

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 10

REGÍMENES EXTREMALES DE H_s EN AGUAS ABIERTAS A LO

LARGO DEL LITORAL ESPAÑOL

10.1. Introducción.

En este capítulo, y tras haber explicado todas las metodologías de calibración que se han desarrollado en esta tesis, se va a calibrar la H_s en diferentes posiciones (calibración puntual), a lo largo de las costas españolas, para definir los regímenes extremales de H_s en aguas abiertas a lo largo del litoral español.

Se van a presentar resultados del ajuste de los regímenes extremales a partir de datos de H_s de SIMAR-44 sin calibrar y calibrados, mostrando las diferencias entre ellos. Para calibrar se van a utilizar los datos de las boyas de la red exterior de OPPE (ver tabla 10.1), utilizando el método de calibración puntual paramétrico direccional QQ ponderado y con MVRExt (ver apartado 5.3.2.3 del capítulo 5). Como ya se ha explicado, ésta es la metodología de calibración puntual paramétrica con la que se obtienen los mejores resultados. No se ha utilizado la metodología de calibración puntual no paramétrica porque, aunque es la que mejor calibra el régimen medio, no modifica el régimen extremal cuando no tiene información para ello. En general, con los datos de las boyas de la red exterior se tienen entre 5 y 15 años de datos, por lo que no se consigue corregir el régimen extremal del oleaje con el método no paramétrico. En cambio, con el método paramétrico QQ se calibra el régimen extremal a partir de las tendencias de corrección ajustadas por la rama alta del régimen medio.

	Profundidad Fondeo [m]	Periodo Fondeo	Posición [° N; ° E]	Tipo
Bilbao	600	11/1999-...	43.64; -3.05	Direccional
Santander	2500	06/2007-...	43.85; -3.77	Direccional
Cabo de Peñas	450	06/1997-...	43.74; -6.17	Direccional
Estaca de Bares	380	07/1996-...	44.06; -7.62	Direccional desde 01/1997
Villano-Sisargas	390	05/1998-...	43.50; -9.21	Direccional
Cabo Silleiro	320	07/1998-...	42.13; -9.39	Direccional desde 06/2003
Cádiz	450	08/1996-...	36.48; -6.97	Direccional desde 05/2003
Alborán	580	02/1997-02/2006	36.25; -5.03	Direccional desde 04/2003
Cabo de Gata	530	03/1998-...	36.57; -2.34	Direccional desde 04/2003
Cabo de Palos	230	07/2006-...	37.65; -0.33	Direccional
Valencia	260	09/2005-...	39.52; 0.21	Direccional
Tarragona	670	08/2004-...	40.68; 1.47	Direccional
Cabo Begur	1200	03/2001-...	41.92; 3.66	Direccional
Mahón	300	04/1993-...	39.72; 4.44	Direccional
Dragonera	135	11/2006-...	39.56; 2.10	Direccional
Gran Canaria	780	06/1997-...	28.20; -15.80	Direccional desde 05/2003
Tenerife	710	04/1998-...	28.00; -16.58	Direccional desde 05/2003

Tabla 10.1. Características de la base de datos de oleaje proveniente de las boyas de la red exterior.

De las 16 boyas de la red exterior del OPPE, más la de Santander del IEO, presentadas en la tabla 10.1, sólo se van a utilizar las que tienen más de 4 o 5 años de datos y cierta cantidad de información coincidente con la base de datos SIMAR-44 (1958-2001), por lo que no se calibran las posiciones de las 5 boyas fondeadas posteriormente al año 2001 (Santander, Cabo de Palos, Valencia, Tarragona y Dragonera). En la figura 10.1 se sitúan las 12 boyas de la red exterior utilizadas para calibrar los datos de H_s de SIMAR-44 en sus posiciones coincidentes.



Figura 10.1. Ubicación de las boyas de la red exterior utilizadas para la calibración de los datos de H_s de SIMAR-44 en dichas posiciones.

Para calibrar la H_s de SIMAR-44 en las 12 posiciones coincidentes con las boyas de la red exterior, se utiliza la metodología de calibración puntual direccional QQ ponderada y con MVRExt. La forma de definir los cuantiles de comparación de cada sector direccional será utilizando, para todos los casos, sólo los datos coincidentes. Para las boyas que se direccionalizaron en el año 2003, sólo se tiene información coincidente del oleaje escalar hasta el 2001, por lo que se utiliza la dirección de los datos coincidentes de SIMAR-44 para definir los cuantiles direccionales de las boyas.

