

Universidad Politécnica de Cataluña
Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental
Doctorado en Ciencias del Mar

Tesis Doctoral

“Tormentas de oleaje en el Mediterráneo: Física y Predicción”

Autor : Rodolfo Bolaños Sánchez

Director: Dr. Agustín Sánchez Arcilla

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

Simbología

1. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN	1
2. OBJETIVOS	5
3. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO	7
3.1 El Mediterráneo Noroccidental	7
3.2 Viento y Oleaje.....	11
3.2.1 <i>Fricción del viento sobre el océano</i>	11
3.2.2 <i>El concepto de mar parcialmente desarrollado y la edad del oleaje</i>	15
3.2.3 <i>Variabilidad climática y oleaje</i>	17
3.2.4 <i>El modelo atmosférico MASS</i>	18
3.2.5 <i>El Modelo atmosférico ARPEGE</i>	19
3.2.6 <i>Descripción espectral del oleaje</i>	21
3.3 Predicción de oleaje.....	28
3.3.1 <i>Introducción a la modelización del oleaje</i>	28
3.3.2 <i>Representación de procesos físicos</i>	31
3.3.3 <i>Fuentes de error y dificultades en el modelado del oleaje</i>	35
3.3.4 <i>El Modelo WAM</i>	36
3.3.5 <i>El Modelo SWAN</i>	40
3.3.6 <i>Difracción en modelos espectrales</i>	43
3.3.7 <i>Variabilidad del viento en modelos espectrales</i>	47
3.3.8 <i>Estadísticas para la validación de modelos</i>	49

4. CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE EN LA COSTA CATALANA.

DATOS PARA VALIDACIÓN	51
4.1 Introducción.....	51
4.2 Redes de instrumentación meteorológica y oceanográfica. Procesamiento de datos.....	51
4.3 Descripción de tormentas características registradas por la XIOM.....	60
4.3.1 <i>Octubre 1997</i>	63
4.3.2 <i>Mestral (4/6/2000 – 12/6/2000)</i>	65
4.3.3 <i>Levante(21/10/2000 – 25/10/2000)</i>	67
4.3.4 <i>Garbi (11/10/2000)</i>	70
4.4 Tormenta de Noviembre 2001.....	73
4.4.1 <i>Condiciones generales</i>	73
4.4.2 <i>Evolución espectral de la tormenta</i>	76
4.4.3 <i>La edad del oleaje</i>	84
4.5 Tormenta de Marzo-Abril 2002.....	90
4.5.1 <i>Condiciones generales</i>	90
4.5.2 <i>Evolución espectral de la tormenta</i>	92
4.5.3 <i>La edad del oleaje</i>	100
4.6 Caracterización de parámetros espectrales: Anchura espectral y su relación con la edad del oleaje.....	102
4.7 Validación de los Modelos MASS y ARPEGE para las tormentas de Noviembre 2001 y Marzo-Abril 2002.....	114
4.7.1 <i>Tormenta de Noviembre 2001</i>	115
4.7.2 <i>Tormenta de Marzo-Abril 2002</i>	118
4.7.3 <i>Descripción espacial de los campos de viento</i>	120

5. PREDICCIÓN DE OLEAJE EN EL MEDITERRANEO: FETCH Y

DURACIÓN LIMITADOS	121
5.1 Introducción.....	121
5.2 Dominio idealizado.....	124
5.3 Coeficientes y análisis de sensibilidad.....	128
5.4 Simulación de la tormenta de Noviembre 2001.....	139
5.4.1 <i>Condiciones generales</i>	139

5.4.2	<i>Altura de ola, periodo medio y dirección</i>	139
5.4.3	<i>Distribuciones espaciales</i>	144
5.4.4	<i>Predicción de los espectros</i>	151
5.5	Simulación de la tormenta de Marzo-Abril 2002.....	162
5.5.1	<i>Condiciones generales</i>	162
5.5.2	<i>Altura de ola, periodo medio y dirección</i>	162
5.5.3	<i>Distribuciones espaciales</i>	168
5.5.4	<i>Predicción de los espectros</i>	173
5.6	Análisis estadístico de un periodo invernal.....	181
5.7	Efecto de las islas en las predicciones de oleaje en el Mediterráneo.....	185
5.8	Análisis del anidamiento en el Mediterráneo.....	188
5.9	Implicaciones de características espectrales para la predicción de oleaje en el Mediterráneo.....	192
5.10	Análisis de las condiciones iniciales. Importancia para el Mediterráneo Noroccidental.....	208
6.	DISCUSIÓN	213
7.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	227
8.	REFERENCIAS	231
ANEJOS		
	<i>I) Sistema de predicción operativo de oleaje del SMC.</i>	
	<i>II) Tabla comparativa de los modelos WAM y SWAN.</i>	

Simbología y Nomenclatura

Se presentan los principales símbolos y nombres utilizados a lo largo de esta tesis

