

# CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA MARÍTIMO PARA INFRAESTRUCTURAS PORTUARIAS: PROYECTO MARUCA



A. Tomás, F. J. Méndez, G. Díaz, F. F. Jaime,  
R. Medina, I.J. Losada<sup>1</sup>

## ANTECEDENTES

Dentro del marco de los proyectos de I+D+i de la Acción Estratégica en Energía y Cambio Climático (Ministerio de Fomento) se está desarrollando el proyecto de investigación titulado “Caracterización climática del medio físico marino español para la optimización de la explotación portuaria y navegación marítima, MARUCA” (E17/08), en el que IH Cantabria lleva trabajando desde el año 2009. Los objetivos generales de dicho proyecto son:

- Caracterizar la dinámica y la climatología del medio físico marino español mediante la generación de bases de datos de dinámica marina de alta resolución.
- Desarrollar metodologías de trabajo específicas que permitan transferir la información climática al entorno de las infraestructuras de transporte marítimo y al interior de las mismas.

## INTRODUCCIÓN

En España, las infraestructuras de transporte marítimo más importantes pertenecen al Sistema Portuario de titularidad estatal, que está integrado por 46 puertos de interés general. Dichos puertos son gestionados por 28 Autoridades Portuarias, cuya coordinación y control de eficiencia corresponde al Organismo Público Puertos del Estado (OPPE).

La importancia del Sistema Portuario de titularidad estatal en las cadenas logísticas y de transporte es tal, que cerca del 60% de las exportaciones y el 85% de las impor-

---

<sup>1</sup> Instituto de Hidráulica Ambiental “IH Cantabria” Universidad de Cantabria.

## INFRAESTRUCTURAS, LOGÍSTICA Y SOSTENIBILIDAD

taciones pasa por dichos puertos; la actividad económica que aportan representa un 1.1% del Producto Interior Bruto español (fuente: [www.puertos.es](http://www.puertos.es)). Por lo tanto, la optimización de la explotación portuaria y navegación marítima del Sistema Portuario español repercute directamente en el rendimiento del transporte marítimo y consecuentemente en la eficiencia de la economía del estado.

Para optimizar el diseño y explotación del Sistema Portuario es necesario satisfacer, en cada puerto, diversos requerimientos de fiabilidad, funcionalidad y operatividad, como se establece en la ROM-00 (2001), durante un cierto intervalo de tiempo (vida útil). Esto implica que, para ello, es imprescindible conocer todos los agentes que condicionan la fiabilidad, funcionalidad y operatividad, a lo largo de la vida útil de las infraestructuras portuarias.

En estructuras marítimas un agente fundamental es el oleaje, por lo que resulta imprescindible caracterizar su estadística, tanto para el diseño como para su gestión, explotación y conservación. Aunque también es necesario caracterizar la estadística de las otras variables con las que se define el clima marítimo en un determinado lugar, el viento y el nivel del mar. Pero en cada ubicación la interacción del mar con la tierra y las acciones meteorológicas es distinta, por lo que el oleaje de la posición concreta de un puerto es diferente al resto y es necesario establecerlo. Para cumplir este objetivo, establecer el oleaje que incide en una estructura marina concreta, es fundamental el conocimiento de la estadística del oleaje de largo plazo que interactúa con ella.



Figura 1 Mapa de la disposición geográfica de los puertos de interés general del Sistema Portuario español.

En la actualidad, tras el desarrollo de modelos numéricos capaces de reproducir el clima marítimo en cualquier lugar a partir de información atmosférica, se pueden generar bases de datos de reanálisis numéricos que simulan largas series temporales (de más de 60 años de duración) de oleaje, viento y nivel del mar, con suficientes resoluciones espacio-temporales y homogéneas, que tras ser calibradas y validadas con información instrumental, son las mejores fuentes de información para caracterizar el clima marítimo en zonas tan extensas como las costas españolas. Cabe señalar que España es el país de la Unión Europea que cuenta con mayor longitud de costa (8000 Km.), a lo largo de la cual se ubican los 46 puertos del Sistema Portuario de titularidad estatal (fig. 1).

Sin embargo, las bases de datos de reanálisis suelen estar generadas en condiciones de aguas abiertas, por lo que es necesario transferirlas o propagarlas hasta el entorno e interior de los puertos. Para ello se ha desarrollado una metodología específica de aumento de resolución o *downscaling* que combina la simulación numérica de todos los procesos de transformación del clima marítimo hasta el interior de los puertos (*downscaling* dinámico) con métodos matemáticos para tratar eficazmente la gran cantidad de información generada (*downscaling* estadístico), denominada metodología híbrida (Camus *et al.*, 2011b).

Con la aplicación de la metodología híbrida, se obtienen largas series de datos (más de 60 años), homogéneas y con suficiente resolución espacial (al menos 200 m), de todos los agentes de clima marítimo (oleaje, agitación, onda larga, marea meteorológica, marea astronómica, etc.), en el entorno e interior de todos los puertos de interés general de Puertos del Estado. A partir de dichas series se caracteriza el clima marítimo de las infraestructuras portuarias, cumpliendo los objetivos marcados en el proyecto MARUCA, para posibilitar la optimización de la explotación portuaria y navegación marítima en España.

A continuación se explica la metodología híbrida y los resultados obtenidos en este trabajo. Previamente se desarrolla los objetivos generales y específicos, que en gran medida coinciden con los del proyecto MARUCA. Posteriormente se explica la metodología híbrida, detallando las particularidades en su aplicación a cada agente de clima marítimo. Después se presentan los resultados del proyecto. Finalmente se resumen las conclusiones obtenidas.

## OBJETIVOS

Los objetivos principales de este trabajo coinciden con los del proyecto MARUCA (véase en Antecedentes). Dichos objetivos generales se desarrollan en este trabajo mediante los siguientes objetivos específicos:

- Generación de *bases de datos de reanálisis* de clima marítimo (viento, oleaje, marea meteorológica, etc.) en aguas abiertas para las costas españolas, homogéneas, continuas y de al menos 60 años de duración. Validadas y/o calibradas con información instrumental.
- Generación de un *paquete estadístico* para caracterizar series de datos mediante técnicas de estadística descriptiva, algoritmos de clasificación de alta dimensiona-

## INFRAESTRUCTURAS, LOGÍSTICA Y SOSTENIBILIDAD

lidad, ajustes de los regímenes medios, regímenes de persistencias, regímenes extremos, etc.

