



MODELO MORFODINÁMICO PARA PLAYAS EXPUESTAS DE BAJA ENERGÍA. APLICACIÓN A LA PLAYA DE VISTAHERMOSA (BAHÍA DE CÁDIZ)

Morphodynamic model for low-energy exposed beaches. Application to Vista Hermosa beach (Cádiz Bay)

J. Benavente, F. J. Gracia y F. López Aguayo

*Dpto. de Geología. Facultad de Ciencias del Mar, Universidad de Cádiz. 11510 Puerto Real (Cádiz)
E-mail: javier.benavente@uca.es*

Resumen. Este trabajo presenta un estudio bidimensional de las variaciones morfológicas de una playa de la Bahía de Cádiz y su relación con las condiciones energéticas del oleaje incidente. El estudio consistió en el perfilamiento topográfico mensual de la playa durante cuatro años consecutivos, con el objeto de modelizar su comportamiento morfodinámico. Para ello se aplicaron inicialmente modelos predictivos clásicos, obteniéndose resultados poco ajustados al comportamiento real de la playa. Tras el análisis de las variables morfológicas y energéticas, proponemos un índice energético, que denominamos *factor de erosividad del oleaje*, que se ajusta satisfactoriamente a los rangos de variación morfológica natural observados en dicha playa. La curva de ajuste así obtenida recoge tendencias asintóticas hacia estados morfodinámicos extremos: en playas reflectivas, pequeños aumentos de la erosividad del oleaje producen cambios morfológicos importantes, mientras que en playas disipativas, un aumento de la erosividad no produce modificaciones significativas.

Palabras Clave: *procesos costeros, modelo morfodinámico, playas, Bahía de Cádiz.*

Abstract. Four years of a monthly monitoring was carried out in a South Atlantic Spanish beach, in a low-energy environment where beaches change slowly, following a typical seasonal behaviour. In this work a two-dimensional study of beach morphological variations has been made, related to the incident wave fluctuant conditions. After applying classical morphodynamic parameters to the field data, poor or null representative results were obtained. It was then necessary to design another energetic characterisation of the incident wave energy. A new index, named *wave erosivity factor*, was introduced in this sense. The resulting ratio between beach gradient and wave erosivity expresses the equilibrium state of the beach for any given energy level. The departure from the equilibrium curve is largest in the intermediate situations, while at the extremes the points are better adjusted to asymptotic tendencies towards equilibrium: on reflective states, small increases in the wave erosivity will produce important beach changes; on dissipative beaches, important increases in the wave erosivity will not produce significant morphological modifications.

Keywords: *Coastal processes, morphodynamic model, beaches, Cadiz Bay*



Benavente, J., Gracia, F. J. y López-Aguayo, F. (2000). Modelo morfodinámico para playas expuestas de baja energía. Aplicación a la playa de Vista Hermosa (Bahía de Cádiz). *Rev. C.&G.*, 13 (3-4), 47-61. © SEG. AEQUA. GEOFORMA Ediciones.

1. Introducción

El presente trabajo tiene por objeto conocer el comportamiento morfodinámico de una playa expuesta de la Bahía de Cádiz. Probablemente, la manera más eficaz de conocer la respuesta de una playa, ante condiciones cambiantes del oleaje incidente, es modelizar su comportamiento mediante el uso de parámetros empíricos sencillos.

La mayoría de los modelos de playas propuestos en la literatura trabajan con variables simples y fáciles de medir. Dichas variables son, fundamentalmente, la energía del oleaje (H_o , altura de ola en condiciones de aguas profundas, H_b , altura de ola en rompiente, T , periodo, L_o , longitud de onda en condiciones de aguas profundas), las características del sedimento (D_{50} , tamaño medio de grano, y W_s , velocidad de caída de grano) y la morfología de la playa (normalmente expresada como $\tan\beta$, siendo β la pendiente o gradiente medio de la playa). La combinación empírica o teórica de estas variables da lugar a una serie de índices y parámetros, generalmente descriptivos y semicuantitativos, que tienden a caracterizar y predecir el comportamiento de la playa (Dean, 1973; Hsu & Wang, 1997). Los modelos cuantitativos bidimensionales propuestos parten normalmente de medidas efectuadas sobre el terreno, o bien de experimentos en tanques de oleaje.

No obstante, una fuente de error muy común en el estudio de la morfodinámica de playas reside en la estimación de H_b , que depende de la batimetría del fondo sublitoral y de su posible variación lateral (Larson & Kraus, 1994). Algunos trabajos más recientes se refieren a valores de H_b medidos mediante transductores de presión durante cortos periodos de tiempo. Sin embargo, la dificultad de utilizar estos equipos durante largos periodos (varios meses) inhabilita este procedimiento en playas de baja variabilidad. Se pueden aplicar entonces conversiones del tipo H_b/H_o , que requieren la existencia de gradientes sublitorales homogéneos, con poca o nula variación lateral.

Por otro lado, la escuela australiana de estudios litorales desarrolló el concepto de *perfil de equilibrio de una playa*, adaptado a una situación energética dada (Wright & Short, 1984; Wright et al., 1985). Dicha escuela estableció seis estados de equilibrio, discriminados mediante la aplicación de índices morfodinámicos ya conocidos, como los pro-

puestos por Battjes (1974) y Guza & Inman (1975). Posteriormente, consideraron también la importancia relativa del rango mareal (Masselink & Short, 1993; Masselink & Hegge, 1995). No obstante, estos modelos no se adaptan bien a playas de baja energía, donde los rangos de variación morfológica son pequeños, con bajas velocidades de cambio.

Además, existen casos en los que la modelización morfodinámica resulta especialmente difícil. Por ejemplo, las playas pequeñas y restringidas pueden introducir algunas complicaciones, ligadas normalmente a procesos de refracción/difracción del oleaje. En otros casos, la existencia de barras en la zona interlitoral supone una dificultad añadida, ya que introducen un filtrado diferencial de la energía incidente. Este tipo de playas con barras habitualmente se corresponden con estadios intermedios dentro de la clasificación de Wright & Short (1984) y son muy comunes en ambientes mesomareales. La alta movilidad y variabilidad morfológica de este tipo de playas hace que su modelización sea normalmente muy difícil (Anthony, 1998).

En el presente trabajo se ha tratado de minimizar en lo posible y simplificar todas estas variables. Se han utilizado exclusivamente datos de campo, tomados en una playa mesomareal expuesta de muy baja energía, con predominio del transporte sedimentario transversal sobre el longitudinal. Este tipo de playas (mesomareales y de baja energía) habitualmente no son tratadas en los modelos, donde se suele utilizar datos procedentes de playas energéticas y mayor variabilidad morfológica. Como consecuencia del presente estudio se presenta un modelo empírico simple de estados de equilibrio, aplicado a una playa estacional de baja energía.

