

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

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos.

Muchas han sido las personas e instituciones que han colaborado para que, con el fruto de muchos años de trabajo, se haya podido realizar esta tesis. Por ello, y para tratar de no olvidarme de ninguno, voy a ir enumerando cronológicamente las personas a las que quiero agradecer su apoyo en este largo camino. Aunque con esta ordenación no quisiera quitarle importancia a ninguno de los mencionados.

Podría considerarse que este camino comenzó al acabar mi carrera universitaria, cuando empecé el doctorado, pero sería injusto no mencionar a quién motivó e ilusionó previamente la introducción de un castellano en este apasionante mundo del mar, Iñigo Losada, quien inicialmente desde sus clases magistrales de 5º, posteriormente brindándome la oportunidad de hacer el doctorado y a lo largo de todo este tiempo, hasta la dirección de esta tesis, ha sido un eslabón clave en mi formación.

Posteriormente, a partir de 6º de carrera, fui conociendo a todos los profesores y personal del grupo (GIOC, actual IHCantabria), Cesar, Mauricio, Javi L., Sonia, Pedro, Cynthia, Sole, Gabo, Maitane, Guanche, Leo, Pablo, Andrés, Nicolás, José María, Luis, Jesús, Isabel, Yolanda, Vero, Paula, María, Melisa, Susana, Ana, Omar, Lucía, Teresa, Hana, Pino, Marcelo, Antonio, Jara, Amaya, Oriana, Ángela, Jonay, Clara, Arrate, Javi S., Fernando L. y tantos otros,...que aunque algunos de ellos ya no forman parte del grupo, pero si de la familia que formamos. Otro profesor que quiero agradecer especialmente es Raúl Medina, con el que siempre he encontrado la respuesta precisa y adecuada a mis dudas.

No voy a seguir destacando a los que del grupo más han influido en mi formación, personal e intelectual, pues lo que tendría que agradecer a cada uno haría que el listado fuese interminable. Salvo la mención destacada y privilegiada que quiero brindar hacia mi amigo y director de tesis, Fernando Méndez. Sin su apoyo, inteligencia y buen humor nada de esta tesis habría podido ser.

Quiero agradecer de esta etapa en Santander a dos instituciones que me concedieron sendas becas de formación. A Puertos del Estado le agradezco la beca que me concedió para realizar el “Master en Ciencias y Tecnologías para la Gestión de la Costa”. A la Fundación Marcelino Botín la beca que sustentó el origen de la investigación que ha dado como uno de sus frutos la presente tesis.

AGRADECIMIENTOS

Tras esta primera etapa en la Universidad de Cantabria y tras la difícil decisión de proseguir mi camino, que me separaba en cierto sentido del grupo, encontré lo que no me esperaba inicialmente, otra familia que me acogió extraordinariamente en Madrid, la actual Subdirección de I+D+i de Puertos del Estado.

A Puertos del Estado, como Organismo, quiero agradecer el sustento que en estos últimos años me ha suministrado mediante la Adenda N°6 al Proyecto “Desarrollo de Investigación Complementaria al Proyecto Europeo Enviwave”, aunque también los datos y servicios que desinteresadamente me ha ofrecido.

Sin embargo, el mayor apoyo lo he recibido del personal de Puertos del Estado. A todos y a cada uno con los que he tratado tengo algo que agradecer, Pilar, Sebas, Mila, Irene, Obdulio, Pilar M., Olga, Bego M., Bego P., Marta A., Marta G., Maribel, José Antonio, Nicola, Roland, Marcos, Susana, Vicente, Jordi, Macu y Enrique. Pero de los que más he aprendido, los que han amparado y permitido que termine la tesis y cuyo trato personal ha sido inmejorable son José Damián López e Ignacio Rodríguez, espero que esta familia, en la que me incluyo, tenga una próspera continuidad.

Me he reservado para el final los agradecimientos más personales, las de mi tercera familia. Destaco a mis amigos de Zamora, los de siempre, los amigos que hice en mi primera etapa aún no portuaria en la Universidad y otros muchos que me han ido dando apoyo a lo largo de todo este tiempo para que pudiese terminar la tesis, Bea, Ruth, Carlos, Cristina, Almudena, Fer F., Carol, Oihane, Elena, Javi, Jorge, Carlos, Juan, Pablo, María, Noelia, Stefania, Borja, Patty, Ana, Fer R., Marta y Martina.

Finalmente, y más importante, agradezco a las personas que emocionalmente más me han apoyado y aguantado, y que se han privado de compartir su tiempo conmigo, en favor de esta tesis: mis padres, José y Manuela, mi hermano José Manuel y mi compañera de camino, Mune.

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

RESUMEN

Resumen.

Para realizar correctamente el diseño y optimización de las estructuras marinas es imprescindible caracterizar el clima marítimo en la ubicación concreta. Para ello, tradicionalmente se ha utilizado distintas fuentes de información instrumental. Suelen tener una serie de carencias, como por ejemplo, no siempre tienen la resolución espacial o temporal adecuada, pueden no ser homogéneas o no tener series de registros con una suficiente duración. Tras la aparición y desarrollo de los modelos numéricos de generación de oleaje y en concreto las bases de datos de reanálisis de oleaje, se dispone de datos de oleaje que no presentan las anteriormente citadas limitaciones, propias de los datos instrumentales. Sin embargo los datos simulados numéricamente no tienen la calidad y fiabilidad de los datos procedentes de sistemas de medida instrumentales. Por lo que, para aprovechar las características cuantitativas de los datos instrumentales e incorporárselas a las buenas características cualitativas de las bases de datos de reanálisis, muchas veces es preciso calibrar las bases de datos de reanálisis con información instrumental.

En esta tesis se propone y desarrolla una completa metodología de calibración de bases de datos de reanálisis de oleaje, en la que se define el tratamiento de los datos disponibles más adecuado para la información que es necesario caracterizar, particularizado a cada caso concreto de diseño de una obra marítima. Para ello, inicialmente en la Sección I se estudian exhaustivamente las distintas fuentes de información de oleaje existentes, fundamentalmente para el ámbito costero español; posteriormente, se estudian distintas técnicas estadísticas de tratamientos de datos que se utilizan actualmente para calibrar, así como el estado del arte de las metodologías de calibración.

Tras el análisis del conocimiento actual, en la Sección II se explica una completa metodología de calibración que resuelve todos los casos posibles de datos de oleaje disponibles e información necesaria para caracterizar correctamente el clima marítimo frente a una obra marítima. A partir de dicha metodología se describen las distintas técnicas de calibración así como el ámbito de aplicación de cada una. En una primera clasificación general se divide en calibraciones puntuales y espaciales. Las metodologías de calibración puntual se utilizan cuando existe información instrumental para calibrar los datos de reanálisis en una posición con un clima marítimo similar, en profundidades indefinidas, al de la localización de la obra en estudio. En cambio, se ha definido una metodología de calibración espacial para calibrar los datos de reanálisis de oleaje en una zona, a partir de la información instrumental de otras zonas con diferentes climas marítimos al de la localización de la obra en estudio.

RESUMEN

Dentro de las calibraciones puntuales se han explicado metodologías no paramétricas y paramétricas; se han calibrando los datos de reanálisis en profundidades indefinidas a partir de información en profundidades reducidas o indefinidas; se han utilizando datos de boyas y/o de satélites para calibrar; y siempre se ha definido métodos de calibración direccional para todas las alternativas.

Las metodologías de calibración espacial (escalar y direccional) resuelven el complicado problema de definir el clima marítimo en una posición sin información instrumental próxima, calibrando los datos de reanálisis de la localización de interés con datos instrumentales (boyas y/o satélites) que tienen climas marítimos muy diferentes. Para ello, dichas metodologías de calibración utilizan la técnica de descomposición en funciones empíricas ortogonales (EOF, *Empirical Orthogonal Function*), con la que se mantienen las correlaciones espaciales de los datos de reanálisis tras la calibración.