- *Caracterización de las dinámicas marinas en aguas abiertas.* Generación de un atlas de dinámica marina a lo largo del litoral español que sirva de complemento a la ROM 0.3-91. La caracterización de la dinámica marina incluirá oleaje, ondas infragravitatorias, probabilidad de *freak waves*, marea meteorológica, marea astronómica, etc.
- Desarrollo de metodologías de trabajo específicas que permitan transferir la información climática al entorno de las infraestructuras de transporte marítimo y al interior de las mismas (*metodología híbrida*). De forma que los resultados sean fácilmente integrados en los procedimientos de verificación de las ROM de Puertos del Estado.
- *Caracterización de las dinámicas marinas en el entorno de los puertos de interés general de Puertos del Estado.* La caracterización de la dinámica marina incluirá oleaje, ondas infragravitatorias, marea meteorológica, marea astronómica, etc. Se creará una base de datos con las librerías de propagación en cada puerto.
- *Caracterización de las dinámicas marinas en el interior de los puertos de interés general de Puertos del Estado.* La caracterización de la dinámica marina incluirá agitación, resonancia portuaria, nivel del mar, etc. Se creará un atlas de resonancia portuaria en cada puerto.
- Creación de una *página Web* para visualizar todos los resultados del proyecto MARUCA.

### METODOLOGÍA

Como ya se ha comentado, la aplicación de la metodología híbrida a cada agente de clima marítimo es distinta, es por ello que a continuación se desarrolla la metodología específica para transferir el nivel del mar (la marea meteorológica y la marea astronómica), el oleaje y las ondas infragravitatorias hasta el entorno e interior de los puertos. Previamente se explica la metodología de generación del reanálisis de viento, pues es un forzamiento común a varios de los otros reanálisis (marea meteorológica y oleaje).

### Viento (SeaWind)

El principal inconveniente que presentan los reanálisis globales atmosféricos es la insuficiente resolución espacial para caracterizar determinadas situaciones locales. Para solventar este problema se suelen emplear técnicas de regionalización (incremento de resolución o *downscaling*). En concreto, el *downscaling* dinámico consiste en incrementar la resolución de la rejilla del modelo atmosférico global anidando a éste un modelo atmosférico regional o mesoescalar (*LAM*) limitando la zona de interés. De esta forma se puede mejorar la orografía y la parametrización de algunos procesos físicos locales de importancia (radiación, capa límite, cúmulos). Usualmente estos reanálisis regionales tienen una resolución espacial de entre 5 y 75 Km y utilizan un

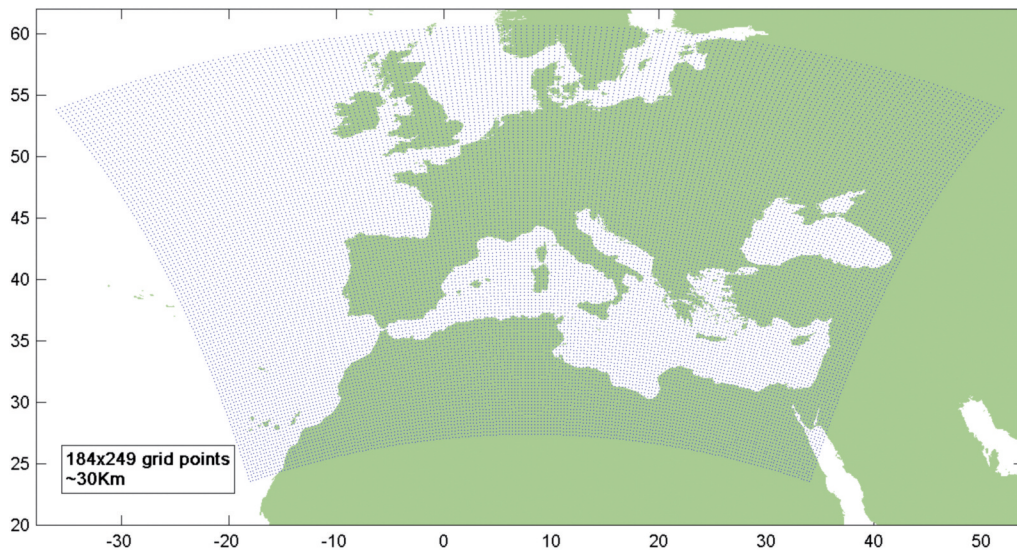


Figura 2. Dominio de la malla SW-NCEP.

acoplamiento de los resultados atmosféricos del reanálisis global como condiciones de inicio y contorno. De esta manera se consigue que los campos atmosféricos de mayor resolución sean consistentes con las ecuaciones atmosféricas y se puedan considerar como las representaciones apropiadas de las condiciones de la atmósfera.

La base de datos generada por el IH Cantabria denominada SeaWind-NCEP (SW-NCEP) está constituida por los campos de viento horarios resultantes de la dinámica atmosférica durante el periodo 1948-2009. Para su elaboración se ha utilizado el modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*, más detalles en Skamarock *et al.*, 2008), que constituye uno de los modelos atmosféricos más modernos, ampliamente utilizado por la comunidad científica. El dominio simulado cubre casi al completo la región europea con una resolución media de 30 Km (figura 2). Los forzamientos de contorno e inicio utilizados proceden del reanálisis global NCEP-NCAR I (Kalnay *et al.*, 1996).

La base de datos de vientos SW-NCEP ha sido validada con información instrumental de boyas, anemómetros y satélites, obteniéndose unos excelentes resultados (Mendez *et al.*, 2011). La gran calidad de dichos datos permite servir de forzamiento para otros modelos de generación de oleaje o marea meteorológica (Reguero *et al.*, 2011; Abascal *et al.*, 2010). Así mismo también se utiliza como forzamiento para obtener vientos de alta resolución, de aproximadamente 2 Km, en zonas de interés, mediante técnicas de *downscaling* híbrido.

## NIVEL DEL MAR (MAREA ASTRONÓMICA Y MAREA METEOROLÓGICA, GOS)

Se define nivel del mar a la posición media de la superficie libre del mar una vez filtradas las oscilaciones de onda corta y larga asociadas al oleaje de viento y tsunamis.

