

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TÉCNICAS  
DEL AGUA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

---

---

**TESIS DOCTORAL**

**METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN DE BASES DE  
DATOS DE REANÁLISIS DE CLIMA MARÍTIMO**

---

---

**Presentada por: ANTONIO TOMÁS SAMPEDRO**

**Dirigida por: FERNANDO J. MÉNDEZ INCERA  
IÑIGO J. LOSADA RODRÍGUEZ**

**Mayo, 2009**

## **CAPÍTULO 8**

### **CALIBRACIÓN ESPACIAL ESCALAR**

---



## 8.1. Introducción.

Tras haber explicado todos los métodos de calibración puntual, en este capítulo se va a desarrollar la calibración espacial en su versión escalar, pues la metodología de calibración espacial direccional se explicará en el capítulo 9. Ambas metodologías de calibración espacial van a aplicarse a una zona del mar Mediterráneo que contiene las islas Baleares, en la que es muy difícil aplicar las metodologías de calibración puntuales, pues el clima marítimo en profundidades indefinidas de las distintas fachadas insulares no pueden considerarse similares y no se tiene suficiente información instrumental para caracterizar el clima marítimo de todas las zonas, como se ve en la figura 8.1. Por lo tanto, es necesario la definición de una metodología de calibración espacial que permita calibrar el oleaje de una zona con información instrumental de otras zonas con climas marítimos distintos.



Figura 8.1. Situación de las boyas de oleaje en el archipiélago balear (imagen tomada de <http://earth.google.es/>).

El objetivo de la calibración espacial es encontrar la transformación o distorsión del campo espacio-temporal de cada uno de los parámetros de estado de mar de SIMAR-44 que mejor modele los datos instrumentales de una zona concreta del mar. Así, comparando los datos instrumentales con los del reanálisis, en las posiciones de la información instrumental, se calibra toda la base de datos de SIMAR-44 de la zona (ver figura 8.2). Para ello, es necesario conservar las correlaciones espaciales entre los nodos adyacentes del reanálisis, de forma que se distribuyan espacialmente las correcciones de los datos instrumentales.

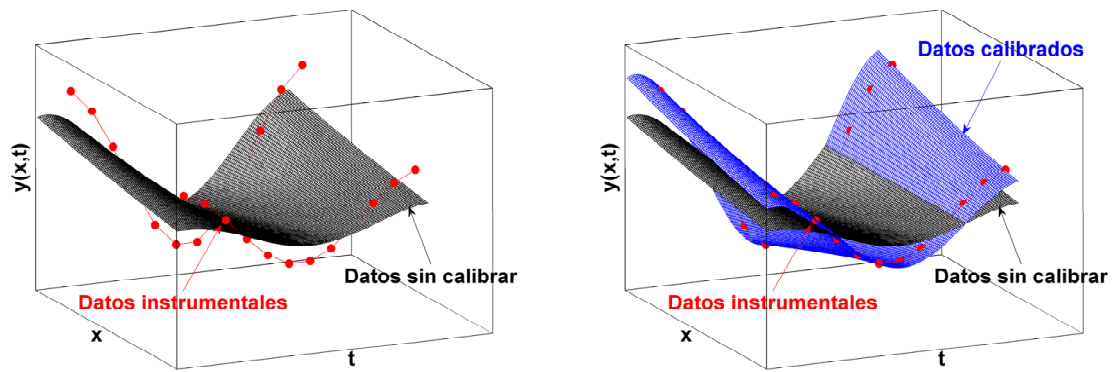


Figura 8.2. Esquema de la calibración espacial de la variable espacio-temporal  $y(x,t)$ , siendo  $x$  la variable espacial de posición y  $t$  la variable temporal.

La no modificación de las correlaciones espaciales entre variables espacio-temporales como  $H_s$  de SIMAR-44 en el Mediterráneo es, a priori, muy complejo debido a la gran cantidad de información que poseen; pues  $H_s(x,t)$  está definido espacialmente en dicho mar con una resolución de  $0.125^\circ \times 0.125^\circ$  (denotándose por  $x$  a la posición de cada  $H_s$ ) y con una resolución temporal invariable de 1 hora desde 1958 hasta 2001 (denotándose por  $t$  el tiempo de cada  $H_s$ ). Así por ejemplo un nodo de SIMAR-44 contiene casi 400000 estados de mar ( $44 \times 365 \times 24$ ).

Debido a la complejidad del problema se busca reducir las dimensiones de las variables espacio-temporales a calibrar. Para ello, en lugar de utilizar la información en el dominio del tiempo (series temporales), se usan desde un punto de vista probabilista, agregando la información de cada nodo de reanálisis en regímenes y ajustándolos a funciones de distribución que dependen de un número reducido de parámetros (ver anejo I). De esta manera se reduce las dimensiones del problema sin perder la información del régimen medio del oleaje.

Posteriormente, los parámetros que definen los regímenes medios de oleaje en cada posición  $x$  se pueden descomponer en una serie de funciones o modos, de manera que se elimina la información redundante, pudiéndose representar con unos pocos modos la mayor parte de la información. Una de las técnicas estadísticas que descomponen en modos una variable bidimensional son las funciones empíricas ortogonales (EOF, *Empirical Orthogonal Function*). Esta técnica de descomposición ha sido empleada en la metodología de calibración espacial, por ello se desarrolla completamente en el anejo II.

Con la descomposición en EOFs de los parámetros que definen los regímenes medios de oleaje se obtienen unos pocos modos o funciones con los que se explica la mayor parte de la variación de la variable. Pero lo más importante es que estos modos pueden modificarse o distorsionarse con parametrizaciones más o menos sencillas, de forma que siempre se

mantienen las correlaciones espaciales de la variable y se posibilita la modificación o corrección de los regímenes medios del oleaje. Por ello se van a buscar parametrizaciones que distorsionen los diferentes modos para lograr que los regímenes de oleaje de SIMAR-44 se aproximen lo más posible a la información instrumental. De esta manera se obtiene el campo espacial de regímenes medios de oleaje de SIMAR-44 calibrados. Esta metodología se aplicará en zonas no excesivamente grandes, de forma que con una distorsión sencilla de un número pequeño de modos de la descomposición en EOFs se logre la calibración requerida; si se utilizan zonas muy grandes será necesario utilizar un gran número de modos con distorsiones o parametrizaciones más complicadas.

A la hora de comparar los regímenes medios, o sus parámetros, con los de los datos instrumentales hay que asegurarse de que todos ellos estén definidos de la misma forma y a partir de una suficiente cantidad de datos que recojan las mismas escalas hiperanuales de variación del oleaje. Por ejemplo, todos los regímenes medios de oleaje de SIMAR-44 están caracterizados a partir de 44 años de datos horarios, por lo que estarán homogéneamente definidos, pero la información instrumental rara vez contará con series coincidentes de oleaje de 44 años. Para ilustrar la manera de seleccionar la información instrumental a utilizar en la calibración espacial se presenta en la figura 8.3 las características de las boyas de OPPE de una zona del Mediterráneo, que coincide con la zona de ejemplo donde se van a aplicar las diferentes metodologías de calibración espacial.



Boyas Exteriores	Periodo fondeo	Profundidad [m]	Tipo
Cabo de Palos	07/2006-...	230	Direccional
Valencia	09/2005-...	260	Direccional
Tarragona	08/2004-...	670	Direccional
Dragonera	11/2006-...	135	Direccional
Mahón	04/1993-...	300	Direccional

Boyas Costeras	Periodo fondeo	Profundidad [m]	Tipo
Cabo de Palos	11/1985-...	67	Escalar
Alicante	09/1985-...	50	Escalar
Valencia	09/1985-06/2005	20	Escalar
Capdepera	05/1985-...	46	Escalar

Figura 8.3. Situación de las boyas del OPPE ubicadas dentro de la zona de calibración [37°N-41°N; 1°W-5°E].

Dentro de la zona de calibración que se presenta en la figura 8.2 existen 5 boyas exteriores (en profundidades indefinidas) y 4 boyas costeras (en profundidades intermedias) del OPPE. De las 5 boyas exteriores sólo la de Mahón tiene datos coincidentes con SIMAR-44, pues este reanálisis termina en el año 2001. El resto de boyas fueron fondeadas posteriormente y tienen registros de duraciones inferiores a los 4 años; por lo tanto, la única boya exterior que cuenta con información suficiente como para definir unos regímenes medios de oleaje comparables a los de SIMAR-44 es la boya de Mahón. Las 4 boyas costeras tienen registros con más de 16 años de datos coincidentes con SIMAR-44, lo que les permite definir los regímenes medios del oleaje correctamente, pero están en profundidades intermedias, por lo que para poder compararlos con los regímenes de SIMAR-44 habrá que retropropagarlos hasta profundidades indefinidas.

La información registrada por las únicas cinco boyas (las cuatro boyas costeras y la exterior de Mahón) susceptibles de permitir la calibración espacial de la zona de la figura 8.3, puede ser utilizada de varias formas para definir los regímenes medios de oleaje. Podrían desecharse, por ejemplo, todos los datos posteriores al año 2001, pues no son coincidentes con SIMAR-44; pero se van a utilizar todos los datos de las cinco boyas mencionadas, sean coincidentes o no con los datos SIMAR-44, para definir los regímenes medios de oleaje con los que calibrar el reanálisis. Esto ha sido motivado porque todos los regímenes de SIMAR-44 se definen con 44 años de datos continuos (desde 1958 hasta 2001). SIMAR-44 contiene muchos datos anteriores a los de las boyas; los registros de las boyas tienen huecos que disminuyen el número de datos coincidentes con SIMAR-44 y es mejor definir los regímenes con la mayor cantidad de datos posible. Así por ejemplo, para la boya de Mahón, en lugar de utilizar 9 años de datos (1993-2001), prácticamente se duplican los datos si se utilizan todos hasta los de la actualidad (16 años). Esto conlleva la posibilidad de incorporar tendencias o climatologías no reproducidas en los 44 años de SIMAR-44, pero a la vista de las comparaciones de los resultados de las calibraciones  $QQ$  del apartado 5.3 del capítulo 5, utilizando todos los datos o sólo los datos coincidentes, no se han apreciado estos problemas.