Todas las metodologías de calibración se han ido explicando con ejemplos de aplicación y comparando los resultados obtenidos con los del resto de los métodos, sacando conclusiones sobre las ventajas e inconvenientes de utilización de cada una. Todas las calibraciones se han particularizado para el ámbito costero español, calibrando la base de datos de reanálisis SIMAR-44 (Organismo Público Puertos del Estado) con información instrumental (boyas y satélites). En particular, siempre se ha aplicado las distintas metodologías a la calibración de H_s de SIMAR-44 en la posición de la boya de Mahón, para poder contrastar los diferentes resultados. Aunque también se han presentado ejemplos de aplicación con las que se abarca las diferentes zonas del litoral español (Océano Atlántico y Mar mediterráneo, incluyendo los archipiélagos Canario y Balear), calibrando los distintos parámetros con los que se caracteriza usualmente un estado de mar (H_s , T_m y θ_m). Se ha tratado de recoger la variada casuística para hacer la metodología de calibración lo más general posible. De hecho es fácilmente generalizable para otros ámbitos costeros e incluso a otras variables geofísicas.

Siempre se han verificado los resultados de las distintas metodologías de calibración, validando dichos resultados con información instrumental reservada a estos efectos. Se ha demostrado la necesidad de realizar obligatoriamente esta actividad para poder acotar la validez de los resultados de cada calibración.

Una vez desarrollada la metodología de calibración y descritos todos los métodos de calibración se está en condiciones de caracterizar, de la mejor forma posible, el clima marítimo en cualquier posición del litoral español. Mediante la calibración de las bases de datos de reanálisis con datos instrumentales se agregan las ventajas de utilización de cada una de las dos fuentes de información. Por lo tanto, queda definida la manera de incorporar las

bases de datos de reanálisis al diseño de obras marítimas, mediante la metodología de calibración propuesta.

Finalmente, en esta tesis se ha aplicado la metodología de calibración propuesta a un caso concreto de gran relevancia: la caracterización de los regímenes extremos en aguas abiertas a lo largo del litoral español. Con dicha aplicación se demuestra la necesidad de calibrar las bases de datos de reanálisis previamente a su utilización, pues se ha comprobado las grandes diferencias que se pueden llegar a encontrar en los regímenes extremos utilizando los datos de reanálisis sin calibrar o correctamente calibrados, lo que repercute directamente en la optimización estructural y económica del diseño de las obras marítimas o en la de cualquier actuación en la costa.

RESUMEN

ÍNDICES

ÍNDICES

Índice.

RESUMEN.....	i
ÍNDICES.....	vii
Índice.....	ix
Índice de figuras.....	xvii
Índice de tablas.....	xxix
Lista de símbolos.....	xxxiii
Lista de acrónimos.....	xxxix
SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1. Introducción.....	5
1.2. Necesidades para el diseño de obras marítimas.....	8
1.3. Motivación.....	11
1.4. Objetivos.....	16
1.4.1. Objetivos generales.....	16
1.4.2. Objetivos específicos.....	17
1.5. Metodología.....	17
1.6. Organización de la Tesis.....	19
CAPÍTULO 2. DATOS DE OLEAJE.....	23
2.1. Introducción.....	25
2.2. Parámetros de oleaje.....	25
2.3. Fuentes de información.....	31
2.3.1. Información instrumental.....	31
2.3.2. Resumen.....	37
2.4. Bases de datos.....	39
2.4.1. Datos visuales.....	40
2.4.2. Datos de barcos meteorológicos.....	41

2.4.3. Datos de boyas.....	42
2.4.4. Datos de satélites.....	47
2.4.5. Datos de modelado numérico.....	51
2.5. Conclusiones.....	58
CAPÍTULO 3. ESTADO DE CONOCIMIENTO	61
3.1. Introducción.....	63
3.2. Técnicas estadísticas de tratamiento de datos	63
3.2.1. Parámetros estadísticos	64
<u>3.2.1.1. Parámetros estadísticos unidimensionales ..</u>	<u>65</u>
<u>3.2.1.2. Parámetros estadísticos bidimensionales</u>	<u>65</u>
3.2.2. Ajustes de los datos a un modelo.....	66
<u>3.2.2.1. Método de mínimos cuadrados</u>	<u>66</u>
<u>3.2.2.2. Método de los momentos</u>	<u>67</u>
<u>3.2.2.3. Método de máxima verosimilitud</u>	<u>68</u>
<u>3.2.2.4. Método de papeles probabilísticos</u>	<u>69</u>
3.2.3. Regresiones	69
<u>3.2.3.1. Regresión clásica</u>	<u>70</u>
3.2.3.1.1. Regresión lineal (recta)	72
3.2.3.1.2. Regresión lineal de la recta que pasa por el origen.....	73
3.2.3.1.3. Regresión no lineal.....	74
3.2.3.1.4. Regresión lineal múltiple	75
<u>3.2.3.2. Regresión simétrica.....</u>	<u>76</u>
<u>3.2.3.3. Regresión EIV</u>	<u>77</u>
3.2.3.3.1. Regresión ODR	79
<u>3.2.3.3.1.1. Recta.....</u>	<u>79</u>
<u>3.2.3.3.1.2. Recta que pasa por el origen</u>	<u>80</u>
3.2.3.3.2. Regresión GMFR	81
<u>3.2.3.4. Regresión FR (EIV múltiple).....</u>	<u>82</u>
3.2.3.4.1. Modelo con rectas en dos de las tres variables	82

3.2.3.4.2. Modelo con rectas que pasan por el origen en dos de las tres variables	83
3.2.3.4.3. Modelo con rectas que pasan por el origen en las tres variables.....	84
<u>3.2.3.5. Aplicación de regresiones con dos variables.....</u>	<u>85</u>
<u>3.2.3.6. Aplicación de regresiones con tres variables (FR).....</u>	<u>89</u>
3.2.4. Diagnóstico.....	91
<u>3.2.4.1. Diagnóstico de los datos</u>	<u>92</u>
<u>3.2.4.2. Diagnóstico del régimen medio</u>	<u>94</u>
3.3. Estado del arte de las metodologías de calibración	98
3.3.1. Datos visuales	98
3.3.2. Datos de satélites	101
3.3.3. Datos de modelado numérico.....	105
3.4. Conclusiones y consideraciones.....	107
SECCIÓN 2: APORTACIONES DE ESTA TESIS.....	113
CAPÍTULO 4. CLASIFICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN.....	115
4.1. Introducción.....	117
4.2. Dónde se tiene la información de oleaje	119
4.3. Tipos generales de tratamiento de los datos.....	122
4.4. Calibración con datos de oleaje en España.....	124
CAPÍTULO 5. CALIBRACIÓN PUNTUAL PARAMÉTRICA.....	129
5.1. Introducción.....	131
5.2. Calibración puntual paramétrica por datos coincidentes o scatter.....	131
5.2.1. Metodología escalar	132
5.2.2. Metodología direccional.....	135
5.3. Calibración puntual paramétrica por cuantiles o QQ.....	139

