EVOLUCION EN PLANTA/PERFIL DE UNA PLAYA. METODOS PREDICTIVOS

Agustín Sánchez-Arcilla y José A. Jiménez

Laboratori d'Enginyeria Marítima, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universitat Politécnica de Catalunya, el Gran Capitá s/n, 08034 Barcelona.

RESUMEN:

La regeneración/alimentación artificial de una playa supone reproducir una costa sedimentaria que, al igual que las costas naturales, estará sometida a una serie de procesos evolutivos. Estos procesos se esquematizan mediante el estudio de los cambios en planta y perfil de la playa, los cuales son comunes tanto para costas naturales como artificiales. A lo largo de este trabajo se presentan una serie de herramientas para evaluar tales cambios y, por tanto, para estimar la durabilidad de las obras de regeneración o, al menos, las fases evolutivas por las que pasarán.

INTRODUCCIÓN

El diseño de una regeneración/alimentación artificial de una playa sedimentaria supone constuir una obra que, dadas sus características, estará sometida a una serie de solicitaciones energéticas por parte del oleaje, mareas, viento, ente otos agentes, y que evolucionará de acuerdo con la intensidad de los procesos que se verifiquen como la hacen las playas naturales.

Esta evolución, que se desarrolla a diferentes escalas de tiempo y de espacio (ver e.g. Sánchez-Arcilla y Jiménez, 1994), determinará la durabilidad de la obra así como las fases intermedias de desarrollo por las que pasará a lo largo de su vida útil.

El estudio de la evolución, por tanto, debe hacerse de igual forma a la que se hace para playas naturales, ya que de algún modo, la alimentación o regeneración de playas implica la reconstrucción o constucción de un sistema natural. Esto puede hacerse desde un punto de vista global, es decir, teniendo en cuenta la totalidad de los procesos que tienen lugar o, separando la evolución por componentes. Esta última aproximación suele hacerse descomponiendo la evolución de una playa en dos direcciones principales, una longitudinal en la que se estudian los cambios en planta y, otra transversal en la que se estudian los cambios en perfil.

En este trabajo se aborda la evolución costera utilizando la última de las aproximaciones citadas (cambios en planta y perfil) y, además de presentar las diferentes herramientas disponibles para estimar de forma más o menos precisa tales cambios, se especifica en detalle aquellas fácilmente aplicables en proyectos de regeneración/alimentación de playas.

FORMA EN PLANTA

La forma en planta que adoptan las playas sedimentarias, ya sean naturales como artificiales, es producto de la interacción de los agentes dinámicos que actúan sobre ellas y de las propias características -particularmente- físicas de la costa. De entre todos los agentes que actúan sobre la costa, el oleaje es, con diferencia, el que suministra más energía al sistema (a una escala desde días a años) y, por ello, será el agente principal a la hora de determinar la forma en planta de una playa.

Es bien conocido que los cambios en planta que sufre una costa, considerados a medio-largo plazo, son debidos a la existencia de un gradiente a lo largo de la misma del transporte longitudinal de sedimento (ver e.g. Komar, 1976). Este gradiente determinará la forma de equilibrio de la playa (si existe) desde un punto de vista dinámico. Es decir, a medida que cambien las condiciones del oleaje incidente y, por tanto, cambie el esquema de transporte longitudinal de la playa, cambiará su forma en planta. En el caso de que exista un oleaje claramente dominante en la zona de estudio, este determinará la planta de la playa a medio-largo plazo, mientras que los oleajes secundarios determinarán variaciones estacionales o de corto plazo de la misma sobre su posición de equilibrio (ver e.g. Komar, 1976).

Este proceso, dependiente de las condiciones de oleaje incidente y esquema de transporte asociado, puede ser conocido de forma determinista si se es capaz de reproducir o cuantificar cada uno de los elementos que participan en el sistema y la forma en que interaccionan (ver e.g. de Vriend et al., 1994). Intentar abordar el problema resolviendo de forma detallada el sistema, es una tarea inabordable desde el punto de vista práctico, al menos para las disponibilidades de información (datos de oleaje, perfiles, etc.) que suele haber a la hora de hacer un proyecto. En efecto, la mayor parte de las herramientas necesarias, aunque disponibles, lo están generalmente en centros de investigación y muchas de ellas en fase de desarrollo. Asimismo, aunque potencialmente pueda resolverse el sistema de forma determinista, existen dos problemas adicionales: la escala de tiempo y la aleatoriedad/incertidumbre asociada a los factores impulsores y respuesta de la costa. La resolución en forma detallada del problema supone, generalmente, trabajar con escalas de tiempo cortas en relación con las escalas usuales en ingeniería de costas (ver *e.g*. de Vriend *et al.,* 1994).

Para resolver este problema, existen una serie de herramientas que, si bien suponen una simplificación del proceso, si son utilizadas correctamente, i.e. conociendo las restricciones y el campo de validez de cada una, permiten obtener resultados válidos desde el punto de vista de la ingeniería. A continuación se presentan diversas aproximaciones al estudio de la forma en planta de las playas sedimentarias desde el punto de vista práctico.

Forma en planta entre obstáculos

Entre los diferentes esquemas de alimentación existentes, bien sea para regeneración de playas bien para playas de nueva creación, se encuentra la aportación de áridos a un tramo de costa encajado entre obstáculos, de tal forma que se cree una playa encajada (CUR, 1988). Generalmente, estos obstáculos están formados por espigones, espigones en T, diques exentos o una combinación de ellos (ver Figura 1). En estos casos, la forma de equilibrio en planta del relleno será similar a la que puede observarse en playas encajadas naturales y dependerá, más que de la forma en que se haga el aporte, de las dimensiones físicas de los obstáculos que delimitan la playa (longitud de los obstáculos, profundidad en sus extremos, distancia entre ellos, etc...) y los términos impulsores que actúan sobre esa playa.

La forma en planta de la playa será función, en primer lugar, del efecto barrera de los obstáculos, que en el caso de que sea total significaría que el volumen de árido aportado se conservará. Esto no significa que la superficie de playa seca sea, a su vez, conservativa, ya que pueden producirse pérdidas no a través de los obstáculos, sino en sentido transversal a la playa, especialmente inmediatamente después de la ejecución, cuando el perfil tenderá a adoptar una forma de equilibrio (ver *e.g*. CUR, 1988) y, también bajo la acción de temporales que producirán una erosión en la parte interior de la playa seca (CUR, 1988).

En el caso de que el efecto barrera de los obstáculos sea parcial, la playa podría potencialmente perder material (longitudinalmente) a través de ellos, con lo que los obstáculos sólo servirían para retardar la pérdida de playa (CUR, 1988).

Asumiendo que los obstáculos actúan como barreras totales al paso de sedimento y que, por lo tanto, el volumen de sedimento permanece constante en el tiempo, la forma de equilibrio en planta de la playa dependerá del oleaje incidente en ella, el cual vendrá absolutamente condicionado por los obstáculos existentes. El oleaje, al propagarse hacia la costa, sufrirá los procesos de refracción y fricción con fondo y, al encontrarse con los obstáculos, se difractará y/o reflejará (ver e.g. Horikawa, 1988). Este proceso, aunque dependiente de las características del oleaje incidente, los obstáculos que definen la playa y las características de la playa en sí, puede ser, sin embargo, generalizado a cualquier playa. Así, desde el punto de vista de la dinámica a corto-medio plazo se observan dos zonas bien diferenciadas (cuyos límites variarán en función del oleaje incidente): (*i*) una zona expuesta, donde el transporte de sedimento y la evolución de la playa estarán dominados por la incidencia oblicua del oleaje y la corriente inducida (transporte longitudinal) y, (*ii*) un zona protegida, en la que se manifiestan los efectos de la difracción del oleaje, y donde además del término anteriormente citado, aparece un término de transporte longitudinal