De esta forma, los regímenes medios de oleaje de las boyas (o en cada caso, de la información instrumental disponible) permiten la calibración espacial de todos los regímenes medios de oleaje de SIMAR-44 en una zona dada, permitiendo la caracterización del clima marítimo de posiciones sin información instrumental próxima. Además, en la caracterización del clima marítimo hay veces que es necesario tener series temporales de oleaje, por ejemplo para caracterizar el régimen de persistencias. Por lo que, tras la calibración de los regímenes medios de oleaje, hay que definir un método para incorporar las correcciones realizadas en las series temporales de oleaje originales de SIMAR-44.

Así finalmente, a partir de la comparación de los regímenes medios calibrados y sin calibrar, en cada punto, se determina una relación paramétrica de calibración que corrige la serie temporal de oleaje de SIMAR-44, recuperando la información del tiempo. Esta última fase de la calibración, en la que se calcula una relación de calibración potencial para cada punto, está basada en la metodología de calibración puntual  $QQ$ .

La metodología de calibración espacial escalar, como se ha comentado anteriormente, se va a explicar mediante la aplicación a la zona del mar Mediterráneo señalada en la figura 8.3, utilizando la boya exterior de Mahón y las cuatro boyas costeras de Alicante, Cabo de Palos, Capdepera y Valencia. Se va a calibrar el parámetro de estado de mar  $H_s$  de SIMAR-44, que está en profundidades indefinidas, por lo que para utilizar la información de las boyas costeras previamente se retropropagan escalarmente; de forma que con la metodología de calibración puntual con retropropagación escalar explicada en el apartado 6.3 del capítulo 6, se calibra el nodo SIMAR-44 más próximo a cada boya costera. Finalmente, se calibra espacialmente la  $H_s$ , de la zona en cuestión, con la información de la boya de Mahón y de los cuatro puntos calibrados de SIMAR-44 con las boyas costeras; utilizándose la información proveniente de satélites para validar los resultados obtenidos.

Por lo tanto, se calibra  $H_s$  de SIMAR-44 con la información de boyas en una zona del mar Mediterráneo, pero esta metodología de calibración ha sido empleada para calibrar otros parámetros del oleaje como  $T_m$  y en otras zonas; así por ejemplo en el estudio “Impactos en la Costa Española por Efecto del Cambio Climático” que la Oficina Española de Cambio Climático (Ministerio de Medio Ambiente) encargó al GIOC (2004) se calibran todos los parámetros de estado de mar de SIMAR-44 para numerosas zonas, que contienen todas las costas españolas mediterráneas y atlánticas, incluyendo el archipiélago canario. Para la calibración homogénea de bases de datos utilizadas para caracterizar climáticamente grandes dominios (como es el caso del cambio climático en las costas españolas) son muy útiles las metodologías de calibración espacial. Aunque en esta tesis la metodología de calibración espacial se incluye dentro de una metodología de calibración más general (para el diseño de obras marítimas ubicadas en una situación concreta del litoral español), en la que es preferible la opción de la calibración puntual frente a la espacial.

La metodología de calibración espacial escalar se separa en dos partes o fases, en la primera se calibran los regímenes medios de oleaje y en la segunda, tras la obtención de los regímenes medios calibrados, se determina la relación final de calibración de las series temporales de  $H_s$ . Seguidamente se explica la metodología, resultados y validaciones de cada una de ellas, para la zona de estudio.



## 8.2. Calibración de Regímenes.

La primera fase de la calibración espacial escalar consiste en calibrar los regímenes medios de oleaje de la zona de estudio; pues como se ha señalado anteriormente, para reducir la complejidad del problema se utiliza la información desde un punto de vista probabilista, agregando los datos de cada nodo de reanálisis en regímenes y ajustándolos a funciones de distribución determinadas. Pero esto puede realizarse de múltiples maneras, en función de la forma de agregar los datos y de las funciones de distribución utilizadas.

Para la calibración espacial escalar se ha decidido agregar los datos en intervalos de tiempo, que tras diversas pruebas, se ha elegido el mes como intervalo de tiempo de agregación. Pero no se agregan los datos de cada mes a lo largo de toda la serie (obteniendo un número de regímenes igual a 12 veces el número de años de la serie), sino que se agregan en cada unidad temporal (el mes) los datos de ese mes de todos los años (obteniendo en total 12 regímenes). En la figura 8.4 se representa la forma de agregar los datos iniciales de  $H_s$ , que tienen una resolución temporal horaria, siendo  $t$  la variable tiempo original. A partir de dichos datos se definen los 12 regímenes medios mensuales de oleaje, siendo  $\tau$  la nueva unidad temporal de agregación, el mes,  $\tau = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_j, \dots, \tau_{12}\}$ . De esta manera se recoge la fluctuación del oleaje invierno-verano, agregándose los datos homogéneamente en 12 unidades temporales, datos de enero con datos de enero de todos los años, febrero con febrero, ... y así para los doce meses. Es importante destacar que con este método de agregación mensual de los datos no se es dependiente de la longitud de las series de los datos o de que tengan huecos, así tanto boyas como SIMAR-44 estarán siempre definidas con regímenes medios de 12 meses.

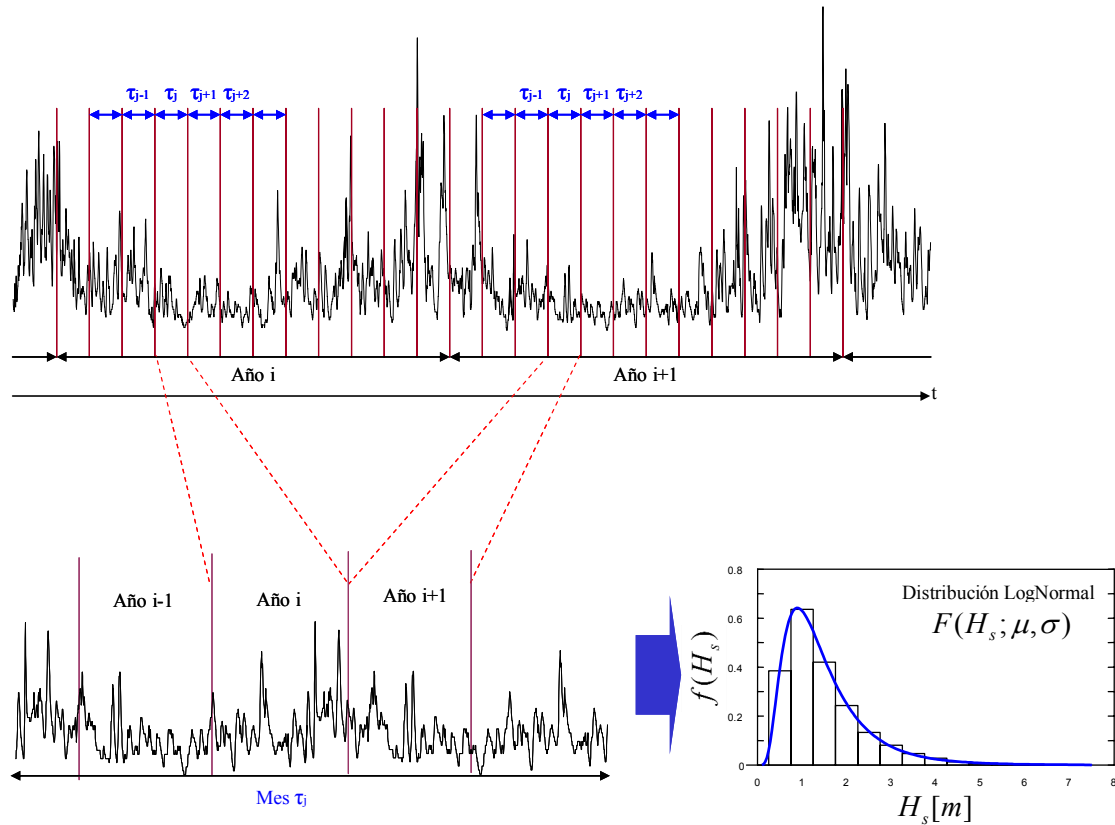


Figura 8.4. Esquema de la agregación mensual de una serie temporal de  $H_s$  para el ajuste del régimen medio mensual de  $H_s$  a la función de distribución Lognormal.

Una vez que se tiene agregada la serie de  $H_s$  en meses se define cada régimen medio mensual. Esto se puede realizar definiendo una serie de cuantiles o percentiles de cada régimen, pero se ha preferido ajustar los datos a una función de distribución, de forma que con un número limitado de parámetros se caracterice todo el intervalo de probabilidades, pudiendo determinarse a partir de ellos cualquier cuantil en el que se esté interesado. Esta segunda alternativa asume que el régimen medio de la muestra de datos se puede representar como una función de distribución dada y no siempre se tiene una función de distribución que ajuste correctamente en todo el intervalo de probabilidades, para todas las posiciones y para todos los meses.

La función de distribución Lognormal es la que mejor representa el régimen medio de  $H_s$  hasta probabilidades acumuladas próximas al 99 % (Massel, 1996; Holthuijsen, 2007); por eso, y tras diversas pruebas de bondad de ajuste realizadas, se ha utilizado la función distribución Lognormal para ajustar el régimen medio mensual de  $H_s$  en este ejemplo de aplicación. Aunque también se han probado con satisfactorios resultados ajustes del régimen medio de  $H_s$  en dos tramos, ajustando los datos hasta la probabilidad del 99.5% a una distribución Lognormal y desde el 99.5% a una distribución Gumbel de máximos, pues se han encontrado ciertas deficiencias en los ajustes de la distribución Lognormal para el régimen

medio-alto. En cambio los ajustes realizados de los regímenes medios mensuales de  $T_m$  a la distribución Lognormal presentan resultados muy satisfactorios. De hecho esta es la función de distribución más usual para el ajuste del régimen medio de  $T_m$  (Von Storch y Zwiers, 2001).

Tras esta introducción y justificación de los regímenes medios mensuales utilizados para la calibración de  $H_s$  en la zona de estudio, se pasa a explicar la metodología de calibración espacial escalar de dichos regímenes, así como posteriormente los resultados obtenidos y las validaciones realizadas.

