

## DISCUSIÓN

### Observaciones disponibles

A pesar de que la costa catalana cuenta con una buena red de boyas, sólo una de estas es direccional. Esto limitó el estudio ya que la mejor forma de caracterizar el oleaje es mediante su espectro direccional; además la variable que se predice en los modelos es el espectro, por lo que el uso de parámetros integrados puede dar lugar a malas interpretaciones.

La definición de las condiciones en el área de estudio como limitada por *fetch* o por tiempo, además de la condición de equilibrio si es que se presenta, es importante para la identificación de las fuentes de error de los modelos. *Bourassa et al. (2001)* realizan un estudio sobre el equilibrio entre las olas y el viento, en el que recomienda el acoplamiento de un modelo de evolución de oleaje con parametrizaciones del estado del mar. Sin embargo, generalizar las condiciones de tormenta en el Mediterráneo como limitadas por *fetch* o tiempo es una tarea difícil, que mejoraría la simulación de alguna tormenta en particular pero que posiblemente limitaría un sistema operativo de predicción de oleaje. Las parametrizaciones deben mejorar las predicciones de los picos de tormenta donde son observados los mayores errores.

Al analizar los datos medidos y las posiciones de las boyas podemos encontrar oleaje limitado por duración o por *fetch*. Las predicciones para los casos de *fetch* limitados serán influenciadas por la resolución espacial mientras que los casos de tiempo limitado serán restringidas por errores del viento y de los propios modelos de oleaje. Las variaciones en el tratamiento de datos puede dar lugar a errores en los resultados y en las conclusiones obtenidas al ser comparadas las mediciones y predicciones. Sin embargo el método utilizado hasta la fecha para realizar las estimaciones de parámetros integrados se mostró fiable. Será necesario realizar un análisis de las estimas de los espectros escalares para considerar la variabilidad que mostró el programa con los que se obtuvieron.

De las tres direcciones predominantes de las tormentas, las de Levante son las más intensas y duraderas, en estas condiciones, en algunos casos, se podría encontrar oleaje limitado por duración (igual que en condiciones de sur). Para el Mestral, las condiciones se encuentran limitadas por *fetch* pero son condiciones de viento muy intenso que producen crecimiento del oleaje de hasta 1 m/hr. Sin embargo, no se pueden estimar curvas de crecimiento de *fetch* limitado por la falta de medidas de viento sobre el mar. En las tormentas de Mestral es donde se ve claramente una relación directa entre la dirección del viento y la del oleaje, así como de la velocidad y altura de ola. El desvío de 10 grados entre las direcciones del viento y oleaje puede deberse a los efectos orográficos y

variaciones por el muestreo. Si se encontrara esta diferencia en el viento sobre el mar indicara una rotación del vector del estrés del viento como lo han propuesto varios autores, y cuyo proceso altera sus interacciones. Estas tormentas se pueden desarrollar rápidamente y las condiciones de oleaje pueden alcanzar, en breve, su condición de equilibrio de *fetch* limitado. Estas tormentas son, por lo tanto, un riesgo principalmente para la navegación. Las variaciones encontradas en los periodo pico y medio se deben a la ocurrencia esporádica de *swell* que hace que la disminución del periodo después de los picos de las tormentas se reduzca más lentamente que la altura de ola.

La dispersión direccional pico se encontró entre 20 y 40 grados, rango común para un *swell*, aunque *Pettersson et al. (2003)* reportaron un rango entre 20 y 60 grados para el golfo de León. Esto fue debido a que en sus mediciones todos sus datos corresponden a tormenta de Mestral por lo que sus mediciones siempre registraron oleaje “joven”, influenciado por el viento y con mayor dispersión direccional. Los mismos autores reportaron espectros bimodales con similar energía para condiciones de Mestral predominante, lo que muestra la influencia del *swell* en esta zona a pesar de unas condiciones claras de viento de Mestral.

### **Tormentas de estudio**

Las tormentas de Noviembre 2001 y Marzo-Abril 2002 son una clara evidencia de que en el Mediterráneo, a pesar de ser un mar de “pequeña” escala, se pueden desarrollar condiciones atmosféricas que produzcan intensos temporales del mar que pueden afectar las costas catalanas. Es claro que las condiciones de más importancia para la costa catalana tanto por su intensidad como por su impacto a la zona costera son los vientos de Levante.