# INFRAESTRUCTURAS, LOGÍSTICA Y SOSTENIBILIDAD

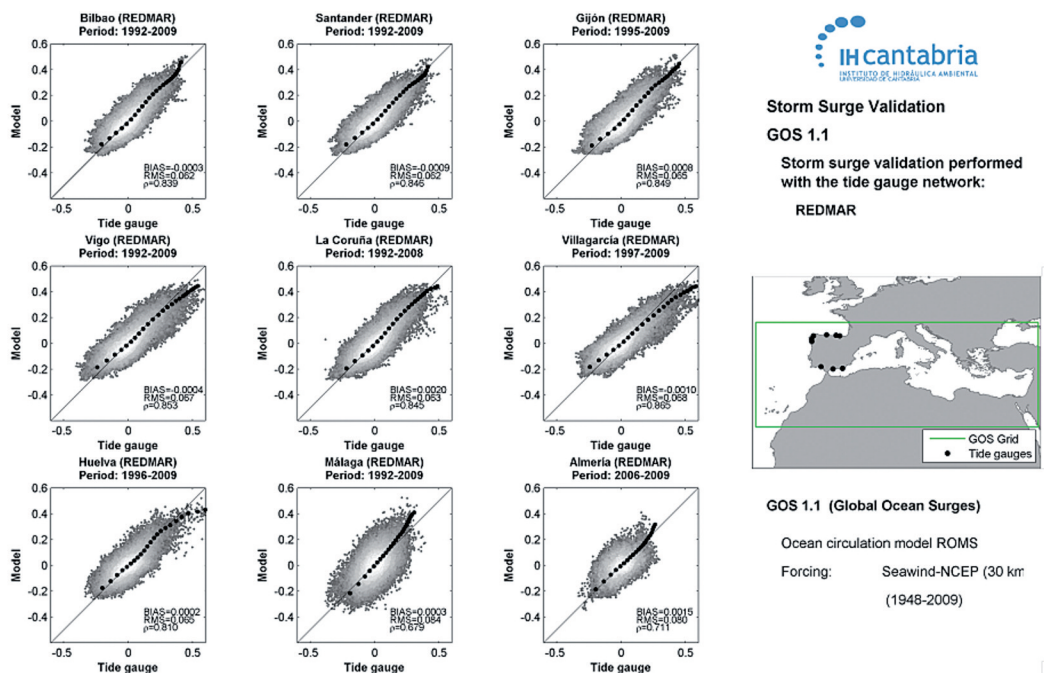


Figura 3. Validación del residuo meteorológico (m) simulado (GOS) con datos medidos por los mareógrafos del OPPE (REDMAR).

Una vez filtradas dichas oscilaciones, las oscilaciones resultantes son causadas por movimientos de largo periodo asociados a la meteorología y a los movimientos astronómicos. La oscilación del nivel medio del mar, asociada a la evolución de los sistemas meteorológicos tiene carácter aleatorio y se denomina Marea Meteorológica. La oscilación del nivel asociada a los movimientos astronómicos tiene carácter determinista y se le denomina Marea Astronómica.

Con la información de las amplitudes provenientes del análisis armónico de series de marea instrumentales a lo largo de la costa española, IH Cantabria ha generado series horarias desde el año 1948 hasta la actualidad en todos y cada uno de los puertos del Sistema Portuario español.

Por otro lado, la base de datos GOS 1.1 (*Global Ocean Surges*) desarrollada por IH Cantabria, comprende el reanálisis de marea meteorológica de más de 60 años (1948-2009) de alta resolución realizado en el sur de Europa. El reanálisis proporciona datos de marea meteorológica calculados con una resolución espacial de  $1/8^\circ$  y una resolución temporal horaria. El área de estudio engloba el sur de Europa, incluyendo el mar Mediterráneo y la costa Atlántica Española (véase *GOS Grid* en la figura 3).

Dicho reanálisis ha sido realizado con el modelo tridimensional de circulación ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) desarrollado por el *Ocean Modeling Group* de

*Rutgers* (Shchepetkin y McWilliams, 2005). Debido a que el modelo incluye algoritmos físicos y numéricos altamente eficientes y precisos, en la actualidad está siendo ampliamente utilizado por la comunidad científica.

El modelo ROMS resuelve de forma numérica las ecuaciones conocidas como ecuaciones primitivas, en las que asume que la presión sigue una ley hidrostática. Las ecuaciones primitivas engloban la ecuación de conservación de cantidad de movimiento, la de conservación de la masa, la de transporte de distintas sustancias como la temperatura y la salinidad, y la ecuación de estado para el cómputo de la densidad del agua. En este estudio, dado el carácter barotrópico del fenómeno a resolver, se ha utilizado la versión 2D del modelo; las condiciones de contorno del dominio fueron definidas mediante barómetro inverso.

El modelo ha sido forzado con datos de viento y presión atmosférica procedentes del *downscaling* dinámico SW-NCEP. Los resultados del reanálisis de marea meteorológica GOS 1.1 han sido validados con datos instrumentales procedentes de la red de mareógrafos REDMAR (OPPE) localizados tanto en el Atlántico como en el Mediterráneo. En la figura 3 se puede verificar la fidelidad de los datos simulados con los datos instrumentales. La alta correspondencia entre ambos conjuntos de datos demuestra la capacidad del modelo para simular el nivel del mar bajo eventos extremos de marea meteorológica.

### Oleaje (DOW)

La metodología desarrollada para obtener las series de oleaje en el entorno de los puertos del Sistema Portuario de Titularidad Estatal parte de la base de datos generada numéricamente por IH Cantabria, denominada DOW 1.1 (*Downscaled Ocean Waves*), que cubre homogéneamente las costas de todo el territorio Español y tiene una resolución espacial de al menos 200 m. Dicha base de datos simula todos los procesos de transformación del oleaje en su propagación hasta costa (refracción, asomeramiento, disipación con el fondo, difracción, rotura, generación de oleaje por viento). Para lo cual, se ha aplicado una metodología híbrida (Camus *et al.*, 2011b) que combina la calibración del reanálisis (Minguez *et al.*, 2011) con modelos numéricos de propagación (*downscaling* dinámico) y métodos matemáticos de clasificación y reconstrucción (*downscaling* estadístico).

