

7.- Conclusiones generales y perspectivas futuras

7.1.- Conclusiones generales

A continuación se presentan algunas conclusiones generales obtenidas a partir del análisis de los resultados, tanto experimentales como numéricos, de las campañas de campo Delta'93, Delta'96 y Egmond. Las conclusiones se agrupan en 3 conjuntos distintos: Diseño experimental, Observaciones realizadas y Observaciones vs. Modelado.

7.1.1.- Diseño experimental

Para el diseño experimental de las campañas Delta'96 (en el Delta del Ebro) y Egmond (en la costa Holandesa), llevadas a cabo en el marco de los proyectos Europeos FANS y COAST3D respectivamente, fue fundamental contar con la experiencia previa adquirida de otras campañas de campo. El principal objetivo de ambas campañas fue la adquisición de un conjunto armónico de datos en playas con una cierta uniformidad longitudinal. No obstante, aquí se puede distinguir entre 2 perspectivas diferentes, ya que Delta'96 y Egmond. Delta'96 se centró en la obtención de información que ayudara al entendimiento de los procesos hidrodinámicos, mientras que Egmond se orientó hacia la obtención de información esencial para la simulación numérica de los procesos morfodinámicos. El diseño experimental de las campañas de campo, Delta'96 y Egmond ha probado ser adecuado, ya que se obtuvo un porcentaje muy alto de datos de alta calidad en ambas campañas.

En el caso concreto de la campaña Delta'96 (que presentó mejoras con respecto de la campaña Delta'93), cabe destacar los siguientes puntos:

- Se realizaron pases numéricos previos a la campaña, para la optimización de los puntos y variables a medir.
- Se realizaron medidas durante más días, lo que a pesar de involucrar costos mayores, permite la obtención de un mayor número de datos bajo distintas condiciones de oleaje y viento.
- Se realizaron medidas fuera de la zona de rompientes (con el sistema PUV-S4DW) de niveles de la superficie libre, así como de la altura y ángulo de aproximación del oleaje, que complementan los datos obtenidos con el trineo.
- La mejora en la distribución vertical de los correntímetros ha permitido una mejor identificación de la estructura vertical de las corrientes. Se realizaron medidas 3-D del flujo, a 65 cm (con los correntímetros LIM-UPC). También se

realizaron medidas cerca del fondo, en las inmediaciones de la capa límite (medidas 3D a 10 cm del fondo con los correntímetros rusos, y medidas 2D, a 5 cm del fondo con los correntímetros del LIM).

- Se realizaron más filmaciones de la zona de estudio, desde una grúa de 40 m, y cenitalmente, con un globo. Las filmaciones pueden realizarse prácticamente sin interrupción a un costo relativamente bajo, y al ser medidas indirectas, es posible obtener datos en zonas difíciles, como la línea de orilla o la zona de rompientes en condiciones de oleaje fuerte. Con la calibración adecuada, es posible pasar la escala de intensidades de los pixels a la correspondiente del parámetro medido, como la concentración de sedimentos, niveles de superficie libre, etc.

Con respecto a la campaña de Egmond, se destacan los siguientes puntos:

- La campaña principal de Egmond fue ensayada con anterioridad, llevándose a cabo un experimento piloto que sirvió para la puesta a punto de la logística y de los aparatos de medida en condiciones reales.
- El experimento piloto tuvo una duración de dos semanas durante la primavera de 1998, durante el cual se registraron 2 tormentas moderadas, que no produjeron cambios batimétricos importantes.
- El experimento principal tuvo una duración de seis semanas durante el otoño de 1998, en el cual se registraron 6 tormentas que sí provocaron cambios importantes en la morfología, así como dificultades logísticas en la adquisición de datos.
- Durante estos experimentos se utilizaron dispositivos móviles recientemente diseñados y construidos específicamente para experimentos costeros: el WESP, que es un tripode motorizado de 10 m de altura, que lleva una cabina y permite realizar medidas hasta 6 m de profundidad y aguanta olas de hasta 2 m de altura y que arrastra un trineo (CRIS) altamente instrumentalizado.

Como conclusión final de estas campañas se destacan los beneficios técnicos y científicos directos de su realización:

- Se ha incrementado el conocimiento de los procesos físicos que co-existen en la zona cercana a la costa y sus interacciones, como la identificación de la estructura vertical logarítmica de las corrientes, la cuantificación de la fricción que ejerce con el fondo o la distribución de la energía que se transmite con el oleaje hacia la zona costera en fenómenos hidrodinámicos con distintas escalas espaciales y temporales.
- Se ha evaluado el desempeño y eficiencia de una gran cantidad de dispositivos de medida, muchos de ellos (no comerciales) diseñados específicamente para las campañas, como por ejemplo el trineo altamente instrumentalizado de medidas en la zona de rompientes, capaz de medir conjuntamente olas, corrientes, sedimento en suspensión y condiciones atmosféricas dentro de la zona de *surf*.