2. Area de estudio

El estudio se concentró en la playa de Vistahermosa (figura 1), situada al norte de la Bahía de Cádiz, en el litoral atlántico gaditano. El máximo rango de mareas vivas de la zona alcanza los 3.7 m, característico de una costa mesomareal. El rango de mareas medias mensuales es de 2 m, mientras que la altura media significativa del oleaje incidente (H_s) oscila en torno a 1 m.

La playa de Vistahermosa tiene una longitud total de 3 km y una anchura media de 50 m, medida desde el nivel medio del mar hasta el primer cor-

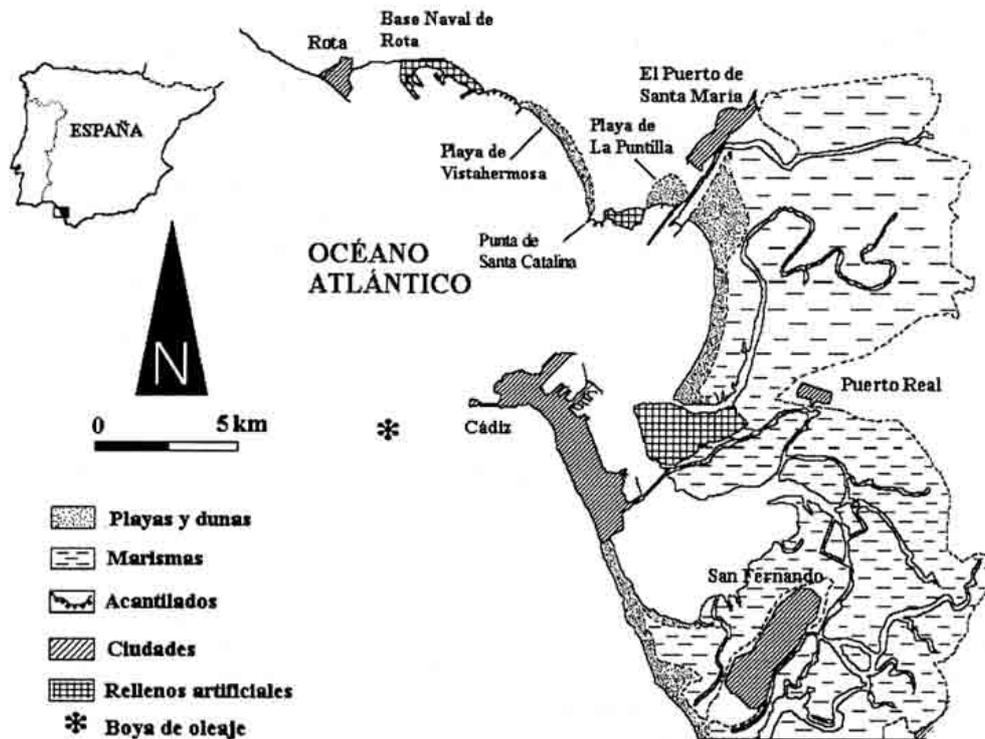


Figura 1. Mapa de localización de la zona estudiada.
Location map of the studied coast.

dón dunar. La playa se encuentra limitada al sur por una plataforma de abrasión rocosa (Punta de Sta. Catalina), mientras que su límite norte está constituido por un espigón artificial que la separa de una zona acantilada perteneciente a la Base Naval de Rota. La mayor parte de la playa está confinada hacia tierra por paseos marítimos, edificaciones y muros de contención, instalados sobre antiguos cordones dunares. Sólo una pequeña porción de 500 m de longitud, en el sector central de la playa, conserva una trasplaya natural, con algunos acúmulos dunares que fosilizan un pequeño acantilado trasero. Este acantilado, labrado sobre arenas pliocenas y estabilizado artificialmente en algunos puntos, aumenta progresivamente su altura hacia el norte.

3. Metodología

3.1. Clima marítimo

Los datos de oleaje fueron suministrados por el Servicio de Clima Marítimo del CEDEX (Ministerio

de Medio Ambiente), correspondientes a la boya escalar «Cádiz» (figura 1). Estos datos consisten en un listado de lecturas horarias de altura significativa de oleaje (H_s) y periodo de cruce por cero (T_z), que han sido tratados para obtener valores estadísticos promedio. En esta franja costera los frentes de oleaje proceden fundamentalmente del cuadrante NO y del SSE, en condiciones de mar de viento. En condiciones de mar de fondo predominan los oleajes procedentes del ONO. Sin embargo, el mayor recorrido de incidencia (*fetch*) y las olas más energéticas corresponden a vientos procedentes del oeste, que actúan normalmente durante los meses invernales. No obstante, la altura significativa de las olas incidentes rara vez supera los 4 m. Por tanto, esta costa puede considerarse como de baja energía.

El análisis de las condiciones de rompiente de las olas se llevó a cabo mediante la aplicación del programa informático REFIDIF® (Grassa, 1990), que simula los fenómenos de refracción y difracción. Dicho programa se aplicó utilizando valores típicos de H_s de 1 m, con un periodo asociado de 6 segundos, que se aproxima bastante a las condicio-

nes reales del sector estudiado. Como direcciones de aproximación de los frentes de oleaje se eligieron O, OSO y ONO, realizándose simulaciones para condiciones de pleamar y bajamar vivas. En la figura 2 se muestra el resultado más representativo de todos los obtenidos. Puede apreciarse cómo a lo largo de toda la playa no existen variaciones significativas en el valor de la altura teórica de rompiente del oleaje (H_b), lo cual concuerda con las observaciones realizadas sobre el terreno. De este modo, podemos suponer que la playa de Vistahermosa presenta un gradiente sublitoral homogéneo. Por lo tanto, es posible aplicar el reduccionismo propuesto por Komar & Gaughan (1972), en el sentido de considerar que la altura de ola en rompiente (H_b) es linealmente proporcional a la altura de ola en aguas profundas (H_o). Mediante este procedimiento se obtuvo una altura de ola en rompiente media anual de 1.1 m, con una desviación estándar de 0.7.

La línea de costa se orienta en dirección NNO-SSE. La llegada de frentes de oleaje procedentes del oeste, dirección habitual de aproximación, da

lugar a una cierta corriente longitudinal dirigida hacia el SE. No obstante, durante la actuación de temporales, la deriva litoral de la zona puede considerarse baja, ya que el ángulo de aproximación de los mismos es generalmente inferior a los 10° (Anfuso et al., 2000). Por otro lado, no existe una gradación longitudinal en la granulometría y mineralogía de los sedimentos de la playa, lo cual indica, según Mabesoone (1963), que las corrientes paralelas a la línea de costa tienen poca importancia en este sector.

