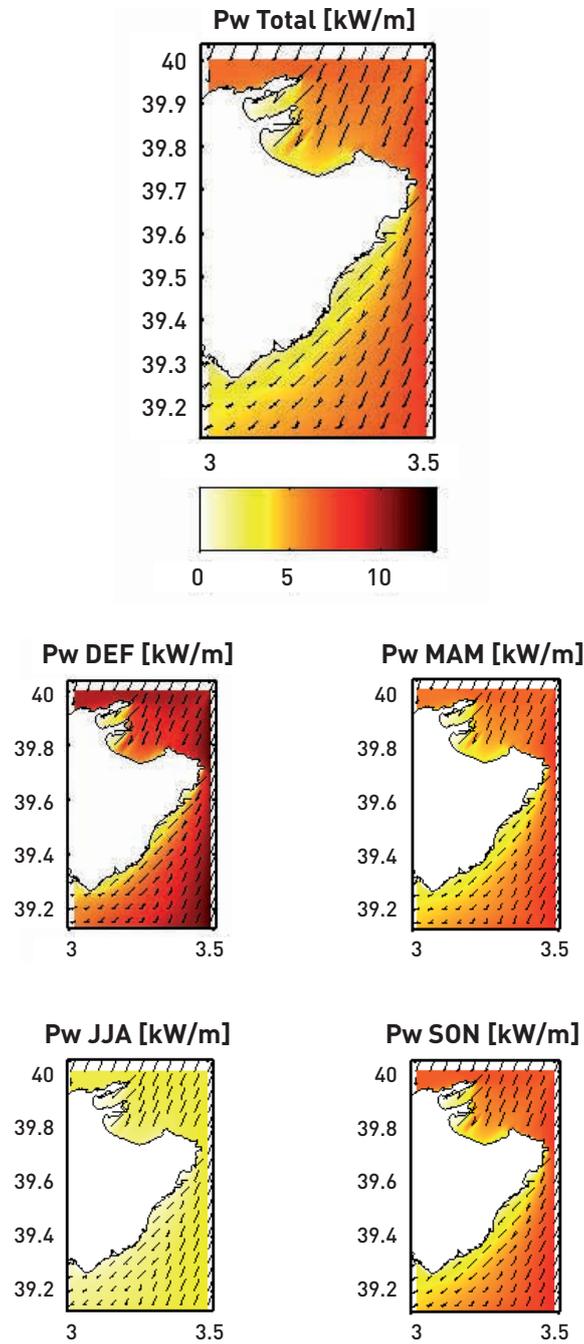


Figura A3.39. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM26

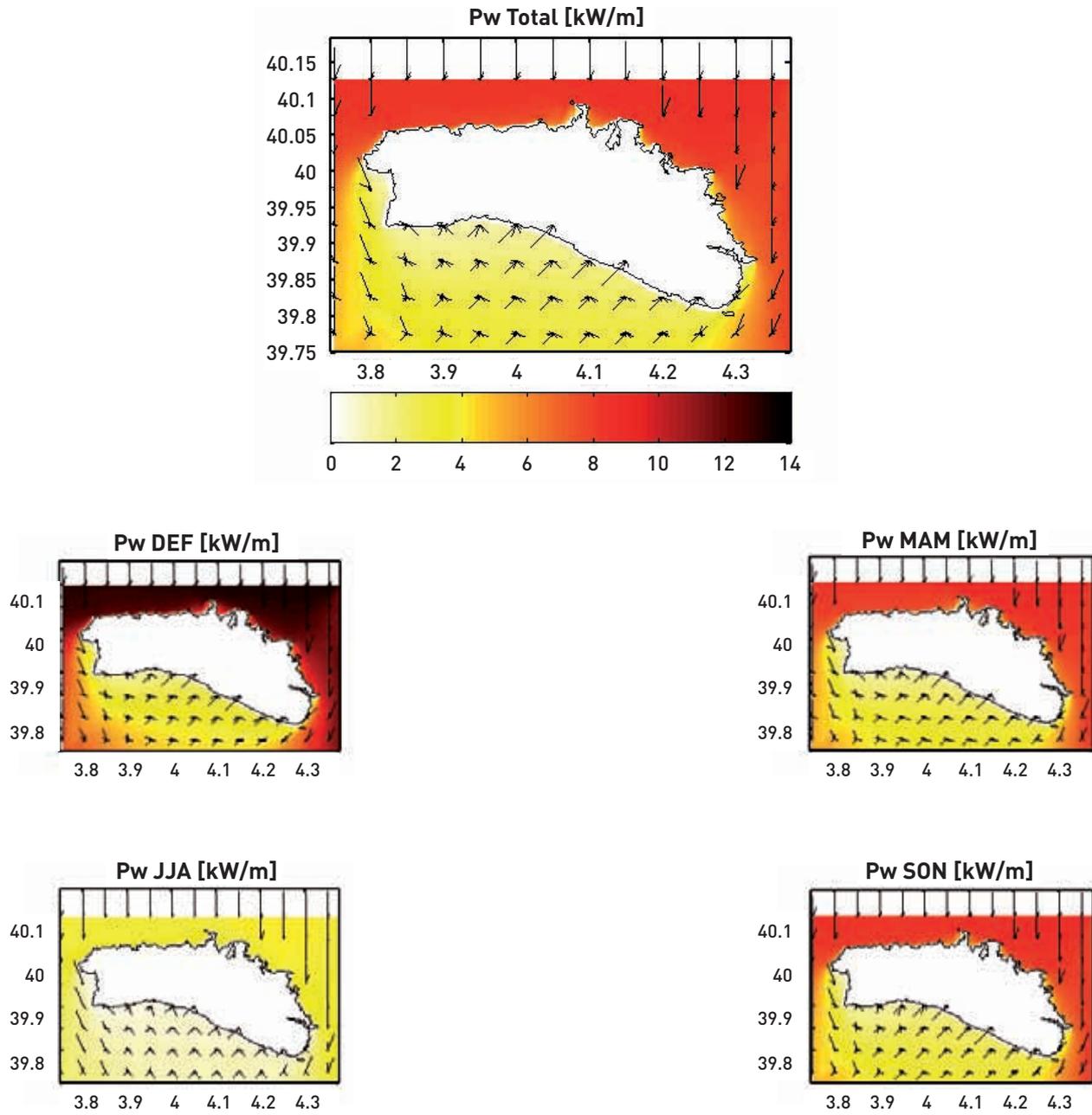
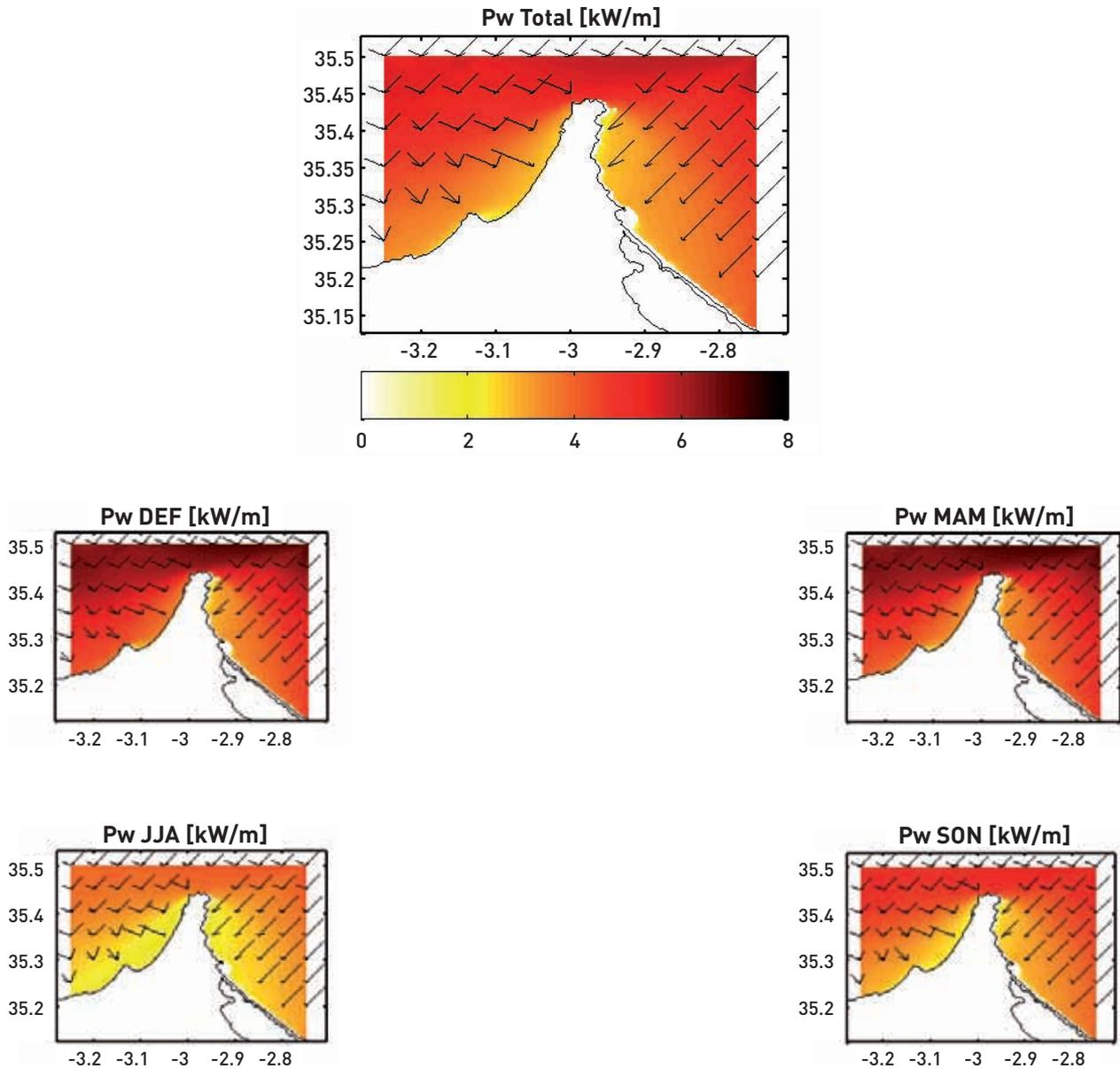


Figura A3.40. Potencia media y porcentaje de energía por sectores: total y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) en la malla de cálculo GM27