En estas condiciones la separación de un espectro escalar entre *sea* y *swell* no es algo trivial, sin embargo el uso de espectros direccionales, junto con la información del viento, permitió identificar los dos sistemas de olas predominantes en los registros. De estos resultados se muestra que las separaciones de los picos posibles utilizando espectros escalares no son adecuadas y pueden dar lugar a errores, por lo que es importante incluir dentro de dichos criterios la información direccional si es posible.

El alto número de espectros bimodales muestra importancia de considerarlos en procesos de transferencia de energía del viento al océano, y en el proceso de disipación. *Geernaert et al. (1993)* sugiere que el vector de tensión no puede ser siempre paralelo a la dirección media del viento. La energía para el crecimiento de las olas es proporcionada por diferentes flujos en la capa límite atmosférica sobre la superficie. Recientemente se ha mostrado que dichos flujos son también alterados por olas de gravedad de superficie subyacente; por lo tanto, ambos están relacionados. En consecuencia, la dirección del oleaje está relacionada con la dirección de la tensión del viento, aunque a veces la tensión del viento gira, por ejemplo, con la dirección de un *swell* oblicuo (*Rieder et al., 1994*).

Debido a las condiciones donde se presenta una combinación de *sea* y *swell*, y las dificultades para obtener viento sobre o cercano a la costa, el parámetro de la edad del oleaje es una buena medida cualitativa del estado del mar pero no cuantitativa. El uso del viento sobre tierra puede producir una sistemática subestimación del viento real (sobre la boya) y por lo tanto una sobrestimación de la edad del oleaje. En la descripción del estado del mar es importante tener en cuenta los diferentes sistemas de olas y para esto, la mejor manera es mediante el espectro. Estimando la edad del oleaje para el espectro, se ha podido observar la evolución a lo largo de los temporales. Ya que se ha identificado la presencia espectros bimodales es necesario considerarlos en la predicción tanto en las formulaciones de los procesos físicos como en las escalas necesarias.

Las tormentas de Noviembre 2001 y Marzo Abril 2002 se generaron por condiciones atmosféricas similares, por lo que una alarma indirecta para tormentas de oleaje sería identificar una serie de parámetros atmosféricos (baja presión, radio, gradiente) en el Mediterráneo que permitieran aumentar el tiempo de predicción de eventos de este tipo. Actualmente, el sistema operativo puede predecir a + 42 horas, lo que en muchas ocasiones no es tiempo suficiente para la mejor gestión de las actividades afectadas.

### **Anchura y edad del oleaje**

Teóricamente un oleaje con la frecuencia pico baja está asociado a un oleaje *swell*, y en consecuencia debería tener un ancho espectral bajo. Si la frecuencia pico fuera alta, el oleaje debería estar asociado a un tipo *sea* y en consecuencia la anchura espectral sería alta. De la información obtenida y analizada en este trabajo se destaca la observación de que cuanto más alta es la frecuencia pico, más baja es la anchura espectral. Esto contradice en parte la teoría previa sobre la anchura espectral, que no tenía en cuenta la existencia de la bimodalidad. Se observó que el *sea* puro se encuentra entre valores de anchura espectral de 0.5 a 0.75 y no sobre valores de 0.8 como se había previsto en la teoría inicial. Los valores de  $\epsilon$  tomados no se adecúan a la teoría previa aunque se pueden utilizar para definir la unimodalidad o la bimodalidad en función del rango de valores que poseen, situación que no se había contemplado previamente.

Ya que  $\epsilon$  muestra una cierta distinción de la uni o bimodalidad de los registros, se puede relacionar con algún parámetro que tenga en cuenta el tipo de oleaje para establecer una división del oleaje que nos sirva de criterio para diferenciar el oleaje *sea* o *swell*. En este sentido parece correcto establecer una relación  $\epsilon$  – edad. Paralelamente se puede establecer un criterio *sea* – *swell* mediante la edad del oleaje a lo largo de cada registro que se han obtenido. De la relación encontrada entre  $\epsilon$  y la edad del oleaje se han propuesto modificaciones en el coeficiente de arrastre para así, considerar la anchura espectral como indicador de la “complejidad” del estado del mar. Este indicador debe de ser reconsiderado para incluir las propiedades direccionales del espectro como la dispersión direccional, la dirección pico del *sea* y *swell* y su relación con la dirección del viento.