### **8.2.1. Metodología.**

La metodología de calibración espacial escalar de los regímenes medios mensuales de  $H_s$ , de reanálisis con boyas, se resume en cuatro partes. La primera es la determinación de los regímenes medios mensuales de SIMAR-44 y de las boyas en profundidades indefinidas mediante el ajuste a distribuciones Lognormales. Seguidamente los parámetros de ajuste de las distribuciones Lognormales de SIMAR-44 se descomponen en EOFs. Posteriormente se parametrizan esos EOFs para permitir una distorsión de los regímenes de SIMAR-44. Y finalmente se define y resuelve la función objetivo a minimizar para conseguir que la distorsión en EOFs de los regímenes de SIMAR-44 se aproxime lo más posible a los regímenes de las boyas. A continuación se explican con detalle estas cuatro fases.

#### **8.2.1.1. Determinación de los regímenes medios mensuales.**

Como se ha explicado, es necesario la determinación de los regímenes medios mensuales de todos los puntos SIMAR-44 de la zona de estudio (figura 8.3) y de sus cinco boyas (Mahón, Alicante, Cabo de Palos, Capdepera y Valencia), asegurándose que todos ellos estén definidos de la misma forma. Así todos ellos deberán ajustarse a funciones de distribución Lognormal, pero previamente todos deben estar definidos en profundidades indefinidas, por lo que las cuatro boyas costeras (Alicante, Cabo de Palos, Capdepera y Valencia) deben retropropagarse escalarmente hasta profundidades indefinidas (ver metodología en apartado 6.3).

Una vez definidas todas las bases de datos en profundidades indefinidas, se ajustan los regímenes medios mensuales de  $H_s$  con la distribución Lognormal, tanto de SIMAR-44, como de las boyas, para cada posición  $x$  de la malla del reanálisis y para cada mes  $\tau$ ; denotándose por ejemplo para SIMAR-44,  $H_s(x, \tau)$ , con  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{np}\}$ , siendo  $np = 1342$  el número de nodos de la zona de calibración y  $\tau = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_j, \dots, \tau_{12}\}$ . El ajuste a

la función de distribución se realiza mediante el papel probabilístico Lognormal (ver Anejo I) utilizando los cuantiles equiespaciados en  $-\log[-\log(\text{Pr})]$  desde el 20% al 99.5%.

La función de distribución Lognormal depende de dos parámetros,  $\mu^*$  (parámetro de localización) y  $\sigma^*$  (parámetro de escala), aunque siempre puede definirse a partir de otros dos, como distintos percentiles o  $\mu$  (media de la distribución Lognormal) y  $\sigma$  (desviación típica de la distribución Lognormal), ver las expresiones que las relacionan en el Anejo I. Para elegir los dos parámetros mejores para calibrar los regímenes, debe tenerse en cuenta que es necesario que exista una relación biunívoca entre cada régimen y sus parámetros. Se debe explicar el mayor porcentaje de varianza con el mínimo número de modos EOF de dichos parámetros y en la medida de lo posible los parámetros deben tener sentido físico, para poder interpretar resultados o identificar errores. Por todo ello, se ha decidido utilizar  $\mu$  y  $\sigma$  para caracterizar la función de distribución Lognormal. Además dichos parámetros nunca son negativos, lo que aporta ventajas computacionales.

Por lo tanto, se determina para cada  $x$  y para cada  $\tau$  los parámetros que definen el régimen medio mensual de la base de datos de SIMAR-44, es decir  $\mu(x, \tau)$  y  $\sigma(x, \tau)$ . De igual manera, a partir de la base de datos de  $H_s$  de las boyas en profundidades indefinidas se calculará, para cada  $x$  (de las 5 boyas) y para cada  $\tau$ , los parámetros que definen el régimen medio mensual, es decir  $\mu_B(x, \tau)$  y  $\sigma_B(x, \tau)$ . A los campos espacio-temporales  $\mu(x, \tau)$  y  $\sigma(x, \tau)$  de SIMAR-44 y  $\mu_B(x, \tau)$  y  $\sigma_B(x, \tau)$  de las boyas se los denominará de manera genérica  $z(x, \tau)$  y  $z_B(x, \tau)$  respectivamente.

Así por ejemplo, en la figura 8.5 se muestran los buenos ajustes a la distribución Lognormal frente a los percentiles del 1% al 99%, en el papel probabilístico Lognormal, de  $H_s$  de la boya de Mahón y de SIMAR-44 en la posición de Mahón, para los meses de Enero ( $\tau = 1$ ) y Julio ( $\tau = 7$ ); mostrando respectivamente los parámetros de ajuste  $\mu_B(\text{Mahon}, \text{Enero})$ ,  $\sigma_B(\text{Mahon}, \text{Enero})$ ,  $\mu_B(\text{Mahon}, \text{Julio})$ ,  $\sigma_B(\text{Mahon}, \text{Julio})$ ,  $\mu(\text{Mahon}, \text{Enero})$ ,  $\sigma(\text{Mahon}, \text{Enero})$ ,  $\mu(\text{Mahon}, \text{Julio})$  y  $\sigma(\text{Mahon}, \text{Julio})$ . Nótese como aunque los valores de la boya y SIMAR-44 presentan patrones de comportamiento y valores similares, sería conveniente que se aproximasen lo más posible, éste es el objetivo de la calibración.

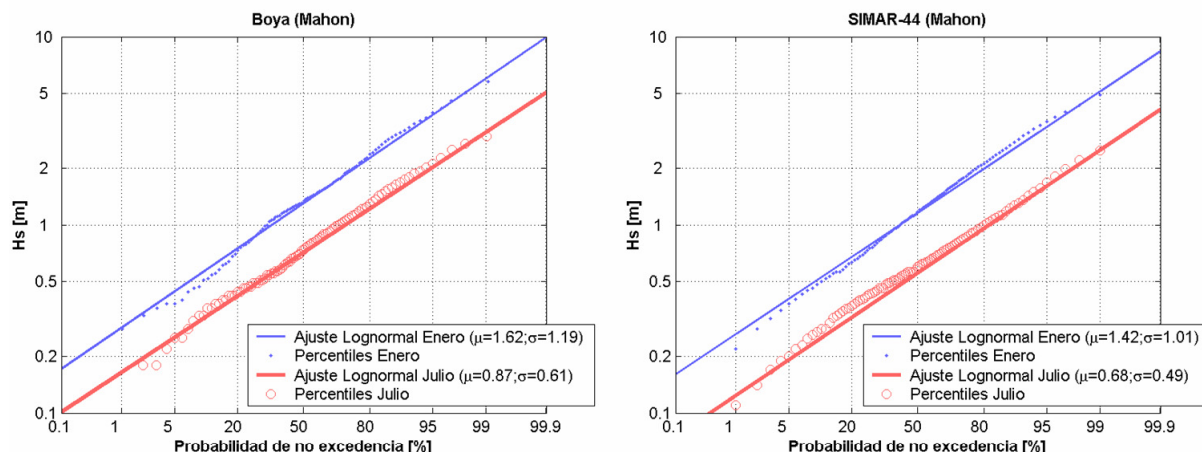


Figura 8.5. Ejemplo del ajuste de la distribución Lognormal en la posición de Mahón (Boya, izquierda y SIMAR-44, derecha) para los datos de  $H_s$  de Enero y Julio.

### 8.2.1.2. Descomposición EOF.

Una vez calculados los regímenes medios mensuales de SIMAR-44,  $\mu(x, \tau)$  y  $\sigma(x, \tau)$ , se aplica la técnica de las funciones empíricas ortogonales (ver descripción EOF en anejo II) para obtener los modos, realizando la descomposición temporal de cada parámetro espacio-temporal  $z(x, \tau)$  en una serie de  $n$  funciones ortogonales (Baldacci *et al.*, 2001), obteniendo:

$$z(x, \tau) = z_M(x) + f_1(x)g_1(\tau) + f_2(x)g_2(\tau) + \dots + f_i(x)g_i(\tau) + \dots + f_n(x)g_n(\tau) \quad (8.1)$$

donde  $z_M(x)$  es la media temporal de  $z(x, \tau)$ ,  $f_i$  es el  $i$ -ésimo modo espacial y  $g_i$  la  $i$ -ésima amplitud temporal (ver figuras 8.6 y 8.7). Para la zona de calibración, el número total de modos es  $n = np = 1342$ , que coincide con el número de puntos de la malla SIMAR-44.

En la figura 8.6 se representa la media temporal del parámetro  $\mu(x, \tau)$  de la zona de estudio ( $\mu_M(x)$ ) y los cuatro primeros modos espaciales ( $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$ ,  $f_3(x)$ ,  $f_4(x)$ ) con sus respectivas amplitudes temporales ( $g_1(\tau)$ ,  $g_2(\tau)$ ,  $g_3(\tau)$ ,  $g_4(\tau)$ ). Siendo el porcentaje de varianza explicada por cada uno de los cuatro primeros modos respectivamente el 99.26%, el 0.46%, el 0.12% y el 0.08%, lo que supone en total el 99.92%.

Aunque la descomposición en EOF es una técnica estadística que no tiene sentido físico, nótese como  $\mu_M(x)$  es mayor en aguas abiertas, lo que indica que la intensidad del oleaje es mayor en aguas abiertas. Así mismo, la primera amplitud temporal,  $g_1(\tau)$ , representa la fluctuación temporal de la intensidad del oleaje, que indica que el oleaje es mayor en los meses de invierno que en los meses de verano; y a su vez también más intenso en aguas abiertas, pues su modo espacial ( $f_1(x)$ ) es similar a la media temporal. El segundo modo

puede identificarse como fluctuaciones Norte-Sur de la intensidad del oleaje respecto de la media, aumentando la intensidad del oleaje al norte de las islas Baleares en Octubre y Noviembre o cerca de Cabo de Palos en Mayo y Junio.