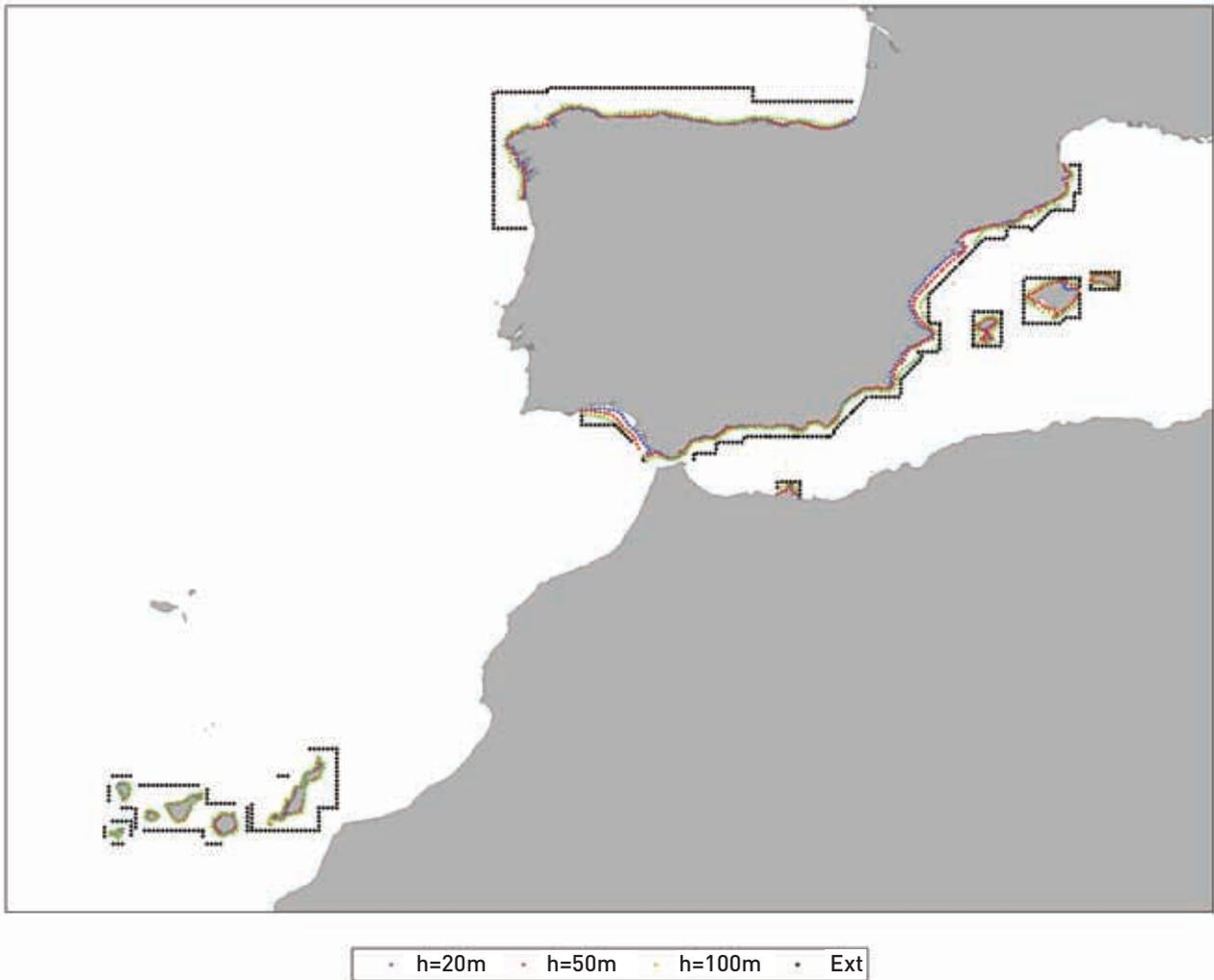


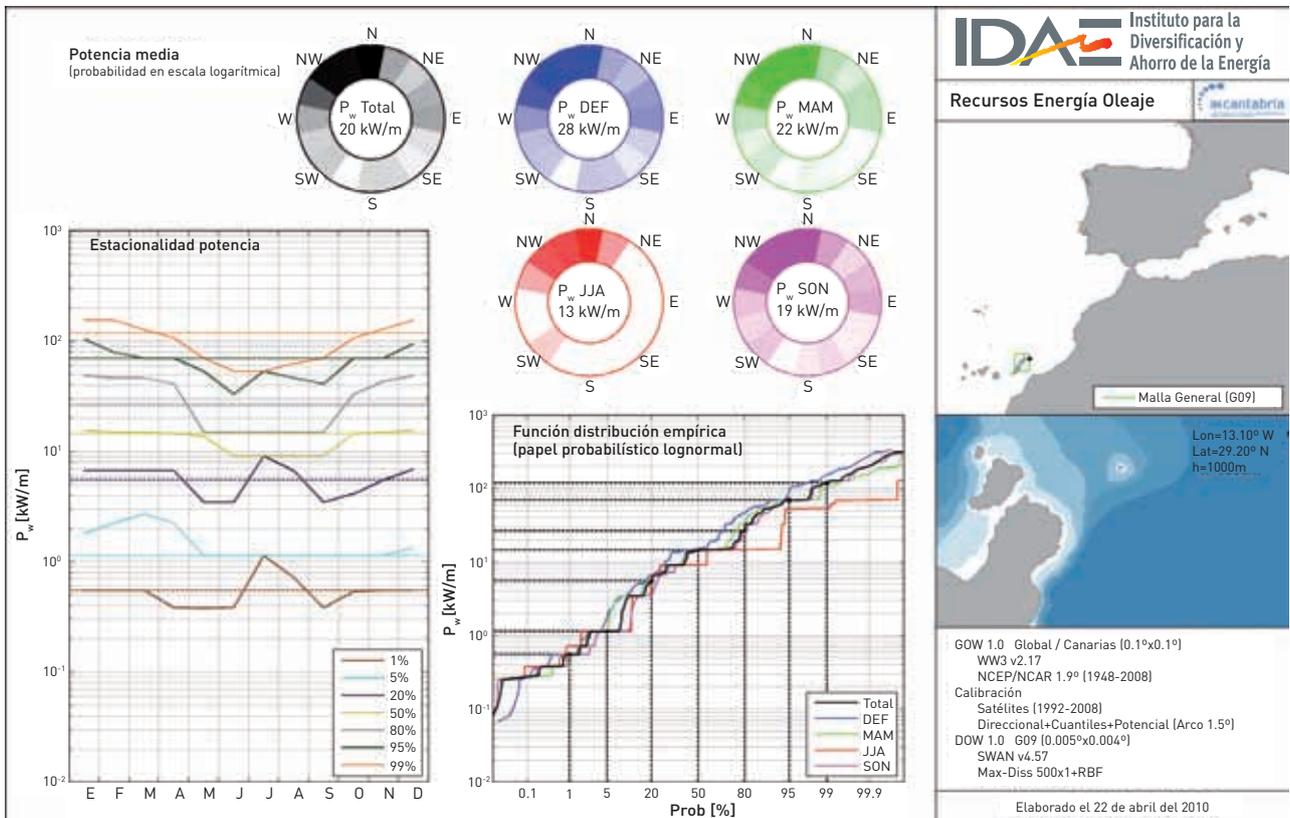