3.2 Perfilamiento topográfico y muestreo de sedimentos

Las campañas de seguimiento de la playa se desarrollaron desde febrero de 1995 hasta abril de 1998, con una periodicidad mensual. En cada campaña se realizó un perfilamiento topográfico de la playa mediante el uso de teodolito electrónico, así como un muestreo de arena de tres muestras por perfil obtenidas en la zona interlitoral. Se realizaron un total de 29 campañas mensuales, llevadas a cabo

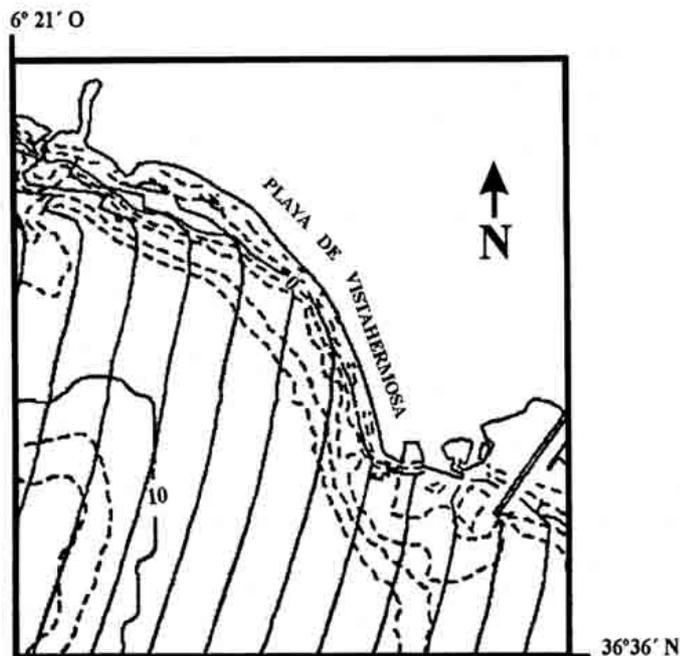


Figura 2. Diagrama de difracción del oleaje a lo largo de la playa estudiada para frentes de ola procedentes del ONO, con $H_s = 1$ m y $T_s = 6$ segs. Modelo de propagación del oleaje desarrollado con el programa REFDIF[®] (Grassa, 1990).

Wave diffraction diagram along the studied beach for WNW wave fronts with $H_s = 1$ m and $T_s = 6$ secs.
Wave propagation model performed with REFDIF[®] program (Grassa, 1990).

siempre en condiciones de bajamar viva. Las campañas se efectuaron a lo largo de cinco perfiles separados entre sí unos 500 m. Los perfiles se posicionaron a partir de puntos fijos en la trasplaya, prolongándose hacia el mar hasta un límite determinado por las condiciones de oleaje imperantes en el momento de muestreo. Durante las épocas estivales se interrumpió el seguimiento debido a la alta afluencia de bañistas. Además, las labores diarias de limpieza y redistribución superficial de arena de la playa seca, llevadas a cabo en esas fechas por el servicio de limpieza del Ayuntamiento de El Puerto de Santa María, modificaron la morfología de los perfiles. En los meses de diciembre de 1996 y 1997 también se interrumpió el seguimiento debido a la coincidencia de mareas vivas con situaciones de extremo mal tiempo. Finalmente, tras casi cuatro años de muestreo, se obtuvieron un total de 150 perfiles.

El seguimiento desarrollado durante el primer año (1995) sirvió para caracterizar el comportamiento medio de la playa. En abril de 1995 se realizó un seguimiento semanal, con el objeto de registrar posibles cambios menores de mayor frecuencia. Sin embargo, los resultados obtenidos llevaron a diseñar finalmente campañas de perfilamiento de carácter mensual, ya que suministraban una información suficientemente representativa del tipo de cambios experimentados por la playa. Por otro lado, durante 1995 se tomaron muestras mensuales de arena superficial para su posterior análisis granulométrico. No obstante, debido a la escasa variación granulométrica observada, se decidió realizar los posteriores muestreos de sedimento a intervalos estacionales (verano e invierno).

4. Análisis de los datos

4.1. Índices energéticos

El primer problema que surge cuando se estudia la situación energética de una costa es la definición de «situación de alta energía», o «situación de temporal». Las estimaciones visuales de los estados del mar proporcionan una idea general bastante válida, pero, en cualquier caso, su caracterización concreta requiere una cuantificación de las variables energéticas.

En los tres últimos años de estudio, las olas de tormenta o de temporal fueron predominantes

durante las épocas invernales y se caracterizaron por altos valores de H_s y T_z , variables que mostraron un comportamiento paralelo cíclico de carácter estacional (figura 3). A diferencia de las relaciones obtenidas por otros autores (Doorkamp & King, 1971; Hardisty, 1986), el peralte del oleaje (H/L , o por extensión, H/T^2) demostró ser un mal indicador de las condiciones energéticas. De hecho, no se obtuvo ninguna relación entre las variaciones de este parámetro y los cambios de la pendiente interlitoral de la playa. En costas de baja energía como la que nos ocupa, un énfasis excesivo en el periodo (T) da como resultado un registro totalmente homogéneo.

Un índice ampliamente utilizado en este sentido es el *parámetro adimensional de caída de grano*, W , propuesto por Gourlay (1968) y desarrollado por Dean (1973) y Dalrymple & Thompson (1976), el cual incorpora características tanto del oleaje como del sedimento:

$$W = H_b / (W_s T) \quad (1)$$

donde H_b es la altura de ola en rompiente, W_s es la velocidad adimensional de caída de grano y T es el periodo del oleaje.

Este parámetro fue utilizado por Wright et al. (1985) en la caracterización de sus ya clásicos seis estados de playas, dependiendo W_s fundamentalmente del tamaño de grano (Gibbs et al., 1971). Sin embargo, en nuestro estudio, D_{50} (mediana de la distribución granulométrica) mostró un rango de variabilidad mínimo, prácticamente despreciable, con lo que su utilidad, desde un punto de vista puramente energético, resultó ser muy limitada. En consecuencia, se aplicó el parámetro de Gourlay considerando W_s como constante, es decir, se utilizó la relación simple H_o/T (ó H_b/T , una vez realizada la conversión). Se obtuvo una buena correspondencia con los episodios de tormenta/calma observados visualmente durante 1995, así como una distribución cíclica de situaciones energéticas mucho más ajustada a la realidad (figura 3). Por tanto, se puede concluir que, para esta costa de baja energía, el parámetro de Gourlay es un buen indicador de las características del oleaje incidente, pudiendo ser utilizado para la discriminación cuantitativa entre condiciones de temporal y de mar de fondo. El valor discriminante de H_o/T obtenido para condiciones de temporal