A modo de ejemplo, en la tabla 10.2 se presentan los resultados de las verificaciones de las calibraciones QQ con los cuantiles de los datos coincidentes de las 12 boyas. Se muestran los parámetros cuantitativos medios del diagnóstico del ajuste de los datos de H_s coincidentes de cada una de las boyas con los SIMAR-44, antes y después de la calibración. Se comprueba que todos los parámetros mejoran considerablemente con la calibración, salvo en alguna ocasión el sesgo o *bias*, pero este hecho no tiene repercusión en la calidad de las calibraciones de los eventos más energéticos. Éste es el objetivo del presente capítulo, la caracterización del régimen extremal a lo largo del litoral español.

	SIMAR-44 sin calibrar				SIMAR-44 calibrado				n
	BIAS	RMS	ρ	SI	BIAS	RMS	ρ	SI	
Bilbao	-0.015	0.454	0.924	0.242	-0.026	0.447	0.926	0.238	18823
Cabo de Peñas	-0.010	0.445	0.925	0.224	-0.017	0.441	0.927	0.222	25577
Estaca de Bares	-0.077	0.554	0.918	0.234	-0.022	0.518	0.927	0.219	25541
Villano-Sisargas	-0.071	0.565	0.901	0.248	-0.022	0.497	0.921	0.218	18529
Cabo Silleiro	-0.160	0.527	0.913	0.243	-0.025	0.453	0.932	0.209	23119
Cádiz	-0.065	0.443	0.845	0.376	0.000	0.373	0.881	0.316	37593
Gran Canaria	-0.188	0.405	0.834	0.250	-0.003	0.321	0.876	0.198	36374
Tenerife	-0.028	0.298	0.800	0.311	-0.015	0.284	0.812	0.297	28270
Alborán	0.187	0.395	0.775	0.530	0.008	0.345	0.792	0.462	21543
Cabo de Gata	0.402	0.623	0.779	0.610	-0.035	0.428	0.840	0.419	23492
Cabo Begur	0.276	0.511	0.863	0.484	-0.003	0.379	0.909	0.359	3034
Mahón	0.280	0.556	0.863	0.410	-0.030	0.459	0.892	0.339	10429

Tabla 10.2. Verificación de las calibraciones puntuales direccionales QQ con ponderación y MVRExt de H_s de SIMAR-44 con datos de distintas boyas de la red exterior.

Se puede comprobar a la vista de los resultados de la tabla 10.2, que en las posiciones de las boyas del Mar Cantábrico y Galicia, SIMAR-44 presenta los mejores valores de ajuste a los datos de las boyas. Por otro lado, los peores valores se encuentran en la zona del Mar de Alborán.

10.2. Variación del régimen extremal en aguas abiertas.

Una vez calibradas las 12 posiciones de SIMAR-44 coincidentes con las boyas exteriores, se puede caracterizar para cada una de ellas el régimen extremal de H_s , antes y después de calibrar. Los regímenes extremales escalares de H_s se han ajustado a la función GEV, *Generalized Extreme Value* (ver anexo I), utilizando para ello únicamente los datos que superan el umbral del percentil del 99.75% de los datos. Usualmente se denomina a esta técnica, que utiliza sólo los datos que superan un cierto umbral para estimar el régimen extremal, POT, *Peaks Over Threshold*. Si con esta técnica se ajusta la función GEV, ésta se denomina GPD, *Generalized Pareto Distribution*.

En la tabla 10.3 se presentan los parámetros que definen la función de distribución GPD para el régimen extremal de H_s , μ , ψ y ξ , estimados mediante el ajuste por máxima verosimilitud. Se realiza la caracterización del régimen extremal en cada una de las 12 posiciones coincidentes de las boyas exteriores, para los datos de H_s de SIMAR-44 sin calibrar y calibrados con la metodología de calibración puntual QQ direccional ponderada y con MVRExt.