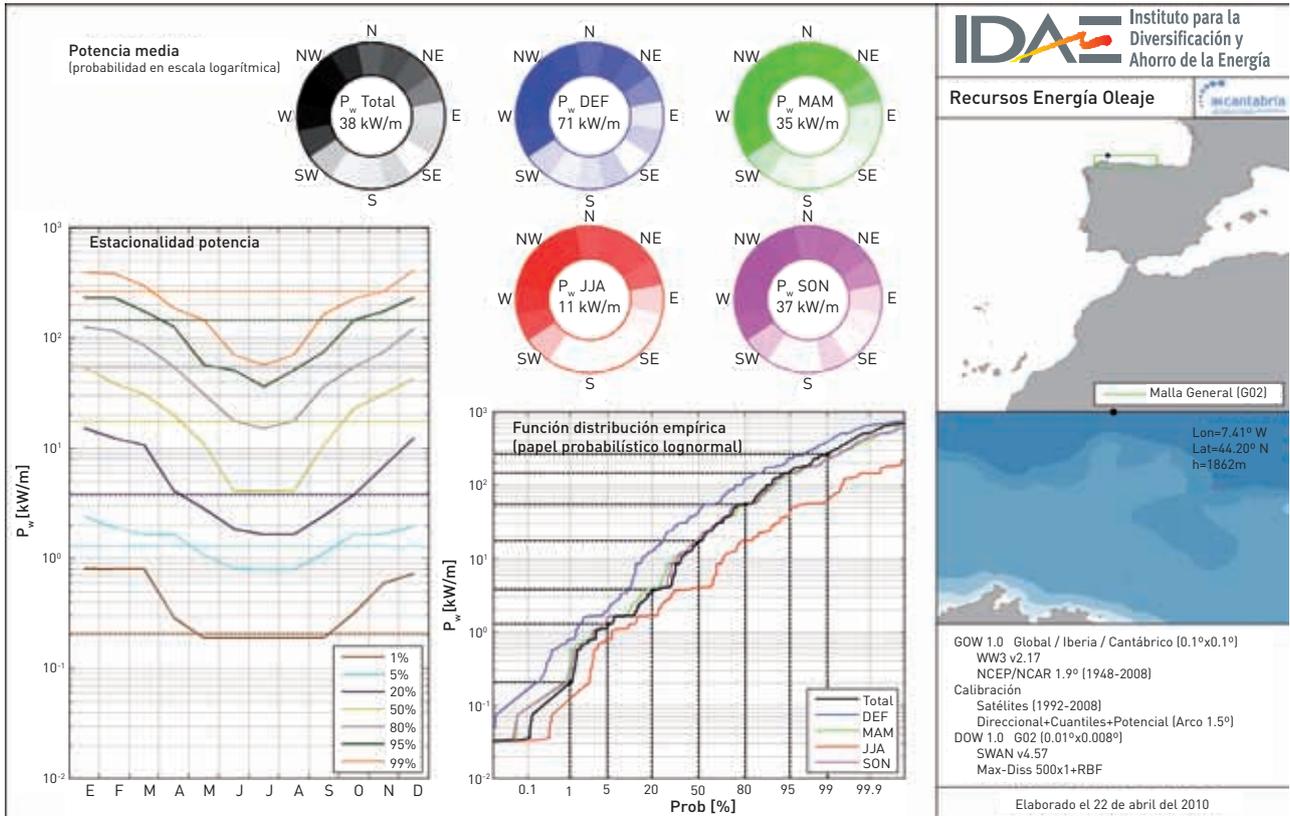
# **Anexo 4.**

