

# **BASES DE DATOS DE OLEAJE Y NIVEL DEL MAR, CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS: EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DINÁMICA MARINA EN ESPAÑA**

Antonio TOMÁS; Fernando J. MÉNDEZ; Raúl MEDINA; Iñigo J. LOSADA;  
Melisa MENÉNDEZ y María LISTE

*Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas*

*Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria*

## **RESUMEN**

Para evaluar los cambios en la dinámica litoral en España son necesarias bases de datos de longitud suficiente con objeto de poder analizar las tendencias de cambio en el clima marítimo. En concreto, los modelos numéricos de retroanálisis y de predicción de variables oceanográficas se muestran hoy en día como una herramienta imprescindible para analizar los efectos del cambio climático. En este trabajo se ha utilizado una base de datos de clima marítimo (simulación horaria en el periodo 1958 a 2001 del proyecto HIPOCAS). Dicha base de datos ha sido calibrada espacialmente con registros instrumentales a partir de la técnica de descomposición en funciones empíricas ortogonales (EOF). Se ha conseguido una excelente base de datos de clima marítimo de toda la costa española de más de 40 años de duración.

**Palabras clave:** Cambio climático, dinámica litoral, clima marítimo, bases de datos, calibración, oleaje, nivel del mar.

## **ABSTRACT**

*The evaluation of long-term changes in coastal dynamics depends on the analysis of long-term wave climate data bases. In particular, wave and storm surge hindcasting numerical models are nowadays very useful tools to predict the effects of climate change. In this work, the results of HIPOCAS project (44-years -1958:2001- of hourly wave climate data along the Spanish coast) are used. This data base is calibrated using instrumental buoys and an innovative procedure, combining a empirical orthogonal functions decomposition and a later transformation using a global optimization algorithm, resulting in a quantitatively correct data base, very adequate to analyse trends in wave climate parameters.*

**Key words:** Climate change, coastal dynamics, wave climate, data base, calibration, wave, sea level.

## **1. INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, España, al igual que el resto de Estados Miembros, tiene el requerimiento de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC) de implementar medidas concretas para adaptarse al ascenso del nivel y demás efectos del cambio climático en la costa (IPCC, 2001; OECC, 2002; WOLF, 2003).

En este sentido, la creación de bases de datos de variables geofísicas oceanográficas de calidad, de alta resolución espacial y a lo largo de un periodo largo de tiempo, en todas las costas españolas (incluyendo las islas) es un factor fundamental para poder determinar los cambios acontecidos en la dinámica costera en las últimas décadas y con ellos predecir los previsibles cambios en la citada dinámica debidos al cambio climático.

En este artículo se van a estudiar las distintas bases de datos, eligiendo las más adecuadas para satisfacer los objetivos marcados. Para su uso desde un punto de vista cuantitativo ha sido necesario calibrar las bases de datos. En este trabajo se plantea el modelo desarrollado tomando como ejemplo un parámetro que caracteriza el estado de mar. Finalmente se describen las conclusiones a las que se han llegado.

Este trabajo está enmarcado en el Estudio sobre los efectos del Cambio Climático en la Costa Española que la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente ha encargado a la Universidad de Cantabria (MÉNDEZ *et al.*, 2004 en este Congreso).

## 2. BASES DE DATOS

Las distintas tareas que va a ser necesario realizar para estudiar las bases de datos son:

1. Selección de las variables más relevantes a analizar;
2. Selección de bases de datos;
3. Necesidad de la calibración de las bases de datos.

### 2.1. Selección de las variables más relevantes a analizar

La caracterización estadística de los estados de mar en un determinado lugar (clima marítimo) se realiza normalmente con los siguientes parámetros: altura de ola significativa, período medio, dirección del oleaje, marea meteorológica, velocidad del viento y dirección de viento. También son interesantes, para estudiar el cambio climático, otros parámetros como: marea astronómica y nivel medio del mar. En este trabajo los parámetros del viento se consideran tan sólo como forzadores del clima marítimo.