5.3.1. Metodología escalar	140
5.3.2. Metodología direccional.....	143
<u>5.3.2.1. Calibración sin ponderación de cuantiles</u> ...	147
<u>5.3.2.2. Calibración con ponderación de cuantiles</u> ..	149
<u>5.3.2.3. Calibración con ponderación de cuantiles y</u> <u>mínima variación del régimen extremal</u>	154
5.4. Conclusiones	159
CAPÍTULO 6. CALIBRACIÓN PUNTUAL CON DATOS EN PROFUNDIDADES REDUCIDAS	163
6.1. Introducción	165
6.2. Propagación en Tarragona	166
6.3. Metodología escalar	171
6.4. Metodología direccional	174
6.5. Conclusiones	178
CAPÍTULO 7. CALIBRACIÓN PUNTUAL NO PARAMÉTRICA	181
7.1. Introducción	183
7.2. Metodología original	184
7.3. Metodología escalar	186
7.3.1. Calibración con datos de satélites.	186
7.3.2. Calibración con datos de boyas.....	196
7.4. Metodología direccional	202
7.4.1. Calibración con datos de satélites.	204
7.4.2. Calibración con datos de boyas.....	205
7.5. Influencia de la información disponible en la calibración.	210
7.6. Resumen de la calibración puntual no paramétrica.	214
7.7. Conclusiones	215
CAPÍTULO 8. CALIBRACIÓN ESPACIAL ESCALAR	219
8.1. Introducción	221
8.2. Calibración de Regímenes	226
8.2.1. Metodología.....	228

8.2.1.1. <u>Determinación de los regímenes medios mensuales</u>	228
8.2.1.2. <u>Descomposición EOF</u>	230
8.2.1.3. <u>Parametrización</u>	232
8.2.1.4. <u>Minimización del error</u>	234
8.2.2. Resultados.	235
8.2.3. Validación.....	237
8.3. Calibración de series temporales	238
8.3.1. Metodología.....	238
8.3.2. Resultados y validación.....	240
8.4. Conclusiones	243
CAPÍTULO 9. CALIBRACIÓN ESPACIAL DIRECCIONAL	247
9.1. Introducción	249
9.2. Regímenes medios direccionales	250
9.2.1. Regímenes medios direccionales de altura de ola significante.	252
9.2.2. Regímenes medios direccionales de periodo medio.	254
9.3. Metodología	257
9.3.1. Determinación de los regímenes medios direccionales.....	258
9.3.2. Descomposición EOF.....	258
9.3.3. Parametrización.....	262
9.3.4. Minimización del error.	263
9.3.5. Calibración de las series temporales.....	265
9.4. Resultados y validación	267
9.5. Conclusiones	269
CAPÍTULO 10. REGÍMENES EXTREMALES DE H_s EN AGUAS ABIERTAS A LO LARGO DEL LITORAL ESPAÑOL	273
10.1. Introducción	275
10.2. Variación del régimen extremal en aguas abiertas	277

CAPÍTULO 11. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	285
11.1. Conclusiones	287
11.1.1. Conclusiones generales.	287
11.1.2. Conclusiones sobre las metodologías de calibración. .	289
11.2. Futuras líneas de investigación	294
 REFERENCIAS	 297
 ANEXO I. DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS DE RÉGIMEN MEDIO	
A.I.1. Introducción	A.I.3
A.I.2. Problema del punteo	A.I.3
A.I.3. Funciones de distribución y papeles probabilísticos	A.I.4
A.I.3.1. Distribución Lognormal.	A.I.5
A.I.3.2. Distribución Gumbel de máximos.....	A.I.7
A.I.3.3. Distribución Weibull de mínimos.	A.I.8
A.I.3.4. Distribución GEV.....	A.I.9
 ANEXO II. FUNCIONES EMPÍRICAS ORTOGONALES	
A.II.1. Introducción	A.II.3
A.II.2. EOF	A.II.3

ÍNDICES

Índice de figuras.

Figura 1.1. Esquema de la metodología general para caracterizar el clima marítimo en una zona de interés.....	6
Figura 1.2. Procedimiento general para caracterizar el clima marítimo en una zona de interés	7
Figura 1.3. Esquema del régimen medio de H_s . En la parte superior se representa la serie temporal de H_s y en la parte inferior la función de densidad, $f(H_s)$, (izquierda) y la función de distribución, $F(H_s)$, (derecha).....	9
Figura 1.4. Esquema del régimen de persistencias (o duraciones) de H_s . En la parte superior se representa una serie temporal de H_s en la que se señala las duraciones D_j para un nivel de corte H_{si} . En la parte inferior se representa la función de densidad, $f(D/H_s)$, (izquierda) y la función de distribución, $F(D/H_s)$, (derecha). ...	9
Figura 1.5. Esquema del régimen extremal de H_s . En la parte superior se representa una serie temporal de H_s en la que se señala los máximos de H_s . En la parte inferior se representa las funciones de densidad de H_s y de sus máximos, $f(H_s)$, (izquierda) y la función de distribución, $F(H_s)$, en función del periodo de retorno (derecha).	10
Figura 1.6. Esquema de la tendencia de la media de H_s . Se señala la pendiente de la curva de la media temporal de H_s	10
Figura 1.7. Esquema de ajustes de relaciones lineales y potenciales	12
Figura 1.8. Situación de las boyas de oleaje en el archipiélago balear (imagen tomada de http://earth.google.es/).....	15
Figura 2.1. Esquema del estudio del oleaje en el dominio del tiempo (arriba) y en el dominio de la frecuencia (abajo).....	26
Figura 2.2. Esquema del oleaje tipo <i>sea</i> (mar de viento) y tipo <i>swell</i> (mar de fondo); modificado del original de Holthuijsen (2007)	30
Figura 2.3. Clasificación de las distintas fuentes de información de datos de oleaje.....	31
Figura 2.4. Esquema de boya con acelerómetro para medir el oleaje (tomado de Holthuijsen, 2007).....	32
Figura 2.5. Croquis de sensores electrónicos bipolares sobre estructura <i>off-shore</i> (tomado de Holthuijsen, 2007).....	32
Figura 2.6. Esquema de sensores <i>in situ</i> situados en el fondo (tomado de Holthuijsen, 2007).....	33
Figura 2.7. Esquema de la estereofotografía aplicada a la medición del oleaje (tomado de Holthuijsen, 2007).....	34
Figura 2.8. Algunos radares de medición del oleaje situados en la costa.....	34
Figura 2.9. Espectro de frecuencias desde HF hasta luz ultravioleta (izquierda, tomado de ESA, <i>European Space Agency</i> , http://earth.esa.int/) y bandas de microondas (derecha)	35
Figura 2.10. Altura de ola y dirección media del proyecto EUROROSE en Gijón (tomado de Gurgel <i>et al.</i> , 2001).....	35
Figura 2.11. Imagen de un radar de banda X (izquierda) y su superficie libre (derecha), tomado de Reichert <i>et al.</i> (2005).....	37

