

## 1 Introducción

El estudio de cualquier tema generalmente involucra una base científica (los aspectos del porque y el donde) y una componente ingenieril o de aplicación práctica (el aspecto del como). En el caso del mar, la parte científica se denomina genéricamente como oceanografía, mientras que la parte práctica se conoce como ingeniería marítima.

Desde la perspectiva científica (al menos en parte de ella), la existencia de los mares condujo el camino de la evolución de materia inerte en vida y conciencia. Su presencia es además, un moderador del clima en el cual la flora y la fauna pueden florecer. La lluvia ha contribuido a la formación de sedimento a partir del material rocoso continental y basáltico y a su transporte hacia el mar. Las mareas, olas y corrientes han contribuido a la distribución del sedimento en las márgenes continentales. En definitiva, el mar es un elemento esencial para la existencia de vida en el planeta. Por tanto, es de vital importancia para el hombre estudiar y conocer bien el sistema oceánico para trasladar este conocimiento científico a la práctica, es decir, para poder conservarlo en su estado natural y para maximizar los recursos (naturales, minerales, etc.) y beneficios (alimento, uso lúdico, transporte, etc.) que el mar produce para el hombre. Precisamente, desde la perspectiva práctica, las aguas marinas costeras no solo aportan alimento, sino que además son de las regiones más importantes y más altamente pobladas de la tierra, ya que cerca del 70% de la población mundial vive en o cerca de las regiones costeras. De entre los beneficios directos que las regiones costeras representan para la especie humana, se encuentran las actividades lúdico-recreativas y turísticas (especialmente las costas con playas arenosas), portuarias y de transporte, de obtención de recursos (pesca y acuicultura), así como de educación e investigación científica (que se pueden traducir directamente en beneficios económicos) entre otras. En definitiva, las áreas costeras proveen una variedad de recursos, beneficios y servicios que en su mayoría pueden medirse en términos monetarios. Las playas arenosas son recursos naturales que no se pueden reponer fácilmente cuando sufren una erosión importante, por lo que deben ser manejadas cuidadosamente para el beneficio mutuo de los que los disfrutan y de los que dependen de ellas. Por lo tanto, la protección de las playas debe considerarse como un objetivo inmediato. La economía de muchas áreas costeras turísticas está basada principalmente en la integridad natural de las playas. Por lo tanto, la economía y subsistencia de las localidades turísticas es tan vulnerable como lo son sus playas.

Desafortunadamente, la mayoría las actuaciones humanas que afectan directa o indirectamente a la costa (construcción de presas, de estructuras costeras, etc.) ha provocado impactos negativos sobre ésta. Tomando en cuenta que los asentamientos humanos en las regiones costeras crecen del orden de 3 veces mas rápido que los asentamientos interiores, puede reconocerse la presión antropogénica a la que se ven sometidas dichas áreas y la magnitud del problema del deterioro ambiental desde los puntos de vista físico y de desarrollo sostenible. Por tomar un ejemplo, en el Mar Mediterráneo (que está rodeado por 20 países de 3 continentes) viven cerca de 130 millones de personas que comparten 46.000 km de costas y recibe cerca de 100 millones de visitantes por año, cantidad que se duplicará en el transcurso de los próximos años (Pineda *et al.*, 1997). Esto otorga una perspectiva esperanzadora para la industria

turística desde el punto de vista económico aunque muy poco halagüeña para la integridad física y medioambiental de las playas. Desde un punto de vista de gestión, es importante vincular y armonizar estos dos puntos antagónicos. De entre los múltiples impactos que se pueden citar ante esta perspectiva, posiblemente el más evidente de todos es el referente al impacto negativo que produce en el turismo. Según datos del Ministerio de Medio Ambiente, se pueden distinguir dos tipos bien diferenciados de movimiento turístico: el de grandes masas (turismo nacional como extranjero), y el turismo tradicional, correspondiente al veraneo tradicional de la sociedad española, dirigido fundamentalmente a pequeñas poblaciones a corta distancia de los núcleos urbanos más importantes. La principal característica de la actividad turística es que presenta una gran estacionalidad y que se concentra mayoritariamente en la franja litoral.