	SIMAR-44 sin calibrar			SIMAR-44 calibrado		
	μ	ψ	ξ	μ	ψ	ξ
Bilbao	9.093	1.721	0.000	8.730	1.567	0.016
Cabo de Peñas	7.892	1.168	-0.010	7.817	1.077	0.050
Estaca de Bares	10.156	1.641	-0.209	9.580	1.539	-0.183
Villano-Sisargas	10.395	1.588	-0.113	9.243	1.144	-0.123
Cabo Silleiro	9.664	1.477	-0.204	8.679	1.229	-0.416
Cádiz	5.913	1.322	-0.224	4.941	1.049	-0.300
Gran Canaria	4.988	0.692	-0.189	4.399	0.467	0.015
Tenerife	2.985	0.606	0.111	2.789	0.466	-0.002
Alborán	3.080	0.585	0.103	3.880	0.760	0.221
Cabo de Gata	2.808	0.517	0.102	4.449	0.698	-0.061
Cabo Begur	4.924	0.728	0.156	5.788	0.781	0.043
Mahón	5.855	0.892	-0.037	6.376	0.998	-0.212

Tabla 10.3. Parámetros de ajuste del régimen extremal de H_s de SIMAR-44 sin calibrar y calibrado con la metodología de calibración QQ direccional ponderado y con MVRExt (con datos de las boyas de la red exterior de OPPE), en la posición de las boyas. Se ajusta el régimen extremal mediante la técnica POT, definiendo el umbral de corte con el cuantil del 99.75% y ajustando los datos a la función GEV.

En la tabla 10.3 se puede observar la variación de los parámetros que definen el régimen extremal en cada posición. La representación gráfica de dichos regímenes extremales de H_s se muestran en la figura 10.2. Se presentan, para cada posición, los regímenes sin calibrar y calibrados de H_s en metros frente al periodo de retorno¹ en años.

Puede observarse que, en función de la posición, existen mayores o menores diferencias entre los regímenes extremales sin calibrar y calibrados. Esto es debido a que los modelos de reanálisis no simulan con la misma eficiencia el oleaje de las distintas áreas geográficas. En general, para las posiciones de las boyas del Mar Cantábrico (Bilbao, Cabo de Peñas y Estaca de Bares) las diferencias no son muy acusadas, aunque la tendencia es a que se disminuya el régimen extremal con la calibración (SIMAR-44 sobreestima en cierta medida los oleajes más energéticos). Para las posiciones de las boyas de la fachada atlántica peninsular (Villano-Sisargas, Cabo Silleiro y Cádiz) se disminuyen considerablemente los regímenes extremales con la calibración; lo mismo sucede para las posiciones de las boyas del Archipiélago Canario (Gran Canaria y Tenerife), aunque en menor magnitud. En cambio, para las posiciones de las boyas del Mar Mediterráneo, la tendencia es a que se aumente el régimen extremal con la calibración (SIMAR-44 subestima los oleajes más energéticos), fundamentalmente para las posiciones de las boyas del Mar de Alborán (Alborán y Cabo de Gata), siendo aumentados en menor medida los eventos más energéticos de Cabo Begur y Mahón.

¹ Periodo de retorno, T_r : es el número medio de años que transcurren entre dos eventos y se define como $T_r = 1/(1 - Pr)$, siendo Pr la probabilidad de no excedencia anual del evento.