ÍNDICES

Figura 2.12. Esquema de la distribución espacial de las posibles distintas fuentes de información para una zona.....	39
Figura 2.13. Distribución del número de datos visuales en un año (SOC, <i>Southampton Oceanography Centre</i> , tomado de http://www.clivar.org/).....	41
Figura 2.14. Posición de las OWS durante 40 años (tomada de Dinsmore, 2005).....	42
Figura 2.15. Boyas de las redes exterior y costera del OPPE.....	44
Figura 2.16. Altura de ola significativa (izquierda) y dirección media (derecha) de algunas boyas del OPPE	46
Figura 2.17. Evolución de la precisión con que las primeras misiones determinaban su posición (CNES, <i>Centre National d'Etudes Spatiales</i> , tomado de http://www.aviso.oceanobs.com/).....	47
Figura 2.18. Representación esquemática de la forma de estimar H_s por altímetros (recopilada de Chelton (1988) y Holthuijsen (2007))	48
Figura 2.19. Distribución espacial de diversas bases de datos de satélites.....	50
Figura 2.20. Datos de altura de ola significativa (25/06/2008-30/06/2008) del JASON-2 (CNES).....	51
Figura 2.21. Distribución espacial del oleaje tipo <i>sea</i> y <i>swell</i> simulados para un temporal del Mediterráneo (AEMET/OPPE, Agencia Estatal de Meteorología / Organismo Público Puertos del Estado, tomado de http://www.puertos.es/).....	52
Figura 2.22. Representación de los nodos de oleaje de las distintas mallas de la base de datos SIMAR-44	55
Figura 2.23. Altura de ola significativa de SIMAR-44 para la posición de algunas boyas exteriores del OPPE....	56
Figura 2.24. Dirección media del oleaje de SIMAR-44 para la posición de algunas boyas exteriores del OPPE.....	56
Figura 2.25. Oleaje <i>sea</i> y <i>swell</i> (H_s y θ) de SIMAR-44 para algunas boyas exteriores del OPPE	57
Figura 2.26. H_s de algunas boyas exteriores y de SIMAR-44 para la posición de dichas boyas.....	58
Figura 3.1. Clasificación de las técnicas de inferencia estadística	64
Figura 3.2. Método gráfico de los papeles probabilísticos para la estimación de funciones de distribución	69
Figura 3.3. Clasificación de los tipos de regresiones en función de varios criterios	70
Figura 3.4. Croquis de la regresión clásica	71
Figura 3.5. Croquis de la regresión lineal clásica para la recta.	72
Figura 3.6. Croquis de la regresión clásica para la recta que pasa por el origen	74
Figura 3.7. Croquis de la regresión clásica no lineal para la relación potencial $\hat{y}_i = \beta x_i^\gamma$	74
Figura 3.8. Regresión para la recta que pasa por el origen, minimizando la distancia vertical (izquierda) y minimizando la distancia horizontal (derecha)	77
Figura 3.9. Croquis de la regresión ODR para la recta (izquierda) y la recta que pasa por el origen (derecha)	79
Figura 3.10. Clasificación de las regresiones explicadas, subrayando los tipos de dos variables	86
Figura 3.11. Ajuste de recta SLR a datos de H_s de dos boyas y sus correspondientes de SIMAR-44	87

Figura 3.12. Ajuste de diferentes rectas que pasan por el origen ($Y = \beta X$) y recta SLR con datos de H_s de dos boyas y sus correspondientes de SIMAR-44.....	88
Figura 3.13. Ajuste de relación no lineal ($Y = \beta X^\gamma$) y recta SLR a datos de H_s de dos boyas y sus correspondientes de SIMAR-44.....	88
Figura 3.14. Ajuste de distintas regresiones EIV y recta SLR a datos de H_s de dos boyas y sus correspondientes de SIMAR-44.....	89
Figura 3.15. Tipos de regresiones FR con tres variables.....	90
Figura 3.16. Ajuste de distintas regresiones FR a los datos comunes de H_s de dos boyas, de Satélites y SIMAR-44. Se representan únicamente las relaciones de satélites frente a boyas.....	90
Figura 3.17. Diagnóstico de H_s de SIMAR-44 con datos de dos boyas de la red exterior de OPPE.....	94
Figura 3.18. Gráficos <i>PP</i> tomando 30 datos de H_s equiespaciados en H_s (desde el mínimo al máximo de las boyas).....	95
Figura 3.19. Gráficos <i>PP</i> tomando 30 datos de cuantiles de H_s de las boyas equiespaciados en probabilidad (del 1% al 99%).....	96
Figura 3.20. Gráficos <i>QQ</i> tomando 30 datos de cuantiles de H_s equiespaciados en probabilidad (del 1% al 99%).....	97
Figura 3.21. Gráficos <i>QQ</i> tomando 30 datos de cuantiles de H_s de las boyas equiespaciados en $-\log[-\log(\text{Pr})]$	98
Figura 3.22. Comparación de varias relaciones de calibración de T_m de satélites con la boya de Mahón (izquierda) y comparación de H_s de satélites frente a la boya de Mahón (derecha).....	105
Figura 4.1. Comparación de seis meses de series de altura de ola significativa de SIMAR-44 con 5 boyas de la Red Exterior del OPPE, en la posición de estas boyas.....	118
Figura 4.2. Clasificación general de las técnicas de calibración.....	119
Figura 4.3. Representación de la clasificación de la información de oleaje disponible en función de su ubicación.....	121
Figura 5.1. Representación de la ubicación de la información disponible y necesaria para la calibración puntual con datos en profundidades indefinidas (supuesto N° 2 del capítulo 4).....	131
Figura 5.2. Croquis de la determinación de las relaciones de calibración a partir de las regresiones no lineal ($Y = \beta X^\gamma$, arriba) y lineal ($Y = \beta X$, abajo).....	133
Figura 5.3. Calibración escalar mediante regresiones clásicas de H_s de SIMAR-44 con datos coincidentes de la boya de Mahón, utilizando un modelo de regresión no lineal de tipo potencial (izquierda) y un modelo de regresión lineal, recta que pasa por el origen (derecha).....	134
Figura 5.4. Calibración escalar mediante regresiones clásicas de H_s de SIMAR-44 con datos coincidentes de la boya de Mahón (izquierda), validando con datos de satélites (derecha). Utilizando un modelo de regresión no lineal de tipo potencial (arriba) y un modelo de regresión lineal, recta que pasa por el origen (abajo).....	135

ÍNDICES

Figura 5.5. Calibración direccional mediante regresiones clásicas de H_s de SIMAR-44 con datos coincidentes de la boya de Mahón, utilizando un modelo de regresión no lineal de tipo potencial (izquierda) y un modelo de regresión lineal, recta que pasa por el origen (derecha). Se representan los parámetros del modelo de calibración (arriba) y la fracción de corrección que impone dicha calibración sobre H_s (abajo).....	138
Figura 5.6. Calibración direccional mediante regresiones clásicas de H_s de SIMAR-44 con datos coincidentes de la boya de Mahón (izquierda), validando con datos de satélites (derecha). Utilizando un modelo de regresión no lineal de tipo potencial (arriba) y un modelo de regresión lineal, recta que pasa por el origen (abajo)	139
Figura 5.7. Croquis de la determinación de la relación de calibración a partir del ajuste de la expresión potencial $Y = \beta X^\gamma$ a los cuantiles de los datos	141
Figura 5.8. Calibración QQ escalar de H_s de SIMAR-44 con datos de la boya de Mahón, utilizando cuantiles de los pares de datos coincidentes (izquierda) y con todos los datos disponibles (derecha).....	142
Figura 5.9. Calibración QQ escalar de H_s de SIMAR-44 con datos de la boya de Mahón, utilizando cuantiles de los pares de datos coincidentes (izquierda) y con todos los datos disponibles (derecha). Verificando con los datos coincidentes de la boya (arriba) y validando con datos de satélites (abajo).....	143
Figura 5.10. Esquema de calibración QQ direccional, para un sólo sector direccional, $\varphi = 0^\circ$ (izquierda) y para los sectores de un cuadrante de 90° (derecha), señalando la recta o el cono bisectriz respectivamente.....	144
Figura 5.11. Esquema de la sectorización direccional utilizada, con 32 sectores de 22.5° de amplitud.....	145
Figura 5.12. Calibración QQ direccional de H_s de SIMAR-44 con datos de la boya de Mahón, utilizando cuantiles de los pares de datos coincidentes (izquierda) y con todos los datos disponibles (derecha). Se representan los parámetros del modelo de calibración (arriba) y la fracción de corrección que impone dicha calibración sobre H_s (abajo).....	148
Figura 5.13. Calibración QQ direccional de H_s de SIMAR-44 con datos de la boya de Mahón, utilizando cuantiles de los pares de datos coincidentes (izquierda) y con todos los datos disponibles (derecha). Verificando con los datos coincidentes de la boya (arriba) y validando con datos de satélites (abajo)	149
Figura 5.14. Esquema de la repercusión de aplicar ponderaciones proporcionales al número de elementos n elevado a distintas potencias.	150
Figura 5.15. Representación de los intervalos de confianza para los cuantiles cuando se tienen muestras de datos con 30, 100 y 1000 elementos. A escala natural (izquierda) y a escala del papel probabilístico Gumbel de máximos ($-\log[-\log(\text{Pr})]$).	150
Figura 5.16. Representación de la función peso $W = \sqrt{n \text{Pr}(1 - \text{Pr})}$ en función de los cuantiles y de tres muestras de 30, 100 y 1000 datos cada una.	151
Figura 5.17. Calibración QQ direccional ponderada de H_s de SIMAR-44 con datos de la boya de Mahón, utilizando cuantiles de los pares de datos coincidentes (izquierda) y con todos los datos disponibles (derecha). Se representan los parámetros del modelo de calibración (arriba) y la fracción de corrección que impone dicha calibración sobre H_s (abajo).....	152
Figura 5.18. Comparación de la calibración QQ direccional sin ponderar (izquierda) y ponderada (derecha) de H_s de SIMAR-44 con datos de la boya de Mahón, utilizando cuantiles de los pares de datos coincidentes, para $\theta = 22.5^\circ$ (arriba) y para $\theta = 135^\circ$ (abajo).....	153
Figura 5.19. Calibración QQ direccional ponderada de H_s de SIMAR-44 con datos de la boya de Mahón, utilizando cuantiles de los pares de datos coincidentes (izquierda) y con todos los datos disponibles (derecha). Verificando con los datos coincidentes de la boya (arriba) y validando con datos de satélites (abajo).	154