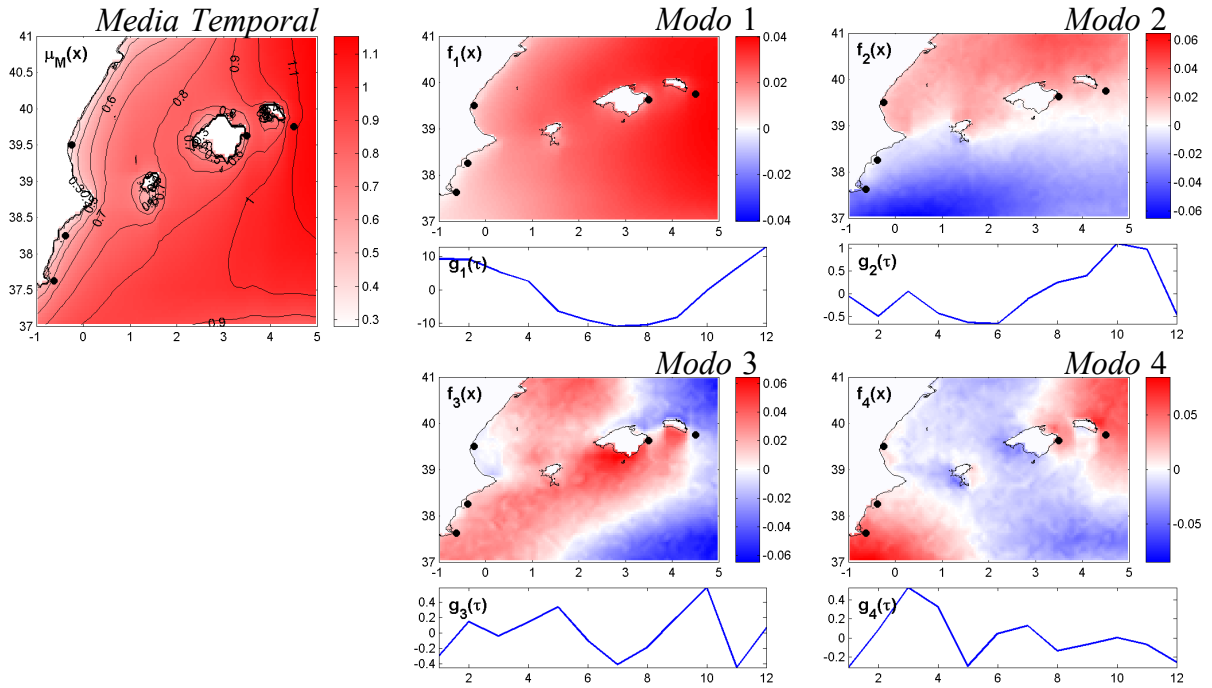


Figura 8.6. Media temporal  $\mu_M(x)$  y cuatro primeros modos del parámetro  $\mu(x, \tau)$  de la distribución Lognormal de  $H_s$  para la zona de calibración. Cada modo está representado por el modo espacial  $f_i(x)$  y la amplitud temporal  $g_i(\tau)$ .

Estos patrones de comportamiento se observan también en la descomposición en EOFs de  $\sigma(x, \tau)$ . Así, en la figura 8.7, se representa  $\sigma_M(x)$  y los cuatro primeros modos espaciales ( $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$ ,  $f_3(x)$ ,  $f_4(x)$ ) con sus respectivas amplitudes temporales ( $g_1(\tau)$ ,  $g_2(\tau)$ ,  $g_3(\tau)$ ,  $g_4(\tau)$ ). Siendo el porcentaje de varianza explicada por cada uno de los cuatro primeros modos respectivamente el 98.54%, el 0.76%, el 0.34% y el 0.17%, lo que supone en total el 99.81%. La función  $\sigma_M(x)$  presenta valores más elevados en aguas abiertas, lo cual muestra que el oleaje es más variable en aguas abiertas. Así mismo, la primera amplitud temporal,  $g_1(\tau)$ , representa la fluctuación temporal de la variabilidad del oleaje, que indica que el oleaje es más variable en los meses de invierno que en los meses de verano. El segundo modo también puede identificarse como fluctuaciones Norte-Sur de la variabilidad del oleaje, pudiendo detectarse como aumenta la variabilidad del oleaje cerca de Cabo de Palos en Mayo y Junio.

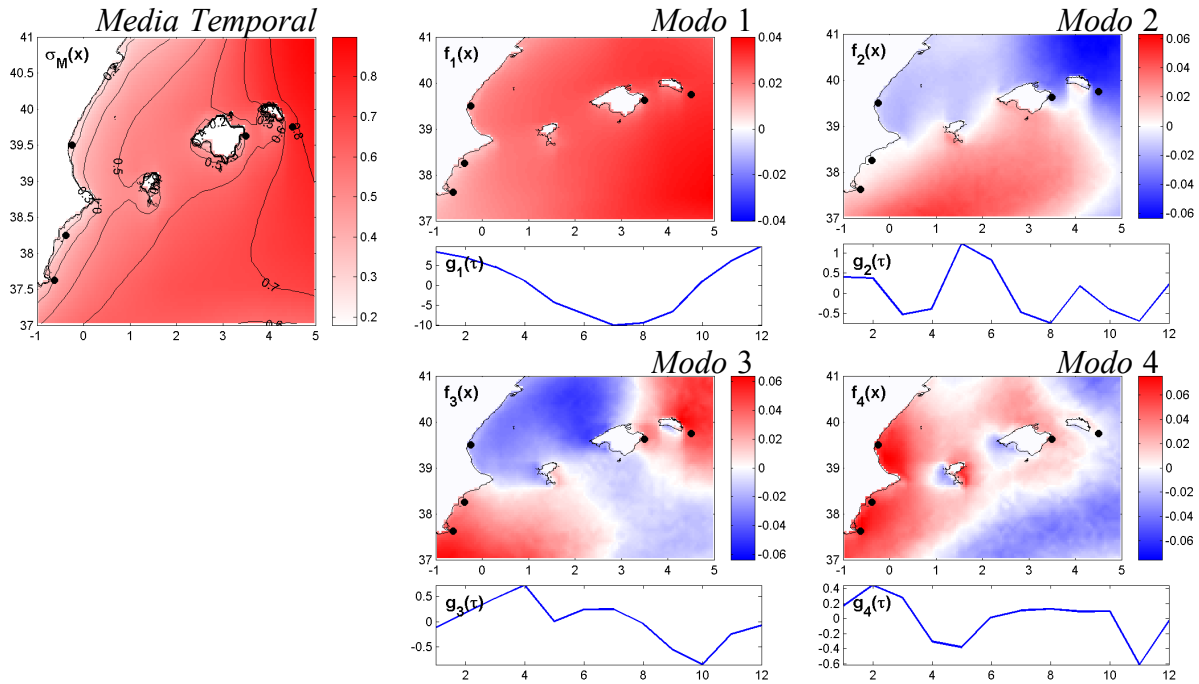


Figura 8.7. Media temporal  $\sigma_M(x)$  y cuatro primeros modos del parámetro  $\sigma(x, \tau)$  de la distribución Lognormal de  $H_s$  para la zona de calibración. Cada modo está representado por el modo espacial  $f_i(x)$  y la amplitud temporal  $g_i(\tau)$ .

Una vez calculados los modos de  $\mu(x, \tau)$  y  $\sigma(x, \tau)$  se puede comprobar que con sólo el primer modo se logra explicar del orden del 99% de la varianza de cada variable (necesitando 12 modos para representar el 100%). Así, de forma general, se podría indicar que de los  $n$  modos se van a seleccionar los  $p$  primeros modos que expliquen como mínimo el 99% de la variable  $z(x, \tau) - z_M(x)$ , en la zona de calibración; simplificándose notablemente las dimensiones del problema. Por ejemplo, para este estudio se utiliza  $p = 4$ , lo que implica que con sólo 4 de los 1342 modos se explica mucho más del 99% de la varianza de cada variable. Por lo que se considera  $z'(x, \tau)$  una suficientemente buena aproximación de  $z(x, \tau)$ :

$$z'(x, \tau) = z_M(x) + f_1(x)g_1(\tau) + f_2(x)g_2(\tau) + f_3(x)g_3(\tau) + f_4(x)g_4(\tau) \quad (8.2)$$

Por lo tanto, el régimen medio mensual se considera ahora definido por  $\mu'(x, \tau)$  y  $\sigma'(x, \tau)$ , formándose cada uno por la suma de la media temporal y los cuatro primeros modos, lo que garantiza mantener la correlación espacial entre los regímenes.

### **8.2.1.3. Parametrización.**

Una vez que se tiene la descomposición en EOFs de cada  $z(x, \tau)$ , hay que introducir una serie de parámetros que distorsionen estos campos espacio-temporales para permitir que se adapten

a lo que registrado en las boyas. Se asume como hipótesis que el valor calibrado  $z_c(x, \tau)$  de la variable  $z(x, \tau)$  es una combinación potencial de su media temporal y cada uno de sus cuatro primeros modos, de tal manera que a partir de  $z'(x, \tau)$  se puede expresar  $z_c(x, \tau)$  como:

$$z_c(x, \tau) = b_0 z_M(x)^{c_0} + b_1 f_1(x) g_1(\tau) |g_1(\tau)|^{c_1-1} + b_2 f_2(x) g_2(\tau) + b_3 f_3(x) g_3(\tau) + b_4 f_4(x) g_4(\tau) \quad (8.3)$$

donde  $\Theta = \{b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, c_0, c_1\}$  es el vector de parámetros a obtener y  $||$  significa valor absoluto.

Los parámetros  $b_0, b_1, b_2, b_3$  y  $b_4$  son los coeficientes lineales que aumentan (si son mayores que 1) o disminuyen (si son menores que 1) cada uno de los sumandos de  $z_c(x, \tau)$ , siendo  $b_0$  el que modifica a la media temporal y el resto a cada uno de los cuatro modos ( $b_i$  afecta al modo  $i$ -ésimo). Pero con estos parámetros lineales no se consigue distorsionar suficientemente cada  $z_c(x, \tau)$  para lograr que se aproximen a los de las boyas, por lo que se introducen unos coeficientes no lineales ( $c_0$  y  $c_1$ ).

Así, para conseguir distorsionar espacialmente  $z_c(x, \tau)$ , se introduce el coeficiente potencial  $c_0$  en el término de la media temporal,  $z_M(x)$ , pues sólo depende de  $x$ , si no hiciese falta esta distorsión el parámetro  $c_0$  tomaría el valor 1. Cabe señalar que como los parámetros  $\mu(x, \tau)$  y  $\sigma(x, \tau)$  son siempre positivos, sus medias temporales también lo son, por lo que  $z_M(x)^{c_0}$  toma siempre valores reales positivos. En la figura 8.8 se presenta un esquema que trata de ilustrar la repercusión y el grado de distorsión que permite la introducción de distintos parámetros de  $z_M(x)$ , verificándose que con la inclusión de  $c_0$  se producen las mayores distorsiones.