Esta metodología se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Bases de datos de reanálisis.
2. Calibración con información instrumental de satélites.
3. Clasificación.
4. Propagación.
5. Reconstrucción de series temporales de oleaje.
6. Validación con información instrumental de boyas.

1.–*Bases de datos de reanálisis*: IH Cantabria ha generado numéricamente una base de datos horaria de oleaje de 61 años de duración (1948-2008) que cubre homogéneamente las costas de todo el territorio Español, con una resolución espacial de 1/16°

## INFRAESTRUCTURAS, LOGÍSTICA Y SOSTENIBILIDAD

$\times 1/16^\circ$ . Dicho reanálisis, denominado GOW 1.1 (*Global Ocean Waves*) se ha ejecutado con el modelo WaveWach III (Tolman, 2002) utilizando como forzamiento los vientos del SW-NCEP.

El modelo WaveWach III resuelve la ecuación de balance de densidad espectral. La hipótesis fundamental asumida por este modelo en la resolución numérica es que las propiedades del medio (corrientes, batimetría) así como las del campo de oleaje varían en el espacio y tiempo en escalas que son mucho mayores que una longitud de onda. Por lo tanto una limitación del modelo es que no es capaz de simular los efectos de propagación del oleaje en profundidades reducidas.

**2.–Calibración con información instrumental de satélites:** Se ha calibrado la base de datos GOW 1.1 con información instrumental (todos los datos de las misiones de satélites de altimetría que van desde 1992 hasta 2008). Para ello se ha utilizado una técnica de calibración no lineal basado en la agregación direccional de cuantiles (Mínguez *et al.*, 2011).

**3.–Clasificación:** Para transferir la información del GOW 1.1 desde profundidades indefinidas hasta la costa de forma eficiente se ha clasificado el clima marítimo de cada zona a partir de los campos espacio-temporales de oleaje y viento de cada zona (Camus *et al.* 2011a), seleccionándose 500 estados de mar en profundidades indefinidas representativos del total de los 61 años (534000 estados de mar). La técnica de clasificación empleada ha sido el algoritmo de máxima disimilitud (MDA, Kennard y Stone, 1969).

**4.–Propagación:** Mediante sucesivas mallas anidadas se propagan espectralmente los 500 estados de mar seleccionados del GOW 1.1 ya calibrados, llegando al menos hasta resoluciones espaciales de 200 m y hasta los 70 m en las mallas de detalle. El modelo de propagación utilizado es el SWAN, que está basado en la ecuación de acción de onda, que promedia la fase (Booij, 1999), lo que permite simular correctamente los procesos de refracción, asomeramiento, disipación con el fondo, rotura, interacciones no lineales, generación de oleaje por viento,... Para propagar se han utilizado dos bases de datos de batimetría; por un lado la batimetría global GEBCO (*British Oceanographic Data Centre*) y por otro lado las cartas náuticas disponibles en el BACO (IH Cantabria).

**5.–Reconstrucción de series temporales de oleaje:** Una vez propagados los casos seleccionados se reconstruyen las series temporales horarias de 61 años de los distintos parámetros de estado de mar mediante técnicas de interpolación basadas en funciones de base radial (*RBF*, Franke, 1982), dicha base de datos se denomina DOW 1.1.

En la figura 4 se muestra un ejemplo de validación de las series temporales de oleaje reconstruidas en la posición de una de las boyas utilizadas para validar. Se puede comprobar el gran acuerdo que siguen las series del DOW 1.1 (rojo) frente a la boya (azul), para la altura de ola significativa, periodo de pico y dirección media

**6.–Validación con información instrumental de boyas:** A partir de las series de oleaje reconstruidas en las posiciones de las boyas se valida el DOW 1.1 y con ello toda la metodología y las bases de datos generadas (fig. 5).



# INFRAESTRUCTURAS, LOGÍSTICA Y SOSTENIBILIDAD

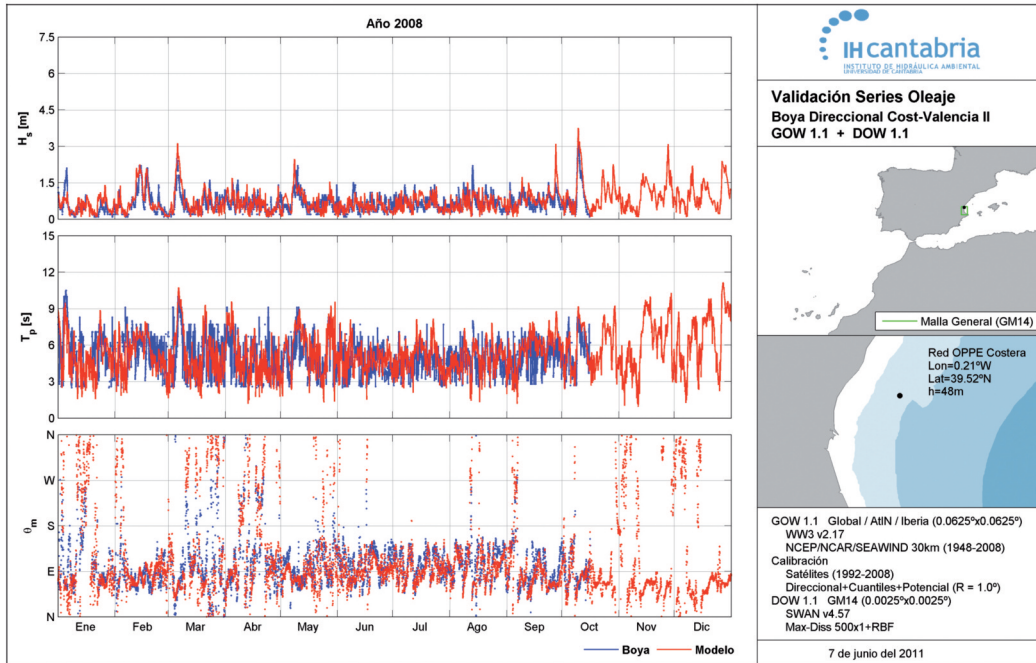


Figura 4. Validación de la serie DOW 1.1 para el punto de la boya direccional costera de Valencia II (OPPE), año 2008.