Por otra parte -debido a la complejidad de los procesos dinámicos costeros, que dependen en buena parte de la forma de la costa y de las condiciones locales (dinámica atmosférica y marina, así como de las actuaciones humanas citadas anteriormente- la estandarización de los métodos de estudio y manejo de los recursos costeros no es una tarea fácil. Por lo tanto, de cara a establecer programas de control, monitorización y predicción del comportamiento de las playas (para minimizar las consecuencias físicas, ecológicas y socio-económicas derivadas de su deterioro) bajo distintos escenarios (ambientales y de impactos producidos por las actuaciones humanas), es muy importante tener en una idea muy clara de las características dinámicas particulares de dichas costas. Con ese conocimiento se pueden desarrollar las herramientas, científicas y de gestión, adecuadas para mantener los niveles de bienestar de la población de forma sostenible en el tiempo, como por ejemplo, el mantenimiento y preservación de la integridad natural de las playas. Se trata, sin duda, de un problema con un equilibrio muy frágil.

Por lo tanto, es necesario un entendimiento a fondo de la naturaleza física de las olas y las corrientes, además del transporte de sedimento resultante de su acción conjunta, para optimizar y mejorar las condiciones de explotación de los recursos marinos, especialmente los recursos costeros. Los temporales pueden ser catastróficos para las costas así como para los objetos flotantes. Las pérdidas anuales de recursos costeros, naturales y económicos, y de medios de subsistencia para ciertos sectores de la sociedad pueden ser fácilmente compensadas con los beneficios que se obtendrían al mejorar el conocimiento de la física, la química y la naturaleza de la biota. Los aspectos físicos del mar son aquellos relacionados con sus movimientos: mareas, olas y corrientes, balance de calor, además de la transferencia de energía de la atmósfera a la superficie del agua por acción del viento. La química del mar incluye la distribución de los componentes químicos, nutrientes, estratificación debida a las diferencias de densidades, mecanismos de corrosión, etc. El aspecto biológico trata con la ecología de las plantas y animales marinos, cadenas tróficas y producción primaria. La geología marina es hermana de la geología terrestre y de hecho es la que, recientemente, ha dado respuesta a muchas de las preguntas sobre el pasado, ya que la gran mayoría de los depósitos sedimentarios que afloran en tierra firme fueron depositados en condiciones oceánicas. El estudio sostenido y progresivo de los procesos costeros y oceánicos puede traer muchos dividendos inmediatos, importante sobre todo en los países en desarrollo que dependen económicamente de las actividades costeras más que de otras actividades.

Los ambientes sedimentarios costeros están sujetos a una gran variabilidad en su morfología y características sedimentarias, ya que éstos responden con gran sensibilidad a las fuerzas que actúan en ellos. Una de las formas más evidentes de los cambios que sufre la costa, es la variación de su perfil bajo la acción del oleaje. Las playas por ejemplo, tienen perfiles característicos para cada época del año (asociados a las variaciones estacionales de la energía del oleaje), debido a que hay un balance delicado entre las fuerzas que tienden a traer arena del mar y aquellas que se lo devuelven. Esto es, la pendiente de la playa cambia conforme la playa avanza o retrocede. Cuando hay depósito (asociada a oleaje poco peraltado, cuyos valores de  $H_0/L_0$  son menores a 0.03), la playa se peralta y cuando hay erosión (asociada a oleaje peraltado, cuyos valores de  $H_0/L_0$  son mayores a 0.03), la playa se aplanan. A pesar de que las playas varían ampliamente en apariencia y composición, los principios que gobiernan sus comportamientos son los mismos. El mecanismo básico de este proceso de cambio, es el levantamiento de millones de granos de arena del fondo por la velocidad de corte del flujo oscilatorio que acompaña al paso de la ola, y la turbulencia generada en la rotura del oleaje. Es generalmente en el oleaje tipo *swell*, bajo condiciones de relativa calma, cuando las condiciones hidrodinámicas conllevan a un depósito en la playa. Cuando hay oleaje de tormenta, el proceso entonces es erosivo.