7.1.2.- Observaciones realizadas

En este punto se mencionarán algunas conclusiones obtenidas de las observaciones realizadas durante las campañas Delta'93 y Delta'96. Los datos obtenidos durante las campañas de Egmond no han sido analizados en esta tesis.

Con respecto de Delta'93, Delta'96 contó con medidas de velocidades horizontales y campo de presión (sistema PUV-S4DW localizado aproximadamente a 150 m de distancia de la línea de orilla y a 3.5 m de profundidad) fuera de la zona de rompientes; imágenes de video a una altura de 40 m (que permitió la filmación de un dominio mas grande de la zona de estudio) y dentro de la zona de rompientes con el trineo. Las medidas hidrodinámicas obtenidas con el trineo representaron una mejora sustancial con respecto a las realizadas en la campaña Delta'93, pues se obtuvo una mejor descripción de la estructura vertical de las corrientes, al tener medidas mas cerca del fondo, en las inmediaciones de la capa límite, y al medir la estructura 3D a 65 cm del fondo. Las condiciones climáticas presentes durante la campaña Delta'96 fueron de baja energía, con alturas de ola significativa mínimas de 12 cm y máximas de 95 y 64 cm (en sendos episodios muy localizados) medidas con el PUV-S4DW.

Estas medidas permitieron la obtención del campo de oleaje en distintos puntos del perfil de playa, y mediante la metodología y postproceso de datos adecuada, la descripción cualitativa y cuantitativa de la transformación de su espectro de energía y la transferencia de la misma a otras escalas hidrodinámicas de interés (turbulencia y oscilaciones de baja frecuencia). A pesar de que la metodología para la obtención de la energía correspondiente a las distintas escalas hidrodinámicas parece adecuada, la longitud de las series de tiempo (velocidades y niveles de superficie libre) no fue lo suficientemente larga, ni con la frecuencia de muestreo adecuada como para obtener una descripción mas precisa de la estructura de oscilaciones de baja frecuencia en la playa.

De las observaciones realizadas en las campañas descritas, cabe señalar:

- En las campañas Delta'93 y Delta'96 las medidas se realizaron a lo largo de un transecto de playa, lo que permite, bajo condiciones razonablemente estacionarias del oleaje, una descripción precisa de la estructura hidrodinámica de las corrientes inducidas por la rotura del oleaje a lo ancho de la zona de rompientes con un único dispositivo de medidas.
- Las medidas de la estructura vertical de la corriente permitieron la identificación de perfiles logarítmicos (para corrientes inducidas por la rotura del oleaje), descartando el supuesto de perfiles verticales cuasi uniformes. Estas medidas también permiten la obtención de información esencial para el estudio del transporte de sedimentos, como la escala de rugosidad del fondo, la cuantificación de las corrientes de resaca y los coeficientes de fricción.
- Las condiciones energéticas del oleaje durante la campaña Delta'96 fueron muy bajas y no estacionarias, de tal manera que la gran mayoría de las medidas hidrodinámicas obtenidas fueron dominadas por viento, complementando los

datos previos obtenidos durante la campaña Delta'93 (donde las corrientes medidas fueron inducidas principalmente por la rotura del oleaje) y los del día 05/11 por la noche (tests 6 - 9) donde la rotura del oleaje operó como principal agente impulsor de la circulación.