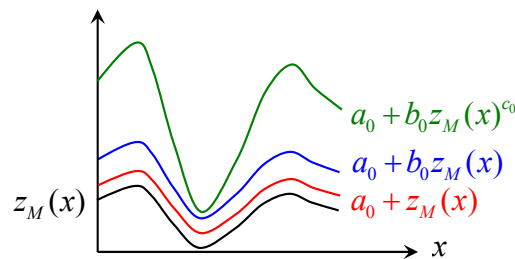


Figura 8.8. Croquis del funcionamiento o distorsión producida por la parametrización de  $z_M(x)$ .

El último de los parámetros de la ecuación 8.3, el  $c_1$ , se introduce para permitir distorsionar temporalmente  $z_c(x, \tau)$ . Dicho coeficiente potencial afecta a la amplitud temporal del primer modo,  $g_1(\tau)$ , que sólo depende de  $\tau$ ; dicho término puede tomar valores positivos y negativos, por ello se toma el valor absoluto de lo que se eleva a la potencia  $c_1 - 1$  y se deja sin tomar valor absoluto lo que se eleva a la potencia 1. De esta forma se mantiene el signo de



$g_1(\tau)$  y se distorsiona su valor con  $|g_1(\tau)|^{c_1-1}$  cuando  $c_1 \neq 1$ , tomando siempre valores reales positivos. En general y como se comprobó en el apartado anterior, el primer modo está asociado a las variaciones estacionales del clima marítimo, explicando del orden del 99% de la varianza, por ese motivo se ha optado por dotar de un grado de libertad más a este primer modo, permitiendo una variación no lineal del clima marítimo a lo largo del año.

Es importante señalar que no se ha introducido más coeficientes no lineales porque se aumenta mucho la no linealidad del problema y no se disminuye sustancialmente el error cometido, pues el primer modo es el que más varianza explica. Otro aspecto a tener en cuenta es que se trata de deformar ligeramente los campos espacio-temporales de las variables. Si se distorsionan demasiado, se puede llegar a reproducir lo que registran las boyas, pero a costa de dar valores anómalos en otras posiciones en las que no se puede evaluar el error cometido. Por eso se limita el número de términos no lineales y se acota todos los coeficientes a valores comprendidos entre 0.4 y 2.5, para que oscilen en torno al valor 1.

#### **8.2.1.4. Minimización del error.**

Una vez definida  $z_C(x, \tau; \Theta)$ , para estimar  $\Theta = \{b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, c_0, c_1\}$ , se evalúa la diferencia entre  $z_B(x, \tau)$  y  $z_C(x, \tau; \Theta)$  en los mismos  $x_i$ , que serán las posiciones de las  $n_B = 5$  boyas de la zona de estudio y para todas las unidades de tiempo, los 12 meses,  $\tau = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_j, \dots, \tau_{12}\}$ . Resultando finalmente un problema de optimización en el cual se debe definir la función objetivo a minimizar,  $J(\Theta)$ , que es el error cuadrático relativo ponderado de la ecuación 8.4:

$$J(\Theta) = \sum_{i=1}^{n_B} \sum_{j=1}^{12} \left[ \frac{z_B(x_i, \tau_j) - z_C(x_i, \tau_j; \Theta)}{\bar{z}_B(x_i)} \right]^2 W(x_i, \tau_j) \quad (8.4)$$

donde  $\bar{z}_B(x_i)$  es el término que relativiza el error y es la media temporal de cada boya ( $\bar{z}_B(x_i) = \sum_{j=1}^{12} z_B(x_i, \tau_j) / 12$ ), con este término se evita dar más peso a las boyas que tienen un clima marítimo más activo; y  $W(x_i, \tau_j)$  es el término que da más o menos peso, a cada boya y a cada mes, dentro de la función objetivo. En la calibración de la zona de estudio de este trabajo se ha dado el mismo peso a todos los sumandos, siendo  $W(x_i, \tau_j) = 1$ .

Una vez definida la función objetivo se estima la combinación de  $\Theta$  que produce el mínimo error cuadrático relativo ponderado entre los regímenes de SIMAR-44 calibrados y los de las boyas de la zona. Para ello se minimiza la función objetivo mediante el método *Shuffled Complex Evolution*, SCE-UA (Duan *et al.*, 1992), obteniendo los parámetros de calibración de  $\mu_C(x, \tau)$  y  $\sigma_C(x, \tau)$ , válidos para la zona de estudio.

### 8.2.2. Resultados.

Con los valores de  $\hat{\Theta}$  obtenidos a partir de la minimización de la función objetivo  $J(\Theta)$  se obtiene  $z_c(x, \tau)$  para cada uno de los parámetros que definen cada régimen medio mensual (es decir, la media  $\mu$  y la desviación típica  $\sigma$  de la distribución Lognormal). Por lo tanto, se tiene, para cada  $x$  y para cada  $\tau$ , la pareja de parámetros  $\mu_c(x, \tau)$  y  $\sigma_c(x, \tau)$  que definen el régimen medio mensual calibrado.

En la figura 8.9 se representa la evolución temporal (12 meses) de los dos parámetros ( $\mu(x, \tau)$  y  $\sigma(x, \tau)$ ) en las cinco boyas de la zona. Representando tanto la evolución de los parámetros que definen los regímenes medios mensuales de SIMAR-44 sin calibrar, los calibrados y los de las boyas en profundidades indefinidas. Se comprueba como, tras la calibración, en todos los casos los parámetros de SIMAR-44 calibrados reproducen casi perfectamente los determinados a partir de los datos de las boyas. Se puede obtener, por lo tanto, unos regímenes medios mensuales de gran calidad en los puntos de la malla de SIMAR-44 próximos a las boyas que han servido de referencia para realizar la calibración.

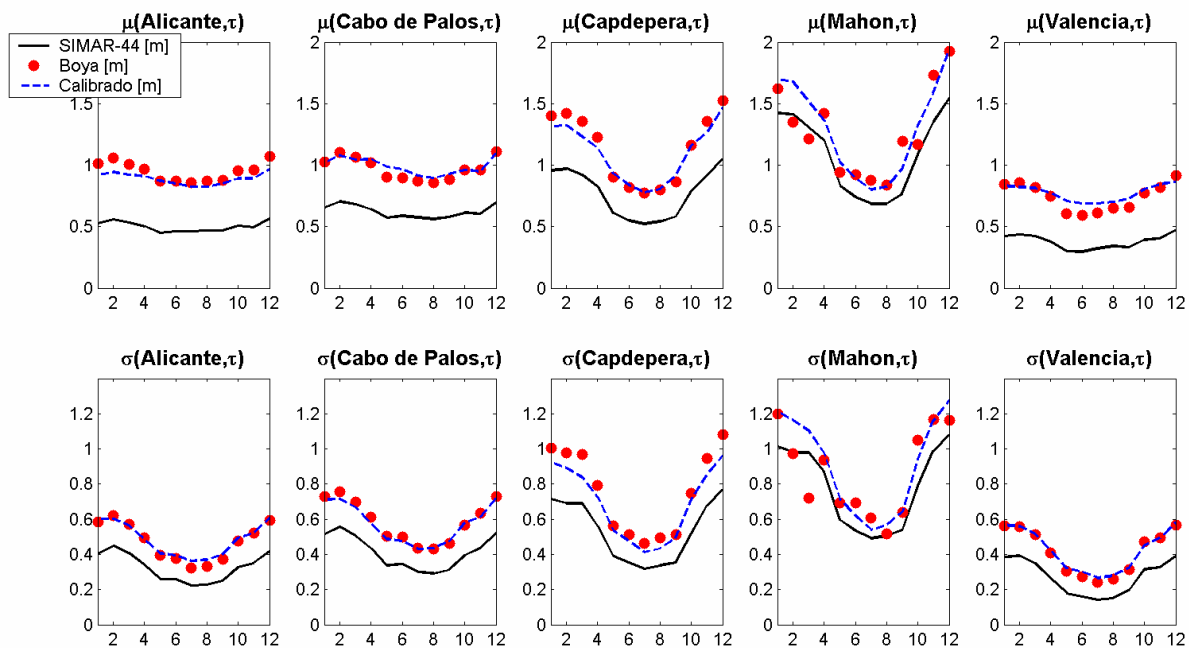


Figura 8.9. Evolución mensual de los parámetro  $\mu(x, \tau)$  (arriba) y  $\sigma(x, \tau)$  (abajo) en las posiciones de las cinco boyas utilizadas para calibrar.

Se puede observar como la bondad en la calibración es similar en todas las boyas (no depende del grado de actividad del clima marítimo de cada boya). También se constata la fluctuación anual invierno-verano en los parámetros de la distribución Lognormal, o lo que es lo mismo, la evolución temporal de los regímenes medios mensuales (Ochi, 1998). Esta misma fluctuación se presenta siempre en la amplitud temporal del primer modo de la

descomposición en EOF de ambos parámetros (ver  $g_1(\tau)$  en las figuras 8.6 y 8.7). Hay que destacar que el método permite distorsionar la fluctuación invierno-verano para conseguir que se ajuste a las distintas oscilaciones temporales existentes en la zona de estudio.