*Makin (2003)* propone una nueva parametrización del coeficiente de arrastre en base a la velocidad del viento, la edad de las olas y la profundidad, aunque para estos casos no toma en cuenta las estructuras bimodales y sólo es aplicable para oleaje considerado como *sea*. *Vickers y Mahrt (1997)* muestran que el coeficiente de arrastre puede verse aumentado en presencia de espectros multimodales y los datos experimentales de RASEX, sugieren que una buena parte de la variabilidad no explicada por la edad de las olas es proporcional a la anchura espectral. Esto concuerda con lo encontrado en esta investigación y soporta la mejora del coeficiente de arrastre utilizando este parámetro.

En condiciones de tormenta producidas por bajas presiones generando formas ciclónicas se pueden encontrar olas viajando en diferentes direcciones al viento por lo que las formulaciones de estrés que no consideren esto, pueden estar sujetas a considerables errores. En estas condiciones una mala resolución espacial de los modelos produce errores principalmente en la dirección ya que las variaciones espaciales de dirección predominante, debido a la forma ciclónica, son altas.

La formulación de Komen se basa en una relación de coseno de la diferencia de las direcciones entre el viento y el oleaje. Sin embargo, se ha reportado (*Makin y Kudryavtsev, 2002*) que el crecimiento de olas “lentas” se da por una relación de  $\cos^2$ . En estos casos las formulaciones podrían diferir por un factor de tres. Queda claro que la direccionalidad de las olas es por lo tanto un factor importante durante el crecimiento del oleaje, por esto se podría considerar además de la anchura espectral la dispersión direccional del espectro en la formulación del coeficiente de arrastre.

### **Validación de vientos**

Se ha mostrado un primer estudio de validación de los modelos MASS y ARPEGE para el Mediterráneo, utilizando mediciones de estaciones costeras y datos de los modelos que funcionan de entrada para los modelos de oleaje. Un punto importante a considerar es el hecho de que la validación sólo se ha realizado en la zona costera, donde probablemente se produce mayor variabilidad del viento, esto podría aparentar mayores errores de los modelos de viento.

Hay que tener en cuenta que las estaciones utilizadas aquí fueron seleccionadas por su cercanía a las boyas y no por su cercanía a la costa, por lo que sería necesario conocer la situación local de la estación para realizar un análisis más concluyente.

El hecho de que los errores del modelo MASS sean de sobrepredicción es un punto interesante. Si este mismo comportamiento fuera observado para la predicción del viento sobre el mar, esto implicaría una mala parametrización de la transferencia de energía viento - superficie de mar, ya que en su estado actual el WAM (para las dos tormentas evaluadas) produce una

subestimación. Si este fuera el caso, la mejora de los campos de viento produciría una mejora en las predicciones del SWAN que actualmente realiza sobrepredicciones.

Definitivamente es indispensable contar con información de viento para mar abierto para completar la validación de los modelos atmosféricos y su efecto en los modelos de oleaje. Actualmente, se ha iniciado la investigación y validación utilizando datos de Quikscat (SeaWinds) los cuales dan 2 campos de vientos al día para el Mediterráneo con una resolución espacial de 0.25 grados. Los análisis preliminares muestran la tendencia general a la subestimación, especialmente en los picos de tormenta donde los datos de satélite alcanzan más de 40 m/s para la tormenta de Noviembre. Este estudio se encuentra en desarrollo y sus resultados darán lugar a posibles ajustes de los campos de vientos. Dentro de esta misma línea se tiene que considerar el empleo de datos de oleaje de satélite para el Mediterráneo, tanto para evaluar los modelos, como para estudiar el efecto de su asimilación como condiciones iniciales, que como se ha mostrado son muy importantes para una buena predicción.

### **Dominio idealizado**

A pesar de algunos antecedentes de predicción de oleaje en el Mediterráneo, aún existen incertidumbres sobre los métodos, modelos, validación y procesos importantes para una buena predicción. La transmisión de energía de oleaje al viento aun son inciertas y más aún en mares complejos como los que se han mostrado aquí en el Mediterráneo. La variabilidad del coeficiente de arrastre muestra una de las variables más importantes y menos estudiadas en relación a su impacto en el modelado del oleaje. Es claro que las condiciones limitadas de tiempo y *fetch*, la variabilidad temporal y espacial de los vientos además de la interacción de los vientos con la costa, complican las mejoras en las predicciones de oleaje en esta zona.