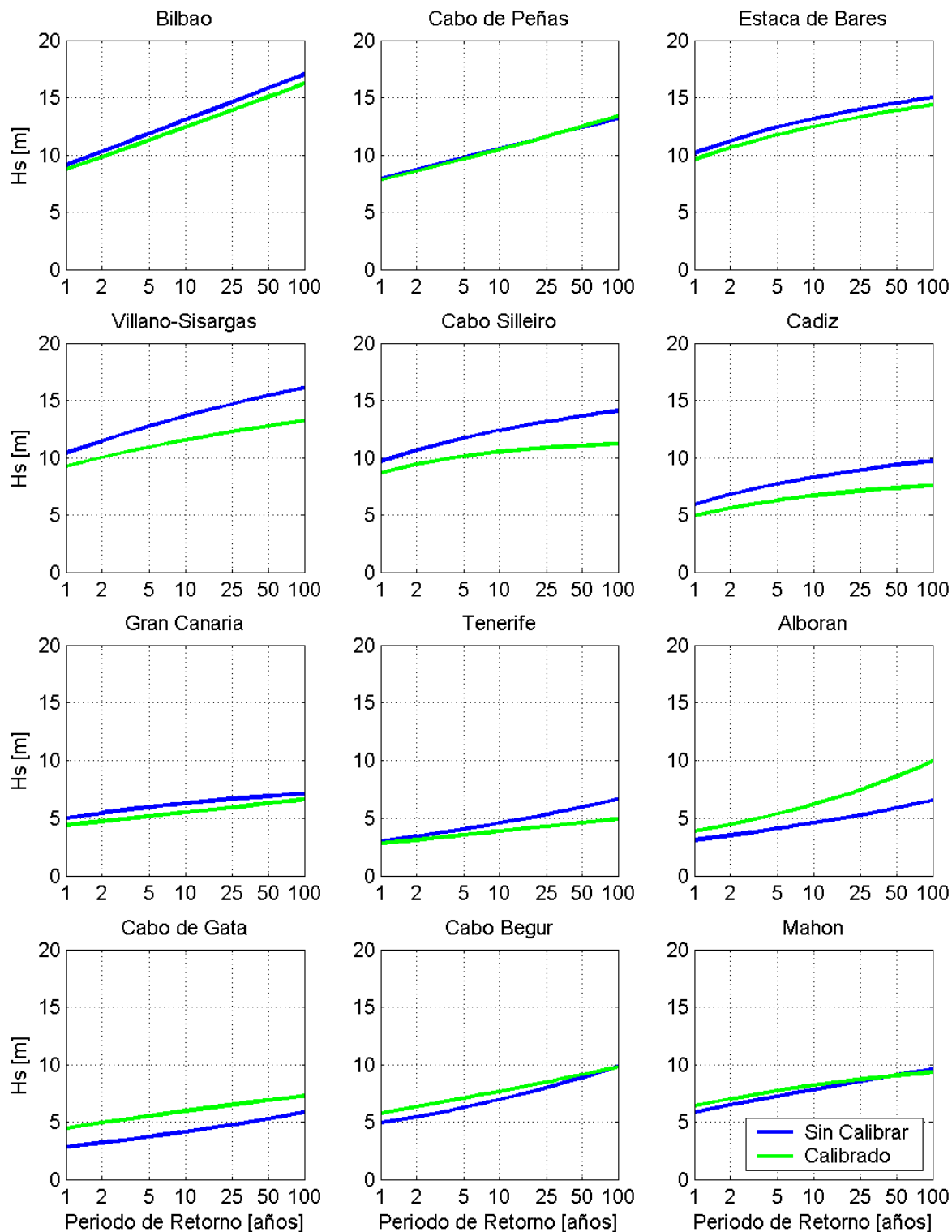


Figura 10.2. Régimen extremal de H_s de SIMAR-44 sin calibrar y calibrado con la metodología de calibración QQ direccional ponderado y con MVRExt (con datos de las boyas de la red exterior de OPPE), en la posición de las 12 boyas. Se ajusta el régimen extremal mediante la técnica POT, definiendo el umbral de corte con el cuantil del 99.75% y ajustando los datos a la función GEV.

En la tabla 10.4 se presentan las H_s de los periodos de retorno de 2, 10 y 50 años, para los regímenes extremales sin calibrar y calibrados de las posiciones de las boyas. Y en la figura

10.3 se ubica en las posiciones de las boyas de la red exterior los incrementos en las H_s de los periodos de retorno de 2, 10 y 50 años debidas a la calibración ($H_{s\text{ CAL}} - H_s$).

	H_s SIMAR-44 sin calibrar [m]			H_s SIMAR-44 calibrado [m]		
	$T_r = 2$	$T_r = 10$	$T_r = 50$	$T_r = 2$	$T_r = 10$	$T_r = 50$
Bilbao	10.3	13.1	15.8	9.8	12.4	15.1
Cabo de Peñas	8.7	10.6	12.4	8.6	10.5	12.5
Estaca de Bares	11.2	13.2	14.5	10.6	12.5	13.9
Villano-Sisargas	11.5	13.6	15.4	10.0	11.5	12.9
Cabo Silleiro	10.6	12.4	13.7	9.4	10.5	11.1
Cádiz	6.8	8.3	9.4	5.6	6.7	7.4
Gran Canaria	5.4	6.3	6.9	4.7	5.5	6.3
Tenerife	3.4	4.6	6.0	3.1	3.9	4.6
Alborán	3.5	4.6	5.9	4.5	6.2	8.6
Cabo de Gata	3.2	4.2	5.3	4.9	6.0	6.9
Cabo Begur	5.5	6.9	8.9	6.4	7.7	9.1
Mahón	6.5	7.8	9.1	7.0	8.2	9.0