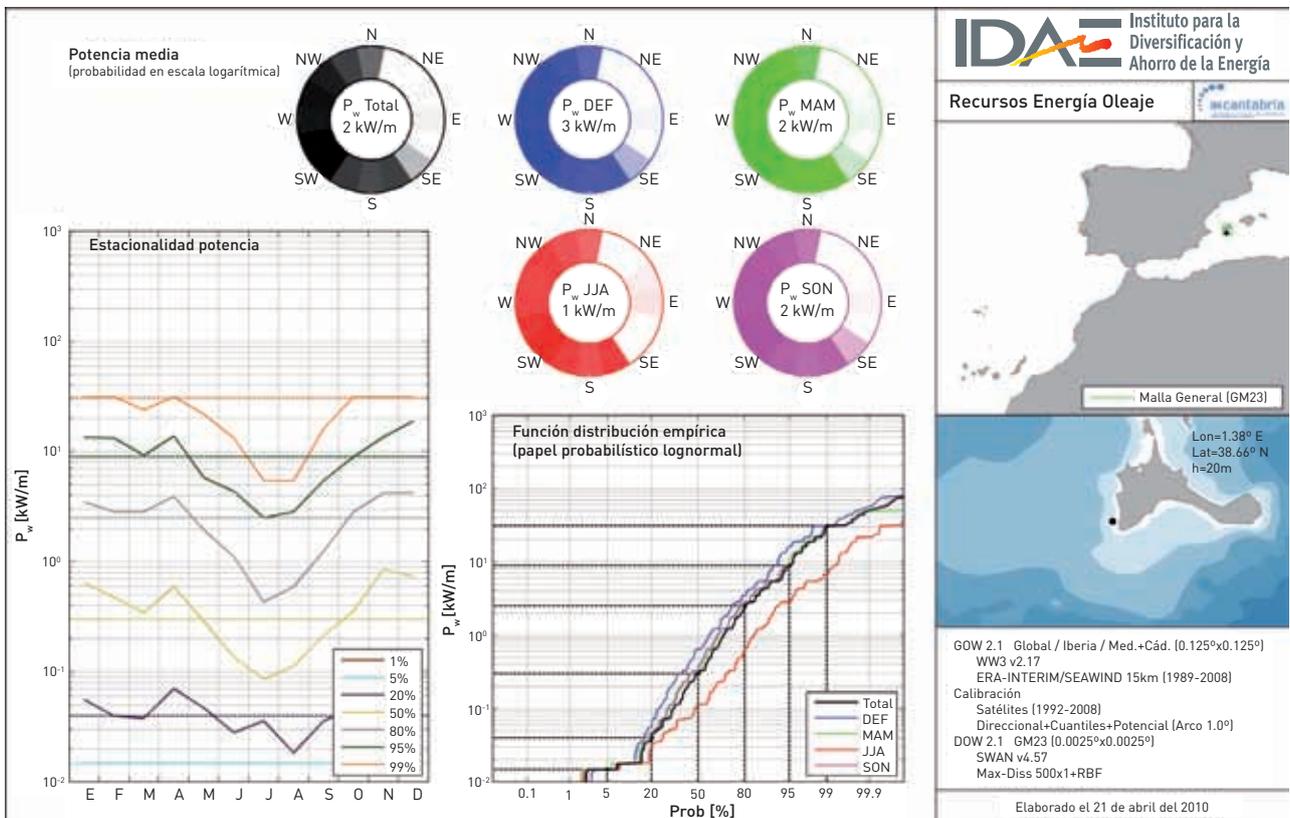
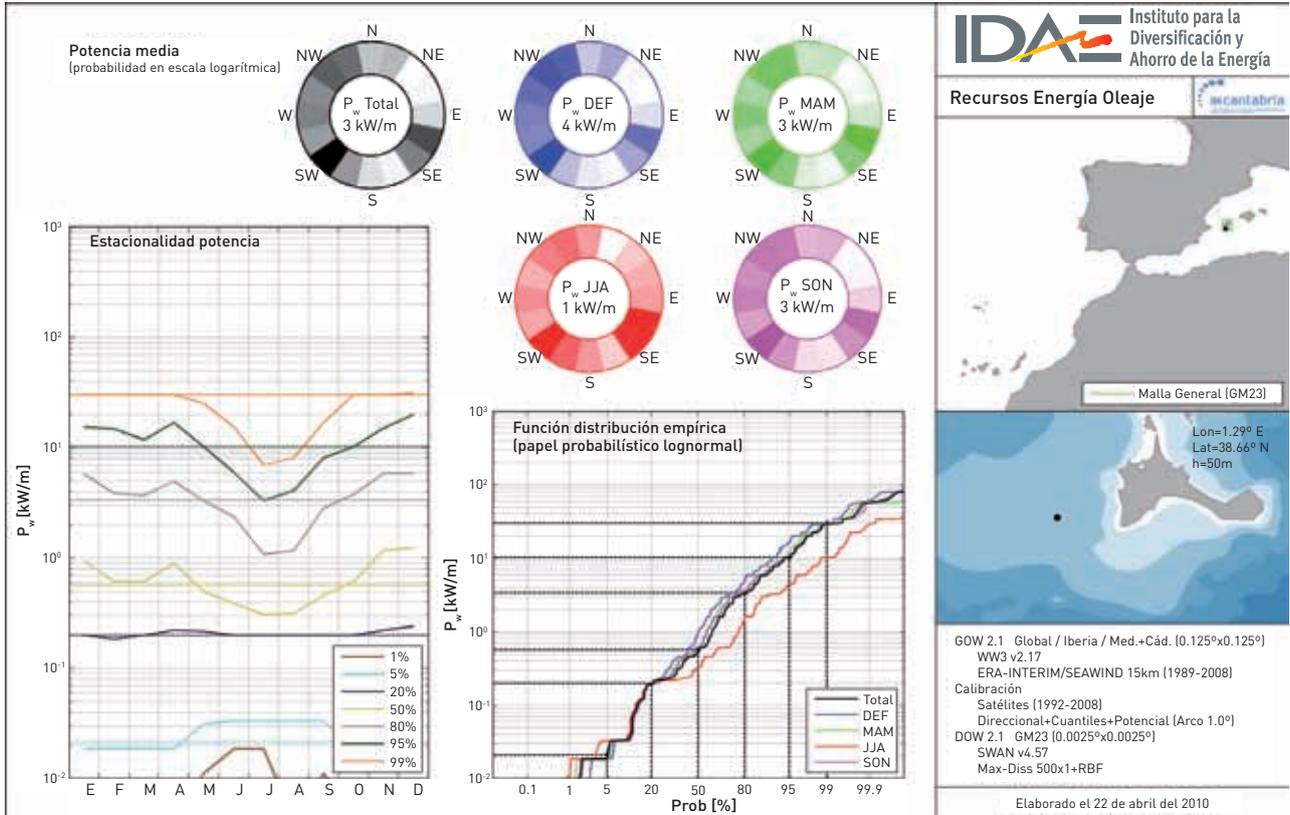
## **Fichas de validación recurso energético**