Se ha mostrado el diferente comportamiento de los modelos en un dominio idealizado, considerado como una fase preliminar, pero de suma importancia para poder evaluar su aplicación en casos reales. Se demostraron variaciones espaciales y temporales de los parámetros integrados. Es importante considerar que al utilizar casos reales se pueden encontrar situaciones en las que los modelos reaccionaran de forma diferente (aumento o disminución de la velocidad del viento, cambio de dirección del viento) por lo que las diferencias encontradas en casos reales no deben de ser atribuidas exclusivamente a las variaciones encontradas en el dominio idealizado. Se han demostrado en esta sección, diferencias importantes entre modelos, que seguramente serán encontradas en el Mediterráneo debido a las condiciones utilizadas, por lo que deben de ser tomadas en cuenta como una herramienta en la interpretación de los resultados.

Las diferencias de altura de ola entre el WAM y SWAN para el dominio idealizado muestran una media de 30 cm que corresponde aproximadamente al 35%. Esto, junto con las gráficas de crecimiento de oleaje en tiempo, ilustran como el SWAN predeciría mayor altura de ola para

condiciones “típicas” del Mediterráneo con *fetch* menores a 500 km. *Monbaliu et al (2000)* reporta crecimiento de oleaje respecto al *fetch* para velocidades de viento de 30 m/s en las que el WAM sobrestima altura de ola respecto al CEM. Sin embargo, aquí hemos mostrado una subestimación para vientos de 10 m/s.

La utilización de viento de 10 m/s fue debido a que es una medida de viento de tormenta común en la costa catalana pero no extrema. Otro punto importante a considerar es que las evaluaciones han sido realizadas con parámetros integrados y no con la forma y evolución espectral. Es recomendable realizar este análisis en futuros trabajos, a pesar de que en la mayor parte de la bibliografía y estado del arte la evaluación de los modelos se realiza mediante parámetros integrados, en realidad, los modelos predicen los espectros discretizados en dirección y frecuencia, por lo que una mejora considerable en la evolución de los modelos es lograr no sólo predecir los parámetros integrados, sino también las formas espectrales. Desafortunadamente, existe una gran desviación entre datos de condiciones limitadas por *fetch*; por lo que un modelo que se ajusta a una curva, puede conflictuar diferentes campañas. El mejor método para ajustar un modelo es hacerlo con eventos bien definidos y específicos, donde se tenga información detallada de las condiciones ambientales.

Si asumimos que existe una asíntota donde el crecimiento del oleaje se reduce dramáticamente y que es representada por el espectro Pierson-Moskowitz, los modelos numéricos son incorrectos porque alcanzan este límite muy lento. Este es el caso para vientos muy intensos. Sin embargo, para vientos de alrededor 10 m/s el tiempo y el *fetch* requerido por los modelos para alcanzar al asíntota no está en clara contradicción con las mediciones de Moskowitz.

### **Análisis de sensibilidad.**

Con la variabilidad en el estado del arte, tanto en teorías como coeficientes y procesos, es claro que su selección para su aplicación en casos reales no es trivial. Hay que realizar un estudio detallado de la zona, sus características y procesos que podrían ser importantes.

Es importante recalcar que el objetivo de esta sección fue el de demostrar la importancia (sensibilidad) de diferentes parámetros en la predicción del oleaje y no la sensibilidad de los modelos. Es probable que a pesar de que los procesos y coeficientes se consideren de la misma manera en cada modelo, al variarlos, los modelos respondan de manera similar pero no idéntica. Por otro lado existen una serie de formulaciones para el coeficiente de arrastre debido a la gran variabilidad que se ha presentado en diferentes campañas de campo al rededor del mundo. Sin embargo, no existe referencia de su utilización y sensibilidad al ser utilizadas en los modelos espectrales de predicción de oleaje. Aquí se ha demostrado una sensibilidad de 10% aproximadamente para la altura de ola. Esta sensibilidad puede explicar parte de los errores.

La variación en los resultados por la formulación al aporte de viento, sugiere la necesidad de una calibración a la zona de estudio pues la variación en la altura de ola fue de más del 20 % siendo mayor a la variabilidad que produjeron las diferentes formulaciones del coeficiente de arrastre. La formulación de Janssen se basa en el cálculo de la velocidad de fricción por interacciones y la de Komen por la utilización de un coeficiente de arrastre en función del viento. Por ello, debería de esperarse que la teoría de Janssen fuera más precisa. Sin embargo, se ha demostrado que con el modelo SWAN la teoría de Komen es más estable y produce mejores resultados. Por esto, una mejora en base a esta formulación produciría resultados mas fiables utilizando este modelo.