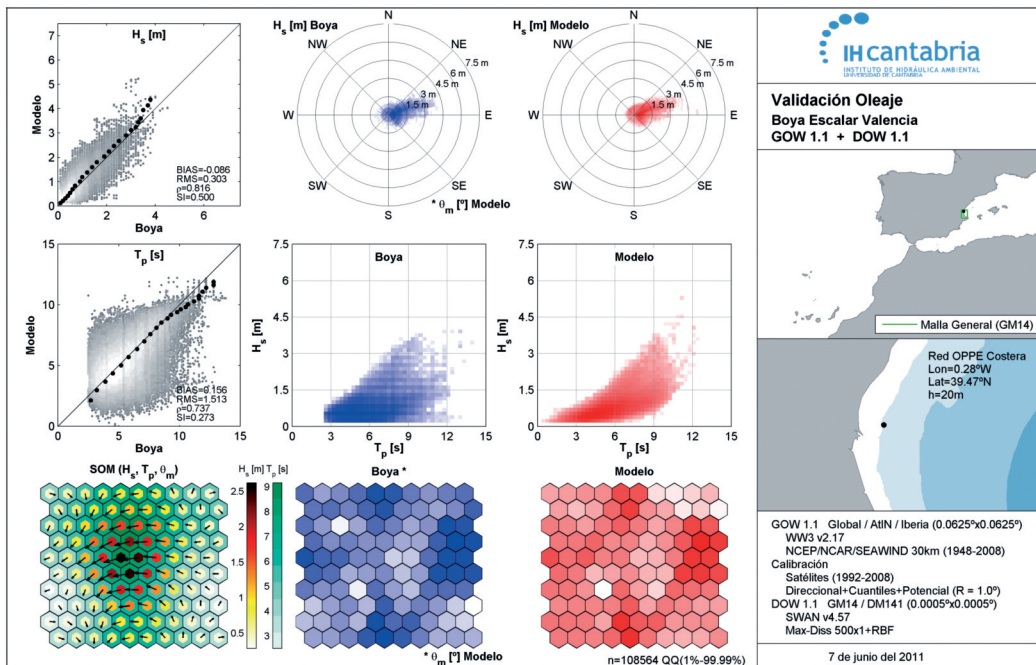


Figura 5. Ficha de validación del oleaje del DOW 1.1 con la boya escalar de Valencia (OPPE).

# INFRAESTRUCTURAS, LOGÍSTICA Y SOSTENIBILIDAD

## Ondas infragravitatorias

La metodología integral para caracterizar las variables asociadas a la onda larga vinculada al agrupamiento del oleaje, denominadas ondas infragravitatorias (1/600 Hz y 1/30 Hz), se basa en la fusión de técnicas analíticas y numéricas, que en conjunto permiten evaluar el aporte energético que presentan dichas ondas infragravitatorias en relación con la energía del oleaje.

Esta metodología parte de los fundamentos matemáticos planteados por Okihiro *et al.* (1992); Hasselman *et al.* (1962); Sand (1980); y Ottesen *et al.* (1980), de los cuales se ha recuperado la técnica matemática propuesta para poder describir la energía espectral transferida hacia las ondas infragravitatorias, a través de la descomposición y el balance energético del tensor de radiación asociado al oleaje en aguas profundas, considerando que el mecanismo de transferencia es debido primordialmente al fenómeno de agrupamiento del oleaje a lo largo de su propagación desde aguas profundas (fig. 6).

Una vez asimilada la técnica matemática para la obtención de la energía del espectro transferida a la banda infragravitatorias, se emplea nuevamente la herramienta numérica de propagación del oleaje, modelo numérico SWAN. El cual es adecuadamente forzado con los espectros modificados (energía del oleaje y ondas infragravitatorias), para poder posteriormente propagar y resolver la amplitud y periodo de las ondas largas asociadas al agrupamiento del oleaje. La metodología se apoya, al igual que en la obtención de la base de datos DOW 1.1 descrita anteriormente, en las herramientas de auto-clasificación, propagación y reconstrucción de estados de mar propuesta por Camus *et al.* (2011a, 2011b).

$$\eta(\omega_j) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{n\theta} \sum_{r=1}^{n\theta} C_e \cdot A_{n,q} \cdot A_{m,r}$$

$$C_e = -\frac{gk_n k_m \cos \Delta\theta}{2\omega_n \omega_m} - \frac{\omega_n \omega_m}{2g} + \frac{(\omega_n^2 + \omega_m^2)}{2g}$$

$$-\frac{g\omega_j}{(g\Delta k \tanh(\Delta kh) - \omega_j^2)\omega_n \omega_m} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \omega_j \left[ \left( \frac{\omega_n \omega_m}{g} \right)^2 + k_n k_m \cos \Delta\theta \right] \\ -\frac{1}{2} \left[ \frac{\omega_n k_m^2}{\cosh^2(k_m h)} - \frac{\omega_m k_n^2}{\cosh^2(k_n h)} \right] \end{array} \right\}$$

$$C_e = -\frac{3}{2} \frac{1}{h^3 k_n k_m}$$

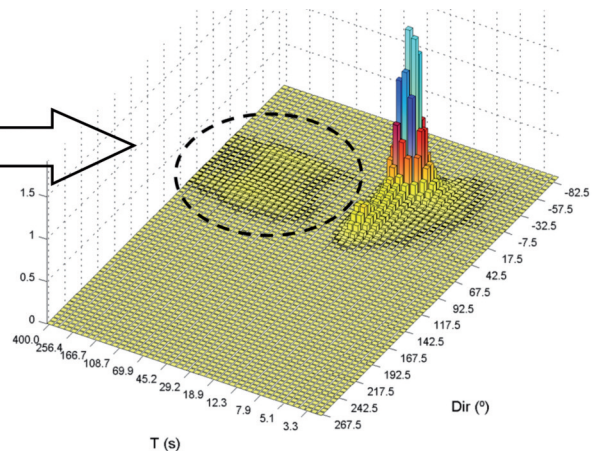
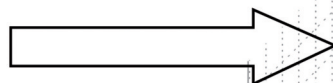


Figura 6. Ejemplo del algoritmo de transferencia de la energía del oleaje a la banda infragravitatorias para la obtención del espectro completo de oleaje y onda larga, a ser empleado como forzamiento en aguas profundas del modelo SWAN para su propagación infragravitatoria.