Una vez que los granos de arena están en suspensión, son susceptibles de ser transportados a lo largo de la costa por corrientes inducidas por el oleaje, yendo a parar cada vez a lugares distintos. Es por esto que las playas constantemente están cambiando de forma. Este transporte litoral juega un papel importante en el desarrollo de un perfil típico y es también el responsable de la mayoría de los cambios en la línea de costa.

La erosión, acreción o estabilidad de las costas depende del balance sedimentario (las tasas a las cuales el sedimento es suministrado o removido de la costa). El concepto de balance sedimentario consiste básicamente en la aplicación del principio de continuidad o conservación de masa a los sedimentos litorales de un área conocida, y sólo puede ser aplicado a aquellas situaciones donde están involucrados material clástico y transferencia de energía. Éste es un fenómeno universal a lo largo de las líneas de costa de todo el mundo, que pueden ser consideradas como zonas de alta energía y de migración activa de material sedimentario mucho más intensa que la mayoría de los lugares en tierra o a mayor profundidad en el mar.

Se dice que una playa está en equilibrio cuando el volumen total de sedimentos que entran y salen de la misma en un determinado lapso de tiempo, no presenta pérdidas ni ganancias. Las actuaciones humanas sobre la costa (construcción de obras costeras) o en los cauces naturales que aportan sedimento al sistema (construcción de presas), traen como consecuencia que este equilibrio se rompa y que el transporte litoral se vea alterado. Por consiguiente, los planes de manejo para la zona costera pueden verse afectados, representando un grave problema. El interés de entender el balance sedimentario en las playas buscando mantener su equilibrio, radica en la importancia que tienen como estructuras naturales de protección costera, para el diseño de obras portuarias y para el desarrollo de proyectos turísticos.

En el campo de la ingeniería de costas, siempre se ha buscado la mejor forma de evaluar correctamente el volumen y sentido del transporte litoral, el estado erosional o deposicional de las playas y la evolución del fondo, dada su importancia en el diseño de cualquier tipo de obra costera. Existen varios métodos teóricos y experimentales para

estudiar los complejos mecanismos de la hidro-morfodinámica de la zona de rompientes, con fórmulas que determinan el transporte litoral en base a datos estadísticos del oleaje, junto con otros parámetros físicos conocidos o práctico-experimentales como el uso de correntímetros, utilización de sensores de presión, trazadores, trampas de sedimento y/o porcentaje de ocurrencia de minerales pesados en el sedimento, etc. Entre los principales problemas que se presentan al estudiar la hidro-morfodinámica de la zona de rompientes, destaca la falta de disponibilidad de datos experimentales obtenidos en campo así como de modelos numéricos calibrados con dichos datos.

### **1.1 Objetivos**

Dada la gran cantidad de incertidumbres que aún existen en la física de la zona de rompientes, la presente tesis tiene como objetivo principal llevar a cabo un estudio experimental y numérico para intentar cuantificar algunos de los procesos más relevantes en la dinámica de la zona cercana a la costa, con el fin último de mejorar el conocimiento existente y validar y calibrar un modelo numérico de predicción de la evolución del fondo.