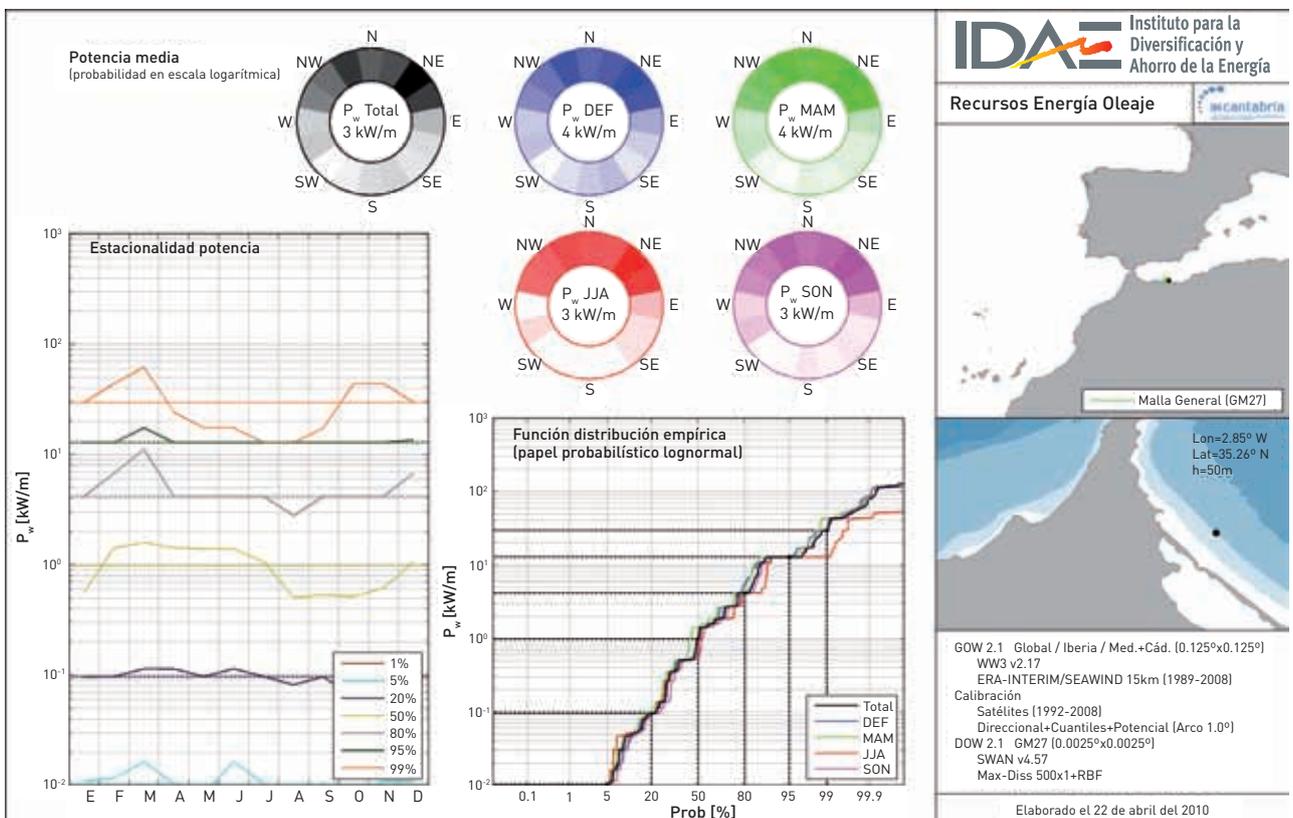
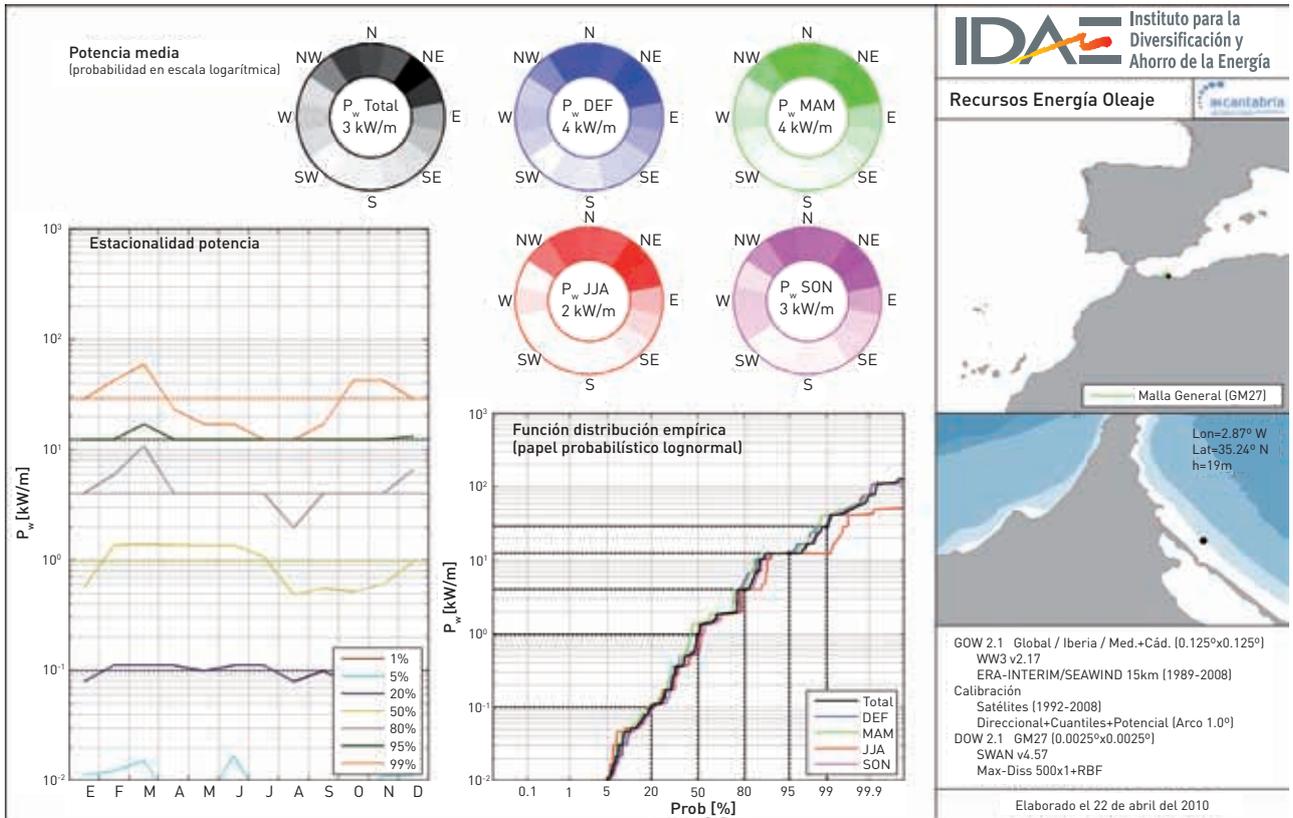
En este Anexo se presentan varios ejemplos representativos de fichas con las que se ha caracterizado el recurso de energía a lo largo de la costa española con una resolución espacial de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  a 20, 50, 100 m de calado y en profundidades indefinidas. En la Figura A4.1 se presenta la ubicación de todas las fichas realizadas que se puede consultar en el SIG desarrollado a tal efecto.