*Young y Eldeberky (1998)* reportan que el efecto de las triadas puede ser importante, no sólo en aguas con asomeramiento, sino también en profundidades intermedias. Este hecho podría ser de interés para las predicciones de oleaje en la posición de las boyas en la costa catalana, ya que se encuentran a profundidades de 50 m, y en condiciones extremas, se podrían considerar profundidades intermedias. Sin embargo, aquí se a mostrado que el efecto de este proceso es mínimo, y para ser de importancia deben de presentarse condiciones de profundidad intermedia sobre *fetch* largos. Para la costa catalana donde la plataforma continental es muy angosta este efecto no es relevante para la predicción por lo que el cálculo de este proceso sólo consumirá más tiempo de cálculo y los resultados no serán mejorados. La variabilidad debida a la ausencia o presencia de interacción de ondas en triadas fue poca (menor 10%) y sólo en *fetch* largos con vientos intensos por lo que se considera que para el Mediterráneo y las posiciones de las boyas, no será un proceso determinante.

La rotura mostró un fuerte efecto sobre la altura significativa. Varios autores han mencionado que este es el proceso menos conocido, por lo que puede ser utilizado como parámetro de calibración, sin embargo, la rotura afecta de manera diferente a la forma del espectro según las frecuencias. Así que la calibración se puede realizar teniendo en cuenta la altura de ola, pero hay que considerar que se debe de utilizar la forma de los espectros y no solamente la altura.

La utilización de la anchura espectral como variable dentro del cálculo del coeficiente de arrastre puede dar lugar a mejoras considerables, pues con este método pueden mejorar los errores producidos por la variabilidad del viento natural y la variabilidad perdida debido a la resolución temporal utilizada. Además, la presencia de espectros bimodales resaltan la importancia de considerar esto en los procesos de transferencia y disipación de energía. Sin embargo, es importante recordar que no siempre que modifiquemos un termino físico para mejorar las predicciones significa que se mejore el proceso físico. El modelo SWAN presenta sobrestimación, pero altas correlaciones con la anchura espectral de la boya, por lo que es necesario realizar un ajuste para poder utilizar las conclusiones obtenidas de los datos de la boya para mejorar las predicciones. Sin embargo el parámetro en el modelo se muestra estable, por lo que se podría utilizar con fiabilidad.

### Simulación de tormentas

Es importante mencionar que una de las motivaciones de este trabajo ha sido la de mejorar el conocimiento y la predicción operativa del oleaje, por lo que hay que recordar que en este trabajo se han utilizado los modelos para realizar experimentos desde un punto de vista operacional: simulación de eventos específicos y el uso de métodos numéricamente económicos.

Los resultados de las distribuciones espaciales confirman la complejidad del sistema océano - atmósfera y sugieren la utilización de sensores remotos para validar y forzar los modelos atmosféricos y de oleaje. Los datos de satélite QuikSCAT muestran (de manera preliminar) que los modelos no simulan los valores máximos de viento por lo que podríamos decir que suavizan el campo disminuyendo máximos de velocidad en los picos de tormenta coincidiendo con la tendencia general de los modelos de oleaje a subestimar los picos de tormenta. Las estadísticas no mostraron una tendencia clara al utilizar los diferentes modelos de viento para generar el oleaje en las boyas costeras. Sin embargo, la distribución espacial muestra variaciones importantes en viento y oleaje que pueden ser trasdentes si las predicciones se utilizan con fines de navegación. Para esto último, lo ideal sería tener mediciones de oleaje direccional en zonas “no costeras” del mediterráneo. Hasta ahora hemos podido cuantificar la calidad de las predicciones de oleaje costero pero no las predicciones *offshore*.

Los resultados de distribuciones espaciales en la malla anidada muestran resultados muy interesantes y relevantes, especialmente para la predicción operativa. La malla gruesa genera un oleaje con sus respectivos espectros, que son proporcionados a la malla media mediante las condiciones de contorno que se forzan cada 6 horas. Al mismo tiempo, se utilizan vientos de la malla anidada, condiciones muy diferentes a las que generaron las condiciones de contorno, tanto en dirección como intensidad, esto hace que el espectro “viejo” se relaje y se genere uno nuevo con las nuevas condiciones. Esto genera (principalmente en el WAM) condiciones muy inestables que tienden a subestimar la altura de ola, se muestra que la utilización de diferentes vientos en el anidamiento, a pesar de ser vientos “mejorados” no necesariamente mejoran la predicción de oleaje. El SWAN, que se ha comprobado ser un modelo mas “rápido” para captar características en *fetch* cortos, resultó menos afectado al anidamiento con vientos “mejorados”.