Figura 5.20. Calibración QQ direccional ponderada y con MVRExt de H_s de SIMAR-44 con datos de la boya de Mahón, utilizando cuantiles de los pares de datos coincidentes (izquierda) y con todos los datos disponibles (derecha). Se representan los parámetros del modelo de calibración (arriba) y la fracción de corrección que impone dicha calibración sobre H_s (abajo)..... 156

Figura 5.21. Comparación de la calibración QQ direccional sin ponderar (izquierda) y ponderada y con MVRExt (derecha) de H_s de SIMAR-44 con datos de la boya de Mahón, utilizando cuantiles de los pares de datos coincidentes, para $\theta = 22.5^\circ$ (arriba) y para $\theta = 135^\circ$ (abajo)..... 157

Figura 5.22. Calibración QQ direccional ponderada con mínima variación del régimen extremal de H_s de SIMAR-44 con datos de la boya de Mahón, utilizando cuantiles de los pares de datos coincidentes (izquierda) y con todos los datos disponibles (derecha). Verificando con los datos coincidentes de la boya (arriba) y validando con datos de satélites (abajo)..... 158

Figura 5.23. Serie temporal de dos meses de datos de H_s de la boya de Mahón y de SIMAR-44 sin calibrar y calibrados con QQ direccional ponderado y MVRExt, utilizando cuantiles de los pares de datos coincidentes (arriba) y con todos los datos disponibles (abajo)..... 159

Figura 6.1. Representación de la ubicación de la información disponible y necesaria para la calibración puntual con datos en profundidades reducidas (supuesto N° 7 del capítulo 4). 165

Figura 6.2. Situación y características de las bases de datos de oleaje próximas al puerto de Tarragona. Distintas ubicaciones de la boya Costera de Tarragona (verde). Nodos de la malla de reanálisis numérico SIMAR-44 (rojo) y punto seleccionado para calibrar con retropropagación. 167

Figura 6.3. Algunas de las relaciones entre diferentes parámetros del oleaje de la zona de Tarragona determinadas a partir de los datos medidos por la boya costera de Tarragona. Relación entre T_p y el T_m (izquierda) y relación entre T_p / T_m y γ del espectro JONSWAP (derecha). 169

Figura 6.4. Ejemplo de las matrices de transferencia, coeficiente de propagación (izquierda) y dirección media del oleaje propagado (derecha), para propagar $H_s = 1m$ de SIMAR-44 desde profundidades indefinidas hasta la posición T1 de la boya costera de Tarragona (30m de profundidad). 170

Figura 6.5. Esquema de la metodología de calibración puntual escalar con retropropagación de H_s de SIMAR-44 con datos coincidentes de la boya costera de Tarragona, mediante el ajuste QQ de $H_{s\text{ CAL}} = bH_s^c$ 172

Figura 6.6. Evolución de los parámetros de la calibración puntual escalar con retropropagación, b_i y c_i , hasta convergencia para $i = 6$ y representación del valor de los parámetros finales de la calibración $H_{s\text{ CAL}} = bH_s^c$ 172

Figura 6.7. Calibración puntual escalar con retropropagación de H_s de SIMAR-44 con datos coincidentes de la boya costera de Tarragona, utilizando una relación potencial del tipo $H_{s\text{ CAL}} = bH_s^c$ ajustada mediante QQ ponderado y MVRExt. Se verifican la calibración de los datos SIMAR-44 propagándolos hasta la posición de la boya..... 173

Figura 6.8. Serie temporal de dos meses de datos de H_s de SIMAR-44 original en profundidades indefinidas, SIMAR-44 calibrado con metodología escalar y propagado hasta la posición de la boya y datos de H_s de la boya costera de Tarragona. 174

Figura 6.9. Esquema de la metodología de calibración direccional con retropropagación de H_s de SIMAR-44 con datos coincidentes de la boya costera de Tarragona, mediante el ajuste QQ de $H_{s\text{ CAL}}(\varphi) = b(\theta)H_s(\varphi)^{c(\theta)}$ 175

Figura 6.10. Representación de los parámetros del modelo de calibración direccional con retropropagación de H_s de SIMAR-44 con datos coincidentes de la boya costera de Tarragona, $b(\theta)$ y $c(\theta)$, (izquierda) y la fracción de corrección que impone dicha calibración sobre H_s (derecha)..... 176

Figura 6.11. Calibración direccional con retropropagación de H_s de SIMAR-44 con datos coincidentes de la boya costera de Tarragona, utilizando una relación potencial del tipo $H_{s,CAL} = b(\theta)H_s^{c(\theta)}$ ajustada mediante QQ ponderado y MVRExt. Se verifica la calibración de los datos SIMAR-44 propagándolos hasta la posición de la boya..... 177

Figura 6.12. Serie temporal de dos meses de datos de H_s de SIMAR-44 original en profundidades indefinidas, SIMAR-44 calibrado con metodología direccional y propagado hasta la posición de la boya y datos de H_s de la boya costera de Tarragona (arriba). Y serie temporal de dos meses de datos de θ de SIMAR-44 original en profundidades indefinidas (abajo)..... 178

Figura 7.1. Croquis de la calibración no paramétrica definida por Caires y Ferreira (2005). 185

Figura 7.2. Ejemplo del criterio de proximidad para seleccionar los datos de satélites para calibrar, con el método no paramétrico original, los datos de una posición o nodo de modelado numérico. 186

Figura 7.3. Calibración de H_s de SIMAR-44 con satélites (arriba) y validación con boyas (abajo) en las posiciones de las boyas de Cabo Begur (izquierda) y Cabo de Gata (derecha) con $h_{700} = 0.3m$ y $R = 5^\circ$ 188

Figura 7.4. Calibración de H_s de SIMAR-44 con satélites (arriba) y validación con boyas (abajo) en las posiciones de las boyas de Cabo Begur (izquierda) y Cabo de Gata (derecha) con $h_{700} = 0.3m$ y $R = 1^\circ$ 189