### 2.2. Selección de bases de datos

En general, existen dos tipos de fuentes de datos a partir de los cuales se puede obtener la información requerida: datos provenientes de observaciones o datos generados numéricamente (WEISSE y FESER, 2003). Desafortunadamente, los primeros presentan una gran cantidad de problemas. En primer lugar, hoy en día las series temporales no son, en general, suficientemente largas como para obtener la información requerida. Asimismo, dichas bases de datos no tienen la homogeneidad espacial requerida o no han sido sometidas al control de calidad necesario para garantizar que los resultados obtenidos a partir de los mismos puedan ser fiables. Y finalmente, de algunas de las variables consideradas ni tan siquiera existen registros.

La generación de datos a partir de modelos numéricos de generación de oleaje permite obtener largas series temporales en dominios extensos y con una distribución espacial suficiente que permita realizar un análisis adecuado. Más aún, si se complementa las bases de datos generadas, con los datos de observaciones con calidad y fiabilidad garantizadas, se puede generar una base de datos homogénea y fiable. Esta última aproximación al problema ha sido lo que se ha seguido en este trabajo para generar las bases de datos.

### 2.2.a. Bases de datos de oleaje

Se ha recopilado la información instrumental suministrada por EPPE que incluye su red de boyas de aguas profundas y la red costera. La boya que cuenta con la serie temporal más larga cuenta con aproximadamente 20 años de datos. Dichas redes cubren la península y parte de los archipiélagos. La red de aguas profundas está formada por 9 boyas Seawatch y 3 Wavescan. Los instrumentos están ubicados en puntos con profundidades entre 200 y 800 m y miden parámetros oceanográficos y meteorológicos. La red costera de Puertos del Estado proporciona datos de oleaje en puntos de aguas poco profundas. Consta de 18 boyas escalares Waverider (red REMRO), y de 5 boyas direccionales. Existen en Cataluña otras 5 boyas gestionadas por la Generalitat.

Por otro lado, se ha recopilado toda la información relativa a los proyectos WASA, WANA, HIPOCAS, STOWASUS 2100 y PRUDENCE; que por su relevancia se describen con mayor detalle a continuación:

- a) El conjunto de datos WASA procede del proyecto financiado por la UE que lleva el mismo nombre. Dicha base de datos está formada por el retroanálisis de oleaje de 40 años (1955-1994). Los datos se obtuvieron aplicando el modelo de generación de oleaje WAM en el Atlántico Norte.
- b) El proyecto WANA, puesto en marcha por el Programa Marítimo de Puertos del Estado, utiliza el modelo WAN de generación del oleaje en una red próxima a las costas españolas con datos desde 1995 cada 3-5 horas y con una resolución espacial de 0,125°-0,25°.
- c) En el proyecto europeo HIPOCAS (SOARES *et al.*, 2002; EPPE, 2003) se ha generado una base de datos homogénea de 44 años (1958-2001). La resolución horizontal oscila entre 0,25° y 0,125° y las resoluciones temporales varían entre 1 y 3 horas. Estos datos de oleaje se obtienen a partir del retroanálisis de 44 años de datos atmosféricos obtenidos del modelo REMO que son utilizados como forzamiento para el modelo numérico WAM de oleaje.
- d) El objetivo general del proyecto europeo STOWASUS-2100 ha sido estudiar eventos extremos de temporales, mareas meteorológicas y oleaje partiendo de las condiciones climáticas actuales así como de un escenario con una concentración de CO<sub>2</sub> doble de la existente en la actualidad, para el 2100. Este proyecto se ha basado en el modelado numérico atmosférico/oceanográfico conjunto en las regiones del Atlántico Norte Europeo y del Mar Mediterráneo, especialmente en el Adriático. Las series de datos incluyen 30 años de información, en cada escenario (KAAS *et al.*, 2000).
- e) PRUDENCE constituye la base de datos atmosféricos más detallada en la actualidad. Al igual que STOWASUS-2100 se han realizado simulaciones para el escenario actual y de doble de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, para caracterizar cambios en variables extremas de precipitación y viento.

### 2.2.b. Bases de datos de nivel del mar

EPPE tiene una red de mareógrafos, REDMAR, desde 1992, constituida por 15 mareógrafos acústicos SONAR y 4 mareógrafos de presión Aanderaa. El Instituto Español de Oceanografía (IEO) tiene series de datos desde 1944, aunque en el momento de realizar este trabajo aún no se dispone de las mismas.