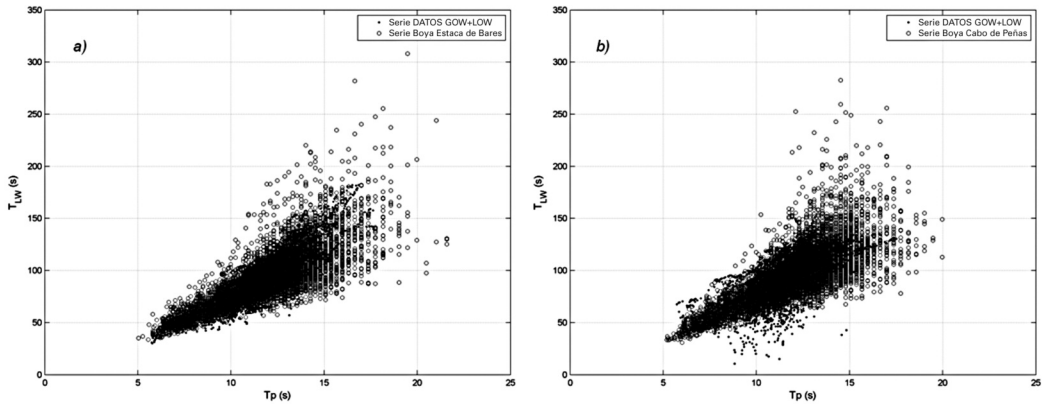


Figura 7. Comparación entre  $T_p$  vs  $T_{LW}$  para las series numéricas (DOW-LW) (puntos) y series instrumentales medidas en las boyas del OPPE en aguas profundas (círculos), a) Estaca de Bares y b) Cabo de Peñas.

Finalmente, la presente metodología ha sido adecuadamente validada con: a) relaciones entre los periodos de pico del oleaje ( $T_p$ ) y los periodos de onda ( $T_{LW}$ ) determinados a través de la técnica SIWEH de Funke y Mansard (1979), para las series de oleaje medidas en las boyas de aguas profundas de Puertos del Estado (fig. 7), y b) datos instrumentales provenientes de la campaña Gijón de 1995 realizada por el Grupo de Ingeniería de Costas de la Universidad de Cantabria, Lara et al. (2002) (fig. 8).

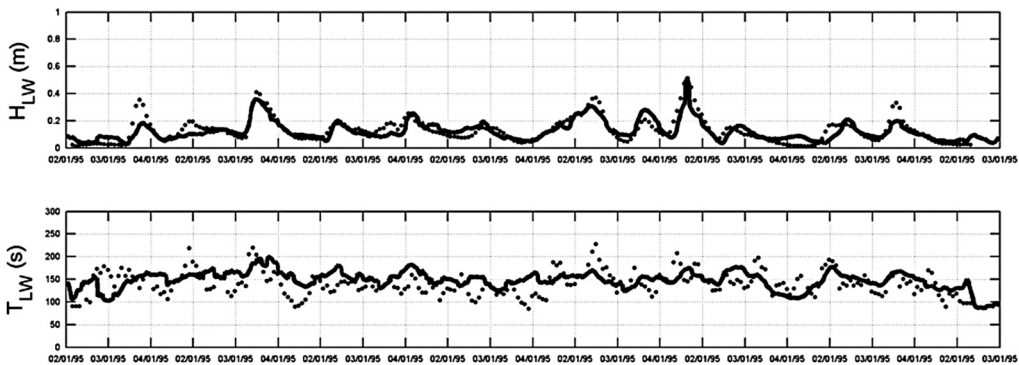


Figura 8. Serie de altura  $H_{LW}$  y periodo  $T_{LW}$  de onda larga propagada con el modelo SWAN y reconstruida con la técnica RBF para la posición del sensor de presión colocado frente al dique Príncipe de Asturias del Puerto de Gijón, durante los meses de enero y febrero de 1995. Serie numérica (línea), serie instrumental (puntos).

De esta forma, se ha conseguido reconstruir los 60 años de oleaje con su correspondiente información energética en la banda infragravitatorias, lo que supone poder generar la estadística completa de la energía asociada a las ondas infragravitatorias en cualquier punto del dominio DOW 1.1 (fig. 9).

# INFRAESTRUCTURAS, LOGÍSTICA Y SOSTENIBILIDAD

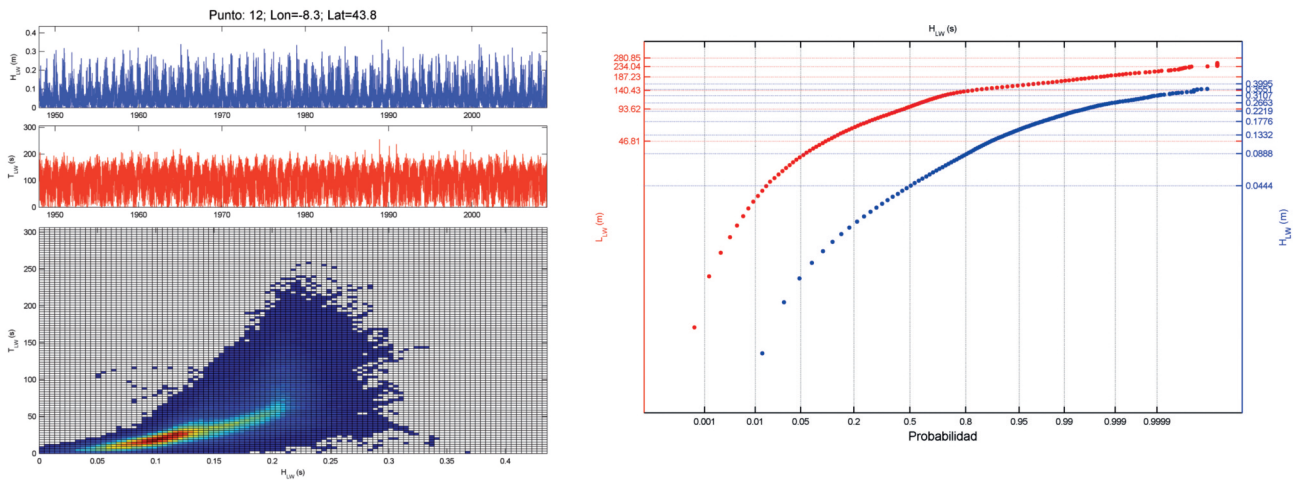


Figura 9 Serie de altura  $H_{LW}$  y periodo  $T_{LW}$  de onda larga obtenida en la zona exterior al puerto de Coruña, distribución de probabilidad conjunta entre variables y regímenes medios.