Figura 7.5. Calibración de H_s de SIMAR-44 con satélites (arriba) y validación con boyas (abajo) en las posiciones de las boyas de Cabo Begur (izquierda) y Cabo de Gata (derecha) con $h_{700} = 0.3m$ y $R = 0.5^\circ$ 190

Figura 7.6. Calibración de H_s de SIMAR-44 con satélites (arriba) y validación con boyas (abajo) en las posiciones de las boyas de Cabo Begur (izquierda) y Cabo de Gata (derecha) con $h_{700} = 0.5m$ y $R = 1^\circ$ 191

Figura 7.7. Calibración de H_s de SIMAR-44 con satélites (arriba) y validación con boyas (abajo) en las posiciones de las boyas de Cabo Begur (izquierda) y Cabo de Gata (derecha) con $h_{700} = 0.5m$ y $R = 0.5^\circ$ 192

Figura 7.8. Serie temporal (noviembre de 2001) de H_s de SIMAR-44 calibrado y sin calibrar con satélites en las posiciones de las boyas de Cabo Begur (izquierda) y Cabo de Gata (derecha) con $h_{700} = 0.5m$ y $R = 0.5^\circ$ 193

Figura 7.9. Serie temporal (noviembre de 2001) de H_s de SIMAR-44 calibrado y sin calibrar con satélites en las posiciones de las boyas de Cabo Begur (izquierda) y Cabo de Gata (derecha) con $h_{700} = 0.5m$ y $R = 0.5^\circ$. Aplicando doble filtro de media móvil de 5 horas. 194

Figura 7.10. Calibración de H_s de SIMAR-44 con satélites (arriba) y validación con boyas (abajo) en las posiciones de las boyas de Cabo Begur (izquierda) y Cabo de Gata (derecha) con $h_{700} = 0.5m$ y $R = 0.5^\circ$. Aplicando doble filtro de media móvil de 5 horas. 195

Figura 7.11. Calibración de H_s de SIMAR-44 con boyas (arriba) y validación con satélites (abajo) en las posiciones de las boyas de Cabo Begur (izquierda) y Cabo de Gata (derecha). Aplicando doble filtro de media móvil de 5 horas. 196

Figura 7.12. Calibración de T_m (arriba) y θ (abajo) de SIMAR-44 con las boyas de Cabo Begur (izquierda) y Cabo de Gata (derecha). Aplicando doble filtro de media móvil de 5 horas..... 198

Figura 7.13. Calibración de H_s de SIMAR-44 con boyas, hasta el año 2000 (arriba) y validación con datos de boyas del año 2001 (abajo); las boyas son las de Gran Canaria (izquierda) y Villano-Sisargas (derecha). Aplicando doble filtro de media móvil de 9 horas. 199

Figura 7.14. Calibración de T_m de SIMAR-44 con boyas, hasta el año 2000 (arriba) y validación con datos de boyas del año 2001 (abajo); las boyas son las de Gran Canaria (izquierda) y Villano-Sisargas (derecha). Aplicando doble filtro de media móvil de 9 horas. 200

Figura 7.15. Series temporales de H_s (arriba) y de T_m (abajo) de SIMAR-44 sin calibrar y calibrado con la metodología escalar, utilizando las boyas de Gran Canaria (izquierda) y Villano Sisargas (derecha) hasta el año 2000, con el intervalo de confianza del 95% de los datos calibrados y la serie temporal de las boyas..... 201

Figura 7.16. Calibración direccional de H_s de SIMAR-44 con satélites (arriba) y validación con boyas (abajo) en las posiciones de las boyas de Cabo Begur (izquierda) y Cabo de Gata (derecha) con $h_{700} = 0.5m$ y $R = 0.5^\circ$ 205

Figura 7.17. Calibración direccional de H_s de SIMAR-44 con boyas (arriba) y validación con satélites (abajo) en las posiciones de las boyas de Cabo Begur (izquierda) y Cabo de Gata (derecha). 206

Figura 7.18. Calibración direccional de T_m (arriba) y θ (abajo) de SIMAR-44 con las boyas de Cabo Begur (izquierda) y Cabo de Gata (derecha). 207

Figura 7.19. Calibración direccional de H_s de SIMAR-44 con boyas, hasta el año 2000 (arriba) y validación con datos de boyas del año 2001 (abajo); las boyas son las de Gran Canaria (izquierda) y Villano-Sisargas (derecha). 208

Figura 7.20. Calibración direccional de T_m de SIMAR-44 con boyas, hasta el año 2000 (arriba) y validación con datos de boyas del año 2001 (abajo); las boyas son las de Gran Canaria (izquierda) y Villano-Sisargas (derecha). 208

Figura 7.21. Series temporales de H_s (arriba) y de T_m (abajo) de SIMAR-44 sin calibrar y calibrado con la metodología direccional, utilizando las boyas de Gran Canaria (izquierda) y Villano Sisargas (derecha) hasta el año 2000, con el intervalo de confianza del 95% de los datos calibrados y la serie temporal de las boyas. 210

Figura 7.22. Calibración direccional no paramétrica de H_s de SIMAR-44 con todos los datos de la boya de Mahón, verificación de la calibración con todos los datos de la boya (izquierda) y validación con los datos coincidentes de satélites con $R = 0.5^\circ$ 213

Figura 7.23. Serie temporal de H_s de SIMAR-44 sin calibrar y calibrado con la metodología direccional no paramétrica, utilizando todos los datos de la boya de Mahón, con el intervalo de confianza del 95% de los datos calibrados y la serie temporal de las boya. 213

Figura 8.1. Situación de las boyas de oleaje en el archipiélago balear (imagen tomada de <http://earth.google.es/>)... 221

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. 222

Figura 8.3. Situación de las boyas del OPPE ubicadas dentro de la zona de calibración [37°N-41°N; 1°W-5°E]. 223

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. 227

ÍNDICES

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.	230
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 $g_i(\tau)$	231
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 $g_i(\tau)$	232
Figura 8.8. Croquis del funcionamiento o distorsión producida por la parametrización de $z_M(x)$	233
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.	235
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).	236
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.	238
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.	239
Figura 8.13. Ajuste de la relación potencial de calibración $H_{s,CAL} = bH_s^c$ para la posición de la boya de Mahón, con QQ ponderado y MVRExt.	240
Figura 8.14. Distribución espacial de los parámetros finales de calibración, $b(x)$ y $c(x)$, para la zona de estudio.	241
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° de la posición de la boya (derecha).	242
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.	242
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.	243
Figura 9.1. Situación de los datos de satélite ubicados dentro de la zona de calibración [37°N - 41°N ; 1°W - 5°E].....	249
Figura 9.2. Distribución espacial del RMS de los ajustes de las funciones de distribución GEV, Gumbel de máximos, Lognormal y Weibull de mínimos a los regímenes medios direccionales de H_s de SIMAR-44 en el mar Mediterráneo.	252
Figura 9.3. Distribución espacial del RMS del ajuste de la función de distribución GEV y de la diferencia de Gumbel de máximos, Lognormal y Weibull de mínimos menos la GEV, para los regímenes medios direccionales de H_s de SIMAR-44 en el mar Mediterráneo.	253

Figura 9.4. Ejemplo del ajuste de la función de distribución GEV, Gumbel de máximos, Lognormal y Weibull de mínimos a los regímenes medios de un sector direccional de H_s en las cuatro posiciones de SIMAR-44 señaladas en la figura 1.3.254

Figura 9.5. Distribución espacial del *RMS* de los ajustes de las funciones de distribución GEV, Gumbel de máximos, Lognormal y Weibull de mínimos a los regímenes medios direccionales de T_m de SIMAR-44 en el mar Mediterráneo.255