Una observación destacable es la tendencia general del WAM a subestimar altura de ola y del SWAN a sobrestimarla mientras que lo contrario es observado para el periodo medio. Esto sugiere un error sistemático entre los modelos que se ve claramente en la predicción de los espectros. El SWAN utiliza una frecuencia de corte mayor que el WAM por lo que presentara energía en esa zona, además se ha mostrado una sobrestimación de energía en las altas frecuencias. Todo esto produce una subestimación del periodo medio y a su vez una sobrestimación de la energía total (y por lo tanto de altura significativa).



El análisis de los espectros predichos por los modelos dio resultados interesantes. A pesar de que el SWAN mostró errores menores al WAM, los espectros escalares del WAM parecieron ajustarse mejor al registrado por la boya. El SWAN mostró una tendencia de sobrestimar la energía en las altas frecuencias, hecho que “balancea” la subestimación del pico del espectro. Estos errores no son notables al comparar solamente los parámetros integrados. Ambos modelos llegan a captar la bimodalidad de algunos registros especialmente los que se presentan después de los picos de las tormentas. Sin embargo, es evidente el error sistemático del SWAN a subestimar bajas frecuencias y a sobrestimar altas. Esto se debe, en parte, al hecho de que la disipación por rotura dependa del parámetro integrado de la pendiente de la ola.

*Monbaliu et al. (2000)* reportan que el WAM es numéricamente estable para *fetch* limitados con un paso de tiempo pequeño, por lo que los problemas del WAM estarán relacionados a problemas numéricos. Sin embargo para casos en el Mediterráneo noroeste donde algunas tormentas severas presentan una corta duración, el WAM muestra problemas de subestimación que puede ser explicado por la demora del crecimiento del oleaje, hecho que se vuelve crítico para casos de duración limitada. *Bauer y Weisse (2000)* y *Oliveira (1997)* proponen otra explicación para las subestimaciones sistemáticas del WAM, y esta es debida a la subestimación de las condiciones de viento. Sin embargo esta subestimación no es tan evidente en el SWAN por lo que los errores deben de producirse por una compleja situación de vientos intensos con dirección muy variable.

Un hecho interesante es que las predicciones del WAM fueron más precisas para el segundo pico de la tormenta de noviembre, donde se presenta una gran variabilidad del viento en la estación meteorológica, pero donde se presentan menos espectros bimodales. A pesar de que la edad del oleaje no mostró correlaciones con los errores de los modelos, el análisis espectral mostró que para espectros más complejos los modelos tienen más errores.

Las pruebas realizadas en el canal ficticio no muestran claramente la rapidez del crecimiento del oleaje, ya que la condición inicial se ajustó con la velocidad del viento. Sin embargo, en las tormentas estudiadas la pendiente de crecimiento y de relajación fueron simuladas correctamente, mostrando errores generalmente en la magnitud del pico de tormenta, lo que vuelve a sugerir una subestimación del aporte del viento, errores en los campos de viento o sobrestimación de rotura.

Para los modelos de predicción se detecta en general una mala predicción del oleaje *sea*, sobre todo en relación a su disposición del rango de frecuencias, y esto puede ser debido, en parte, a la interacción *sea-swell*, la desviación de la dirección del viento y la bimodalidad.

El *swell* puede afectar al *sea* refractándolo, y en consecuencia le transmitirá menos energía al desplazado *sea*. Esto puede hacer que modelos como el WAM y el SWAN, que tienen como hipótesis que la dirección del viento y la del oleaje *sea* es la misma, sufran un error en la predicción debido a que no tienen en cuenta la interacción con el *swell*. Este cambio de dirección puede

provocar que al no transmitir toda la energía esperada por el viento al oleaje *sea*, realmente este oleaje no se sitúe en las frecuencias esperadas. Se encontraron situaciones donde la progresiva desviación del viento provocó que el oleaje *sea* no responda inmediatamente.

Estos conceptos también están relacionados con el error que se produce al analizar una única dirección del oleaje, la consideración de una sola dirección por registro da una idea errónea. Además debe tenerse en cuenta que tanto los modelos de generación como los paramétricos no tienen en cuenta fenómenos como la dispersión direccional del oleaje *sea* en frecuencias dos veces la frecuencia pico: es necesario observar que la densidad de energía espectral de las frecuencias altas es poca comparada con la aportación de la región alrededor del pico. En contraste a lo reportado por *Wang y Hwang (2001)* y *Ewans (1998)*, no se encontraron abundante espectros con características bimodales en altas frecuencias. Los espectros direccionales han mostrado la bimodalidad en altas frecuencias en sólo algunos casos, pero por las características de la boya estas están limitadas para medir energía en altas frecuencias, lo que explica la ausencia de dicha estructura en una buena parte de los datos.