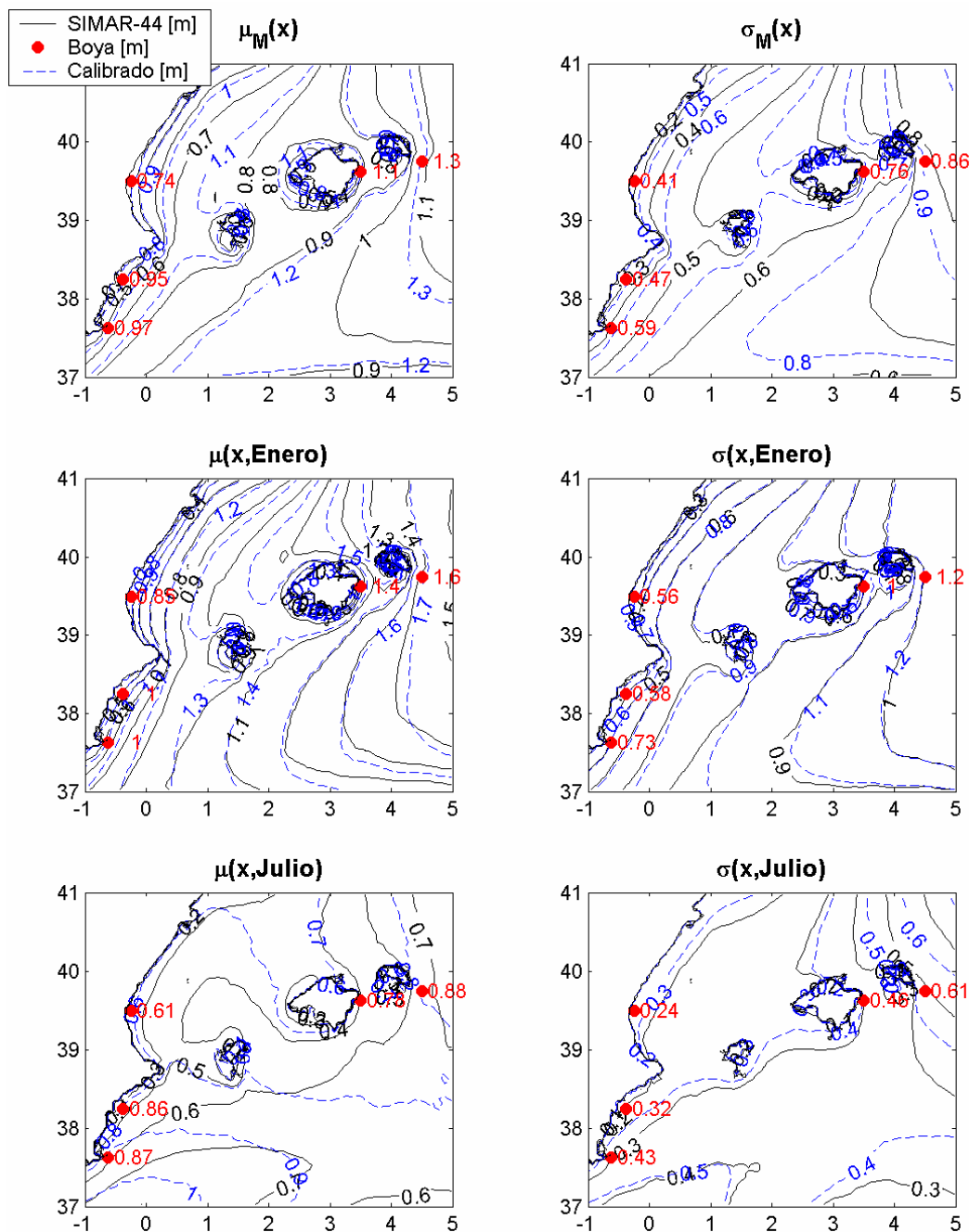


Figura 8.10. Evolución espacial de los parámetros  $\mu(x, \tau)$  (derecha) y  $\sigma(x, \tau)$  (izquierda) en la zona de calibración, para los campos de la media temporal (arriba) y los meses de Enero (centro) y Julio (abajo).

Gracias al calibrado espacial, al igual que en la posición de las boyas, se puede definir el régimen medio mensual en toda la zona de estudio. En la figura 8.10 se muestra la distribución espacial de los parámetros  $\mu(x, \tau)$  y  $\sigma(x, \tau)$  en la zona calibrada, tanto para la media temporal de los regímenes medios mensuales como para el régimen medio mensual de

Enero ( $\tau = 1$ ) y de Julio ( $\tau = 7$ ). Representando los valores de SIMAR-44 sin calibrar, calibrados y los de las boyas en profundidades indefinidas. En dicha figura se puede observar que la transformación modifica suave y homogéneamente los regímenes medios mensuales, logrando ajustarse a los de las boyas. También se comprueba como el oleaje en Enero (invierno) es mayor y más variable que en Julio (verano).

### 8.2.3. Validación.

La validación del modelo de calibración espacial de los regímenes medios mensuales puede realizarse de dos maneras. La primera validación consiste en hacer una calibración utilizando sólo tres de las cinco boyas disponibles, para después validar los resultados de la calibración con las dos boyas que no se utilizan. Por ejemplo, se podría calibrar con la información de las boyas de Valencia, Cabo de Palos y Mahón, y después validar los resultados en las posiciones de Alicante y Capdepera (Tomás *et al.*, 2006). De esta forma se demuestra que al calibrar con información en unas posiciones determinadas se mejoran los resultados en el resto, pero no se llega a igualar los resultados de la calibración con las cinco boyas. Por eso se ha decidido validar aquí de una segunda forma, comparando los resultados de la calibración con las cinco boyas con información instrumental independiente, proveniente de satélites (Tomás *et al.*, 2008). En concreto se utilizan los datos de  $H_s$ , para la zona de calibración, del satélite TOPEX/POSIDON<sup>1</sup> para validar los resultados obtenidos.

Pero la cantidad de datos de  $H_s$  del TOPEX no es suficiente para definir el régimen medio mensual en cada punto de la malla del reanálisis, por lo que se agregan los datos en una malla de 1° por 1°, se calculan sus regímenes medios y se compara con los de SIMAR-44 calibrado. En la figura 8.11 se muestran los valores de  $\mu$  y  $\sigma$  de la distribución Lognormal del TOPEX en el centro de cada cuadrícula de 1°x1°, sobre la distribución espacial de la media temporal de los regímenes medios mensuales de SIMAR-44 calibrado.

Nótese como los campos espaciales calibrados reproducen, muy adecuadamente, los valores obtenidos por los satélites, no sólo en las proximidades de las boyas, sino también en toda la zona calibrada, confirmando la validez de la metodología de calibración. De hecho el error cuadrático medio relativo de SIMAR-44 (comparado con los datos del TOPEX) ha sido disminuido del 28% (antes de la calibración) al 5% (después de la calibración) para  $\mu_M(x)$  y del 20% al 8% para  $\sigma_M(x)$ .

---

<sup>1</sup> Los datos  $H_s$  del satélite TOPEX/POSEIDON (1997-2003) han sido obtenidos del *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center* (PO.DAAC) y han sido calibrados con la expresión de Barstow *et al.* (1998) de la tabla 3.6.

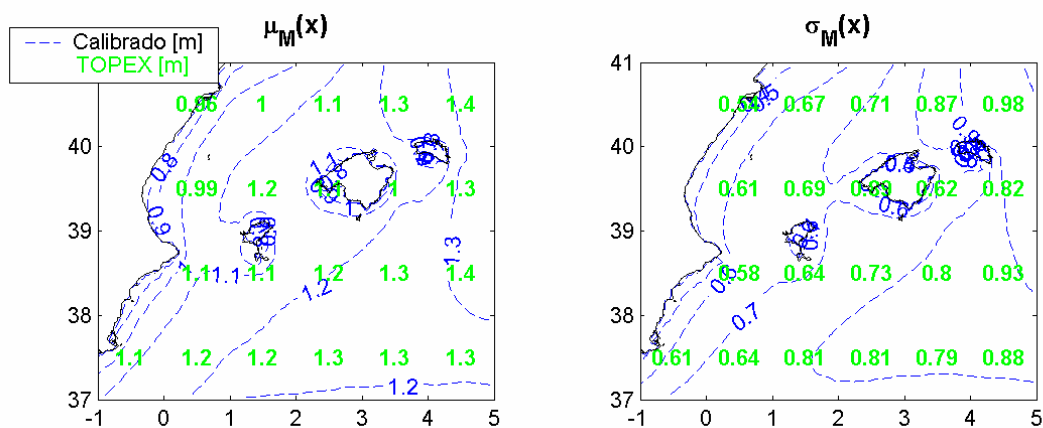


Figura 8.11. Comparación entre los campos calibrados de  $\mu(x, \tau)$  (derecha) y  $\sigma(x, \tau)$  (izquierda) con los del satélite TOPEX de áreas de  $1^\circ \times 1^\circ$ , para la media temporal de los regímenes medios mensuales.

### 8.3. Calibración de series temporales.

Una vez que se tienen calibrados los regímenes medios mensuales mediante la calibración espacial escalar, en muchas ocasiones es necesario calibrar también las series temporales de  $H_s$ . En este apartado se define un método para incorporar las correcciones o calibraciones realizadas en las series temporales de oleaje originales de SIMAR-44. Este método se basa en la comparación de los regímenes medios calibrados y sin calibrar, en cada punto, mediante simulación de Monte Carlo, determinando una relación paramétrica de calibración que corrige la serie temporal de  $H_s$  de SIMAR-44, recuperando la información del tiempo. A continuación se explica la metodología, resultados y validaciones de la calibración final de las series temporales de la zona de estudio.

#### 8.3.1. Metodología.

Dado que el método de calibración espacial está basado en la utilización de regímenes, es decir, se agregan los datos, se ha perdido la información del tiempo, por lo que, en principio, no se conoce cuál es la transformación que recupera las series temporales de  $H_s$  de SIMAR-44. Pero lo que sí se tiene es la caracterización de los regímenes medios mensuales en cada punto antes y después de calibrar ( $\mu(x, \tau)$  y  $\sigma(x, \tau)$  y  $\mu_c(x, \tau)$  y  $\sigma_c(x, \tau)$  de la distribución Lognormal).

Por lo tanto, la calibración de las series temporales se va a hacer definiendo una función de transformación entre series simuladas numéricamente de  $H_s$  sin calibrar y calibradas. Estas series simuladas numéricamente van a ser el resultado de unas simulaciones de Monte Carlo cuyos regímenes medios mensuales coincidan con los regímenes medios mensuales sin

calibrar y calibrados. Finalmente para definir la relación de calibración en cada punto se ajusta una relación potencial mediante  $QQ$  ponderado y MVRExt (ver calibración puntual  $QQ$  escalar del apartado 5.3) entre ambas series simuladas con el método de Monte Carlo.