El trabajo experimental se ha centrado en la cuantificación de la transformación de la energía del oleaje a otras escalas hidrodinámicas presentes en la zona cercana a la costa y su contribución a la evolución del fondo, persiguiendo los siguientes objetivos:

- Diseñar los experimentos hidromorfodinámicos en la zona costera del Delta del Ebro (Delta'96), introduciendo innovaciones y mejoras con respecto a estudios experimentales anteriores (Delta'93).
- Desarrollar una técnica nueva para la identificación y separación de la turbulencia del resto de las escalas hidrodinámicas.
- Analizar cualitativamente la transformación del espectro del campo de oleaje en la zona cercana a la costa del Delta del Ebro mediante análisis digital de imágenes y medidas *in situ* de niveles de superficie libre, así como cuantificar de la transformación de los espectros de energía del oleaje (transferencia de energía a distintas escalas hidrodinámicas) mediante análisis espectral (Delta'96).
- Evaluar la resistencia al flujo de las corrientes inducidas por la rotura del oleaje debida a la fricción con el fondo (Delta'93).
- Describir la evolución batimétrica a corto término en la Barra del Trabucador del Delta del Ebro en condiciones de baja energía (Delta'93 y Delta'96).

El trabajo numérico se ha centrado en la validación y calibración de un modelo numérico hidromorfodinámico mediante un análisis de sensibilidad de sus parámetros de entrada y la repercusión en los resultados obtenidos con el modelo. El ajuste se ha

basado en la cuantificación del error en el modelado con respecto a datos medidos en campo. Los objetivos subordinados a esta parte del trabajo son:

- Cuantificar el desempeño de los modelos de disipación de energía por rotura de oleaje irregular de Battjes & Janssen (1978), Battjes & Stive (1984) y Thornton & Guza (1983), ajustando el decaimiento de la altura de ola (mediante los parámetros de entrada del modelo) con respecto a los datos medidos y evaluando el error entre las predicciones y las medidas.
- Evaluar las incertidumbres del modelado numérico hidromorfodinámico en la zona cercana a la costa mediante un análisis de sensibilidad de los parámetros hidrodinámicos y de transporte de sedimentos implementados en el modelo numérico (primero por separado y luego de manera conjunta).
- Evaluar de los resultados y limitaciones del modelado 2DV de perfiles de playa, cuantificando el error en los parámetros hidrodinámicos y en la evolución del fondo mediante el índice BSS (Brier Skill Score).
- Aplicar la metodología numérica utilizada en los puntos anteriores, al caso medido en la campaña Delta'93, modelando numéricamente el campo de oleaje y evaluando la corriente longitudinal medida en la barra del trabucador del Delta del Ebro.

## 1.2 Estructura del trabajo

La presente tesis incluye una revisión de algunos de los modelos de disipación de energía por oleaje irregular más utilizados en Ingeniería Marítima, y de los principales procesos hidrodinámicos relacionados con la rotura del oleaje: turbulencia, ondas largas y corrientes (capítulo 2), así como de los procesos morfodinámicos involucrados en la evolución de la forma de las playas, enfatizando en la generación de capa límite (interacción del flujo con el fondo), coeficientes de fricción, etc. (capítulo 3). A continuación se efectúa una revisión exhaustiva de las principales campañas de campo en la zona de rompientes llevadas a cabo por distintas instituciones en todo el mundo (capítulo 4). En este punto se realiza una comparación entre las principales campañas de campo de este tipo realizadas en España, la campaña Delta'93 y la campaña Delta'96, llevadas a cabo por el LIM-UPC, así como la descripción de las campañas llevadas a cabo en el marco del proyecto europeo Coast3D en Holanda. A continuación se presentan los resultados experimentales (capítulo 5) obtenidos de los datos adquiridos durante las campañas Delta'93 y Delta'96 (principalmente) y los resultados numéricos (capítulo 6). Estos dos capítulos incluyen las conclusiones particulares de cada uno de los puntos estudiados. Las conclusiones generales de la tesis se presentan en el capítulo 7. En el anejo 1 se presenta la descripción del modelo numérico desarrollado en el LIM-UPC utilizado para la simulación de los principales procesos hidro-morfodinámicos involucrados en el proceso de evolución morfológica 2DV de playas arenosas. En el anejo 2 se presenta una breve descripción de la teoría de oleaje, incluyendo algunos conceptos de su generación y propagación y en el anejo 3 las publicaciones relacionadas con la tesis.