La base de datos del proyecto HIPOCAS emplea el modelo HAMSOM que utiliza como forzamiento los campos de viento y de presión superficial obtenidas del modelo REMO. Así se genera una base de datos de 44 años de retroanálisis de residuo de nivel del mar, que cubre tanto la cuenca mediterránea como parte del Atlántico, con una resolución espacial de 15' x 10' (EPPE, 2003).

### 2.3. Necesidad de la calibración de las bases de datos

Una vez seleccionadas las variables consideradas como más relevantes para este estudio, se ha comprobado que la base de datos del proyecto HIPOCAS es la más adecuada para garantizar cambios en la dinámica costera española en la segunda mitad del siglo XX. Sin embargo, desde un punto de vista cuantitativo, se ha comprobado que dicha base de datos no es del todo correcta. La base de datos HIPOCAS difiere ligeramente de lo registrado en las redes de medida. Para alturas de ola, las mayores variaciones se dan en las zonas más próximas a la costa; siendo los valores dados por el modelo siempre inferiores a los valores obtenidos por teledetección y siendo las desviaciones estándar de las series de datos generadas menores que las dadas por teledetección. Para el nivel del mar, el modelo subestima sistemáticamente lo registrado en los mareógrafos de la red REDMAR (EPPE, 2003). Estas diferencias entre los resultados de los modelos y las medidas son debidas a las limitaciones inherentes a todo modelo numérico.

Por ello, se pone así de manifiesto la necesidad de realizar una calibración de los datos del modelo con los datos instrumentales (boyas y mareógrafos) con el fin de mejorar aún más la calidad de los datos de partida.

### 3. MODELO DE CALIBRACIÓN

El objetivo de la calibración es encontrar la transformación de cada parámetro de la base de datos de HIPOCAS que mejor modele lo registrado en las redes de medida instrumentales. Es importante señalar que en el proceso de calibración, la información de las redes de medida instrumentales es previamente corregida para eliminar la influencia de la propagación del oleaje en zonas someras (ver GIOC, 2000 para más detalles). Debido a la complejidad del problema, es necesario fijar a priori la escala temporal de calibración del problema. Así, en este trabajo se va a utilizar la aproximación probabilista (calibrando la base de datos agregada en términos de la evolución temporal de los regímenes de cada parámetro). De esta manera, en lugar de centrarse en las series temporales instantáneas, se va a trabajar con los regímenes de los parámetros (Fig. 1).

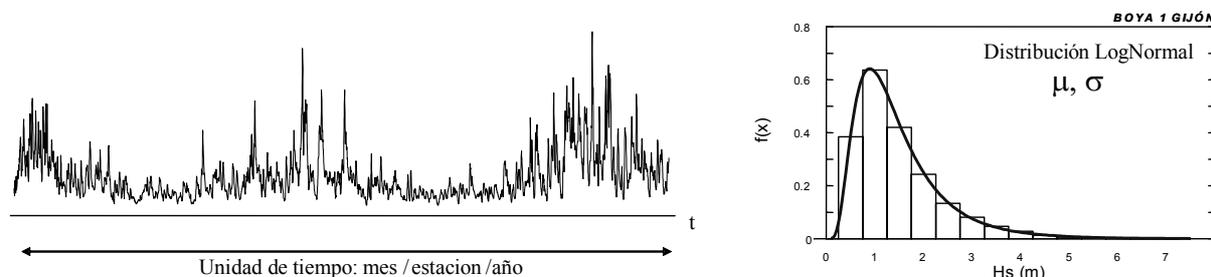


Fig. 1. Ejemplo de agregación de serie temporal de altura de ola significativa

Para mostrar los pasos seguidos en la calibración, se va a utilizar la altura de ola significativa, siendo el mismo procedimiento el que se seguiría para la calibración de cualquier otro parámetro. Los pasos son los siguientes:

1. Se selecciona la variable altura de ola significativa  $H_s(\bar{x}, \bar{t})$ , siendo  $\bar{t}$  la variable tiempo elegida (mes, año...) ( $\bar{t} = \{t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_n\}$ ) y  $\bar{x}$  la variable que define la posición de los puntos en la malla de HIPOCAS ( $\bar{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m\}$ ). Se tiene entonces una serie de  $H_s$  para cada  $x_i$  y para cada  $t_j$ .
2. Se definen los distintos regímenes en los que se puede separar la función de distribución empírica agregada de  $H_s$  para cada  $x_i$  y para cada  $t_j$  (p.e. régimen medio (20%-99,5%)).
3. Se asume para cada régimen de  $H_s$  la distribución a la que mejor se ajusta (por ejemplo, lognormal) (Fig. 2).