Tabla 10.4. H_s de distintos periodos de retorno ($T_r = 2$ años, $T_r = 10$ años y $T_r = 50$ años) de SIMAR-44 sin calibrar y calibrado con la metodología de calibración QQ direccional ponderado y con MVRExt (con datos de las boyas de la red exterior de OPPE), en la posición de las boyas.

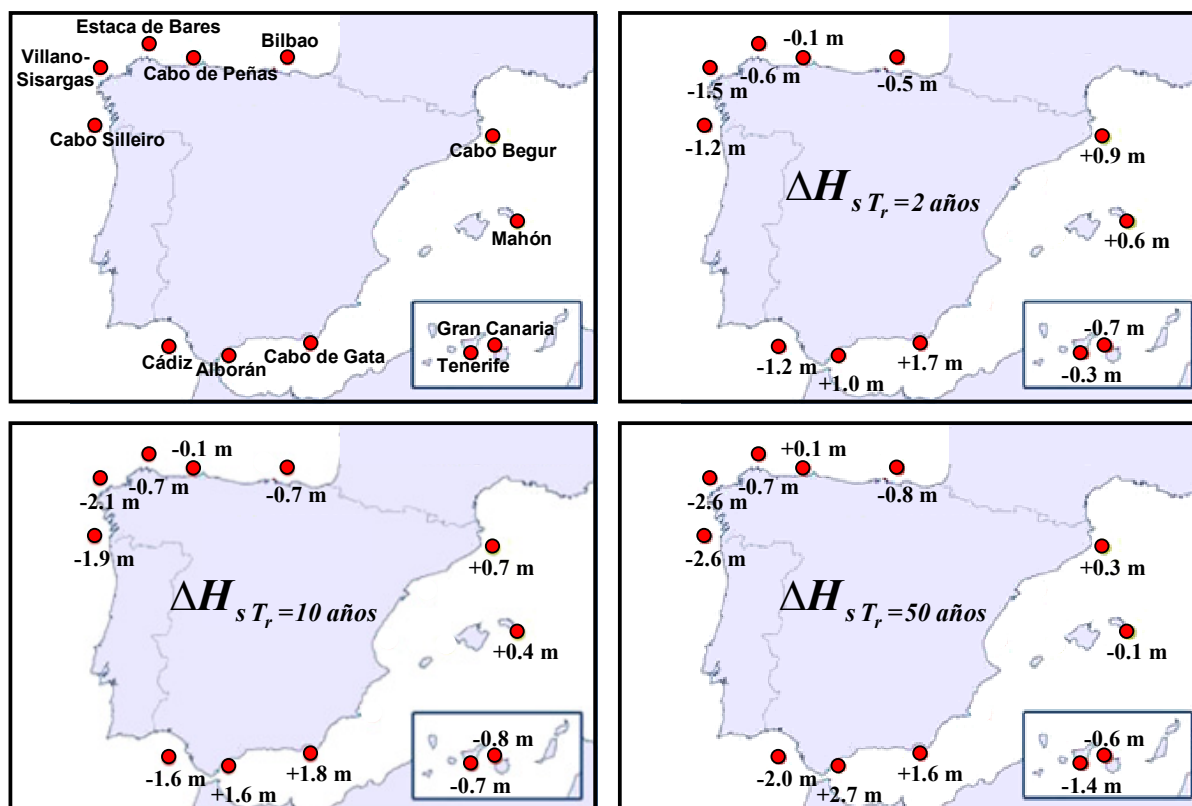


Figura 10.3. Incremento de H_s (calibrado menos sin calibrar) del periodo de retorno $T_r = 2$ años (arriba-derecha) $T_r = 10$ años (abajo-izquierda) y $T_r = 50$ años (abajo-derecha). Y posición de los puntos SIMAR-44 calibrados en la posición de las boyas (arriba-izquierda).