En la figura 8.12 se muestra el esquema del procedimiento o metodología de calibración. Así mediante simulación de Monte Carlo se definen series sintéticas o simuladas de 44 años de SIMAR-44 calibradas ( $H_{s,SIM-CAL}(x_i, t_{SIM})$ ) y sin calibrar ( $H_{s,SIM}(x_i, t_{SIM})$ ), de las que se obtiene los cuantiles de comparación para definir la relación potencial de calibración  $QQ$  en cada posición,  $H_{s,SIM-CAL}(x_i, Pr_{SIM})$  y  $H_{s,SIM}(x_i, Pr_{SIM})$ . Como cada simulación de los 44 años de datos horarios puede ser estadísticamente distinta, se realizan un número de simulaciones ( $SIM = 50$ ) y se toma la media de sus cuantiles, de forma que ésta sea lo más representativa posible de los regímenes medios mensuales calibrados y sin calibrar ( $H_{s,SIM-CAL}(x_i, Pr)$  y  $H_{s,SIM}(x_i, Pr)$ ). Finalmente, a partir de estos cuantiles medios se define la relación potencial de calibración, para cada  $x_i$  de la zona de estudio, del tipo  $H_{s,CAL}(x) = b(x)H_s(x)^{c(x)}$ . Dicho ajuste se realiza como el de la calibración puntual  $QQ$ , con ponderación de cuantiles ( $W(Pr) = \sqrt{Pr(1-Pr)}$ ) y MVRExt (introduciendo el último cuantil sin calibrar para que se produzca la mínima variación del régimen extremal), siendo los cuantiles de comparación equidistantes en  $-\log[-\log(Pr)]$ .

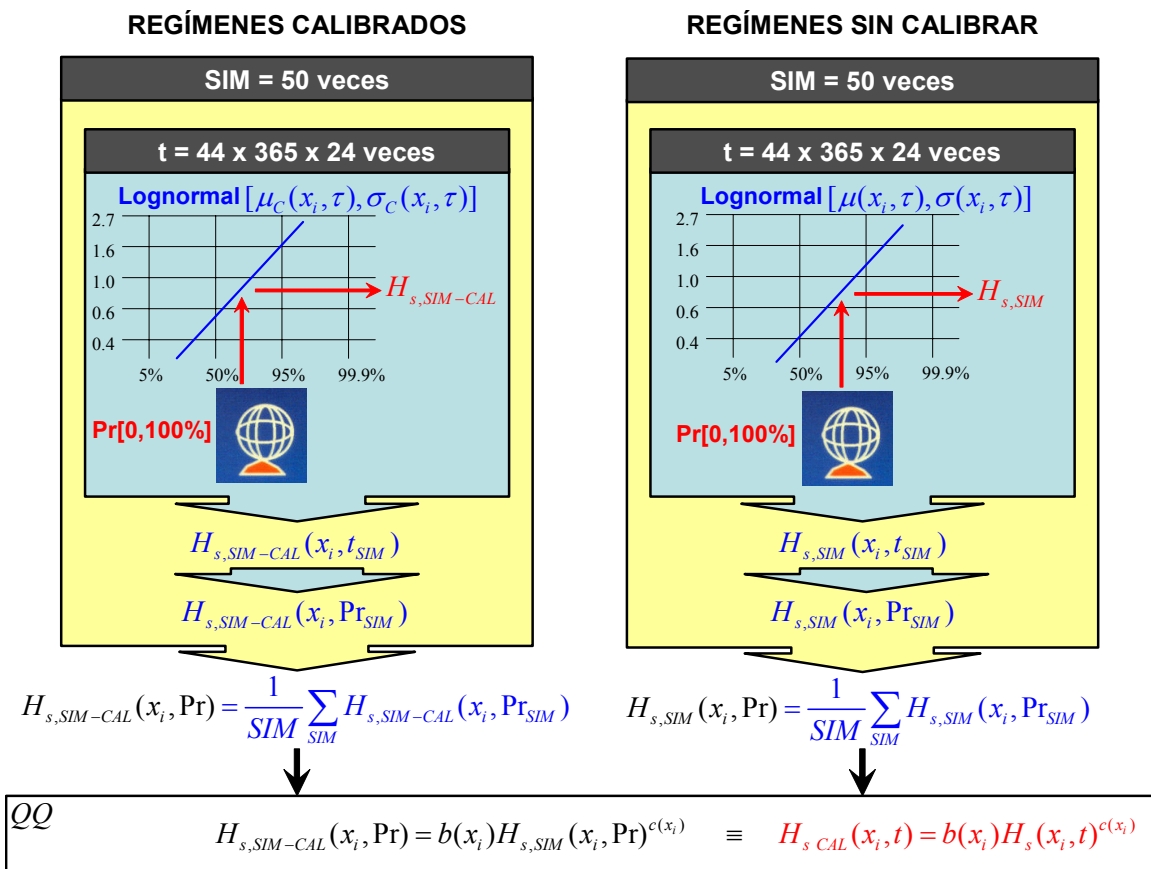


Figura 8.12. Esquema de la metodología de calibración de las series temporales de oleaje (en cada posición  $x$ ) a partir de los regímenes medios mensuales calibrados con la metodología de calibración espacial escalar.

Se obtiene así, para cada  $x_i$  de la zona de estudio, una relación potencial distinta del tipo  $H_{s\text{ CAL}}(x) = b(x)H_s(x)^{c(x)}$ , válida para calibrar las series temporales de  $H_s$  de SIMAR-44. Por ejemplo, en la figura 8.13 se muestra la relación obtenida para  $H_s$  de SIMAR-44 en la posición de Mahón, a partir de los cuantiles medios simulados con Monte Carlo. Puede observarse, en relación con los resultados de la calibración puntual  $QQ$  escalar de la figura 5.7, que se obtienen curvas de calibración distintas, aunque presentan tendencias similares para la corrección del régimen medio.

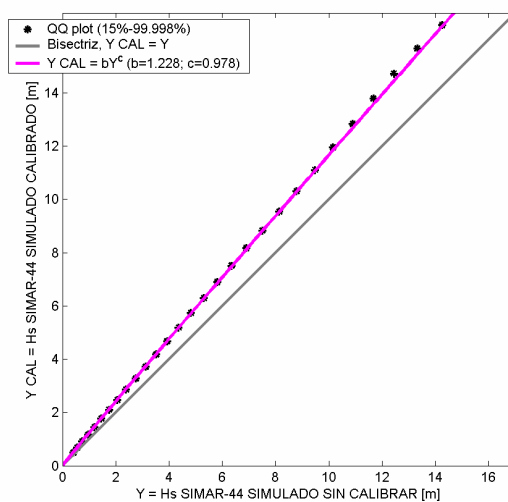


Figura 8.13. Ajuste de la relación potencial de calibración  $H_{s\text{ CAL}} = bH_s^c$  para la posición de la boya de Mahón, con  $QQ$  ponderado y MVRExt.

Cabe comentar que para las aplicaciones de calibración de esta tesis siempre se ha utilizado relaciones de calibración potenciales del tipo  $Y = bX^c$ , en un tramo o que están definidas para todo el rango de validez de  $X$ . Pero para otras aplicaciones de este método de calibración espacial se ajustan relaciones potenciales en dos tramos, teniendo una relación del tipo  $Y = bX^c$  para el primer rango de valores de  $X$  y otra del tipo  $Y = a + bX^c$  para el resto. Esto ha sido fundamentalmente utilizado cuando la tendencia del régimen medio-alto era muy distinta a la del medio, lo que a su vez motivaba el ajuste de los regimenes medios mensuales a dos funciones de distribución distintas, Lognormal para el régimen medio (hasta el 99.5%) y Gumbel de máximos para el régimen medio-alto.

### 8.3.2. Resultados y validación.

Una vez determinados los parámetros  $b(x)$  y  $c(x)$  de la relación final de calibración de las series de  $H_s$  de SIMAR-44 de la zona de calibración, se representan en la figura 8.14 dichos parámetros. Se puede comprobar que la calibración realizada no modifica drásticamente la base de datos de SIMAR-44, pues los parámetros  $b(x)$  y  $c(x)$  no difieren mucho de 1, salvo

en las proximidades de la costa; y que la variación espacial de dichos parámetros es suave, lo que es una muestra de que se han mantenido las correlaciones espaciales con la calibración, pues es lógico pensar que nodos de reanálisis próximos necesiten correcciones similares.

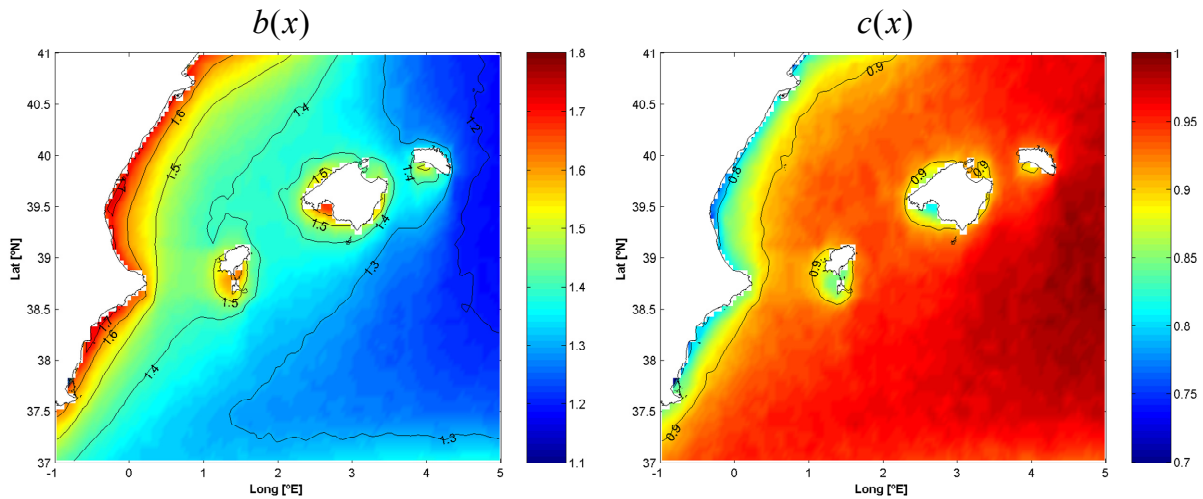


Figura 8.14. Distribución espacial de los parámetros finales de calibración,  $b(x)$  y  $c(x)$ , para la zona de estudio.