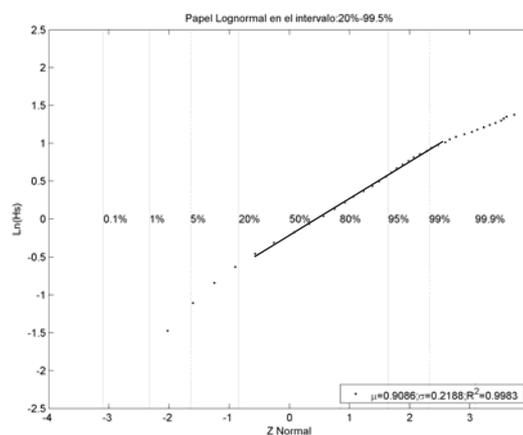


Fig. 2. Ajuste del régimen medio de la serie de altura de ola significativa, para un  $x_i$  y  $t_j$  dados

4. Se obtienen los parámetros de las distribuciones de cada régimen para cada  $x_i$  y para cada  $t_j$  (por ejemplo, la media  $\mu(i, j)$  y la desviación típica  $\sigma(i, j)$ , de la lognormal).
5. Se aplica la técnica de funciones empíricas ortogonales (EOF) para obtener los modos descomponiendo cada parámetro espacio-temporal en una serie de  $q$  funciones ortogonales (BALDACCI *et al.*, 2001). Por ejemplo, para una variable genérica  $Z(i, j)$  (que podría ser  $\mu(i, j)$  o  $\sigma(i, j)$ ) se obtiene:

$$Z(i, j) = Z_{MT}(i) + f_1(i) g_1(j) + f_2(i) g_2(j) + \dots + f_q(i) g_q(j)$$

donde  $Z_{MT}(i)$  es la media temporal,  $f_i$  es el  $i$ -ésimo modo espacial y  $g_i$  la  $i$ -ésima amplitud temporal (Fig. 3).

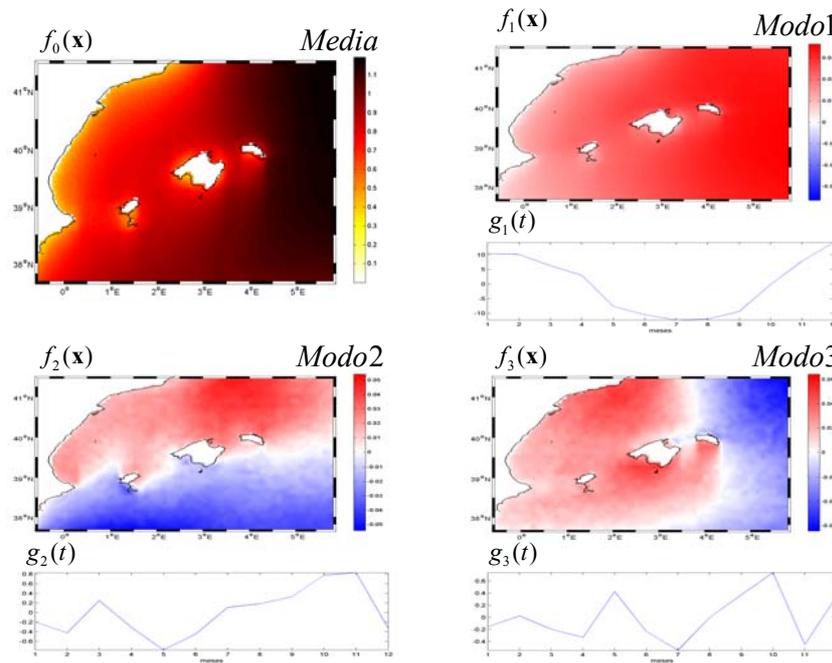


Fig. 3. Ejemplo de la media temporal y los tres primeros modos

6. De los inicialmente  $q$  modos se seleccionan los  $p$  primeros modos que deberán explicar como mínimo el 95% de la varianza de la variable  $Z(i, j)$  (p.e.  $p = 4 < q$ ).