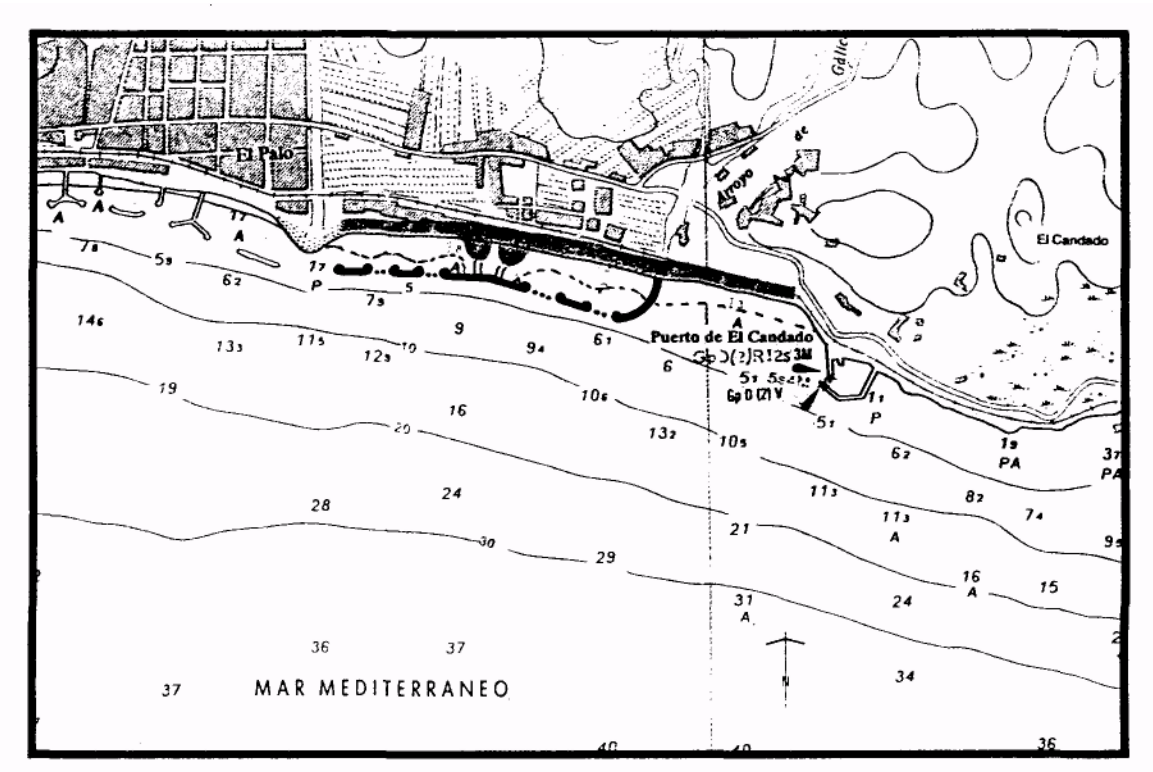

Figura 1. *Planta de las obras de regeneración de la Playa del Palo (MOPTMA).*

adicional debido al gradiente a lo largo de la playa de la altura de ola, que generará corrientes dirigidas desde la zona expuesta a la protegida (ver *e.g.* Kraus, 1988).

Debido a que este esquema se repite en cada playa, aunque variando sus dimensiones/intensidades en función de cada caso en particular, y que sus efectos morfológicos son siempre similares al dar a la planta de la playa una forma curva, se ha intentado caracterizar ésta mediante expresiones analíticas universales.

La mayor parte de las aproximaciones al estudio de playas encajadas han sido orientadas a reproducir o caracterizar su comportamiento y no los procesos que tienen lugar en ellas. Por ello, cabe considerar estos estudios como los precursores de lo que hoy en día se llama modelos morfológicos orientados al comportamiento ("morphological behaviour oriented models"). La mayoría asemejan la forma en planta a diversas curvas geométricas: arcos de círculo (Hoyle y King, 1958), cicloides (Bruun, 1953), espirales logarítmicas (Yasso, 1965, Silvester, 1970, LeBlond, 1972), espiral logarítmica de ángulo constante (Garau, 1979), arcos de circunferencia (Berenguery Enríquez, 1988), parábola (Hsu y Evans, 1989, Silvester y Hsu, 1991, Tan y Chiew, 1994), etc.

De todas ellas, la más extendida en la actualidad es la de Hsu y Evans (1989) en la que se aproxima la línea de orilla de equilibrio a un polinomio de segundo grado dado por la relación (ver Figura 2 para simbología):

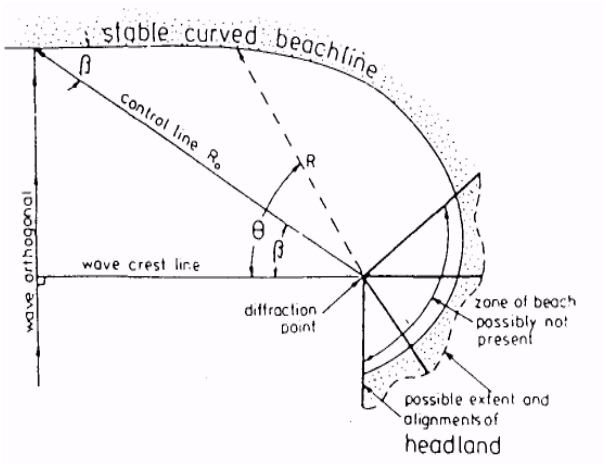

***Figura** 2. Esquematización de una bahía de equilibrio.*

$$R/R_0 = C_0 + C_1(\beta+\theta) + C_2(\beta/\theta)^2 \qquad (1)$$

y donde, según los autores, los coeficientes (C_0, C_1 y C_2) tienen un valor universal que es función única y exclusivamente de β y θ (ver tabla 1).

Tabla 1. *Coeficientes de la ecuación (1) (Hsu y Evans, 1989).*

β(°)	C_0	C_1	C_2
10	*0.036*	*1.011*	*-0.047*
15	*0.050*	*0.998*	*-0.049*
20	*0.055*	*1.029*	*-0.088*
25	*0.054*	*1.083*	*-0.142*
30	*0.045*	*1.146*	*-0.194*
35	*0.029*	*1.220*	*-0.253*
40	*-0.000*	*1.326*	*-0.332*
45	*-0.039*	*1.446*	*-0412*
50	*-0.088*	*1.588*	*-0.507*
55	*-0.151*	*1.756*	*-0.611*
60	*-0.227*	*1.930*	*-0.706*
65	*-0.315*	*2.113*	*-0.800*
70	*-0.409*	*2.284*	*-0.873*
75	*-0.505*	*2.422*	*-0.909*
80	*-0.60*	*2.520*	*-0.906*

Sin embargo, Jiménez *et al.* (1995) al analizar diversas playas encajadas entre obstáculos naturales, encontraron que dichos coeficientes, aunque útiles para dar una idea de la forma en equilibrio de la playa, no eran constantes, sino que eran variables.

Esto implica que cada playa adoptará una forma de equilibrio dada por la expresión (1), pero con un valor de los coeficientes función de sus características físicas (sedimento, etc...) (ver Figura 3). Berenguer y Enríquez (1992) llegaron a la misma conclusión en playas encajadas entre obstáculos artificiales, donde el clima de oleaje incidente y las características del sedimento controlaban, junto a las características físicas de los obstáculos, la forma en planta.

Jiménez *et al*. (1995) al analizar casos donde los obstáculos impedían un desarrollo muy curvo de la costa (situación bastante común), vieron que la expresión (1) podía truncarse en el primer orden, obteniéndose un grado de ajuste entre dicha expresión y la costa real similar al que se obtenía con la forma parabólica.

Cabe decir que esta aproximación supone una forma de equilibrio como respuesta a la acción del oleaje dominante, por lo que no puede asumirse que es una forma estática, sino que sufrirá variaciones en función de las características del oleaje incidente (sin considerar el efecto de tormentas). Este tipo de variaciones se suelen denominar basculaciones y, generalmente, tienen un carácter estacional y/o cíclico relacionado con cambios en la dirección del oleaje incidente (ver e.g. Silvester y Hsu, 1991).

Aunque esta aproximación es útil sobre todo para tener una idea del comportamiento de equilibrio de estas playas, no deja de ser más que una simplificación sin dar información sobre la evolución temporal de la costa. Recientemente, Wind (1994) presenta una expresión analítica para describir la planta de este tipo de playas, en la que se aborda el problema de forma más orientada a los procesos dominantes (Le. difracción del oleaje).

La restricciones o simplificaciones que suponen aplicar este tipo de aproximación pueden ser resueltas utilizando modelos de evolución en planta que incluyen una descripción detallada de los procesos que tienen lugar en estas playas. Este tipo de modelos (ver e.g. Sánchez-Arcilla y Jiménez, 1995) ya que son, generalmente, aplicables a cualquier tipo de playa serán descritos en el apartado siguiente.