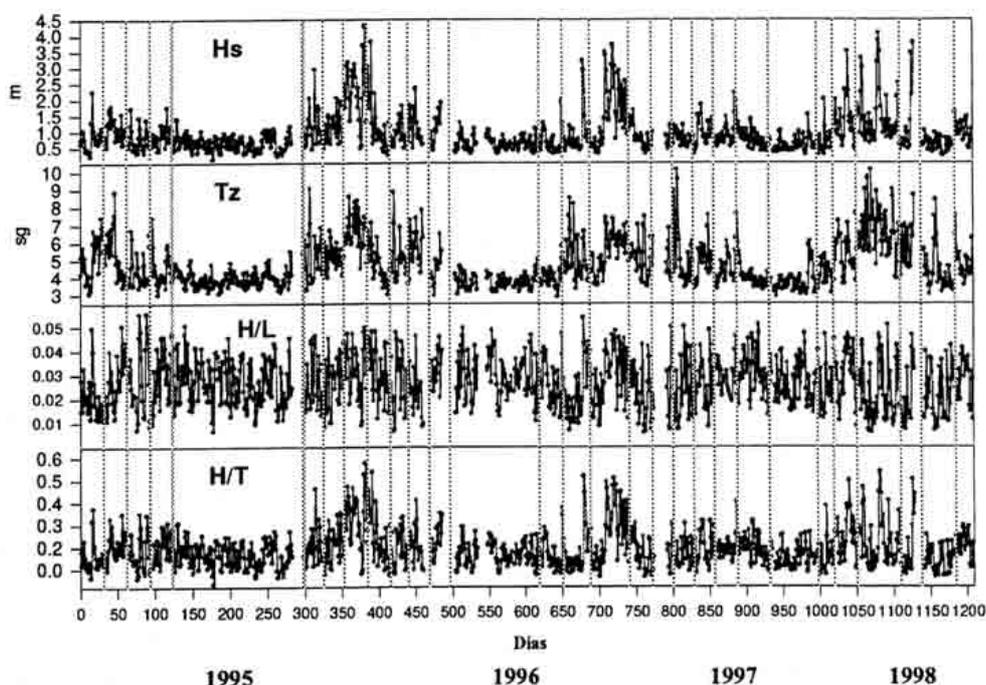


Figura 3. Variación temporal de los parámetros del oleaje durante el periodo muestreado: H_s (altura de ola significativa), T_z (periodo de cruce por cero), H/L (peralte del oleaje en aguas no reducidas) y H_0/T . También se ha incluido la distribución temporal de campañas de seguimiento de la playa (líneas grises verticales).

Temporal variation of wave parameters during the surveyed period: H_s (significant wave height), T_z (crossing-zero period), H/L (deep water wave steepness) and H_0/T . Temporal distribution of beach monitoring surveys are also included (vertical grey lines).

fue de 0.3, asociado a una altura de ola significativa de 2 m y un periodo de 6 segundos.

Como premisa inicial puede suponerse que las olas con valores altos de H_0/T deberían ser siempre erosivas. Sin embargo, en algunos casos sus alturas no son suficientemente importantes (véase, por ejemplo, el registro entre los días 50 y 100 de la figura 3) y por tanto su «eficiencia erosiva» es a veces muy baja. Es el caso de los frecuentes vientos fuertes procedentes del Estrecho de Gibraltar (componente SE, vientos de levante), que generan olas de corto periodo pero de altura muy reducida, debido al escaso *fetch*.

La densidad energética desarrollada por un frente de ola es también un parámetro ampliamente utilizado para caracterizar las condiciones energéticas del oleaje incidente. Dicha densidad energética viene expresada por (CERC, 1973):

$$E = \rho g H_b^2 / 8 \quad (2)$$

donde ρ es la densidad del agua del mar, g es la constante gravitatoria y H_b es la altura de ola en

rompiente. Aquí, la altura de ola es la única variable energética. Mediante este parámetro podemos estimar el flujo energético del oleaje incidente.

Si tenemos también en consideración el carácter erosivo del oleaje, podremos obtener una idea de su eficiencia erosiva real. Para ello se ha introducido un nuevo parámetro que discrimina entre condiciones erosivas o agradantes para una playa determinada. Este parámetro, que hemos denominado «factor de erosividad del oleaje» (E_r), proviene del producto entre los dos parámetros energéticos anteriores, W y la densidad energética del oleaje (E). El factor resultante, considerado como un parámetro indicativo del potencial erosivo de las olas incidentes, incluye dos variables físicas dinámicas principales, y enfatiza el papel de la altura de ola:

$$E_r = E W = \rho g H_b^3 / 8 W_s T \quad (3)$$

Los resultados granulométricos reflejaron variaciones mínimas en el valor del D_{50} medio, siempre inferiores a 0.1 mm y correspondientes a un tamaño de grano de arena media próxima a

arena fina. Debido a la casi nula variabilidad granulométrica de la playa de Vistahermosa durante todas las campañas, se consideró un valor constante de D_{50} para calcular W_s . Por lo tanto, puede definirse una constante de proporcionalidad K_d que incluya las variables granulométricas y densimétricas para la playa de Vistahermosa:

$$K_d = \rho g / 8W_s \quad (4)$$

Finalmente, y como consecuencia de lo anterior, el factor de erosividad tendría la siguiente expresión:

$$E_r = K_d H_b^3 / T \quad (5)$$

que tiene dimensiones de energía.

En este estudio, para cada campaña de seguimiento se promediaron los valores de altura de ola del mes precedente. De esta forma se considera la influencia que la morfología inicial de la playa ejerce sobre el tipo de actuación del oleaje, según un proceso de retroalimentación ya puesto de manifiesto por Hardisty (1986). El efecto de un temporal o de un oleaje de buen tiempo dependerá de la forma que tenga la playa, la cual a su vez depende del oleaje precedente. Se relacionó así la erosividad del oleaje, promediada para las condiciones imperantes entre dos campañas consecutivas, con la pendiente o gradiente interlitoral que mostraba la playa después de este periodo de tiempo (es decir, durante la segunda de las campañas consideradas).

4.2 Índices morfológicos

La determinación de los gradientes de la playa se restringió a la zona intermareal, ya que en ésta los procesos de «surf» y «swash» actúan durante la mayor parte del tiempo (Masselink & Short, 1993). Para su cálculo, se dividió el valor de la pendiente media en cada perfil por el máximo valor adquirido por el perfil durante todo el periodo estudiado. De este modo se obtuvo el *gradiente de playa normalizado*, cuya aplicación a todos los perfiles permitió su comparación directa y el cálculo de una pendiente media normalizada de toda la playa. Este procedimiento minimiza la influencia de posibles variaciones locales, cuya cuantificación es muy difícil (Thom & Hall, 1991; Takeda & Sunamura, 1992). No obstante, esta simplificación puede hacerse sólo en playas que presenten un com-

portamiento homogéneo en sentido longitudinal, como es el caso de Vistahermosa (figura 2).

Algunos autores dividen la zona intermareal en dos segmentos, superior e inferior, para el cálculo de las pendientes (Masselink & Hegge, 1995), fundamentalmente en playas con un replano o «terrazza de bajamar». Sin embargo, la playa de Vistahermosa presentó gradientes intermareales prácticamente constantes en todos los perfiles estudiados, por lo que se decidió utilizar un único valor de pendiente interlitoral. Tras relacionar el factor de erosividad del oleaje con la pendiente de la playa durante el primer año se obtuvo una buena correspondencia. Se observaron bajos gradientes de playa, correspondientes a estadios disipativos, para valores altos de E_r , y viceversa (figura 4a). Relaciones similares se obtienen si se consideran volúmenes de arena: estados de alta erosividad del oleaje incidente dan lugar a un menor volumen de arena remanente en la playa (figura 4b).