Figura 9.6. Distribución espacial del *RMS* del ajuste de la función de distribución GEV y de la diferencia de Gumbel de máximos, Lognormal y Weibull de mínimos menos la GEV, para los regímenes medios direccionales de T_m de SIMAR-44 en el mar Mediterráneo.256

Figura 9.7. Ejemplo del ajuste de la función de distribución GEV, Gumbel de máximos, Lognormal y Weibull de mínimos a los regímenes medios de un sector direccional de T_m en las cuatro posiciones de SIMAR-44 señaladas en la figura 1.6.257

Figura 9.8. Media direccional $\mu_M(x)$ y dos primeros modos del parámetro $\mu(x,\varphi)$ de la distribución GEV de H_s para la zona de calibración. Cada modo está representado por el modo espacial $f_i(x)$ y la amplitud direccional $g_i(\varphi)$260

Figura 9.9. Media direccional $\psi_M(x)$ y dos primeros modos del parámetro $\psi(x,\varphi)$ de la distribución GEV de H_s para la zona de calibración. Cada modo está representado por el modo espacial $f_i(x)$ y la amplitud direccional $g_i(\varphi)$260

Figura 9.10. Media direccional $\xi_M(x)$ y dos primeros modos del parámetro $\xi(x,\varphi)$ de la distribución GEV de H_s para la zona de calibración. Cada modo está representado por el modo espacial $f_i(x)$ y la amplitud direccional $g_i(\varphi)$261

Figura 9.11. Representación de dos ejemplos de calibración del régimen medio direccional en el que se varía $J(\Theta)$, en la parte superior no tiene el término MVRExt y en la parte inferior si lo tiene.265

Figura 9.12. Representación de los parámetros del modelo de calibración direccional (izquierda) y la fracción de corrección que impone dicha calibración sobre H_s (derecha), para la posición de la boya de Mahón.266

Figura 9.13. Distribución espacial de los parámetros $b_0(x)$ y $c_0(x)$ del modelo de calibración direccional final, para la zona de estudio.266

Figura 9.14. Calibración direccional 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° de la posición de la boya (derecha).267

Figura 9.15. 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 direccional.268

Figura 9.16. Validación de la calibración espacial direccional de las series de H_s de SIMAR-44 de la zona de estudio con los datos coincidentes de satélites de toda la zona.269

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.276

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

ÍNDICES

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.279

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).280

Figura A.I.1. Función distribución empírica de la variable aleatoria X A.I.3

Figura A.I.2. Método gráfico de los papeles probabilísticas para la estimación de la función de distribución de la variable aleatoria X A.I.5

ÍNDICES

Índice de tablas.

Tabla 1.1. Características necesarias y aconsejables de los datos para definir los diferentes regímenes del oleaje	11
Tabla 1.2. Características de los métodos de calibración existentes	13
Tabla 1.3. Características de las metodologías generales de calibración	16
Tabla 2.1. Relación de boyas de la red exterior del OPPE.....	44
Tabla 2.2. Relación de boyas de la red costera del OPPE.....	45
Tabla 2.3. Características de las diferentes misiones de satélites con altímetros hasta la actualidad.....	50
Tabla 3.1. Parámetros para la regresión lineal $\hat{y}_i = \alpha + \beta x_i$	73
Tabla 3.2. Rectas de calibración de datos visuales OWS con datos instrumentales OWS (H en m y T en s)....	99
Tabla 3.3. Rectas de calibración de datos visuales VOS con datos visuales OWS (H en m y T en s).....	100
Tabla 3.4. Relaciones de calibración no lineales de datos visuales VOS con datos instrumentales (H en m y T en s).....	100
Tabla 3.5. Rectas de calibración de datos visuales VOS con boyas (unidades en m).....	100
Tabla 3.6. Relaciones de calibración de H_s provenientes de satélites (unidades en m).....	103
Tabla 3.7. Relaciones de calibración de periodos de oleaje provenientes de satélites (unidades en s)	104
Tabla 4.1. Clasificación de la información de oleaje disponible en función de su ubicación	122
Tabla 4.2. Tratamiento de los datos disponibles en función de la clasificación de la información de oleaje.....	123
Tabla 4.3. Metodologías de calibración para los datos de oleaje españoles.....	125
Tabla 4.4. Metodologías de calibración para los datos de oleaje españoles, salvo los provenientes de satélites.....	125
Tabla 6.1. Relación de los 171 estados de mar propagados hasta la boya costera de Tarragona.	169
Tabla 7.1. Validación de las calibraciones direccionales no paramétricas de H_s de SIMAR-44 con datos de la boya de Mahón, se validan las calibraciones con los datos de la boya de Mahón de los años 2000 y 2001.....	211
Tabla 7.2. Validación de las calibraciones direccionales no paramétricas de H_s de SIMAR-44 con datos de la boya de Mahón, se validan las calibraciones con los datos de satélites con $R = 0.5^\circ$	212
Tabla 10.1. Características de la base de datos de oleaje proveniente de las boyas de la red exterior.	273

ÍNDICES

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.	277
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.	278
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.....	280
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.....	281
Tabla A.I.1. Diferentes fórmulas de punteo	A.I.4
Tabla A.I.2. Fórmulas de punteo de la distribución Weibull de mínimos.....	A.I.9

Lista de símbolos.

a	Amplitud de una onda [m]. Término independiente en las relaciones de calibración.
A	Parámetro de escala de la distribución Weibull de mínimos.
b	Parámetro lineal en las relaciones de calibración.
B	Parámetro de localización de la distribución Weibull de mínimos.
c	Celeridad del pulso emitido por los altímetros. Parámetro potencial en las relaciones de calibración. Parámetro utilizado para definir los datos análogos en las calibraciones no paramétricas.
C	Banda de microondas [4-8 GHz]. Parámetro de forma de la distribución Weibull de mínimos.
D	Persistencia o duración de excedencia [horas].
e	Error aleatorio.
f	Función de densidad.
f_i	i -ésimo modo espacial de la descomposición en EOFs.
F	Función de distribución.
g	Aceleración de la gravedad [m/s ²].
g_i	i -ésima amplitud temporal o direccional de la descomposición en EOFs.
h	Profundidad [m].
h_n	Máxima diferencia permitida para considerar datos análogos del reanálisis de H_s [m].
H	Altura de ola [m].
H_{m0}	Altura de ola de momento de orden cero [m].
H_{rms}	Altura de ola media cuadrática [m].
H_s	Altura de ola significativa [m].
$H_{1/N}$	Altura media de las $1/N$ mayores olas [m].
J	Función objetivo a minimizar.
k	Número de covariables del modelo de regresión.
K	Banda de microondas [18-26.5 GHz].
K_a	Banda de microondas [26.5-40 GHz].
K_p	Coefficiente de propagación.
K_u	Banda de microondas [12-18 GHz].