Forma en planta para playas libres

La alimentación en playas carentes de obstáculos físicos que intercepten el material aportado supone, generalmente, la necesidad de diseñar un esquema de alimentación periódica, ya que en este caso, el material puede ser transportado libremente a lo largo de la costa (Le. ser eliminado de la zona "alimentada" hacia zonas adyacentes). En estos casos, la configuración en planta de la playa no suele adoptar una forma

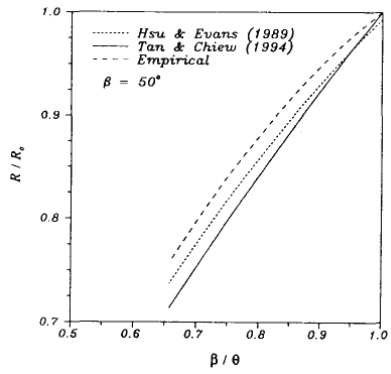

Figura 3. *Ajuste de una playa encajadaq a una playa parabólica utilizando los métodos coeficientes de Hsu y Evans, Tan y Chiew y -empírico- sin prefijar coeficientes (Jiménez et al., 1995)*

generalizada (como era el caso de playas encajadas), sino que viene dada tanto por los condicionantes geológicos de la zona (y otras condiciones de contorno "externas"), como por los procesos actuantes y su evolución temporal.

La alimentación, en estos casos, se plantea para solucionar un problema de erosión existente, por lo

que el dimensionamiento de esta alimentación viene dado en función de un tiempo de vida predeterminado. Este tiempo es estimado a partir del conocimiento de la dinámica litoral de la zona y suponiendo que los procesos que tienen lugar en la playa natural, se verán repetidos en la playa regenerada (CUR, 1988). Aceptando que los procesos se reproducen, es lógico esperar que la forma en planta final de la playa regenerada sea, cuanto menos, similar a la existente antes de la alimentación. Este hecho implica que, a menos que el material aportado sea más estable que el nativo o, que exista algún obstáculo aguas abajo, la forma final de la playa tras el período de vida de la obra, será prácticamente idéntica a la inicial, es decir, se reproducirá el esquema erosivo sobre el que se ha actuado.

Si se parte de la idea de que la forma final de la playa será la misma que la inicial tras un periodo de tiempo, el problema radica en saber la forma intermedia de la playa, o lo que es lo mismo, saber la evolución temporal del relleno. Al igual que en el caso anterior, la resolución de este problema puede abordarse -simplificadamente y en primera aproximación- desde el punto de vista analítico, con lo que se puede estimar de una manera simple la permanencia del relleno en la zona de aportación. Esta solución viene dada por la ecuación de difusión (Pelnard Considere, 1956)

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \qquad (2)$$

donde la posición de la línea de orilla *X(y,t)* es función de la posición a lo largo de la línea de orilla, y, y del tiempo, *t*, y ε es el coeficiente de difusión, el cual es función de la tasa de transporte longitudinal existente. En el caso de que se utilizase la fórmula del CERC para estimar el transporte longitudinal, este coeficiente vendría dado por

$$\epsilon = \frac{2S_0}{d_c + B} = \frac{2}{d_c + B} \frac{K H_b^{2.5} \sqrt{g/\gamma}}{16(s-1)(1-p)} \qquad (3)$$

donde *K* es la constante de calibración de la fórmula del CERC, d_c es la profundidad crítica, *B* es la altura de la berma, *s* es la densidad relativa, *p* es la porosidad del sedimento, H_h es la altura de ola incidente en rotura y, γ es el ratio entre altura de ola y profundidad en rotura.

La aplicación de las soluciones analíticas de la ecuación (2) supone aceptar las siguientes hipótesis: el perfil de playa se desplaza paralelamente a sí mismo sin cambiar de forma, no hay pérdida de sedimento más allá de la profundidad crítica, d_c, y, el transporte longitudinal de sedimento depende única y exclusivamente de la curvatura de la costa, ya que se asume que el oleaje es constante en altura y dirección, y, además el ángulo entre el oleaje y la costa es pequeño.

Larson *et al.* (1987) hacen el análisis más completo hasta la fecha de las diferentes soluciones analíticas de la ecuación (2) en función de diferentes formas iniciales con y sin presencia de obstáculos y/o fuentes de sedimento. Dean y Yoo (1993) analizan también de forma analítica el comportamiento en planta de alimentaciones, incluyendo algunos efectos que no han sido tenidos en cuenta en estudios anteriores (erosión anterior al proyecto, refracción del oleaje, etc...).

La Figura 4 muestra la variación temporal del porcentaje de material de relleno que permanece en la zona de alimentación para el caso de aportaciones en planta de forma rectangular (una de las más comunes), en función dc la longitud del relleno, /, y del coeficiente de difusión, e. Este porcentaje de material

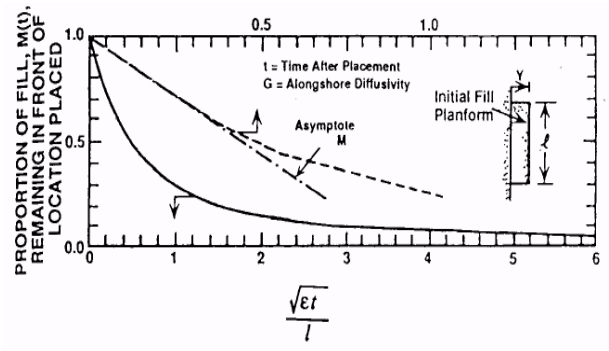

Figura 4. *Proporción del volumen de un relleno rectangular que permanece en la zona de aportación en función del parámetro* $(\epsilon t)^{0.5}/l$ *(t en años, I en Km en la escala horizontal superior y l en millas en la escala horizontal inferior)(Dean y Yoo, 1993).*

que permanece en la zona, *M*, puede expresarse (para valores entre el 100% y el 50%) por (Dean y Yoo, 1993)

$$M = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{\epsilon t}}{l} \qquad (4)$$

Recientemente, Walton (1994) presenta la solución analítica para un relleno rectangular, pero ajustándose a lo que ocurre cuando se ejecuta la obra, es decir, los extremos del relleno no son perpendiculares a la costa, sino que hay un cambio gradual en la orientación de la orilla.

Sin embargo, todas estas aproximaciones analíticas no

consideran el efecto de la erosión a la que está sometida la costa, por lo que, en realidad, la deformación del relleno será más rápida que la predicha por todas ellas. Dean y Yoo (1993) presentan una aproximación analítica para el caso de erosión uniforme.

Forma en planta para cualquier tipo de playa

En el caso de que se quiera evaluar el comportamiento del relleno para cualquier forma de playa arbitraria y, considerando la situación real de la costa, es decir, la existencia de una erosión previa, la herramienta disponible más precisa, son los modelos numéricos de evolución de playas. De la gran variedad existente (ver e.g. Horikawa, 1988) el más simple y que mejor se adecúa a los requerimientos actuales de la ingeniería de costas (en cuanto a escalas de tiempo y espacio), es el modelo de 1 línea. Este tipo de modelos permite, en principio, estimar la evolución en planta de una playa para cualquier forma inicial, con cualquier tipo de estructuras y, bajo la acción de cualquier oleaje incidente, considerando única y exclusivamente el transporte longitudinal de sedimento (ver Kraus, 1988). La fiabilidad del resultado dependerá lógicamente, de la precisión asociada a los parámetros libres del modelo (e.g. coeficientes de transporte, etc.).

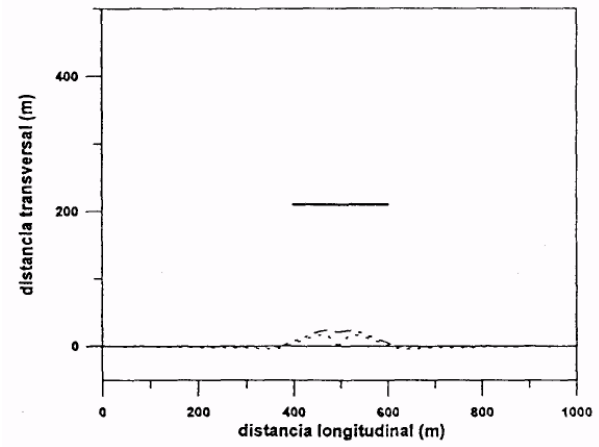

***Figura** 5. Simulación de la formación de un hemiotómbolo bajo incidencia normal del oleaje.*

La ecuación que rige estos modelos es una generalización de la ecuación (2)

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\frac{1}{d_c + B}\left(\frac{\partial Sl}{\partial y} - q\right) \qquad (5)$$

donde q representa la existencia de fuentes o sumideros de sedimento y, Sl es la tasa de transporte longitudinal.