En muchos trabajos previos sobre morfodinámica de playas se han usado las variaciones en el volumen de arena como indicadores del estado de la playa (Carr *et al.*, 1982; Thom & Hall, 1991). En la playa de Vistahermosa la pendiente intermareal mostró una buena correlación lineal con las variaciones de volumen a lo largo de las campañas de 1995 (figura 4c). Por tanto, se optó por la utilización del gradiente de playa, por ser un buen indicador de su estado acumulativo/erosivo. Por otro lado, la playa presentó una tendencia erosiva, a medio-largo plazo, con una progresiva disminución del volumen de arena de la playa con el tiempo. Como resultado, ante la incidencia de un mismo régimen de oleaje, la playa presentó menos volumen de arena durante las últimas campañas, en comparación con los muestreos iniciales. Por esta razón y por las consideraciones hechas anteriormente, se utilizaron preferentemente las variaciones en el gradiente de playa intermareal medio normalizado, en lugar de los cambios volumétricos.

5. Comportamiento morfodinámico de la playa

Los resultados obtenidos del seguimiento desarrollado durante el primer año (1995), proporcionaron una caracterización general del comportamiento morfodinámico de la playa. Las situacio-

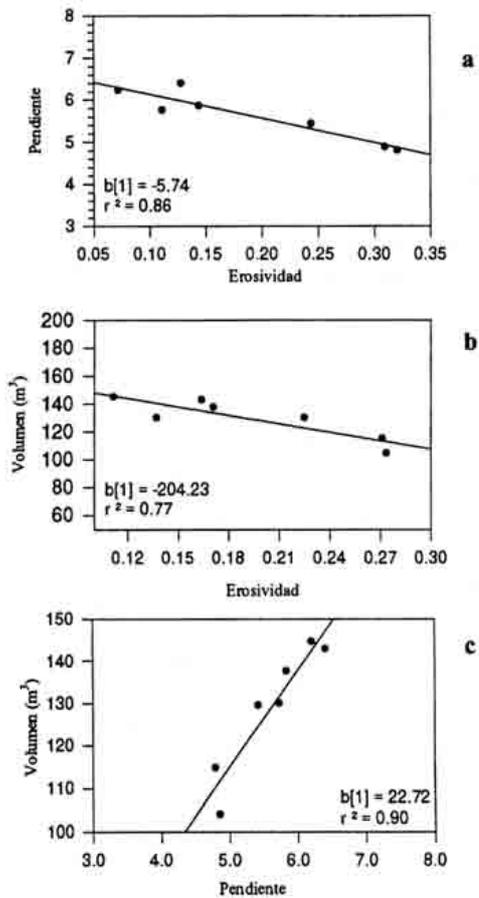


Figura 4. Gráficas que relacionan el factor de erosividad del oleaje (E_r) y el gradiente medio de la playa (a), el factor E_r y el volumen de arena (b), y la pendiente normalizada con el volumen de arena de la playa (c), todas elaboradas a partir de los datos obtenidos durante el primer año de seguimiento (1995).

Relationship between wave erosivity factor (E_r) and medium beach gradient (a), E_r and beach sand volume (b), and between medium normalized beach gradient and medium beach volume (c) for the first year of monitoring.

nes de máxima acreción se alcanzaron tras las épocas estivales, dando perfiles de tipo reflectivo a intermedio (figura 5 y 6a). Durante los episodios de tormenta, se produce remoción de sedimento desde la parte alta del frente de playa (figura 6b), con un depósito en la parte baja del perfil. De acuerdo con la clasificación de estados de playa propuesta por Masselink & Short (1993), la mayor parte de los datos de campo obtenidos corresponderían al grupo de «playas intermedias», distribuidos alrededor del límite entre las «playas con

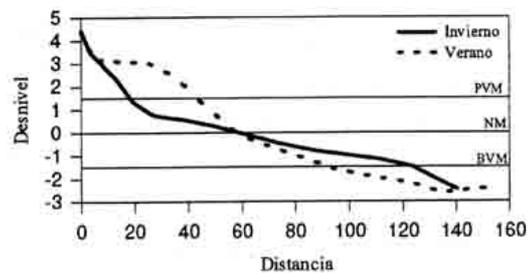


Figura 5. Cambios morfológicos interanuales extremos en un perfil representativo del sector central de la playa de Vistahermosa (perfil de invierno correspondiente a 11/1/1997; perfil de verano tomado el 17/10/1997).
Extreme interannual morphological changes in a representative profile of the central area of Vistahermosa beach (winter profile surveyed in 11/1/1997; summer profile taken in 17/10/1997).

barras» (*barred beaches*) y las «playas con barra de bajar» (*low-tide bar/rip beaches*). Esto contrasta con los perfiles teóricos propuestos por estos autores. Las formas observadas en la playa de Vistahermosa durante condiciones de buen tiempo correspondían a estadios mucho más próximos a las «playas con terraza de bajar» (*low-tide terrace + rip*) o incluso a las «playas reflectivas» propiamente dichas. En este mismo sentido, durante las situaciones más energéticas, los datos reflejaron una situación próxima o totalmente incluida en el tipo «playas disipativas con barra» (*barred dissipative beaches*).

Durante los episodios de mayor erosión la remoción de sedimento comenzó con un retroceso paralelo de la pendiente en la parte alta del intermareal. Los escarpes creados, en situación de desequilibrio, eran rápidamente suavizados por procesos gravitacionales. Los cambios morfológicos anuales medios mostraron un comportamiento pivotante. Dicha variación consiste en un intercambio de sedimento entre la zona de «swash» y la parte baja del intermareal, de manera muy similar a la descrita por Nordstrom & Jackson (1992). De este modo pudo identificarse un punto de pivotaje o de cambio morfológico nulo, siempre localizado cerca del nivel medio del mar. Puntos de pivotaje similares se han reconocido, igualmente, en otras playas del entorno, localizados en posiciones equivalentes.

El ritmo de respuesta morfológica de la playa resultó ser mucho más lento que el ritmo de cambio de los procesos hidrodinámicos, especialmente



Figura 6. a) Aspecto de la playa de Vistahermosa en su sector central durante época estival (año 1995). Se aprecia la presencia de cúspides en la zona superior del intermareal. b) Aspecto de la misma zona tras los temporales de diciembre de 1995 y enero de 1996. Pueden apreciarse los daños producidos en la escalera de acceso a la playa.

a) Beach aspect of the central sector of Vistahermosa during summer time (year 1995). Several beach cusps can be seen in the upper intertidal zone. b) General aspect of the same zone after the storms of december 1995 and january 1996. Damage affecting the stairs of access to the beach consisted of a partial failure.

durante la recuperación post-tormenta. Los cambios en la playa emplearon varias semanas o incluso meses para llegar a adquirir estados morfodinámicos distintos. A lo largo del periodo estudiado, la playa experimentó diversos cambios volumétricos y morfológicos que confirmaron este comportamiento, similar al descrito por otros autores en muchas otras playas (Dean & Maurmeyer, 1983; Wright & Short, 1984, etc.). Este ritmo de cambio contrasta llamativamente con el que se registra en otras playas de la costa suratlántica ibérica. Por ejemplo, la playa de Faro, en la costa portuguesa del Algarve, puede cambiar de un perfil erosivo a otro netamente reflectivo en apenas horas o días (Reyes et al., en prensa).