- Se ha verificado que en la franja cercana a la costa y zona de rompientes tanto el oleaje, como el viento y la circulación asociada a la marea (astronómica y meteorológica) compiten alternativamente en importancia como mecanismos impulsores de la circulación costera.
- Dado que las mediciones hidrodinámicas realizadas incluyen todas las escalas hidrodinámicas descritas anteriormente, el estudio por separado de las mismas se basa en las series de tiempo obtenidas del postproceso de datos, no exento de limitaciones.
- Se ha comprobado que el supuesto de la uniformidad longitudinal morfológica de las playas arenosas largas y rectilíneas es cuestionable. En las playas del Delta del Ebro y Egmond se presentaron no-uniformidades, tanto morfológicas como hidrodinámicas, que deben ser consideradas en la interpretación de los datos hidrodinámicos.
- En el caso concreto de la playa de la Barra del Trabucador, se registraron variaciones batimétricas de consideración, en una zona relativamente estrecha de la franja costera, bajo condiciones de baja energía, llegando incluso a seccionar la barra sumergida. La interpretación de la respuesta del fondo a las condiciones hidrodinámicas no parece sencilla sin contar con medidas que abarquen una mayor distancia del perfil de playa, preferentemente hasta la profundidad de cierre.
- Las diferencias fundamentales que se observan entre las campañas es, sin duda, la cobertura espacial y temporal de las medidas. Las medidas realizadas en las campañas Delta'93 y Delta'96 se realizaron en un transecto del perfil de playa, observando los principales fenómenos *cross-shore*. No obstante, la limitada cobertura espacial (limitada al perfil) y temporal (limitada a condiciones ambientales muy específicas) no permiten la identificación de los principales mecanismos tridimensionales de una playa, que inducen las no-uniformidades longitudinales de la misma, ni los cambios asociados a la variación de las condiciones ambientales (por ejemplo, condiciones de calma y condiciones de temporal). En contrapartida, las campañas de Egmond tuvieron una cobertura espacial y temporal mayor lo que permitió la observación tridimensional que no se observó en el Delta del Ebro. Teniendo en cuenta que las medidas de campo tienen una menor resolución que el modelado numérico, se puede concluir que la planificación de las campañas debe basarse en las escalas, espacial y temporal, de los procesos (definidos *a priori*) que se quieren estudiar, cubriendo una cantidad estadísticamente significativa de los mismos, preferiblemente con una cobertura estacional, y apoyados con medidas que aporten datos de las condiciones en mar abierto, sobre la plataforma continental.

7.1.3.- Observaciones vs Modelado

Poder evaluar el grado de precisión (y por lo tanto, de fiabilidad) de las predicciones obtenidas de un modelo numérico es de particular importancia para la gestión de las actuaciones ingenieriles y de los recursos costeros. En este trabajo se ha evaluado el desempeño de un modelo numérico que fue desarrollado en el LIM-UPC (pero que puede ser aplicable a cualquier otro modelo numérico), ajustando las predicciones y comparándolas con datos.

El modelo hidromorfodinámico consiste en una batería de 3 modelos que reproducen por separado el campo de oleaje, la circulación inducida por la rotura del oleaje y los cambios batimétricos resultantes. Teniendo en cuenta esto, y dado que el oleaje es, para las playas estudiadas, el principal mecanismo impulsor de la dinámica costera, se ha puesto especial énfasis en la calibración del campo de alturas de ola y su decaimiento a través de la zona de rompientes por medio de 3 modelos de disipación diferentes (Battjes & Janssen, 1978; Thornton & Guza, 1983 y Battjes & Stive, 1984). Los ajustes consistieron en afinar la predicción con respecto a las medidas, por medio de los parámetros libres de los modelos, hasta obtener el menor error medio relativo en cada caso. En general, los 3 modelos tienen un buen desempeño, aunque el que mejor ajusta los datos de la playa de Egmond es el modelo de Battjes & Janssen (1978), seguido del modelo de Thornton & Guza (1983) y finalmente el de Battjes & Stive (1984), aunque es éste último el que mejor reproduce la rotura sobre la barra exterior. Cabe mencionar también que, por la forma de evaluar la eficiencia de los modelos, mientras más pequeñas son las alturas de ola simuladas, en general, los errores son mayores.

Con respecto a las incertidumbres asociadas a la simulación numérica en su conjunto (oleaje, corrientes inducidas por la rotura y la evolución batimétrica resultante), se realizó un análisis de sensibilidad del modelo para poder definir los parámetros “críticos” en los que hay que poner énfasis en medir adecuadamente de cara a la calibración. De manera general, los parámetros de entrada a los que los resultados son más sensibles son, para el campo de oleaje el parámetro γ de rotura y el nivel medio del mar (puesto que la configuración de la zona de rompientes depende en gran medida del punto de rotura), la mezcla turbulenta para la configuración de las corrientes longitudinales inducidas por la rotura, y los parámetros relacionados con el transporte de sedimentos por la acción del oleaje A_w y el parámetro ε que tiene en cuenta la pendiente de la playa en la magnitud del transporte.

Tal como era de esperar, el modelo hidromorfodinámico tiene un mejor desempeño en la predicción del campo de oleaje, menor en las corrientes inducidas por la rotura y pobre en la predicción de la evolución del fondo. No obstante, aquí hay que recalcar que la predicción de la evolución del fondo, al ser la última parte del proceso de modelado, acarrea los errores acumulados en las predicciones del campo de oleaje y de corrientes. Además, la forma de evaluar la evolución del fondo con el índice BSS tiene ciertos inconvenientes. Por una parte, en un caso hipotético donde la predicción del modelo fuera pobre y los cambios en el perfil fueran grandes, el valor de éste índice sería alto, indicando la eficacia del modelo, y por otra, el propio índice predice su ambigüedad (una división por cero) al modelar la condición inicial del perfil. En definitiva, es un índice de valor limitado para evaluar la simulación de la evolución del perfil de playa.