El modelo MASS sí reproduce el viento local de Mestral en el delta del Ebro (sobre tierra). Sin embargo es interesante notar que dicho patrón se modifica rápidamente sobre el mar, lo que hace que con una baja resolución espacial se pierda dicha característica y se pierda la simulación de la bimodalidad observada durante esta tormenta en Tortosa.

Los datos de las boyas presentaron una cantidad significativa de errores durante los momentos más intensos de las tormentas, por lo que los resultados y conclusiones aquí presentadas derivados de estos deben de tomarse con precaución. Sin embargo, dan una muestra clara de la situación y trazan una línea de trabajo para la mejor caracterización, y predicción de oleaje en la costa catalana. También es necesario realizar un estudio espectral espacial ya que en este trabajo sólo se han utilizado espectros direccionales de Tortosa. Un análisis espacial de los espectros ayudará al entendimiento de la evolución de las tormentas y la respuesta del oleaje a eventos extremos.

Los resultados encontrados por los modelos de oleaje utilizando el ARPEGE muestran la importancia de la energía generada localmente en la zona costera donde se ubican las boyas costeras. El hecho de que se produzca una mayor altura en el mar “abierto” y una menor en la costa muestra la importancia de la resolución y de la generación en la zona costera.

Los errores, en la predicción de los espectros pueden parecer insignificantes para una predicción operacional donde los parámetros que se utilizan son la altura de ola, el periodo medio o pico y la dirección. Sin embargo, como ya se ha mencionado en el estado del arte, la adecuada predicción del espectro puede ser muy importante. Para los casos de múltiples anidamientos, y especialmente al incluir modelos tipo bousinesq, los cuales requieren como entrada un espectro o serie de tiempo, la predicción puede ser importante para la determinación de las condiciones en

puertos. Muchos modelos ahora son espectrales, eso quiere decir que requieren como entrada un espectro, el cual muchas veces por la falta de datos proviene de modelos de generación de oleaje.

La predicción de oleaje en Rosas está limitada por su posición, si bien es cierto que en evento de tormenta esta localidad es bien predicha debido a que el aporte principal es debido al *swell* de levante el cual es “independiente” de las particularidades de la zona, en condiciones en las que exista oleaje local la predicción puede mostrar errores considerables.

Desde el punto de vista operativo, el modelo SWAN muestra mejores predicciones. Sin embargo, la sobrepredicción de calmas y los errores en las formas espectrales comparadas con el WAM, hacen que requiera una reconsideración y una mejora.

Además de la sensibilidad en los modelos en casos idealizados a procesos físicos, cuando aplicamos estos modelos a casos reales, nos encontramos con situaciones muy variables en espacio y tiempo. Un mismo modelo puede producir subestimaciones en una boya y sobrestimaciones en otra. Esto hace difícil la identificación de la procedencia de los errores, y es necesario realizar mediciones de los procesos físicos y sus constantes para así poder evaluar la predicción de cada proceso por sí solo. Por el otro lado existen una serie de campañas de campo con esa intención pero la variabilidad en las medidas producen nuevas teorías y formulaciones. *Liu et al (2002)* mencionan la “teoría” de que los modelos espectrales han llegado a un límite por los supuestos que se toman en esta teoría. Sin embargo, como ya se ha mencionado, las validaciones que se hacen de estos modelos suelen ser utilizando parámetros integrados y pocas veces se utiliza el espectro frecuencial y mucho menos los espectros direccionales. Un primer paso ha sido evaluar estos modelos desde el punto de vista espectral, identificar sus tendencias y sus posibles soluciones. El trabajo aquí realizado se limita a los datos de dos tormentas intensas en la costa catalana. Será necesario realizar estos análisis con una cantidad de datos considerables que den más soporte a lo aquí sugerido. Además es necesario utilizar condiciones de calma, y una serie de tormentas con diferentes características (de dirección por ejemplo). Habiendo identificado los procesos importantes en la predicción de oleaje, los importantes en la costa catalana y sus efectos en la forma de los espectros, se podrá producir un aporte muy importante en el modelado del oleaje.