La respuesta a largo plazo de la playa, expresada en función del gradiente intermareal normalizado, aparece representada en la figura 7. Independientemente de la tendencia de cambio volumétrico a largo plazo, se aprecia un claro comportamiento morfológico de carácter cíclico estacional, como respuesta a la ciclicidad observada en la energía incidente (figura 3). Los pulsos de máxima erosión se reflejan en la adquisición de los típicos perfiles planos, próximos al estado disipativo. En 1996, tras 7 meses de progresiva

recuperación post-tormenta, la playa culminó en un diseño final de tipo reflectivo a intermedio. En 1997 una situación de cierta energía se prolongó durante la época primaveral, lo que produjo el mantenimiento de un estado morfodinámico intermedio, ni puramente disipativo ni plenamente acumulativo. Finalmente, una vez sobrepasados los eventos erosivos asociados a las tormentas del invierno de 1998, la playa progresivamente recuperó un perfil de acreción después de tres meses de buen tiempo.

Es importante resaltar los extremos de variación morfológica de la playa representados en la figura 7. Obviamente, después de largos periodos de oleaje constructivo, los perfiles resultantes, de máxima acumulación, adquirieron pendientes normalizadas próximas a la unidad. Durante los episodios de erosión más severa, asociada a las olas más energéticas registradas en las últimas décadas, los perfiles resultantes, de máxima erosión, adquirieron pendientes normalizadas inferiores a 0.35. Todos los posibles estados morfodinámicos de la playa están incluidos dentro de estos dos límites, que representan el rango de variabilidad morfológica natural de la playa.

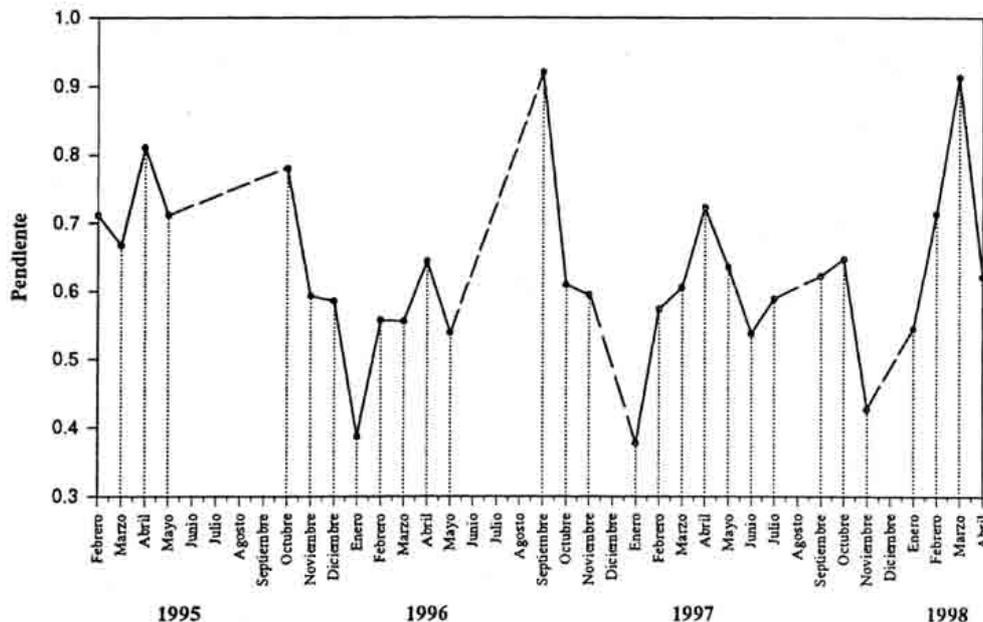


Figura 7. Variaciones en el gradiente medio intermareal normalizado a lo largo de todo el periodo de muestreo. *Variations in the mean normalised intertidal beach gradient during the monitored period.*

Durante estos años se mantuvo la relación $\tan\beta/E_r$ y los valores de la pendiente de la playa oscilaron dentro de los mismos rangos: la playa adoptó las mismas morfologías durante estaciones equivalentes año tras año. En conclusión, la pendiente intermareal normalizada constituye un parámetro perfectamente representativo de la respuesta morfodinámica de esta playa ante cualquier situación energética posible. Por otro lado, da una idea bastante aproximada de su rango natural de variación morfológica.

6. Propuesta de un modelo de equilibrio morfodinámico

Una playa emplea un cierto tiempo para evolucionar hacia una situación de equilibrio, lo cual depende de sus características morfológicas (gradiente, volumen de arena disponible) y de la energía del oleaje incidente. Por ello, sería preferible aplicar los parámetros morfodinámicos a periodos de tiempo suficientemente largos. De esta forma se

elimina cualquier cambio menor y se puede trabajar con datos representativos, adaptados al ritmo natural de variación morfológica de playas con largos periodos de respuesta.

Hemos elegido la pendiente media intermareal normalizada y la erosividad del oleaje como las principales variables a utilizar en el estudio de los cambios de la playa. El modelo resultante aparece en la figura 8. La gráfica puede considerarse como una curva de equilibrio morfodinámico, donde se representa todo el rango de posibles estados de la playa en función de su gradiente y del potencial erosivo de las olas incidentes. Aparece así una doble exponencial, con dos extremos asintóticos. El primero indica que, cuando la energía tiende a cero, la pendiente normalizada de la playa tiende a 1, lo que podría considerarse como situación de «equilibrio reflectivo». Una vez alcanzada esta situación, cualquier pequeño incremento en la erosividad del oleaje producirá cambios importantes en la playa. El segundo extremo representa la situación disipativa: existe un valor limitante en el gra-