Al resolver esta ecuación de forma numérica, se puede estimar la evolución en planta de una playa prácticamente sin restricción alguna, siempre y cuando los cambios a considerar sean debidos exclusivamente al transporte longitudinal y la evolución del perfil sea conocida. Existen numerosos modelos descritos en la literatura que utilizan esta ecuación (ver Kraus, 1988) y cuya bondad se mide por la capacidad de representar las estructuras costeras. En los últimos modelos presentados se hace uso, generalmente, de la expresión dada por Ozasa y Brampton (1980) para el transporte longitudinal

$$Sl = Sl_{CERC} + \frac{K_2}{8(s-1)(1-p)\tan\beta} H_b^2 C_{g,b} \frac{\partial H_b}{\partial y} \cos\alpha_b \qquad (6)$$

en la que el primer término es el equivalente a la fórmula del CERC y el segundo, es un término que tiene en cuenta la existencia de un gradiente en la altura de ola a lo largo de la costa, útil sobre todo cuando existen estructuras costeras "difractantes" a lo largo del borde litoral. Un ejemplo extremo de las ventajas de la aplicación de esta formulación puede verse cuando se considera un oleaje que incide normalmente a una costa en presencia de un dique exento. Utilizando sólo una fórmula que tenga en cuenta el transporte longitudinal, la evolución de la costa sería casi nula -el término Sl_{CERC} varía con el seno del ángulo de incidencia del oleaje que sería 0 en este caso-, mientras que si se usa la expresión (6), se predice la formación de un tómbolo (ver Figura 5). Esto hace que, en algunos casos, se relacione erróneamente la formación de tómbolos con el transporte longitudinal bruto existente en una costa y no con la difracción del oleaje.

Como ejemplo de la aplicación de este tipo de modelos, la Figura 6 muestra la evolución de una playa entre dos obstáculos a diferentes distancias, obtenidas con el modelo BEACHIL (Jiménez, 1995) utilizando el campo de oleaje en rotura calculado mediante el modelo PROPS (Rivero, 1995) que tiene en cuenta refracción, fricción, difracción e interacción olas-corrientes. Este ejemplo se corresponde con la evolución de una playa aguas abajo de un puerto, considerando la construcción de un espigón a diferentes distancias del contradique para reducir la basculación. Puede observarse que la forma final en planta es próxima a la que prevén las expresiones de playas en equilibrio, aunque, en este caso, se predicen desviaciones debidas al proceso de propagación del oleaje sobre la batimetría real.

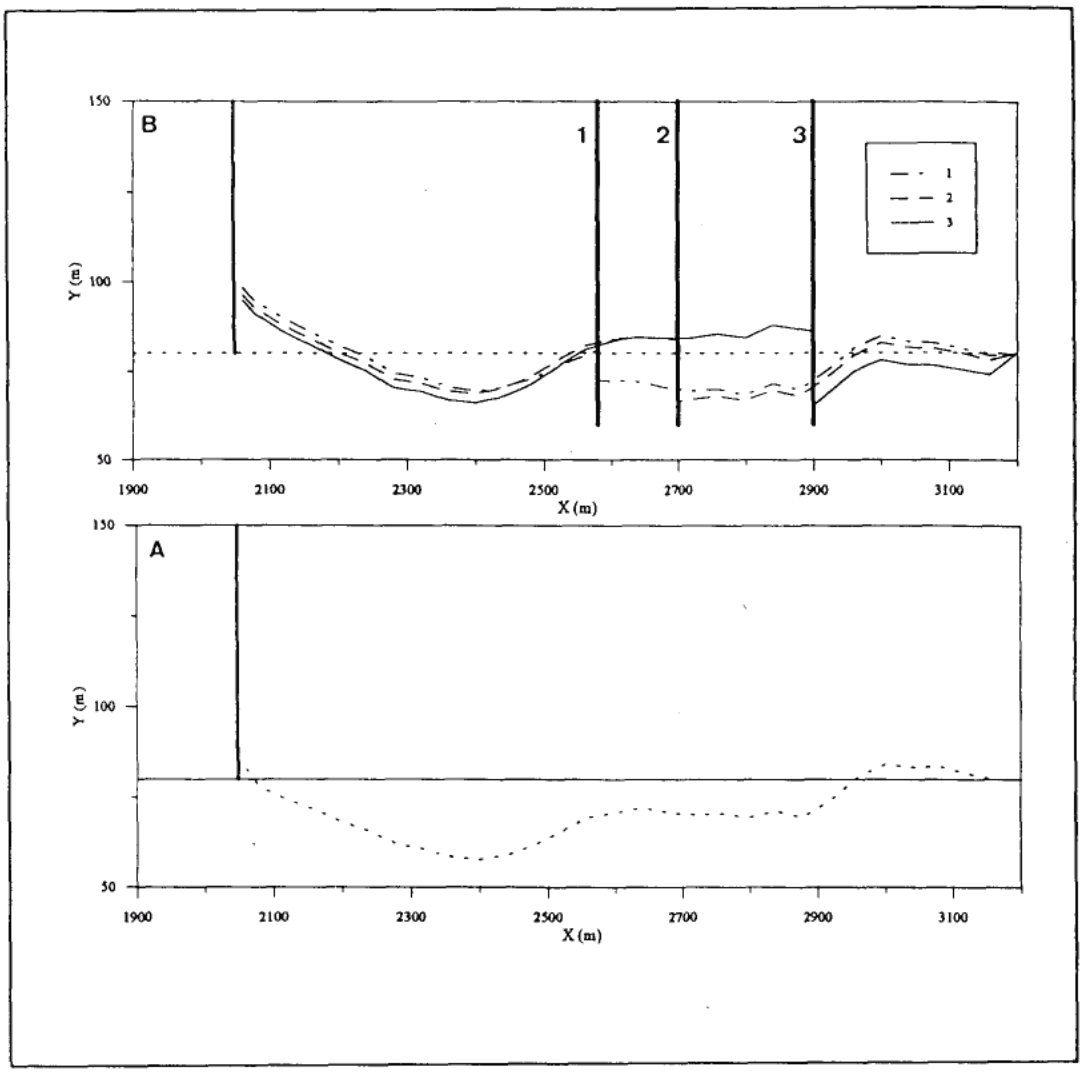

Figura 6. *Simulación de la línea de orilla aguas abajo de un puerto (A: sin estructuras adicionales; B: con espigones adicionales a diferentes distancias).*

La utilización del modelo permite, por tanto, obtener una idea de la posición óptima del espigón, tanto para reducir la basculación de la playa como para evitar la erosión aguas abajo del mismo.

FORMA EN PERFIL

Al igual que ocurre con la forma en planta, la forma en perfil de una playa es producto de la interacción de los agentes dinámicos que actúan sobre ella y de las propias características físicas de la costa, siendo el oleaje el agente energético más importante a la escala usual de la Ingeniería de Costas.

El perfil de la playa va asociado, principalmente, a la acción del transporte transversal de sedimento que, a su vez, depende del oleaje, viento y nivel relativo del mar (marea).

Básicamente, los cambios en el perfil de playa suelen asociarse a dos tipos de estados: *(i)* perfil de erosión o disipativo y, *(ii)* perfil de acumulación o reflexivo (ver Figura 7).

El primero de ellos se produce bajo la acción de tormentas, en las que el oleaje que actúa en la playa es de gran contenido energético. En estas condiciones se produce una erosión de la parte interna del perfil retrocediendo la línea de orilla y, transportándose el material mar adentro, siendo depositado la mayor parte de las veces en forma de barras sumergidas. El resultado final es una disminución de la pendiente del perfil.

El perfil de acumulación se produce bajo la acción del "oleaje reconstructor", de bajo contenido energético y, generalmente asociado a la acción del swell. En estas condiciones el material almacenado en las barras es transportado hacia costa, reconstruyendo la berma y haciendo avanzar la línea de orilla. El resultado final es un aumento en la pendiente del perfil.

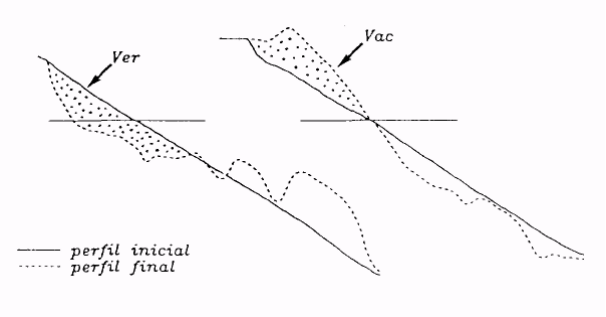

***Figura** 7. Perfiles de erosión y acumulación típicos (obtenidos de laboratorio)*

La escala temporal a la que se producen estos cambios es del orden de horas para el caso del perfil de erosión (la duración de la tormenta) y, mucho más lenta para el de acreción, llegando a veces al orden de meses (ver *e.g.* Sunamura, 1988).