$$Z^*(i, j) = Z_{MT}(i) + f_1(i) g_1(j) + f_2(i) g_2(j) + \dots + f_p(i) g_p(j)$$

7. Se asume como hipótesis que el valor calibrado  $Z_C(i, j)$  es una combinación potencial de cada uno de los modos, de tal manera que una de las posibles formas en las que se puede expresar es:

$$Z_C(i, j) = a_0 Z_{MT}(i)^{b_0} + a_1 f_1(i) g_1(j)^{b_1} + a_2 f_2(i) g_2(j)^{b_2} + \dots + a_p f_p(i) g_p(j)^{b_p} + c_0$$

donde  $\{a_0, a_1, a_2, \dots, a_p, b_0, b_1, b_2, \dots, b_p, c_0\}$  son las incógnitas a obtener.

8. Se calcula, para cada boya corregida, la variable  $Z$  que se pretende calibrar, que se llamará  $Z_B(i, j)$ . Ésta deberá estar definida en los mismos términos que  $Z_C(i, j)$ , o sea en los mismos  $x_i, t_j$ , régimen, distribución y con las mismas características del oleaje.
9. Para obtener  $\{a_0, a_1, a_2, \dots, a_p, b_0, b_1, b_2, \dots, b_p, c_0\}$  se evaluará la diferencia entre  $Z_B(i, j)$  y  $Z_C(i, j)$ , en los mismos  $x_i$  y  $t_j$ . Resultando finalmente un problema de optimización en el cual se debe definir la función objetivo a minimizar ( $J$ ), la cual se puede definir como:

$$J = \sum_j \left\{ \sum_i \left\{ \left[ \frac{Z_B(i, j) - Z_C(i, j; \{a_0, a_1, a_2, \dots, a_p, b_0, b_1, b_2, \dots, b_p, c_0\})}{R(i, j)} \right]^2 P(i, j) \right\} \right\}$$

donde  $R(i, j)$  es el término que relativiza el error (p.e. la media temporal de cada boya corregida  $R(i) = \overline{Z_B(i, j)}$ ) y  $P(i, j)$  es el término que da más o menos peso a cada sumando de la función objetivo.

10. Una vez definida la función objetivo se elige la combinación de  $\{a_0, a_1, a_2, \dots, a_p, b_0, b_1, b_2, \dots, b_p, c_0\}$  que produce el mínimo error cuadrático relativo ponderado entre los datos de HIPOCAS calibrados y las boyas de medida (minimiza la función objetivo mediante el método *shuffled complex evolution*, SCE-UA (DUAN *et al.*, 1992).
11. Con los valores obtenidos de la minimización de la función objetivo  $\{a_0, a_1, a_2, \dots, a_p, b_0, b_1, b_2, \dots, b_p, c_0\}$  se obtiene  $Z_C(i, j)$ .
12. Se calibra, para cada régimen, todos los parámetros de cada distribución; se repite para cada parámetro desde el paso 5) al 11).
13. Una vez calibrados todos los parámetros de todos los regímenes de la altura de ola significativa ( $Z(i, j)$ ), se hace una simulación de Monte Carlo con estos parámetros calibrados para construir una serie de alturas de ola significantes para cada  $x_i$  y para cada  $t_j$ . Así se obtiene una serie simulada de  $H_s$  calibrada para cada  $x_i$  y para cada  $t_j$ .
14. Se define la función potencial que compara, en cada  $x_i$  y en cada  $t_j$ , la serie de  $H_s$  inicial ( $H_s$ ) con la serie  $H_s$  calibrada ( $H_{sc}$ ) por percentiles. Por ejemplo,  $H_{sc} = b H_s^c$ .
15. Finalmente, se ajusta a la función potencial definida anteriormente, determinándose los parámetros finales de ésta (por ejemplo,  $b(i, j)$  y  $c(i, j)$ ) para cada  $x_i$  y para cada  $t_j$ , en los que se resume toda la información de la calibración de la base de datos de HIPOCAS. En la figura 4 se muestra el ajuste a la función potencial de unos  $x_i$  y  $t_j$  dados y la distribución espacial de  $b$  y  $c$  para una zona del mar Mediterráneo en el tiempo  $t_j$ .