## RESULTADOS

A partir de las series de información de clima marítimo (marea astronómica, marea meteorológica, oleaje y onda infragravitatoria) definidas a lo largo de todas las infraestructuras portuarias, se caracteriza el clima marítimo mediante algoritmos de clasificación de alta dimensionalidad (SOM), técnicas de estadística descriptiva, ajustes de los regímenes extremales escalar, mensual y direccional (Menéndez *et al.*, 2008), incorporación de la incertidumbre instrumental en la determinación de los regímenes extremales escalares (Mínguez *et al.*, 2012), ajustes de los regímenes medios escalar, mensual y direccional, regímenes de persistencias, tendencias,... de los distintos parámetros que caracterizan el clima marítimo. Para ello se utiliza el software libre del IH Cantabria denominado IH AMEVA (Análisis Matemático Estadístico de Variables Ambientales). En la figura 10 se presenta un ejemplo de caracterización de régimen de persistencias.

Todos estos resultados se transfieren y publican en el marco del proyecto MARUCA mediante una Web pública realizada a tal efecto ([www.maruca.ihcantabria.com](http://www.maruca.ihcantabria.com)). En ella se visualizan los resultados de caracterización de las dinámicas en aguas abiertas del litoral español, en el entorno e interior de los puertos de interés general, así como las validaciones realizadas con información instrumental de todos los reanálisis numéricos generados.

A modo de ejemplo en la figura 11 se muestra la propagación de un estado de mar de la librería de casos generada en la zona de Valencia (el primer estado de mar seleccionado con la técnica *MaxDiss*, que es el más energético de los 500).

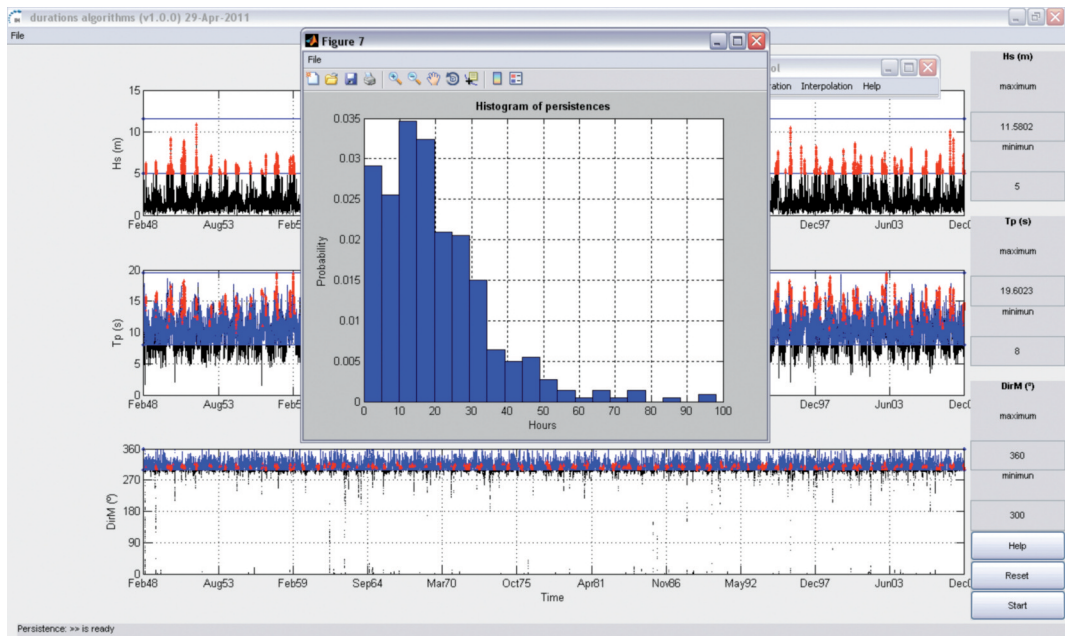


Figura 10. Ejemplo de utilización del software IH AMEVA para caracterizar régimen de persistencias condicionando la altura de ola significativa, el periodo de pico y la dirección media.

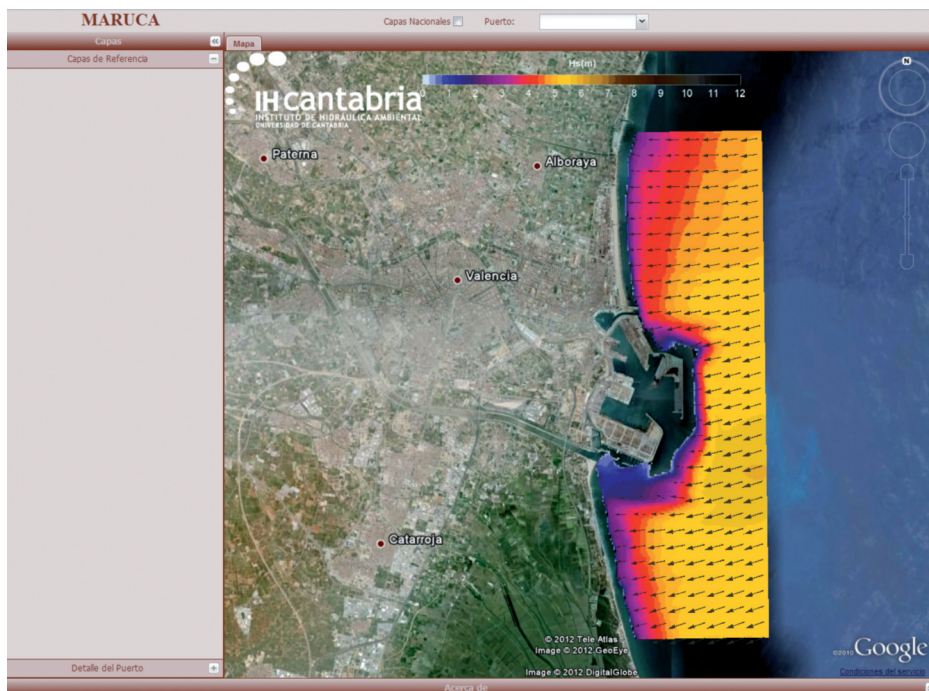


Figura 11. Propagación del estado de mar N°1, el más energético, en la malla de detalle de Valencia. Resultados de Hs en metros.