En algunos casos, la acción del "oleaje reconstructor" puede ser insuficiente (debido a sus características) para eliminar de forma efectiva las barras longitudinales formadas. Este puede ser el caso del Mediterráneo, donde las barras tienen un carácter estacionario o permanente, con pequeñas oscilaciones pero sin una migración efectiva hacia costa. Este hecho podría asociarse a la práctica ausencia de swell o de oleaje de período largo a lo largo de un año tipo.

Estos dos perfiles descritos no son sino los límites de un rango de estados del perfil de playa relacionados con la capacidad energética del oleaje, características físicas de la costa y otras variables como marea, viento, etc (ver e.g. Short, 1993).

La predicción de este tipo de cambios se puede hacer en primera instancia utilizando parámetros o "predictores" del perfil de playa. Estos parámetros, empíricos en su mayor parte, predicen el estado final del perfil en función de características del oleaje, del sedimento que compone la playa y, en algunos casos de la pendiente del perfil inicial. Una revisión de los parámetros existentes puede verse en Larson (1988) y Negro (1991) entre otros.

Jiménez y Sánchez-Arcilla (1993) hacen un análisis de los estimadores existentes, utilizando para ello datos de laboratorio a gran escala. De todos ellos, los mejores predictores del comportamiento del perfil (aparición de erosión o acreción) son: *(i)* el parámetro de Dean (1973) dado por

$$D_b = \frac{H_b}{wT} \qquad (7)$$

donde *Hb* es altura de ola en rotura, *w* es la velocidad de caída y *T* es el período de ola, y donde el valor que limita la aparición de erosión en condiciones de campo es *Db = 4,* y

(ii) el parámetro de Dalrymple (1992) dado por

$$P = \frac{gH_0^2}{w^3 T} \qquad (8)$$

siendo H_0 la altura de ola en aguas profundas y, donde el valor umbral para delimitar los cambios en condiciones de campo es 9,500.

Jiménez y Sánchez-Arcilla (1993) analizan la relación del valor de cada uno de estos parámetros con el volumen de erosión y acumulación y encuentran que para que haya una relación cuantitativa, debe incluirse la pendiente inicial del perfil. Así, se propone un parámetro que sirva tanto para estimar la aparición de erosión o acumulación, y que a su vez permita estimar en función del valor que tome la intensidad de los procesos. Este parámetro está basado en el parámetro de Dean y está dado por (Jiménez et al., 1993)

donde D_b es el parámetro de Dean evaluado en rotura, $D_{b,eq}$ es el valor umbral del parámetro de Dean ($D_{b\ eq} = 4$) y, *m* es la pendiente del perfil. El estado del perfil viene dado por el signo de ($D_{b,eq}$-D_b). En este caso la pendiente de la playa actúa como factor normalizador para determinar las dimensiones de la zona de disipación de energía al romper la ola.

Perfil de equilibrio

Una de las aproximaciones más sencillas al cálculo del perfil de equilibrio de una playa regenerada es la que estima una pendiente media del perfil en función de las características del sedimento y del grado de exposición de la playa. Esta aproximación se hace, en general, a partir de diagramas empíricos, como el de Wiegel (1964), donde se da la pendiente esperada para la playa en función del diámetro medio utilizado para playas expuestas, parcialmente protegidas y protegidas de la acción del oleaje (ver Figura 8).

$$JA = |D_{b,eq} - D_b|^{0.5}\, m \qquad (9)$$

Estudios similares para la pendiente de la playa en función de las características del sedimento y del oleaje han sido realizados por Dalrymple y Thompson (1976), Sunamura (1984), Kriebel *et al.* (1991) y Jiménez y Sánchez-Arcilla (1992), entre otros. Según estos autores,

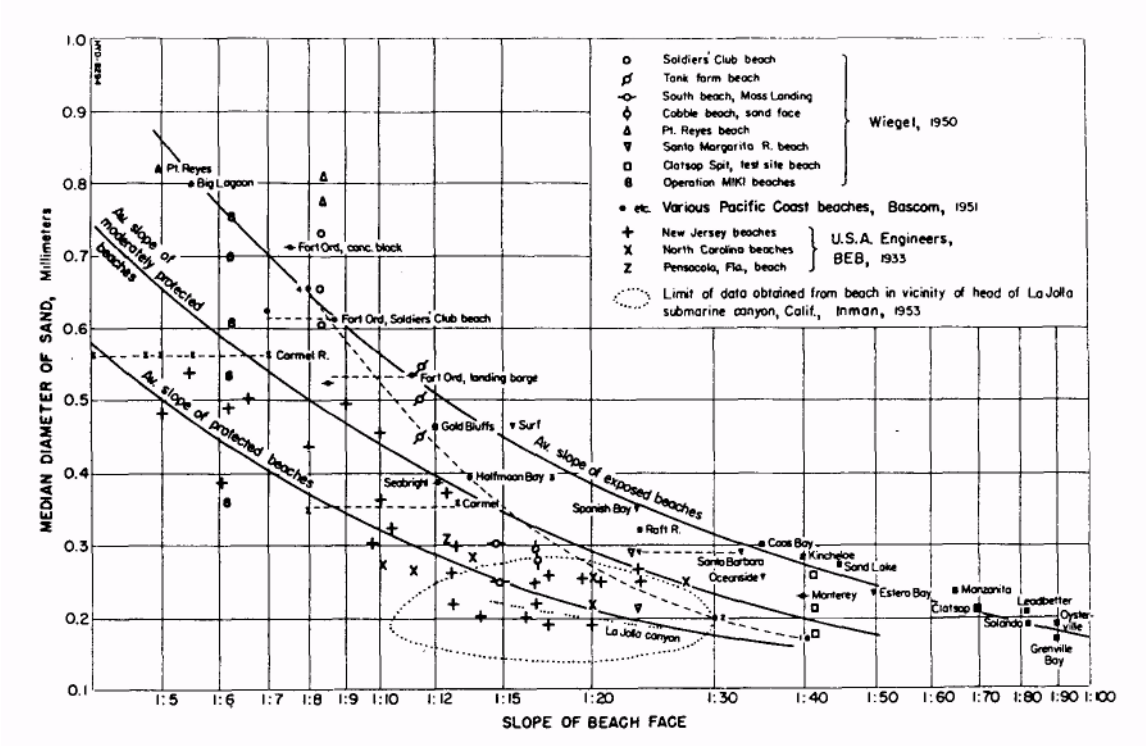

Figura 8. *Pendientes de equilibrio para diferentes tamaños de grano y grado de exposición al oleaje (Wiegel, 1964).*

puede aceptarse, de forma general, que la pendiente de equilibrio de la playa, m_{eq}, viene dada por

$$m_{eq} \sim K\left(\frac{H_b}{wT}\right)^{-0.5} \qquad (10)$$

Vellinga (1982), a partir de una serie de ensayos de laboratorio, obtuvo una relación de escala con la que se puede predecir el efecto de un cambio en la granulometría del sedimento en la forma del perfil de la playa. Esta relación viene dada por

$$\frac{l_n}{l_p} = \left(\frac{w_n}{w_p}\right)^{-0.56} \qquad (11)$$

donde l indica distancia horizontal (es decir la distancia horizontal entre dos cotas dadas), w es la velocidad de caída del sedimento, n indica características de la playa nativa (antes de la regeneración) y, p, indica características de la playa alimentada. La Figura 9 muestra un ejemplo de la aplicación de esta relación para dos casos distintos: (*a*) material de aportación más grueso que el nativo y, (*b*) material de aportación más fino que el nativo. Puede observarse que la utilización de un material más grueso hace que la pendiente de la playa regenerada sea mayor que la nativa (se necesita una menor longitud horizontal para una diferencia de cota dada), mientras que si se usa material más fino, la pendiente de equilibrio disminuiría (se necesitaría una mayor distancia horizontal para una misma diferencia de cota).

Una aproximación menos simplista al perfil de equilibrio es aquella en la que no sólo se predice una pendiente de equilibrio en función del diámetro de sedimento (lo que supone un perfil dado por un talud uniforme) sino que se predice la forma del perfil de forma más próxima a la naturaleza. Si bien en este caso el perfil es más próximo al real, el perfil predicho es el que adoptaría la regeneración tras actuar el oleaje y, no el que se tendría tras la puesta en obra, debido a la dificultad de ejecución.