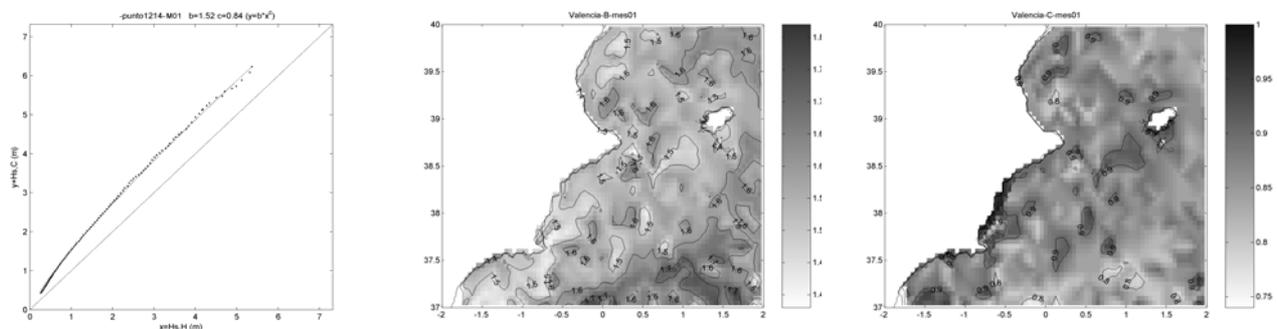


Fig. 4. Ejemplo del ajuste a la función potencial  $H_{sc} = b H_s^c$  y distribución espacial de  $b$  y  $c$ . En el organigrama de la figura 5 se muestran los pasos seguidos en la calibración de la altura de ola significativa, siendo el mismo procedimiento el seguido por el resto de los parámetros.

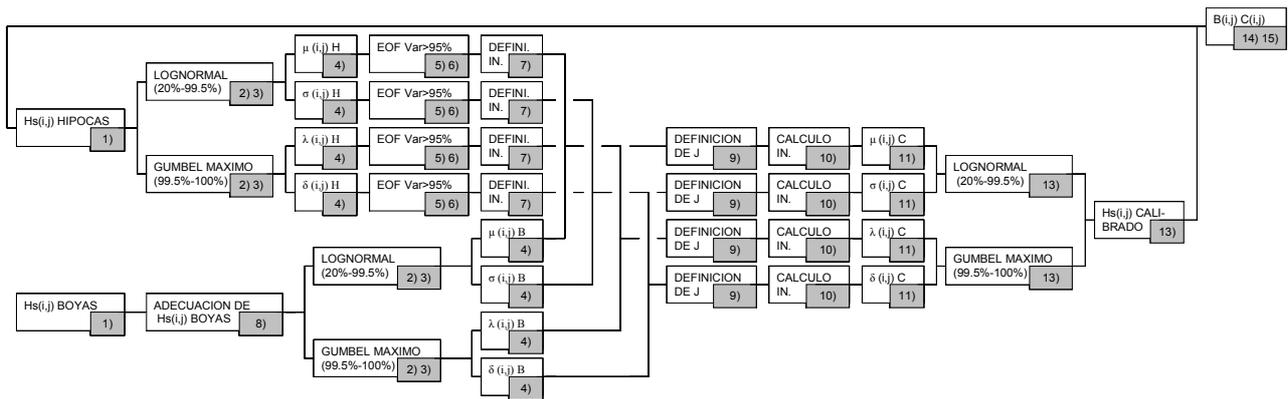


Fig. 5. Organigrama de calibración de  $H_s$

#### 4. VALIDACIÓN DEL MODELO

Al igual que cualquier modelo, se ha validado el modelo de calibración para comprobar que las calibraciones realizadas son correctas. Así, a modo de ejemplo se muestran los resultados de validación de una zona del Mediterráneo, en la que existen tres boyas de oleaje. Se calibra el régimen medio (ajuste Lognormal entre el 20% y el 99,5% de probabilidad acumulada) y el régimen medio-extremal (ajuste Gumbel de máximos entre el 99,5% y el 100% de probabilidad acumulada) de la altura significativa con dos boyas corregidas (Valencia y Cabo de Palos) y se valida con la tercera (Alicante). En la figura 6 se representan los datos calibrados de HIPOCAS en Alicante del régimen medio ( $\mu$  y  $\sigma$ ), que se ajustan a los datos de la boya corregida mucho mejor que antes de la calibración.