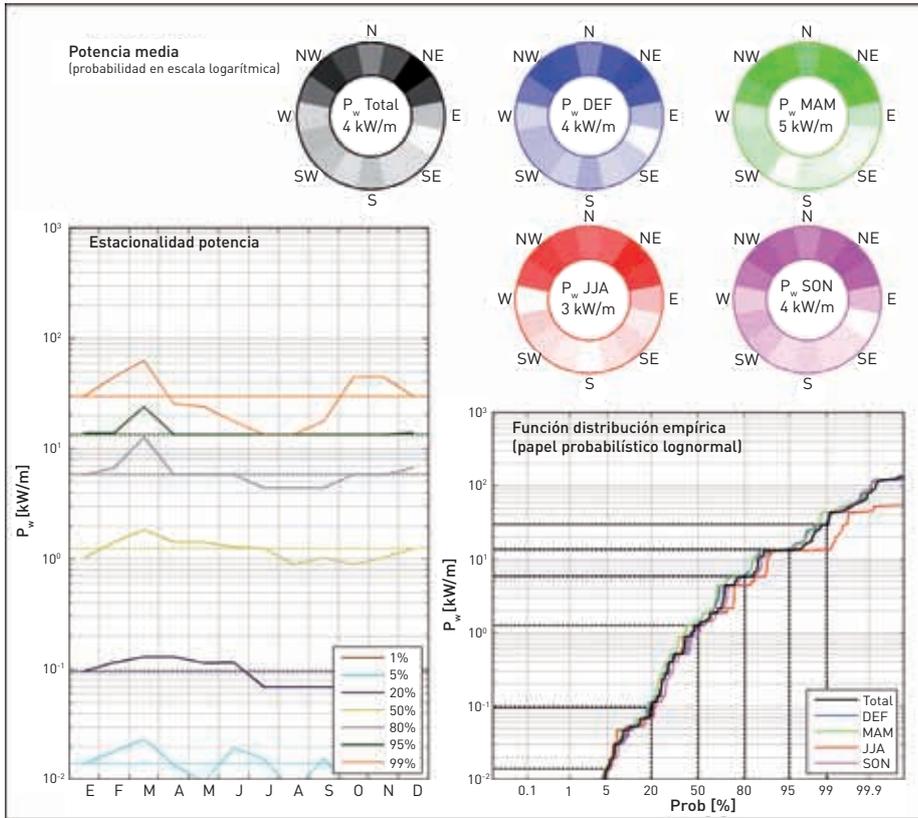
**Figura A4.1. Localización de las fichas de caracterización del recurso de energía del oleaje**