ÍNDICES

L	Longitud de onda [m]. Banda de microondas [1-2 GHz].
m	Número de observaciones de las subseries de datos análogos de reanálisis.
m_r	Momento de orden r de la función densidad espectral.
\tilde{m}_r	Momento de orden r respecto de la media de una variable aleatoria.
$M_{r,s,p}$	Momento ponderado de parámetros r , s y p .
n	Número de observaciones de una muestra.
np	Número de nodos de reanálisis de una zona de calibración.
n_{Pr}	Número de cuantiles de una muestra.
n_θ	Número de ondas sinusoidales que permiten la variación de los parámetros de las relaciones de calibración en función de la dirección de procedencia del oleaje.
n_φ	Número de sectores direccionales en los que se agrega el oleaje direccional.
p	Número de parámetros. Número de secuencias o subseries de datos análogos de reanálisis que tienen datos instrumentales coincidentes. Número de modos EOFs utilizados.
P	Banda de microondas [0.2-1 GHz]. Relación teórica proporcional al periodo del oleaje (utilizada en teledetección).
Pr	Probabilidad de no excedencia.
q	Número de modos EOFs con parametrización lineal.
Q_p	Apuntamiento espectral de Goda.
R	Radio del área circular máxima para considerar datos instrumentales próximos a una posición concreta de reanálisis [m].
s_X	Cuasidesviación típica muestral de la variable aleatoria X .
S	Densidad espectral [m^2/s]. Banda de microondas [2-4 GHz].
S_{XY}	Covarianza muestral de la variable aleatoria bidimensional $\{X, Y\}$.
t	Tiempo (Variable temporal).
t_n	Máxima diferencia permitida para considerar datos análogos del reanálisis de T_m [s].
$t-S$	Función de distribución de la t-Student's.
T	Periodo de ola [s]. Variable determinista.
$T_{H_{1/3}}$	Periodo medio condicionado a la altura de ola significativa [s].
T_{ij}	Periodo del oleaje asociado a los momentos de orden i y j [s].

T_m	Periodo medio [s].
T_p	Periodo de pico [s].
T_r	Periodo de retorno [años].
$T_{1/3}$	Periodo significativo [s].
U_{10}	Velocidad del viento a 10m sobre la superficie.
W	Peso utilizado para ponderar las funciones objetivo a minimizar.
x	Posición (Variable discreta espacial).
X	Banda de microondas [8-12 GHz]. Variable aleatoria.
Y	Variable aleatoria.
z	Variable normal estándar.
Z	Variable aleatoria. Variable espacio-temporal o espacio-direccional.
Z_M	Media temporal o direccional de la variable bidimensional Z .
α	Pendiente de la evolución temporal de la potencia del pulso reflejado. Término independiente en los modelos de regresión. Nivel significativo. Parámetro utilizado para definir los datos análogos en las calibraciones no paramétricas.
β	Parámetro lineal en los modelos de regresión.
γ	Parámetro potencial en los modelos de regresión. Factor de apuntamiento espectral de JONSWAP.
η	Superficie libre [m].
θ	Ángulo o dirección de una onda [°]. Dirección media de procedencia del oleaje [°].
θ_m	Dirección media de un estado de mar [°].
θ_n	Máxima diferencia permitida para considerar datos análogos del reanálisis de θ_m [°].
θ_p	Dirección media de un estado de mar propagado [°].
Θ	Vector de parámetros.
λ	Fracción de las varianzas de los errores de dos variables aleatorias.
μ	Media de la distribución Lognormal. Parámetro de localización de la distribución Gumbel de máximos. Parámetro de localización de la distribución GEV.
μ^*	Parámetro de localización de la distribución Lognormal.

ÍNDICES

μ_X	Media poblacional o momento de primer orden respecto del origen de la variable aleatoria X .
ν	Anchura espectral de Longuet-Higgins.
ξ	Parámetro de forma de la distribución GEV.
ρ	Densidad [kg/m^3]. Coeficiente de correlación de la regresión.
σ	Desviación típica de la distribución Lognormal.
σ^*	Parámetro de escala de la distribución Lognormal.
σ_X	Desviación típica poblacional de la variable aleatoria X .
σ_0	Potencia del pulso reflejado por la superficie del mar (emitido por altímetros).
τ	Duración del pulso emitido por los altímetros. Meses, unidad temporal discreta de agregación temporal de datos de oleaje.
φ	Centros de los sectores direccionales de procedencia del oleaje (Variable discreta) [$^\circ$].
ϕ	Fase de una onda.
Φ	Función distribución de la Normal estándar.
ψ	Parámetro de escala de la distribución Gumbel de máximos. Parámetro de escala de la distribución GEV.
ω	Frecuencia [Hz].
ω_p	Frecuencia de pico [Hz].
$ X $	Valor absoluto de X .
$\langle X \rangle$	Media aritmética de la variable aleatoria X .
\bar{x}	Media muestral la variable aleatoria X .
\hat{X}	Estimador puntual de X .
X'	Aproximación de X .

ÍNDICES

Lista de acrónimos.

ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profilers.</i>
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología.
ATM	<i>Airborne Topographic Mapper.</i>
CaE	Calibración Espacial.
CaP	Calibración Puntual.
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación.
CMEDS	<i>Canadian Marine Environmental Data Service.</i>
CNES	<i>Centre National d'Etudes Spatiales.</i>
COADS	<i>International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set.</i>
CV	Coefficiente de Variación.
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecast.</i>
EIV	<i>Error-In-Variables.</i>
EOF	<i>Empirical Orthogonal Function.</i>
ERS	<i>European Remote-Sensing Satellite.</i>
ESA	<i>European Space Agency.</i>
FGGE	<i>First GARP Global Experiment.</i>
FR	<i>Functional Relationship.</i>
GEV	<i>Generalized Extreme Value.</i>
GFO	<i>GEOSAT Follow-On.</i>
GIOC	Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas.
GMFR	<i>Geometric Mean Functional Relationship.</i>
GPS	<i>Global Positioning System.</i>
HF	<i>High Frequency.</i>
HIPOCAS	<i>Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe.</i>
HNODC	<i>Hellenic National Oceanographic Data Center.</i>
IC	Intervalo de confianza.
ICOADS	<i>International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set.</i>
IEO	Instituto Español de Oceanografía.
INM	Instituto Nacional de Meteorología.
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project.</i>

ÍNDICES

JMA	<i>Japan Meteorological Agency.</i>
MLE	<i>Maximum Likelihood Estimation.</i>
MVRExt	<i>Mínima Variación de Régimen Extremal.</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration.</i>
NCEP/NCAR	<i>American National Centers for Environmental Prediction and for Atmospheric Research.</i>
NDBC	<i>National Data Buoy Center.</i>
NDBP	<i>Indian National Data Buoy Programme.</i>
ODR	<i>Orthogonal Distance Regression.</i>
OLS	<i>Ordinary Least-Square.</i>
OPPE	<i>Organismo Público Puertos del Estado.</i>
OPR	<i>Off-line Products.</i>
OWS	<i>Ocean Weather Station.</i>
PCA	<i>Principal Component Analysis.</i>
PO.DAAC	<i>Physical Oceanography Distributed Active Archive Center.</i>
PP	<i>Probabilidad-Probabilidad.</i>
PR	<i>Propagar.</i>
QQ	<i>Quantile-Quantile.</i>
RA	<i>Radar Altimeter.</i>
RePR	<i>Retropropagar.</i>
RMS	<i>Root Mean Square.</i>
ROM	<i>Recomendaciones de Obras Marítimas.</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar.</i>
SCE	<i>Shuffled Complex Evolution.</i>
SCEM	<i>Shuffled Complex Evolution Metropolis.</i>
SI	<i>Scatter Index.</i>
SLR	<i>Simple Linear Regression.</i>
SOC	<i>Southampton Oceanography Centre.</i>
SR	<i>Swell Ratio.</i>
SSE	<i>Sum Squares Error.</i>
SSR	<i>Sum Squares Regression.</i>
SST	<i>Sum Squares Total.</i>
SWAN	<i>Simulating Waves Nearshore.</i>

T/P	TOPEX/POSEIDON.
TVE	Teoría de Valores Extremos.
UD	Usar directamente.
VCC	<i>Vector Correlation Coefficient.</i>
VOS	<i>Voluntary Observing Ships.</i>
WAM	<i>Wave Analysis Model.</i>
WAMDI	<i>Wave Analysis Model Development and Implementation group.</i>
WASA	<i>Waves and Storms in the North Atlantic.</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization.</i>

ÍNDICES