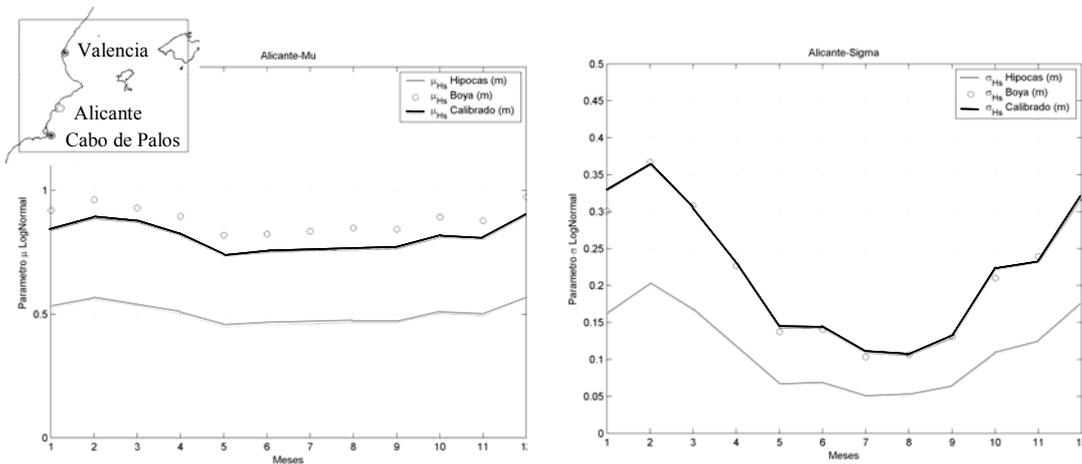
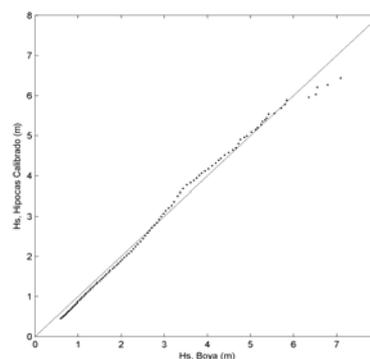


Fig. 6. Zona seleccionada,  $\mu$  y  $\sigma$  en Alicante

Una vez calibrado el régimen medio y el régimen medio-extremal se recompone la serie de alturas de ola significativa en Alicante. Se compara la serie de alturas de ola significativa calibradas con la serie de alturas de ola significativa de la boya corregida de Alicante. En la figura 7 se comprueba la bondad del método de calibración, pues prácticamente son idénticas las dos series de altura de ola significativa (los puntos se sitúan sobre la bisectriz).

Fig. 7. Serie de  $H_s$  boya corregida de Alicante vs Serie de  $H_s$  HIPOCAS calibrado en Alicante



Por otro lado, si se calibra con los datos de las tres boyas de la zona seleccionada, se obtienen valores calibrados de los parámetros del régimen medio ( $\mu$  y  $\sigma$ ) muy próximos a los de las boyas que han servido para calibrar HIPOCAS en esa zona (Fig. 8).

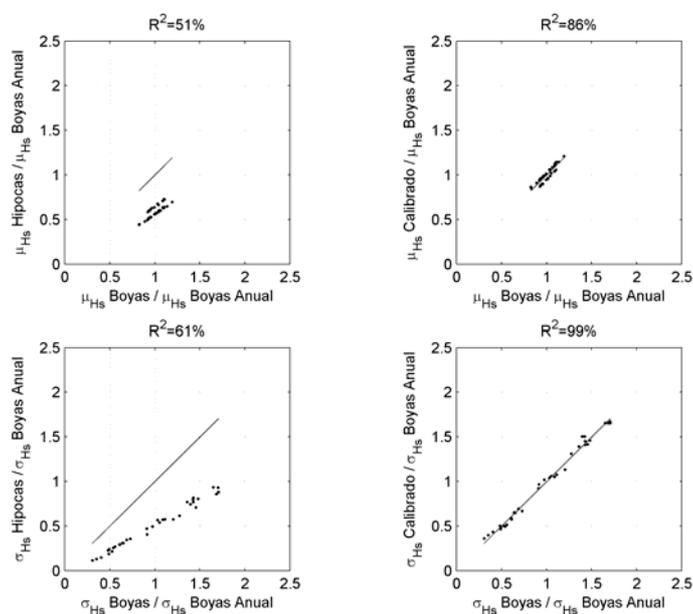


Fig. 8. Comparación relativa de los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  antes y después de calibrar con los de las boyas corregidas (divididos entre la media anual de las boyas corregidas)