Para verificar que la calibración espacial es correcta y comparar con los resultados de las calibraciones puntuales, a partir de la relación de calibración de la posición de la boya de Mahón (ver figura 8.13) se calibra la serie de  $H_s$  de SIMAR-44 en la posición de la boya y se compara con los datos coincidentes de la boya de Mahón. Esto se muestra en la figura 8.15, en la que se comprueba la mejora de los parámetros cuantitativos medios con la calibración. Así mismo, el comportamiento de los regímenes medios mejora, pues la posición de los cuantiles medios calibrados es prácticamente coincidente con la bisectriz, pero el régimen medio alto se sobreestima con la calibración. Esto es debido a la falta de precisión a la hora de definir la rama alta del régimen medio con la distribución Lognormal.

Para validar dicha calibración en la posición de Mahón, se han utilizado los datos de satélites coincidentes (figura 8.15). Se comprueba que el régimen medio coincide casi completamente con la bisectriz tras la calibración, validando la bondad del método, pero los parámetros de la calibración con datos coincidentes empeoran. Esto es debido a que con la calibración se aumentan excesivamente los valores más pequeños de  $H_s$ ; de hecho dichos valores sin calibrar son prácticamente correctos (esto mismo sucede en las validaciones de la calibración puntual).



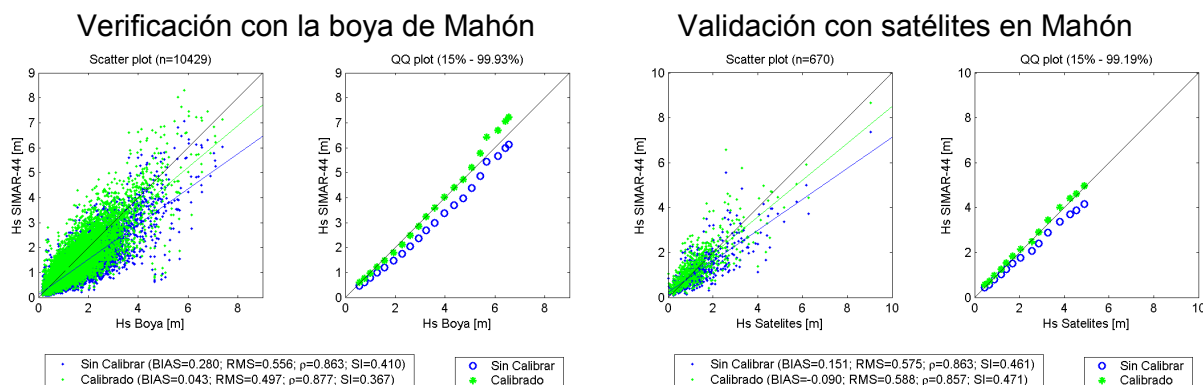


Figura 8.15. Calibración escalar de la serie de  $H_s$  de SIMAR-44 en la posición de la boya de Mahón, verificando con los datos coincidentes de la boya (izquierda) y validando con datos de satélite que distan menos de  $0.5^\circ$  de la posición de la boya (derecha).

Comparando los resultados de la calibración espacial escalar en la posición de la boya de Mahón con los de las calibraciones puntuales, se puede comprobar (ver figura 5.8 de calibración escalar  $QQ$ ) que aunque con la calibración espacial se mejora la calidad de la base de datos SIMAR-44, no se llega a la calidad de los resultados de las calibraciones puntuales.

En la figura 8.16 se muestran las series temporales de los datos de  $H_s$  de SIMAR-44 sin calibrar y calibrados y la serie de datos de la boya de Mahón. Se puede comprobar el aceptable ajuste logrado tras la calibración, a pesar de que los oleajes más energéticos se sobreestiman con la calibración.

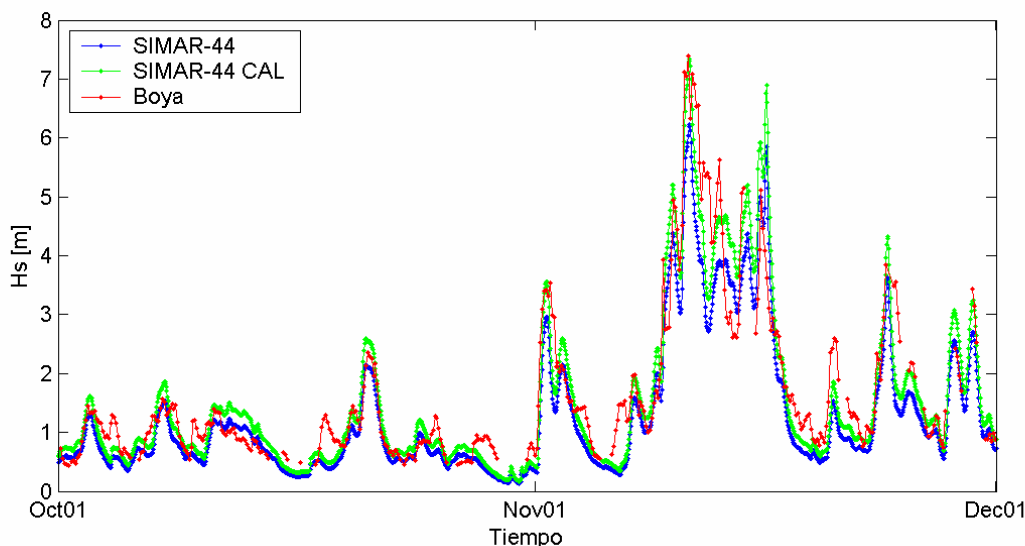


Figura 8.16. Serie temporal de dos meses de datos de  $H_s$  de la boya de Mahón y de SIMAR-44 sin calibrar y calibrados con la metodología de calibración espacial escalar.

Para validar los resultados de la calibración en toda la zona calibrada, con los parámetros de calibración de la figura 8.14 se calibra toda la base de datos de  $H_s$  de SIMAR-44,

comparándose con los datos coincidentes de satélites de dicha zona de estudio. En la figura 8.17 se comprueba que prácticamente todos los parámetros cuantitativos medios mejoran con la calibración y que el régimen calibrado presenta una distribución más próxima a la bisectriz que antes de calibrar, por todo ello puede considerarse que la calidad de los datos mejora con la calibración espacial escalar.

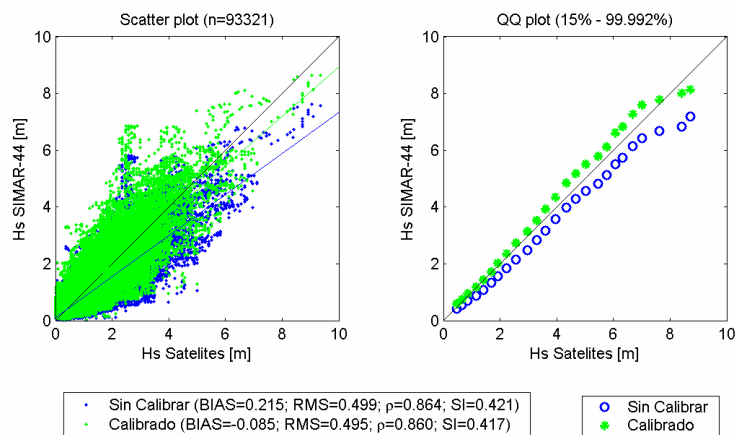


Figura 8.17. Validación de la calibración espacial escalar de las series de  $H_s$  de SIMAR-44 de la zona de estudio con los datos coincidentes de satélites de toda la zona.

## 8.4. Conclusiones.

A continuación se resume una serie de conclusiones a las que se ha llegado en el presente capítulo 8:

- Se ha desarrollado una compleja metodología de calibración espacial escalar para poder calibrar el oleaje en una posición, utilizando información instrumental que tiene climas marítimos en profundidades indefinidas distintos a los de la posición de interés, aprovechando las relaciones espaciales de los datos de reanálisis. De hecho, esta metodología consigue calibrar los regímenes medios de toda una zona, determinando una relación de calibración potencial final del tipo  $Y = bX^c$ , para cada nodo del reanálisis.
- La metodología de calibración espacial, tras el ajuste de los regímenes medios mensuales de toda la zona de estudio a funciones de distribución Lognormal, descompone los parámetros de dichas funciones de distribución en modos, utilizando la técnica clásica de descomposición de variables bidimensionales en EOFs. Con la parametrización de dichos modos se permite la distorsión de los regímenes medios mensuales para que se aproximen a los de los datos instrumentales, consiguiendo calibrar los regímenes medios mensuales de toda la base de datos. Tras la calibración

de dichos regímenes, se ha utilizado el método de Monte Carlo para definir los regímenes medios escalares con los que ajustar las relaciones potenciales finales de calibración en cada punto, mediante calibraciones puntuales  $QQ$  escalares ponderadas y MVRExt. De esta forma se pueden calibrar las series temporales de  $H_s$  de SIMAR-44 en todos los nodos de la zona de aplicación.

- Para resolver los complicados problemas de minimización de las funciones objetivo con las que se estiman los parámetros de las relaciones de calibración, ha sido imprescindible la implementación del algoritmo de optimización de problemas de alta dimensionalidad SCE-UA.
- La metodología de calibración espacial escalar se ha aplicado a la  $H_s$  de SIMAR-44 de una zona del mar Mediterráneo que cubre Valencia y las Islas Baleares, utilizando la información de 5 boyas para calibrar, Mahón y cuatro boyas en profundidades intermedias retropropagadas hasta profundidades indefinidas, validando los resultados con datos de satélites. Dicha metodología de calibración presentada puede extenderse a cualquier base de datos de variables geofísicas obtenidas mediante modelos de reanálisis.
- Se puede comprobar que los resultados obtenidos de la calibración espacial escalar no llegan a las calidades logradas con la calibración puntual escalar  $QQ$ , por lo que para el diseño de obras marítimas es preferible utilizar, cuando se pueda, la calibración puntual. Pero para aplicaciones en caracterización de climatología, con grandes bases de datos de reanálisis que abarcan zonas extensas, para producir calibraciones eficientes y homogéneas espacialmente, se propone utilizar mejor las calibraciones espaciales frente a las globales o puntuales.
- En cuanto a las funciones de distribución Lognormal, se ha comprobado que presenta algunas deficiencias para la correcta determinación del régimen medio-alto de  $H_s$ .