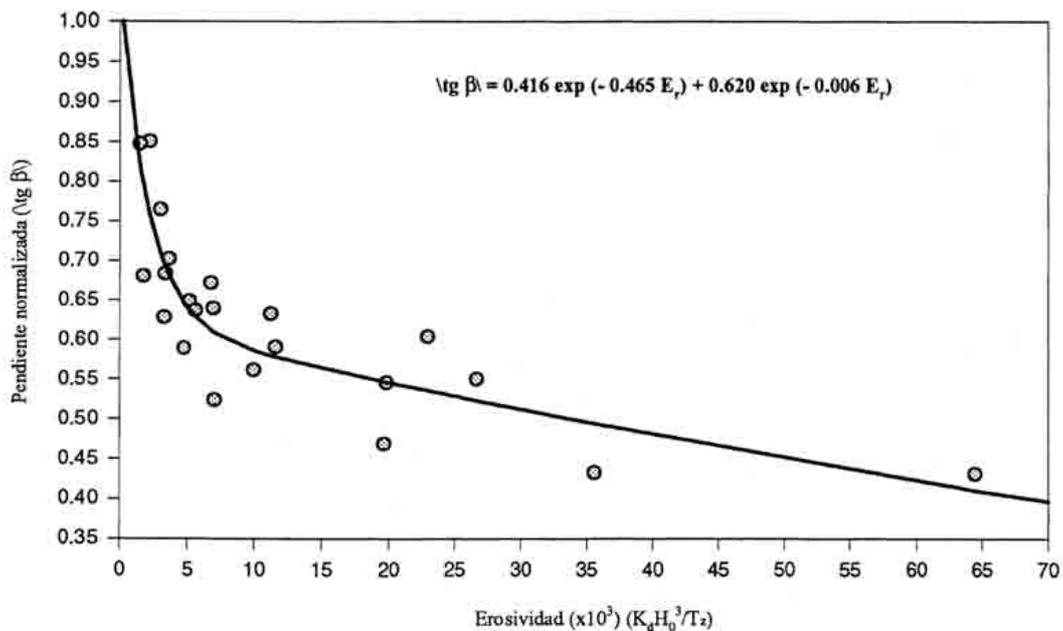


Figura 8. Curva de equilibrio morfodinámico para la playa de Vistahermosa, representada por las variaciones en el gradiente medio normalizado en función de los cambios en la erosividad del oleaje incidente. Los datos corresponden a todo el periodo de seguimiento.

Morphodynamic equilibrium curve of Vistahermosa beach, represented by the variations in the mean normalised beach gradient as a function of the changes in the incident wave erosivity. Data belong to all the surveyed period.

diente de la playa a partir del cual un incremento en el potencial erosivo del oleaje no producirá ya ningún cambio morfológico significativo.

El modelo implica que, conforme una playa se va haciendo «demasiado reflectiva», sobreviene el desequilibrio, en un sentido muy similar al ya expresado por Wright et al. (1985). Estos autores introdujeron la idea de «alejamiento del equilibrio», según la cual el ritmo de cambio de la playa será proporcional a la divergencia instantánea del estado teórico frente a una situación energética dada. No obstante, los citados autores propusieron una curva conceptual de equilibrio teórico algo distinta a la presentada aquí y no apoyada por datos de campo. Wright et al. (1985) diseñaron su modelo conceptual a partir de sus experiencias en el estudio de las playas del Este de Australia, en las que la mayor parte de la varianza tiene lugar en ciclos de menos de 1 mes de duración. Su modelo, por tanto, debe ser verificado en playas con un largo periodo de respuesta, es decir, con ciclos anuales/estacionales, como es el caso de Vistahermosa.

El desequilibrio es máximo en playas con situaciones de tipo intermedio, donde existe una alta movilidad y sensibilidad a pequeñas oscilaciones en la energía del oleaje incidente (figura 8). Existe en esta zona un alto rango de variación en el eje Y ($\tan\beta$) frente a un estrecho margen de variación en el eje X (E_p). Estos perfiles de tipo intermedio generalmente corresponden a épocas equinocciales: a finales de verano y comienzos del otoño, los perfiles de playas tienden a presentar todavía gradientes relativamente altos mientras que la energía del oleaje incidente comienza a aumentar con la llegada de las primeras tormentas. De igual manera, a comienzos de la primavera las playas todavía presentan perfiles planos aunque la energía del oleaje ya ha decrecido suficientemente y las barras submareales comienzan a migrar hacia la costa. El dilatado tiempo de respuesta morfológica de esta playa explica dicho comportamiento, fundamentalmente en términos de agradación.

Sunamura (1984) propuso una ecuación predictiva que relaciona el gradiente de la playa con un parámetro energético adimensional que incluye H_b/T y D_{50} . Las curvas sintéticas obtenidas por este autor, elaboradas a partir de numerosos datos procedentes tanto de experimentos en tanques de oleaje como de campañas de campo realizadas por

otros autores, mostraban una tendencia bastante similar a la presentada aquí. No obstante, todas las playas representadas en su curva oscilaban dentro de rangos morfodinámicos muy restringidos y ninguna de ellas cubría el rango total de estados morfodinámicos teóricamente posibles (reflectivo, intermedio y disipativo).

Una simple comparación de las figuras 4b y 8 permite deducir la necesidad de disponer de un seguimiento continuado de la playa durante al menos tres años. Un único año de seguimiento mensual puede dar lugar a errores importantes, ya que durante ese tiempo es posible que no se den todos los posibles estados extremos de la playa. La inclusión en el modelo de gradientes de playa normalizados permite una visualización fácil y rápida de la situación morfodinámica de una playa dentro de su propio rango natural de variación y predice sus tendencias naturales y sus estados extremos de variación.

7. Restricciones a la aplicación del modelo propuesto

La posible aplicabilidad de este modelo viene impuesta por diversas restricciones relativas a la playa específica objeto del estudio, que de forma sintetizada son las siguientes:

- Largo tiempo de respuesta de la playa, especialmente durante su recuperación tras periodos de tormentas. El modelo es fácilmente aplicable a playas de comportamiento estacional, como la estudiada u otras cercanas a la Bahía de Cádiz. Otras playas más móviles requerirían intervalos de seguimiento más cortos, del orden de semanas, días o incluso horas.
- Amplio rango de situaciones morfodinámicas. Algunas playas, como las que caracterizan a la costa mediterránea española, de tipo micromareal de baja energía, se restringen siempre a unos pocos estados morfodinámicos, y su rango de variación natural es muy limitado, lo cual, no obstante, puede facilitar la elaboración de modelos predictivos.
- Pocas barras intermareales y con muy baja movilidad. En playas con sistemas de barras múltiples (*ridge & runnel*), el papel protector de las barras y su alta movilidad da lugar a una

serie de complicaciones metodológicas a veces difíciles de solventar. Se requeriría entonces, probablemente, una subdivisión de la playa y una determinación pormenorizada de gradientes a lo largo de todo el perfil sumergido.

- Predominio del transporte de arena de tipo transversal. Este hecho permite una fácil reducción del estudio de la playa a una modelización de tipo bidimensional. Sin embargo, este no es el caso de muchas otras playas, en las que la componente energética longitudinal ejerce una influencia fundamental sobre el comportamiento morfodinámico.
- Playas expuestas. Las playas protegidas y con fuertes condiciones de contorno (por situarse entre promontorios, espigones u otras estructuras artificiales, o playas en el interior de bahías, etc.) pueden no experimentar variaciones significativas a lo largo del tiempo o, si lo hacen, los cambios pueden no estar directamente relacionados con las fluctuaciones de la energía del oleaje. Este es el caso de algunas playas ubicadas en el interior de la Bahía de Cádiz, como la playa de la Puntilla (figura 1), donde la aplicación del presente modelo no ha sido satisfactoria, debido sobre todo a que la acción del oleaje se manifiesta de manera muy indirecta y transformada por procesos de refracción y difracción (Benavente *et al.*, 1998).
- Ausencia de variaciones granulométricas importantes a lo largo del tiempo. Este es el caso de la playa de Vistahermosa y por ello se consideró el tamaño medio de grano como constante en el cálculo del parámetro adimensional de caída de grano. Sin embargo, esta variable puede cambiar mucho en otras playas, por lo que debería entonces ser incluida en el cálculo del factor de erosividad del oleaje.