Se destaca de este modelo de calibración que los resultados obtenidos en Alicante tanto calibrando con los datos de la boya de Alicante como si se calibra sin tener esos datos en cuenta, se llegan a resultados muy semejantes. Lógicamente la calibración con un mayor número de boyas permite una definición más correcta de la transformación a realizar.

## 5. CONCLUSIONES

Para poder estudiar con suficiente rigor los efectos del cambio climático sobre la costa se necesitan largas series de los estadísticos fundamentales de la dinámica marina, para poder así analizar las tendencias de estos en la totalidad de las costas insulares y peninsulares.

Haciendo un repaso de las distintas fuentes de datos existentes, se ha llegado a la conclusión de que la mejor base de datos es la de HIPOCAS, pero desde el punto de vista cualitativo presenta algunas deficiencias.

Se ha desarrollado una completa metodología para la calibración de todos los parámetros más relevantes del clima marítimo. Así actualmente, tras la calibración de la base de datos de HIPOCAS, se dispone de una serie de datos de 44 años (hora a hora) de una resolución espacial próxima a los 10 km y con una excelente calidad (análoga a la de las redes de medida). Dicha metodología se puede extender a cualquier base de datos de variables geofísicas, resultando una herramienta de gran utilidad para poder utilizar dichas bases de datos desde un punto de vista cuantitativo.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Oficina Española de Cambio Climático del Ministerio de Medio Ambiente la financiación por el proyecto "Investigación sobre impactos en la Costa Española por efecto del Cambio Climático". Se agradece al Ente Público Puertos del Estado (Ministerio de Fomento) la información facilitada, tanto de la base de datos de proyecto HIPOCAS, como de las redes instrumentales de medida. F.J.M. agradece al Ministerio de Ciencia y Tecnología la financiación dentro del programa Ramón y Cajal.

## 7. REFERENCIAS

- BALDACCI, A. *et al.* (2001). "A study of the Alboran sea mesoscale system by means of empirical orthogonal function decomposition of satellite data". *Journal of Marine Systems*, 29, pp. 293-311.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S. and GUPTA, V. (1992). "Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models". *Water Resources Research*, Vol. 28(4), pp. 1015-1031.
- EPPE (2003). *Reanálisis de 44 años (1958-2001) del clima oceánico y atmosférico en el Mar Mediterráneo: Informe Técnico de la contribución de Puertos del Estado al proyecto europeo HIPOCAS*. 305 pp.
- GIOC (2000). *Estudio Básico para la Ampliación del Puerto de Gijón. Determinación del Clima Marítimo*. Autoridad Portuaria de Gijón.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: Synthesis Report. Summary for Policymakers*. 145 pp .
- KAAS, E. *et al.* (2000). *Synthesis of the STOWASUS-2100 proyect*. 27 pp.
- OECC (2002). *Principales conclusiones del Tercer Informe de Evaluación*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). En: Cambio Climático: Ciencia, Impactos, Adaptación y Mitigación. Ministerio de Medio Ambient, 35 pp.
- MÉNDEZ, F. J. *et al.* (2004) Estudio de los Impactos en la Costa Española por efecto del Cambio Climático. En: *IV Congreso de la Asociación Española de Climatología (AEC)*.
- PRUDENCE Project. On-Line: <http://prudence.dmi.dk>
- SOARES, C.G. *et al.* (2002). *A 40 years hindcast of wind, sea level and waves in European waters*. Proceedings of OMAE 2002: 21<sup>o</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. OMAE2002-28604.
- WEISSE, R. and FESER, F. (2003). "Evaluation of a method to reduce uncertainty in wind hindcast performed with regional atmosphere models". *Coastal Engineering* 48(4), pp. 221-225.
- WOLF, J. (2003). "Effects of climate change on wave height at the coast". *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 5, 13351.