Finalmente, con el apoyo de estos modelos se procedió a la estimación de las corrientes longitudinales inducidas por la rotura del oleaje medidas durante la campaña Delta'93. Al presentarse una cierta estacionariedad de las condiciones del oleaje durante las medidas en distintos puntos en la zona de rompientes, se ha podido modelar el campo de alturas de ola para dos casos de oleaje. El ajuste del campo de alturas de ola permite disminuir el error esperado en las predicciones de las corrientes longitudinales, cuya fricción con el fondo se escaló únicamente con el tamaño de grano (bajo la suposición inicial de que no había formas del fondo presentes). Los resultados indican que el modelo de corrientes utilizado, sobreestima la magnitud de las mismas debido seguramente a la presencia de formas del fondo que ejercían una mayor fricción y resistencia al flujo. Esta metodología ha permitido evaluar también el coeficiente N de mezcla lateral propuesto por Longuet-Higgins (1970), obteniéndose valores similares o inferiores a otros encontrados en la literatura especializada.

7.2.- *Perspectivas futuras*

A lo largo de esta tesis se ha intentado abarcar el estudio de los procesos costeros desde dos perspectivas diferentes y complementarias entre sí: la experimental y la numérica. El trabajo experimental se ha centrado en el análisis de la hidrodinámica medida en 3 campañas de campo y los cambios morfológicos inducidos, poniendo especial énfasis en la separación de las distintas escalas espaciales y temporales que co-existen en la zona cercana a la costa derivadas del oleaje y su rotura: macrotrubulencia, oleaje, corrientes y oscilaciones de baja frecuencia. Las escalas hidrodinámicas inducidas por cambios en el nivel del mar debidos a la marea astronómica o meteorológica han quedado fuera de los objetivos de esta tesis. En lo referente a la parte numérica, el estudio se ha centrado en la calibración y validación de un modelo morfodinámico que calcula por separado el campo de oleaje, el campo de corrientes y el transporte de sedimentos y cambios morfológicos resultantes. Aún cuando ha sido un estudio integral de los procesos costeros, continúan abiertas las líneas de investigación que se han seguido durante esta tesis. En lo referente al estudio de la macroturbulencia, solo se ha estudiado con cierto detalle la técnica de separación de escalas, probando su validez al comprobar que las series de velocidades filtradas cumplen con las propiedades esperables de la turbulencia. Temas como el estudio de la distribución espacial en la playa en condiciones de oleaje con una fracción muy pequeña de olas rotas, o en la distribución en planta de corrientes inducidas por viento, como fue el caso de la campaña Delta'96 siguen abiertos. En lo referente al estudio de la evolución del espectro de energía y la transferencia de energía del oleaje a otras escalas hidrodinámicas, la técnica propuesta parece adecuada para dicha cuantificación. No obstante, es necesario recalcar dos puntos importantes sobre el estudio de las oscilaciones de baja frecuencia. Por una parte, se tiene el inconveniente de que el sensor de elevación de la superficie libre tiene una precisión de ± 5 cm, por lo que pudiera no detectar oscilaciones menores que la precisión del aparato. Por otra parte, la longitud de las series de tiempo utilizada es insuficiente, por lo que, al remuestrear las series se reduce mucho el número de datos para el análisis espectral, reduciendo la precisión del mismo. Para la validación de la técnica propuesta en esta tesis sería interesante poder realizar medidas sobre un dominio más grande, con series de tiempo más largas. Con las filmaciones es posible estudiar la dispersión frecuencial, aunque la obtención de las elevaciones de la superficie libre mediante las imágenes de video es un tema que sigue estando abierto. En lo referente a las corrientes, se ha

conseguido la identificación de la estructura vertical, tanto de corrientes inducidas por la rotura del oleaje, como en el caso de corrientes inducidas por viento. Las diferencias observadas en los valores de las corrientes a distintas profundidades da una idea de la compleja estructura 3D. Con el perfil de las corrientes fue posible cuantificar la escala de rugosidad del fondo y deducir que había formas del fondo presentes, aún cuando estas no fueron medidas. No obstante, las conclusiones obtenidas de la distribución *cross-shore* de las corrientes se basan en el supuesto de la uniformidad longitudinal de la playa, cuando en realidad no lo es. Una línea de trabajo futuro en este campo sería la de realizar medidas en perfil y en planta, con la suficiente cobertura espacial y temporal (que puedan ser repetibles) para tener en cuenta las no-uniformidades presentes en la playa en el momento de analizar las corrientes. En cuanto a la parte de simulación numérica de este trabajo, queda claro que las predicciones numéricas de la evolución del fondo, en particular cuando se calculan por separado los campos de oleaje, corrientes y transporte de sedimentos, deben ser validadas con datos de campo.