### **Análisis estadístico de un periodo invernal**

Se ha encontrado interesante que el comportamiento de los modelos utilizando  $H_s$  como parámetro de evaluación varía con la situación. El modelo SWAN tiende a sobrestimar calmas, pero en general se comporta mejor en las tormentas y predice mejor sus picos. Sin embargo sería necesario tomar en cuenta los espectros para poder caracterizar adecuadamente el comportamiento de los modelos. Es importante extender estos tipos de análisis sobre largas series de tiempo que permitan aumentar la validez y el conocimiento de las condiciones donde los modelos se comportan mejor o peor, y así lograr la identificación de los problemas y sus posibles soluciones.

El hecho de que el WAM sobrestime y subestime, puede hacer que el análisis de toda la serie de tiempo (Bias) se sesgue. En general el SWAN mostró un mejor comportamiento en tormentas pero no en periodos de calma. El WAM subestimó los eventos de tormenta, por esto sería recomendable realizar una estadística con series de tiempo pasadas, caracterizadas por tormentas, con el fin de estudiar los porcentajes del WAM en los que no las detecta. Será recomendable también mantener el SWAN en operativo para seguir estudiando su comportamiento en el Mediterráneo contrastado con el WAM y estudiar los porcentajes, que por sus características de sobrestimación de Hs, podría generar falsas alarmas.

### **Efecto de islas**

A pesar de que algunos autores han enfatizado en el efecto de las islas en la predicción de oleaje, este efecto sólo se presenta de manera local en escalas espaciales pequeñas donde la sombra y la difracción son procesos relevantes. Las islas en el Mediterráneo son barreras definidas, que limitan aún más el *fetch*, pero no se presentan como barreras generadoras de “sombras”. Se identificó el problema numérico de propagación de energía entre nodos de la malla cercanos a las islas para ciertas condiciones. El error se logró eliminar con la rotación de la discretización direccional. Esta modificación, a pesar de ser muy importante para la predicción operacional, no tiene un impacto importante en cuanto a las validaciones en la costa catalana. El aumento de la resolución en frecuencias y direcciones definitivamente aumenta la precisión de los modelos pero es una acción que debe de balancearse con la capacidad de cálculo, ya que para modelos operacionales muchas veces este factor es limitante.

### **Análisis del anidamiento**

Con los resultados de las secciones 5.4 y 5.5 es evidente que el método de anidamiento es clave para el adecuado acercamiento del oleaje a la costa, aumentando la resolución espacial (*downscaling*). Se mostró que el anidamiento en la malla media con vientos de la malla gruesa producía una mejora en la predicción de Hs en el pico de las tormentas, pero la utilización de vientos “mejorados” mediante vientos anidados, aumentó los errores.

El anidamiento de mallas de oleaje utilizando anidamientos en el modelo de vientos no mostró mejora e incluso los resultados fueron de peor calidad que los obtenidos con la malla gruesa. Esto muestra la sensibilidad de los modelos a las condiciones de contorno, especialmente en el WAM. Las mallas de viento mostraron grandes diferencias que producen que las condiciones de contorno en la malla anidada se pierdan, y en cambio se generen unas nuevas con los nuevos vientos. Con la sensibilidad de los modelos de oleaje a las variaciones del viento, el anidamiento utilizando mallas anidadas de viento no es recomendable a esta escala. Algunos autores han mostrado que es posible realizar anidamientos con grandes saltos de resolución por lo que una solución factible para la costa catalana sería realizar la predicción con la malla gruesa y una malla mucho más fina y cercana a la costa con vientos anidados, pero en una zona menor a la que se utiliza actualmente.

El anidamiento en una malla fina no mejoró la predicción del pico de la tormenta pero si del crecimiento y la relajación donde tienen mayor influencia las condiciones locales. Sin embargo, el uso de condiciones medidas costeras produjo una subestimación, lo que ilustra la posibilidad de que en el mar se encuentren velocidades considerablemente mayores a las encontradas en tierra.

### **Condiciones iniciales**

La buena definición de las condiciones iniciales produce una mejora considerable en las predicciones de un centro operativo. Esto sugiere la posibilidad de realizar asimilación de datos, de satélite y/o radar por ejemplo. Sin embargo hay que tener varias consideraciones previas. La asimilación de observaciones es esencial para hacer más precisa la predicción de *swell* de bajas frecuencias. La asimilación de datos de satélite se puede ver limitada debido a la falta de continuidad de los datos, específicamente para el Mediterráneo, por su tamaño y las islas la información puede ser muy escasa. Otro problema con los datos de satélite es que algunos (como el SAR) requieren información del mismo modelo para la extracción de la información.