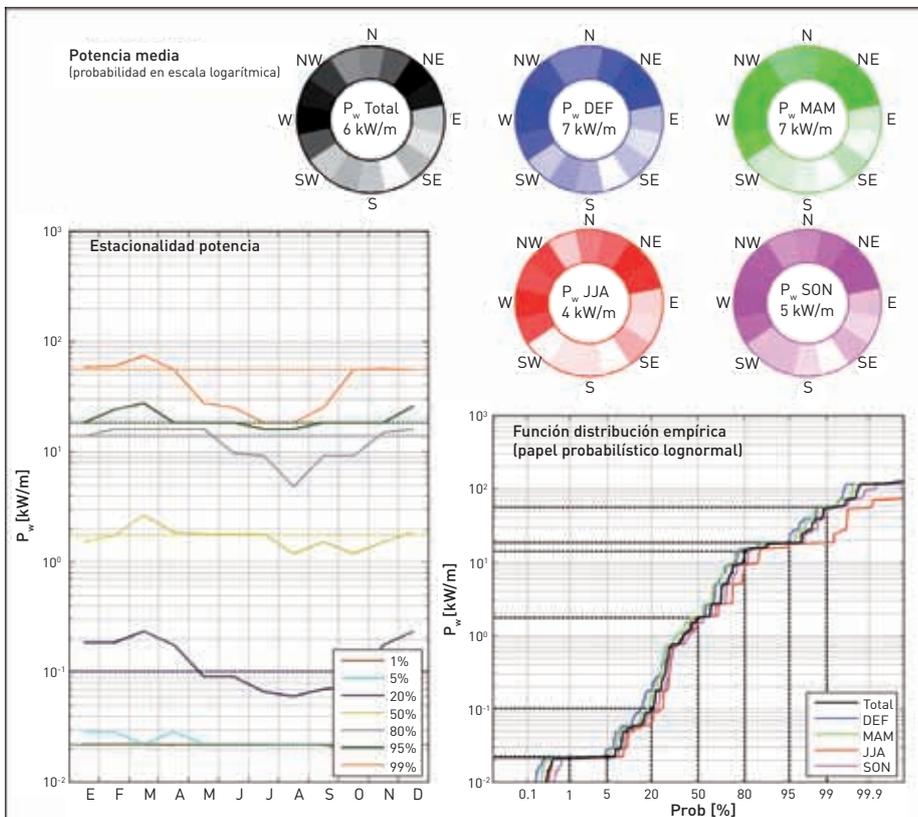
**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

Recursos Energía Oleaje

Lon=2.82° W  
Lat=35.31° N  
h=100m

GOW 1.0 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15 km [1989-2008]  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial [Arco 1.0°]  
DOW 2.1 GM27 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010