El concepto básico es que el perfil de equilibrio sería aquel que disipa de forma uniforme la energía incidente en el mismo. Puesto que el oleaje es variable en el tiempo, el "perfil de equilibrio" representa el estado de equilibrio respecto al oleaje dominante, sobre el cual se producirán fluctuaciones en función de las características del oleaje incidente.

Existen diversas expresiones para determinar el perfil de equilibrio de una playa basadas en curvas potenciales (Dean, 1977,1991), exponenciales (Bodge, 1992; Komar y McDougal, 1994), considerando la variación del tamaño de sedimento a través del perfil (Larson, 1991),

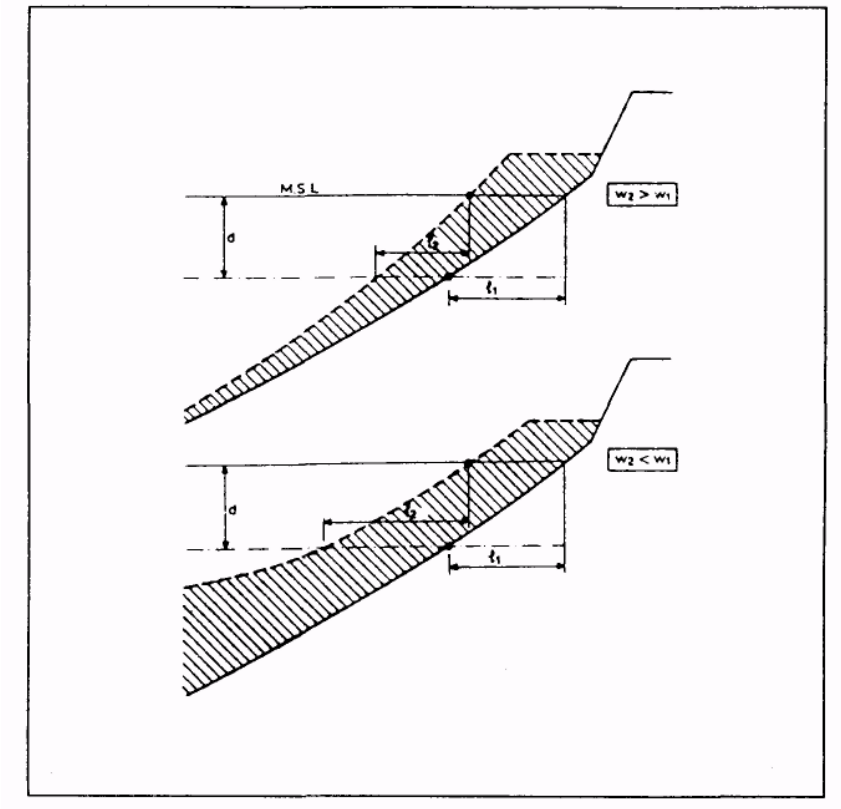

Figura 9. *Efecto de las diferencias en el tamaño de grano en la forma del perfil (1: material nativo; 2: material de aportación) (CUR, 1988).*

presencia de barras (Inman *et al*., 1993), etc.

La mayor parte de estas expresiones predicen la forma del perfil de la playa de equilibrio en función de las características del sedimento que compone la playa. Aunque algunas de ellas han sido derivadas teniendo en cuenta la física del proceso, el criterio de selección debe basarse en utilizar la curva que mejor ajuste a los datos disponibles si estos existen. Como ésto no siempre ocurre, a continuación se presenta la curva de equilibrio propuesta por Dean (1991), en la que se modifica la clásica expresión potencial propuesta ya porBruun (1954) para incluir términos gravitacionales

$$y = \frac{h}{m} + \frac{1}{A^{3/2}} h^{3/2} \qquad (12)$$

siendo y la distancia hasta la costa, h la profundidad local, m la pendiente de la playa en el entorno de la línea de orilla y A un parámetro que depende de las características del sedimento (ver Figura 10). En las proximidades de la línea de orilla predomina el primer término de la ecuación (9), quedando $h=m\ y$, es decir una playa con pendiente uniforme, mientras que, a medida que aumenta la distancia a la orilla, predomina el segundo término, quedando $h = A\ y^{2/3}$ que es la expresión clásica del perfil de Dean (1977).

En Dean (1991) puede verse la aplicación de este perfil de equilibrio para estimar la respuesta de la playa ante diversos conidicionantes como la presencia de estructuras, tormentas, cambios en el nivel del mar, etc...

A la hora de aplicar expresiones de perfil de equilibr io hay que tener en cuenta que éstas predicen una forma simple de perfil, en la que no se tienen en cuenta características morfológicas tales como barras, surcos, etc.

Perfil de erosión

A la hora de diseñar una alimentación de playas, muchas veces es deseable conocer, o al menos estimar, cual será la respuesta del perfil regenerado a la acción de un tormenta. En estos casos, el perfil de equilibrio corresponde a un estado de "equilibrio extremo", denominado "perfil de erosión".

La forma óptima de calcular este "perfil de erosión" sería estimar el transporte de sedimento que se produce bajo la acción de la tormenta y, las modificaciones consiguientes que se producirán en el perfil. Sin embargo, dado que esto sólo puede hacerse de forma determinista utilizando modelos no disponibles generalmente (ver *e.g.* Steetzel, 1993), hay que utilizar herramientas más sencillas. Entre ellas, y al igual que lo

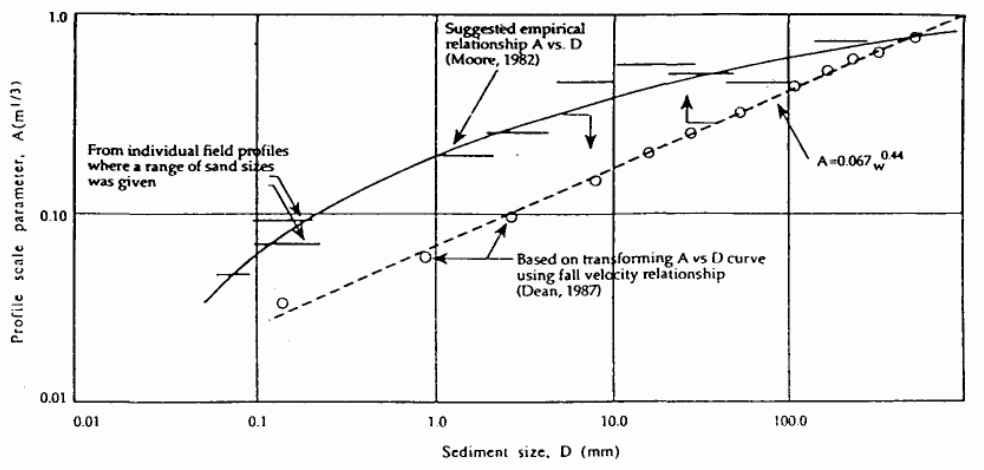

Figura 10. *Variación del parámetro A con el tamaño del sedimento (Dean, 1991).*

expuesto para formas en planta a lo largo de este artículo, se encuentran diversas soluciones analíticas que pueden ser aplicadas si bien no para predecir con toda exactitud el efecto de la tormenta, si para estimar un orden de magnitud de la respuesta esperable.

Uno de los métodos más conocidos es el perfil de erosión de Vellinga (1986), que predice la forma del "perfil de erosión" tras el paso de una tormenta a partir de un análisis empírico realizado con ensayos de laboratorio de gran escala y datos de campo. El perfil de erosión vendrá dado por (ver Figura 11.a):

$$\frac{7.5}{H_{os}} = 0.47\left[\left(\frac{7.6}{H_{os}}\right)^{1.28}\left(\frac{w}{0.0268}\right)^{0.56} x + 18\right]^{0.56} - 2 \qquad (13)$$

donde *Hos* es la altura de ola significante en aguas profundas *y, x* es la distancia a la orilla, siendo el límite aguas adentro del perfil en horizontal

$$x = 250\left(\frac{H_{os}}{7.6}\right)^{1.28}\left(\frac{0.0268}{w}\right)^{0.56} \qquad (14)$$

y en vertical

$$y = 0.75\, H_{os} \qquad (15)$$

La forma práctica de estimar este perfil de erosión es desplazándolo hacia costa hasta que las superficies de erosión *y* acumulación se equiparen.