# INFRAESTRUCTURAS, LOGÍSTICA Y SOSTENIBILIDAD

## CONCLUSIONES

Con los resultados del proyecto MARUCA se consigue una mejora sustancial de los datos climatológicos existentes hasta la fecha en las inmediaciones de los puertos de interés general, facilitando los cálculos de diseño en las obras de infraestructuras marítimas así como la optimización de las condiciones de explotación y mantenimiento de las mismas.

Los excelentes resultados de las validaciones de los reanálisis numéricos con información instrumental, así como la longitud de las series generadas (más de 60 años de datos horarios), permite acotar la incertidumbre en la caracterización del clima marítimo, fundamentalmente en los regímenes extremos.

Las metodologías de *downscaling* desarrolladas permiten caracterizar el clima marítimo en cualquier ubicación no solo del litoral español, sino que también pueden implementarse en otros ámbitos geográficos si se dispone de la información necesaria, pues se han definido con suficiente generalidad.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Fomento (Acción Estratégica en Energía y Cambio Climático) la financiación por el proyecto MARUCA. Se agradece al Organismo Público Puertos del Estado, Generalitat de Cataluña (XIOM), Gobierno Vasco (ITSASNET) y Gobierno de Cantabria (Red Vigía) el acceso a sus bases de datos instrumentales.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABASCAL, A.J.; CASTANEDO, S.; MEDINA, R. (2010): GOS, un reanálisis de marea meteorológica de 60 años de alta resolución para el sur de Europa. I Encuentro Oceanografía Física Española, Barcelona (España).
- BOOIJ, N.; RIS, R.C.; HOLTHUIJSEN, L.H. (1999): A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104(4). pp 7649-7666. doi: 10.1029/98JC026222.
- CAMUS, P.; MÉNDEZ, F.J.; MEDINA, R.; COFIÑO, A.S. (2011): Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 58(6), pp 453-462. doi:10.1016/j.coastaleng.2011.02.003.
- CAMUS, P.; MÉNDEZ, F.J.; MEDINA, R. (2011): A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering*. 58(9), pp 851-862. doi:10.1016/j.coastaleng.2011.05.007.
- FRANKE, R. (1982): Scattered data interpolation: test of some methods. *Math. Comp.*, 38, pp 181-200.
- HASSELMAN, K. (1962): On the non-linear energy transfer in gravity-wave spectrum 1. *General Theory*, *J. Fluid Mech.* 12, 481-500.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS,

- W.; JANOWIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; JENNE, R. AND JOSEPH, D. (1996): The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77, 437-470.
- KENNARD, R.W.; STONE, L.A. (1969): Computer aided design experiments. *Technometrics*, 11, 137-148.
- LARA J. L., MARTIN F. L., LOSADA I. J. (2002): Análisis experimental de ondas largas en la bocana del puerto de Gijón. *Ingeniería del agua Vol. 9 N° 4*.
- LONGUET-HIGGINS M.S., STEWART R.W. (1962): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with applications to surf beats. *J. Fluid Mech*, page 481504.
- MENÉNDEZ, M., TOMÁS, A., CAMÚS, P., GARCÍA-DIEZ, M., FITA, L., FERNANDEZ, J., MÉNDEZ, F.J., LOSADA, I.J. (2011): A methodology to evaluate regional-scale offshore wind energy resources. *Oceans 2011. IEEE. Spain. ISBN: 978-1-4577-0086-6*.
- MÍNGUEZ, R.; ESPEJO, A.; TOMÁS, A.; MÉNDEZ, F.J.; LOSADA, I.J. (2011): Directional Calibration of Wave Reanalysis Databases using Instrumental Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28. doi: 10.1175/JTECH-D-11-00008.1
- MÍNGUEZ, R.; TOMÁS, A.; MÉNDEZ, F.J.; MEDINA, R. (2012): Mixed extreme wave climate model for reanalysis data bases. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* (enviado).
- OKIHIRO M.; GUZA R.T. (1992): Seymour R. J. Bound Infragravity Waves, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, No. C7. Pages 11453-11469.
- OTTESEN HANSEN N.-E. (1978): Long period waves in natural wave trains. *Inst. Hydrodyn. And Hydraulic Engrg., Tech. Univ. Denmark, Prog. Rep. 46*, pp. 13-24.
- REGUERO BG, A.J. ABASCAL, M. MENÉNDEZ, S. CASTANEDO, F.J. MÉNDEZ, R. MEDINA, I.J. LOSADA (2011): GOW y GOS: Reanálisis de oleaje y marea meteorológica en la costa española. *XI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Las Palmas de Gran Canaria, 2011*.
- ROM 0.0, 2001; Procedimiento general y Bases de Cálculo. *Recomendaciones Obras Marítimas. Puertos del Estado. 207 pp ISBN: 84-88975-30-9. [http://www.puertos.es/es/programa\\_rom](http://www.puertos.es/es/programa_rom)*
- ROM 0.3-91, 1992; Acciones Climáticas I: Oleaje. *Recomendaciones Obras Marítimas. Puertos del Estado. 77 pp. [http://www.puertos.es/es/programa\\_rom](http://www.puertos.es/es/programa_rom)*
- SAND S.E. (1982) Long waves in directional seas, *Coastal Eng.* 6(3), 195-208, 1982.
- SHCHEPETKIN, A.F., McWILLIAMS, J.C. (2005): Regional Ocean Model System: a split-explicit ocean model with a freesurface and topography-following vertical coordinate. *Ocean Modelling* 9, 347-404.
- SKAMAROCK, W.C., KLEMP, J.B., DUDHIA, J., GILL D.O., BARKER D.M., DUDA, M.G., HUANG, X.-Y., WANG, W., POWERS, J.G. (2008): A description of the Advanced Research WRF Version 3. (Available at: [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw\\_v3.pdf](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf))
- TOLMAN, H.L. (2002): User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 222, 139 pp. [http://polar.wmb.noaa.gov/mmab/papers/tn222/MMAB\\_222.pdf](http://polar.wmb.noaa.gov/mmab/papers/tn222/MMAB_222.pdf)