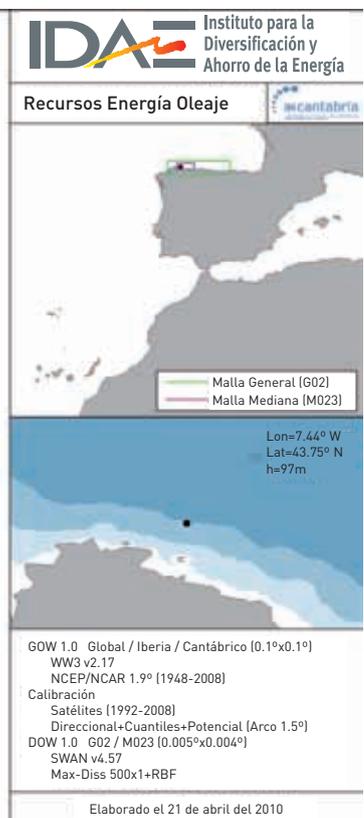
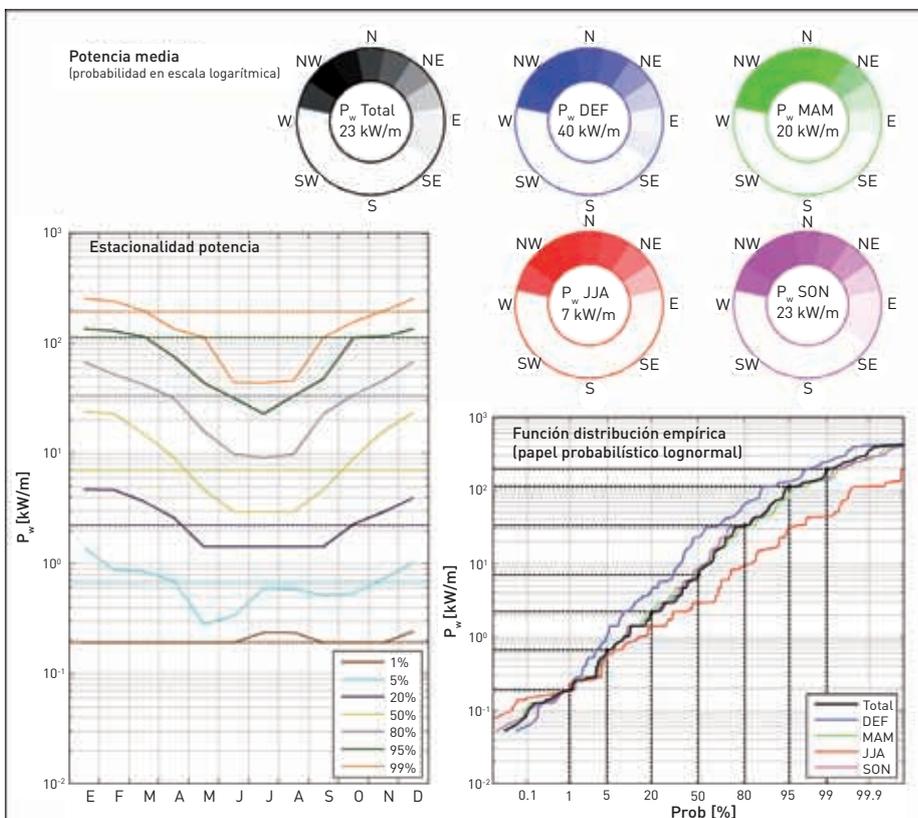
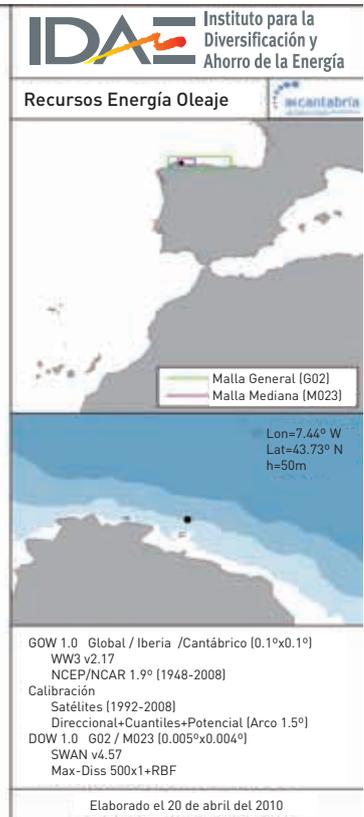
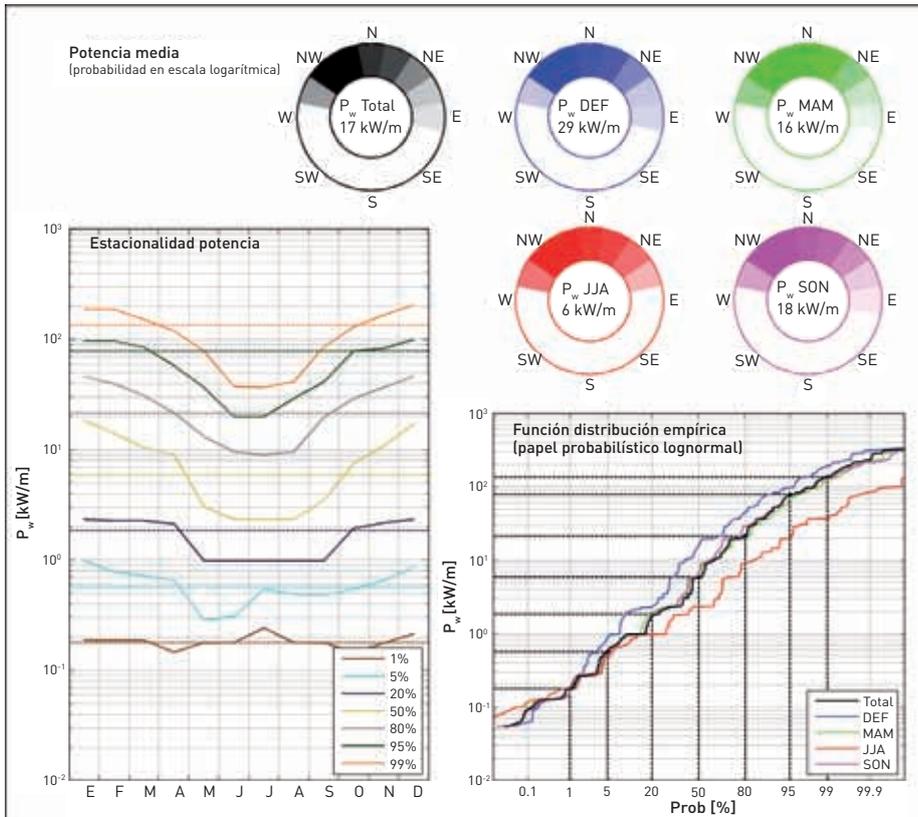
**IDA** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

Recursos Energía Oleaje

Lon=2.75° W  
Lat=35.50° N  
h=255m

GOW 2.1 Global / Iberia / Med.+Cád. [0.125°x0.125°]  
WW3 v2.17  
ERA-INTERIM/SEAWIND 15km [1989-2008]  
Calibración  
Satélites (1992-2008)  
Direccional+Cuantiles+Potencial [Arco 1.0°]  
DOW 2.1 GM27 [0.0025°x0.0025°]  
SWAN v4.57  
Max-Diss 500x1+RBF

Elaborado el 21 de abril del 2010









[www.idae.es](http://www.idae.es)

**IDAE:** Calle Madera 8, 28004, Madrid, Tel.: 91 456 49 00, Fax: 91 523 04 14  
mail: [comunicacion@idae.es](mailto:comunicacion@idae.es)