δ	Densidad
ε	Anchura espectral ε
ν	Anchura espectral ν
τ	Esfuerzo
f, ω	Frecuencia
θ	Dirección
ARPEGE	Modelo atmosférico (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle)
CEM	Coastal Engineering Manual
C	Celeridad de la ola
C_D	Coefficiente de arrastre
C_p	Celeridad correspondiente al pico del espectro
Cuadruplets	Interacciones no lineales entre cuatro ondas
Edad	Edad del oleaje, relación entre la celeridad y la velocidad del viento
Fetch	Area de generación del oleaje
FFT	Fast Fourier Transform – Transformada rápida de fourier
Garbi	Referente a la dirección del viento o el oleaje con componente principal del SE
g	Aceleración de la gravedad
H_s	Altura significativa
H_{max}	Altura máxima
H_{smax}	Altura significativa máxima
Levante	Referente a la dirección del viento o el oleaje con componente principal de E
Mestral	Referente a la dirección del viento o el oleaje con componente principal de NW
MASS	Modelo atmosférico (Mesoscale Atmospheric Simulation System)
m_n	Momento espectral de orden n
Q_p	Anchura espectral propuesta por Goda
RMSE	Root Mean Square Error
S	Termino fuente-sumidero de energía del oleaje dentro de los modelos
$S(f), S(\sigma)$	Densidad espectral en función de la frecuencia
$S(f,\theta), S(\sigma,\theta)$	Densidad espectral en función de la frecuencia y dirección
SI	Scatter Index (índice de dispersión)
SWAN	Simulating Waves Nearshore
S_{max}	Densidad energética pico
Sea	Oleaje de viento
Swell	Oleaje de fondo
Shoaling	Efecto de asomeramiento del oleaje, por fondo o corrientes
Tramuntana	Referente a la dirección del viento o el oleaje con componente principal del N
T_z	Periodo medio
Triadas	Interacciones no lineales entre tres ondas
T_p	Periodo de pico
U_{10}	Velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie
U_*	Velocidad de fricción
U_z	Velocidad del viento a una altura z sobre la superficie
WAM	WAve Model
XIOM	Xarxa d'Instrumentació Oceanogràfica i Meteorològica
XMET	Xarxa Meteorològica
Z_o	Escala de rugosidad

Agradecimientos

Esta tesis de doctorado es en realidad fruto de un trabajo de equipo donde la colaboración, sugerencias, comentarios y apoyo de otras personas han sido de gran importancia. Por esto, aquí intento agradecer a todas aquellas personas involucradas durante alguna parte del desarrollo de este trabajo.

No puedo empezar esta sección sin antes agradecer a mi país (México) y especialmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado una beca para la realización de este doctorado. También agradezco al CIIRC-LIM por su apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

Quiero agradecer a mi director, Agustín Sánchez-Arcilla por haberme dado la oportunidad de incorporarme a su grupo de trabajo y por sus constantes motivaciones.

Agradezco a Jesús Gómez, Jordi Caterua y Nicolas Ortiz por sus colaboraciones y su participación durante el tratamiento de datos, discusiones y comentarios.

No hay que olvidar a los compañeros doctorandos (algunos ya doctores) que siempre dieron apoyo cuando fue necesario y con los que se ha, y esperamos, se siga colaborando (Dani, Biel, Cesar, Ivan, Eric, Jose María, Augusto, Tona, Ana, Jorge, Jaime, Erika, Mar, Marc...)

Además hay personas con la que la colaboración no ha sido de manera directa pero su labor ha sido importante para el desarrollo de este trabajo como Joan y Fede (mantenimiento de la XIOM) y el SMC que aportaron datos de campo utilizados en este trabajo. Se agradece la colaboración de Meteo-France por haber facilitado los datos del modelo ARPEGE. Así mismo quiero agradecer al proyecto PREVIMED y FLOODSite en los que se ha desarrollado parte de este trabajo.

Además del apoyo en el desarrollo técnico, existen personas que han sido muy importantes desde el punto de vista personal, la lista es larga pero aquí están algunas de ellas: mis padres y familia, amigos de “allá” (Mexico): Roberto P., “los doctores”, “los oceanologos”, Omar, Eduardo,... Amigos de “acá”: Cristina F., Cristina H., Carmen, Elena G., Elena, Adela, Roberto G., Angel, Roberto M., Karen, Elia, Bene, Kristin, Sheryl, Marc, Marina, Noelia, Marcos, Pedro Osuna... y por supuesto MERCE.

A los profesores e investigadores del LIM con los que se ha interactuado ya sea de una menor o mayor forma (M. Espino, J. Jiménez, J.P. Sierra, Quim, Xavi...).

También se agradece al personal administrativo del departamento: Marisol, Emilia, Genoveva, María, Isabel y Javier por su ayuda y disposición cuando fue necesario.

"Uno no es lo que es por lo que escribe,
sino por lo que ha leído."
Jorge Luis Borges (1899-1986)

"Not everything that can be counted counts,
and not everything that counts can be counted."
Albert Einstein (1879-1955)

"In theory, there is no difference between theory and
practice. But, in practice, there is."
Jan L.A. van de Snepscheut (1953-1994)

A mis padres y hermana