Kriebel y Dean (1993) proponen otro método analítico para estimar la erosión que se produce en un perfil de playa ante la acción de una tormenta (storm surge y olas), partiendo del concepto del perfil de equilibrio antes descrito. Este procedimiento, conocido como el método de convolución, da una estima de la erosión máxima esperable, R_∞, bajo la acción de una tormenta con un "storm surge" (sobreelevación), *S, y* una zona de rotura caracterizada a través de una profundidad h_b, *y* una anchura x_b, para un perfil con pendiente *m y* una berma *B* (ver Figura 11 .b)

$$R_\infty = \frac{S(x_b - h_b/m)}{B + h_b - S/2} \qquad (16)$$

y donde el volumen de sedimento erosionado por encima del nivel medio original es:

$$V_\infty = R_\infty B + \frac{S^2}{2m}\,\frac{2S^{2.5}}{5A^{1.5}} \qquad (17)$$

siendo *A* el parámetro del perfil de equilibrio (ver Figura 10).

Estos mismos autores proponen otra serie de ecuaciones para estimar la máxima erosión esperable para diferentes tipos de perfil inicial, así como su evolución en el tiempo.

Hay que tener en cuenta, a la hora de aplicar estos métodos u otros propuestos en la literatura (ver *e.g.* Dean y Maurmeyer, 1983), que todos ellos predicen la erosión debido exclusivamente al transporte transversal de sedimento. Es decir, no consideran ni el transporte longitudinal ni los fenómenos morfológicos asociados, por lo que muchas veces infravaloran la erosión que se producirá como por ejemplo, ante la acción de una tormenta en la que el oleaje incida oblicuamente, es de esperar un gradiente en el transporte longitudinal. La erosión debida a este gradiente tendría que añadirse a la erosión "transversal" dada por los modelos de perfil.

Evolución del perfil de playa sin restricciones

Adicionalmente a los casos citados, "perfil de equilibrio" y "perfil de erosión", existe una serie de modelos que estiman la evolución del perfil de una playa ante la acción

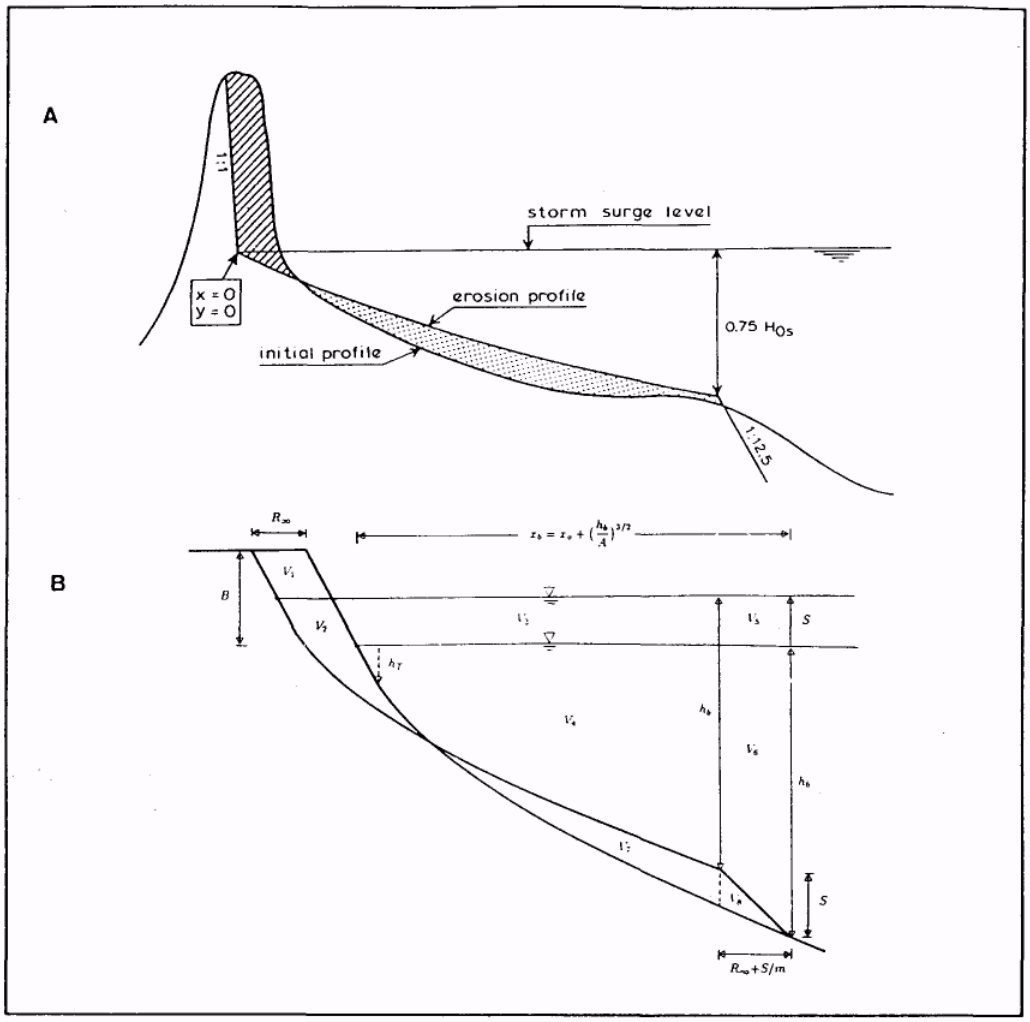

Figura 11. *Perfiles de erosión (A: Vellinga, 1986; B: kriebel y Dean , 1993).*

del oleaje sin predeterminar la forma final del perfil. Estos modelos, de tipo determinista, donde se resuelve la hidrodinámica actuante, el transporte de sedimento generado y, por último, la evolución del fondo inducida se denominan modelos 2DV.

La principal ventaja de estos modelos es que estiman la evolución del perfil ante cualquier tipo de condiciones hidrodinámicas actuantes y para cualquier tipo de perfil inicial. Las desventajas de tales modelos radican en el número de coeficientes de calibración existentes y que, muchas veces, si bien estiman de forma apropiada un tipo de respuesta, *i.e.* erosión, no lo hacen tan bien en el otro sentido, *i.e.* acreción.

Asimismo, la escala temporal de estos modelos suele ser corta con respecto a la escala de trabajo en ingeniería, por lo que en la mayoría de las veces habrá que utilizarlos para caracterizar la respuesta del perfil bajo unas condiciones hidrodinámicas características de una situación meteorológica determinada.

Existe un número relativamente grande de estos modelos, con diferentes descripciones de la hidrodinámica y del transporte de sedimento asociado. En Hedegaard *et al.* (1992) puede verse una comparación del comportamiento predictivo de varios de los modelos existentes.

CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se han presentado algunas de las herramientas disponibles para estimar los cambios en planta y perfil que sufren las playas sedimentarias. Su utilización si bien no implica que seamos capaces de determinar con una precisión milimétrica los cambios naturales o inducidos que se presentarán, si que permitirán estimar un orden de magnitud de tales cambios.

Por supuesto que intentar aplicar las mejores herramientas disponibles no está al alcance de toda la comunidad involucrada en la ingeniería de playas, sobre todo teniendo en cuenta que muchas de ellas

están en fase experimental y/o desarrollo. Sin embargo, esto no exime de utilizar otras que, aunque con una menor precisión, predicen de forma aceptable el comportamiento del diseño realizado.

Esto es especialmente necesario si se piensa que los proyectos de regeneración/ alimentación de playas suponen el diseño de una obra efímera, sujeta a la acción de unos agentes impulsores aleatorios que, modificarán el diseño original en función de sus características. Muchas veces cuando se consulta un proyecto de regeneración, se tiene la impresión de que la obra diseñada es tan permanente como un dique. Sin embargo, si bien en el diseño estructural de obras marítimas se debe estimar una ola de cálculo que determina la vida útil de la obra, en el caso de regeneración de playas, la vida útil viene determinada por la intensidad de los procesos litorales que actúan sobre ella.

Esto implica que si una playa regenerada o alimentada artificialmente, se erosiona tras un periodo de tiempo y, vuelve a su situación inicial, el diseño realizado habrá sido el correcto, si hemos sido capaces de determinar o preveer tal modificación a unas escalas de tiempo y espacio próximas a las reales. Por otro lado, si en el proyecto realizado no se incluye ninguna previsión de tal comportamiento, se ha de suponer que dicha regeneración está planteada de forma permanente y por tanto, de durabilidad ilimitada.