Puede comprobarse en la figura 10.3 que para las posiciones de las boyas del Mar Cantábrico (Bilbao, Cabo de Peñas y Estaca de Bares) las diferencias en H_s para los periodos de retorno estudiados ($T_r = 2$ años, $T_r = 10$ años y $T_r = 50$ años), son inferiores al metro; en cambio para las posiciones de las boyas de la fachada atlántica peninsular (Villano-Sisargas, Cabo Silleiro y Cádiz) se obtienen diferencias máximas de 2.6 m. De la misma manera, para las posiciones de las boyas del Archipiélago Canario también se producen diferencias debidas a la calibración, siendo inferiores al metro en Gran Canaria y de hasta 1.4 m en Tenerife. En general, en las posiciones evaluadas del Atlántico, se disminuye el régimen extremal con la calibración. Sin embargo, en el Mediterráneo la tendencia es a aumentar el régimen extremal con la calibración, fundamentalmente para las posiciones de las boyas del Mar de Alborán. Así, en las posiciones de las boyas de Alborán y Cabo de Gata se producen diferencias superiores a los 2 m; en cambio para las posiciones de Cabo Begur y Mahón las diferencias son siempre inferiores al metro.

Más importante que las variaciones en términos absolutos de los regímenes extremales son las variaciones en términos relativos, pues cuando se diseña una obra exterior (usualmente en base a H_s de $T_r = 50$ años) los costes de la obra suelen ser proporcionales al valor de diseño de H_s elevado al cubo. Por lo que, por ejemplo, una disminución del 20% en el valor de H_s de diseño supone una reducción próxima al 50% en los costes de la obra. En la tabla 10.5 se presenta el porcentaje de variación de H_s , para los periodos de retorno $T_r = 2$ años, $T_r = 10$ años y $T_r = 50$ años, debidos a la calibración de la base de datos SIMAR-44 en la posición de las boyas exteriores.

	$100 \frac{H_{s,CAL} - H_s}{H_s} [\%]$		
	$T_r = 2$	$T_r = 10$	$T_r = 50$
Bilbao	-4.5	-5.0	-4.9
Cabo de Peñas	-1.4	-1.0	+0.8
Estaca de Bares	-5.6	-5.2	-4.6
Villano-Sisargas	-12.7	-15.3	-17.0
Cabo Silleiro	-11.3	-15.2	-19.0
Cádiz	-17.2	-19.4	-21.4
Gran Canaria	-13.1	-12.5	-9.0
Tenerife	-9.1	-15.6	-22.7
Alborán	+27.1	+33.9	+45.9
Cabo de Gata	+54.8	+43.3	+29.9
Cabo Begur	+16.1	+10.6	+3.0
Mahón	+8.6	+4.3	-0.8

Tabla 10.5. Porcentaje de variación de H_s de distintos periodos de retorno ($T_r = 2$ años, $T_r = 10$ años y $T_r = 50$ años) debido a la calibración de SIMAR-44 en la posición de las boyas.

Se puede comprobar en la tabla 10.5 que para las posiciones de las boyas del Mar Cantábrico (Bilbao, Cabo de Peñas y Estaca de Bares) se disminuye el régimen extremal del orden del 5%, en cambio para el resto de las posiciones de las boyas del Atlántico (Villano-Sisargas, Cabo Silleiro, Cádiz, Gran Canaria y Tenerife) se reduce el régimen extremal entre aproximadamente el 15% y el 20%. Sin embargo, en las posiciones de las boyas del Mar de Alborán (Alborán y Cabo de Gata) se producen aumentos del régimen extremal próximos al 50%, aunque en otras posiciones como las de las boyas de Cabo Begur y Mahón las diferencias son menores, del orden del 10% o inferiores para los oleajes más energéticos.

Finalmente, y como conclusión, se ha comprobado la enorme repercusión en el diseño de las obras marítimas de la calibración de los datos de oleaje. Pues, tras la calibración de las bases de datos de reanálisis, los regímenes extremales de oleaje varían sustancialmente. Dado que éstos son la base fundamental del diseño de las obras de abrigo, sus costes de ejecución se ven extraordinariamente alterados. Por lo tanto, para la correcta optimización económica de las obras marítimas es indispensable la adecuada calibración de las bases de datos de reanálisis de oleaje, previamente a su utilización para la caracterización del clima marítimo incidente en la obra.