AGRADECIMIENTOS

Parte de este trabajo ha sido realizado gracias a la colaboración del Programa de Clima Marítimo (Ente Público de Puertos del Estado) a través del convenio *Procesos Hidrodinámicos en Zona de Rompientes.*

REFERENCIAS

Berenguer, J.M. y Enríquez, J. *(1988). Design of pocket beaches. Proc. 21st* Coastal Eng. Conf., ASCE, 1411-1425.

Bodge, K. (1992). *Representing equilibrium beach profiles with an exponential expression.* J. of Coastal Research. 8, 47-55.

Bruun, P. (1953). *Forms of equilibrium coasts with littoral drift.* Tech. Rep. 3, University of California, Engineering Research Laboratory, Berkeley.

Bruun, P. (1954). *Coast erosion and the development of beach profiles.* Beach Erosion Board, Techn. Memo. 44.

CUR. (1988). Manual on Artificial Beach Nourishment. Rijkswaterstaat, The Netherlands, 195 pp y anejos.

Dalrymple, R.A. (1992). *Prediction of storm/normal beach profiles.* J. of Waterway. Port. Coastal and Ocean Engineering. 118, 2, 193-200.

Dalrymple, R.A. y Thompson, W. *(1976). Study of equilibrium beach profiles.* Proc. 15th Coastal Eng. Conf.. ASCE. 1277-1296.

Dean, R.G. (1973). *Heuristic models of sand transpon in the surf zone.* Proc. of the Conf. on Engineering Dynamics in the surf zone. 208-214.

Dean, R.G. (1977). Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf Coasts. Dept. of Civil Eng., Ocean Eng. Tech. Rep. 12, Univ. of Delaware.

Dean, R.G. (1997). *Equilibrium beach profiles: characteristics and applications.* J. of Coastal Research. 7, 1, 53-84.

Dean, R.G. y Maurmeyer, E.M. *(1983). Models for beach profile response.* En: Komar, P.D. (ed.), Handbook of Coastal Processes and Erosion. CRC Press, Boca Ratón, 151-166.

Dean, R.G. y Yoo, C. 1993. *Predictability of beach nourishment perfomance.* En: Stauble, D.K. y Kraus, N.C. (eds.), Beach Nourishment Engineering and Management Considerations. ASCE, 86-102.

De Vriend, H.J.; Zyserman, J.; Nicholson, J.; Roelvink, J.A.; Pechón, P. y Southgate, H.N. (1994). *Medium-term 2DH coastal área modelling.* Coastal Engineering. 21. 193-224.

Garau, C. (1979). *Condicionantes de la estabilidad de playas. A nálisis de la función polar de los salientes.* II Curso de Ingeniería Oceanogràfica y Portuaria. Santander.

Hedegaard, I.B.; Roelvink, J.A.; Southgate, H.; Pechón, P.; Nicholson, J. y Hamm, L. (1992). *Intercomparison of coastal profile models.* Proc. 23rd Coastal Eng. Conf.. ASCE, 2108-2121.

Horikawa, K. (1988) Nearshore Dynamics and Coastal Processes. University of Tokyo Press, Tokyo.

Hoyle, J.W. y King, G.T. (7955). *The orígin and stability of beaches.* Proc. 6th Coastal Eng. Conf.. ASCE,'281-301.

Hsu, J.R.C. y Evans, C. (1989). *Parabolic hay shapes and applications.* Proc. Institution of Civil Engineers. 87, 557-570.

Inman, D.L.; Elwany, M.H.S. y Jenkins, S.A. (1993). *Shorerise and bar-berm profiles on ocean beaches.* J. of Geophysical Research, 98. C10.18181 -18199.

Jiménez, J.A. (1995). *BEACH1L.* Laboratori d'Enginyeria Marítima, Universitat Politécnica de Catalunya, Barcelona, 41 pp y anejos.

Jiménez, J.A. y Sánchez-Arcilla, A. (1992). *Simulación de cambios a corto plazo en la línea de costa.* Revista de Obras Públicas. 3315, 41-51.

Jiménez, J.A. y Sánchez-Arcilla, A. *(1993). Influencia de la pendiente en la evolución del perfil de playa.* II Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Gijón (en prensa).

Jiménez, J.A.; Sánchez-Arcilla, A. y Stive, M.J.F. (1993). Discussion on Prediction of storm/normal beach profiles. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering,* 119, 4, 466-468.

Jiménez, J.A.; Valdemoro, H. y Sánchez-Arcilla, A. (1995). *Discussion on A nalysis of bayed beaches in static equilibríum.* J. of Waterway. Port. Coastal and Ocean Engineering. Mav/June (en prensa).

Komar, P.D. (1976). Beach Processes and Sedimentation. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, 429 pp.

Komar, P.D. y McDougal, W.G. (1994). *The analysis of exponential beach profiles.* J. of Coastal Research. 10, 1, 59-69.

Kraus, N.C. (1985). *Prediction models of shoreline change.* En: Horikawa, K. (ed.), Nearshore Dynamics and Coastal Processes. University of Tokyo Press, Tokyo, 321-366.

Kriebel, D.L. y Dean, R.G. (7995). *Convolution methodfor time-dependent beach-profile response.* J. of Waterway. Port. Coastal and Ocean Engineering. 119, 2, 204-226.

Kriebel, D.L.; Kraus, N.C. y Larson, M. (1991). *Engineering methods for predicting beach profile response.* Coastal Sediments' 91. ASCE, 557-571.

Larson, M. (1955). *Ouantification of beach profile change.* Report 1008, Dept. of water Resources Eng., Lund University.

Larson, M. (1991). *Equilibríum beach profiles of a beach with varying grain size.* Coastal Sediments'91. ASCE, 905-919.

Larson, M.; Hanson, H. y Kraus, N.C. (1987). Analytical solutions of the one-line model of shoreline change. Tech. Rep. CERC-87-15.

Le Blond, P.H. (1972). *On the formation of spiral beaches.* Proc. 13th Coastal Eng. *Conf.*. ASCE, 1331-1345.

Negro, V. (1990). *La variabilidad de los perfiles de playa. Perfiles de verano e invierno. Análisis histórico(1ª parte).* Revista de Obras Publicas. Marzo 1990, 23-29.

Ozasa, H. y Brampton, A.H. *(1980). Mathematical modelling of beaches backed by seawalls.* Coastal Engineering. 4, 1, 47-64.

Pelnard-Considere, R. (1956). *Essai de theorie de l'evolution des formes de rivage de sable et de galets.* 4th Journees de l'Hydraulique. Question III, Rapport 1, 289-298.

Rivero, F. (1995). PROPS. Laboratori d'Enginyeria Marítima, Universitat Politécnica de Catalunya, Barcelona.

Sánchez-Arcilla, A. y Jiménez, J.A. (1994). *Ingeniería de playas (I): conceptos de morofología costera.* Ingeniería del Agua. 1, 2, 97-114.

Short, A.D. (ed.) *(]993). Beach and surf zone morphodynamics.* J. of Coastal Research. Special Issue 15.

Silvester, R. (1970). *Growth of crenulated shaped bays to equilibríum.* J. of Waterways and Harbours División. 96, WW2, 275-287.

Silvester, R. y Hsu, J.R.C. (1991). *New and oíd ideas in coastal sedimentation.* Reviews in Aquatic Sciences. 4, 4, 375-410.0

Steetzel, H.J. (1993). *Cross-shore transpon during storm surges.* Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 242pp.

Sunamura, T. (1984). *Quantitativeprediction ofbeach-face slopes.* Geological Soc. of Amer. Bull.. 95, 242-245.

Sunamura, T. (1985). *Beach morphologies and their change.* En: Horikawa, K. (ed.), Nearshore Dynamics and Coastal Processes. Univ. of Tokyo Press, Tokyo, 136-157.

Tan, S.K. y Chiew, Y.M. (1994). *Analysis of bayed beaches in static equilibríum.* J. of Waterway. Port. Coastal and Ocean Engineering. 120. 2, 145-153.

Vellinga, P. (1982). *Beach and dune erosión duríng storm. surges. Coastal Engineering,* 6, 806-819.

Vellinga, P. (1986). Beach and dune erosión during storm surges. Ph. D. Thesis, Delft University of Technology.

Walton, T.L. (1994). *Shoreline evolution for tapered beach fill.* J. of Waterway. Port. Coastal and Ocean Engineering. 120, 6, 651-655.

Wiegel, R.L. *(1964)* Oceanographic Engineering. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

Wind, H.G. (1994). *An analytical model of crenulate shaped beaches. Coastal Engineering.* 23. 243-253.

Yasso, W.E. (1965). *Plan geometry of headland hay beaches.* J. of Geology. 73. 702-714.