8. Consideraciones finales y conclusiones

En este trabajo se presenta un modelo de comportamiento morfodinámico de una playa estacional de baja energía. Dicho modelo relaciona la variación morfológica de la playa con las condiciones energéticas del oleaje incidente, a partir de variables fácilmente medibles. Para llegar al modelo se ha utiliza-

do como variable morfológica la pendiente intermareal, indicadora de los estados agradantes o erosivos de la playa. Dicha pendiente se obtuvo a partir de un perfilamiento topográfico mensual desarrollado a lo largo de cuatro años. Este dilatado periodo de seguimiento garantiza la inclusión de un amplio rango de estados morfodinámicos de la playa, lo que redundará en la representatividad del modelo. Como variable energética se propone el que hemos denominado «factor de erosividad del oleaje», que incluye como variables la altura y el periodo del oleaje en condiciones de aguas profundas.

La relación obtenida entre estas dos variables, representada mediante una curva de variación, expresa el estado de equilibrio dinámico en que se encuentra la playa ante cualquier situación energética. El alejamiento de la curva de equilibrio representa situaciones morfodinámicas inestables, con una elevada tendencia al cambio morfológico.

Los aspectos restrictivos del modelo (playas mesomareales expuestas y de baja energía) reducen, obviamente, sus posibilidades de aplicación, por lo que su definitiva validación requiere nuevos estudios en otros tipos de playas. En cualquier caso, esto no invalida su utilidad, sobre todo en lo referente a su capacidad de predicción mediante el uso de parámetros simples y fácilmente medibles, como las características del oleaje en aguas profundas, la pendiente de la zona intermareal o la granulometría.

La predicción del comportamiento bidimensional de las playas a corto plazo puede llegar a ser asequible y probablemente sólo necesita de una adecuada caracterización cuantitativa del estado morfodinámico y de su ritmo de cambio. El modelo presentado en este trabajo permite conocer en un momento dado la situación de estabilidad de una playa, lo que a su vez facilita la predicción de su comportamiento a corto - medio plazo en función del oleaje incidente. Por tanto, constituye una herramienta de utilidad en el diseño de medidas correctoras ante la erosión costera. Un ejemplo claro sería la elección de un perfil de playa adecuado en obras de regeneración artificial, que permitiría una mayor durabilidad de las actuaciones.

Agradecimientos

Debemos agradecer a los profesores A.D. Short (Universidad de Sydney) y G. Masselink

(Univ. de Loughborough) sus comentarios y sugerencias acerca del modelo morfodinámico, así como a la Dra. Teresa Bardají (Univ. de Alcalá de Henares) y a otro revisor anónimo por sus sugerencias constructivas. Igualmente, agradecemos a J.J. Muñoz (Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico) las facilidades y ayuda prestadas en el uso del software de refracción. Ana Nistal (Servicio de Clima Marítimo del CEDEX, Ministerio de Medio Ambiente) facilitó los datos de oleaje y J.L. Reyes participó activamente en las campañas de toma de datos. Este trabajo ha sido subvencionado por el Grupo de Investigación RMN-161 del Plan Andaluz de Investigación.

Referencias bibliográficas

- Anfuso, G., Gracia, F. J., Andrés, L., Sánchez, F., Del Río, L. & López-Aguayo, F. (2000). Depth of disturbance in mesotidal beaches along a single tidal cycle. *Journal of Coastal Research*, vol. 16 (en prensa).
- Anthony, E. J. (1998). Sediment-wave parametric characterisation of beaches. *Journal of Coastal Research*, 14 (1), 347-352.
- Battjes, J. A. (1974). Surf Similarity. *Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng.* ASCE, 466-480.
- Benavente, J., Gracia, F. J. & López-Aguayo, F. (1998). Morfodinámica de la Playa de la Puntilla (Pto. de Santa María, Bahía de Cádiz). En: *Investigaciones recientes de la Geomorfología española* (A. Gómez & F. Salvador, eds.). Serv. Publ. Univ. Barcelona, 307-316.
- Carr, A. P., Blackley, M. W. L. & King, H. L. (1982). Spatial and seasonal aspects of beach stability. *Earth Surf. Proc. and Land.*, 7, 267-282.
- CERC, Coastal Engineering Research Center. (1973). *Shore Protection Manual, vol. 1*. Superintendent of Documents, Washington, D.C.
- Dalrymple, R. A. & Thomson, W. W. (1976). Study of equilibrium beach profiles. *Proc. 15th Conf. Coastal Eng.* ASCE, pp. 1277-1296.
- Dean, R. G. (1973). Heuristic models of sand transport in the surf zone. *Proc. Eng. Dynamics in the Surf Zone*, Sydney, 208-214.
- Dean, R. G. & Maurmeyer, E. M. (1983). Models for Beach Profile Response. En: *CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion* (P.D. Komar, ed.). CRC Press, Boca Raton, Florida, 151-165.
- Doorkamp, J.C. & King, C.A.M. (1971). Numerical Analysis in Geomorphology: An Introduction. Arnold, London.
- Gibbs, R. J., Matthews, M.D. & Link, D.A. (1971). The relationship between sphere size and settling velocity. *Jour. Sedim. Petrol.*, 41 (1), 7-18.
- Gourlay, M. R. (1968). Beach and dune erosion tests. Delft Hydraulics Laboratory, Report No. M935/M936, Delft, Holanda.
- Grassa, J. M. (1990). Manual de usuario del programa REFDIF. Ministerio de Obras Públicas, CEDEX, Madrid.
- Guza, R. T. & Inman, D. L. (1975). Edge waves and beach cusps. *J. Geophys. Res.*, 80, 2997-3012.
- Hardisty, J. (1986). A morphodynamic model for beach gradients. *Earth Surf. Proc. and Land.*, 11, 327-333.
- Hsu, T. W. & Wang, H. (1997). Geometric characteristics of storm beach profiles. *J. Coastal Res.*, 13, 1102-1110.
- Komar, P. D. & Gaughan, M. K. (1972). Airy wave theory and breaker height prediction. *Proc. 13th Conf. Coastal Eng.* ASCE, 405-418.
- Larson, M. & Kraus, N. C. (1994). Temporal and spatial scales of beach profile change, Duck, North Carolina. *Mar. Geol.*, 117, 75-94.
- Mabesoone, J. M. (1963). Coastal sediments and coastal development near Cádiz (Spain). *Geol. Mijm.*, 42 (2), 29-43.
- Masselink, G. & Hegge, B. (1995). Morphodynamics of meso- and macrotidal beaches: Examples from central Queensland, Australia. *Mar. Geol.*, 129, 1-23.
- Masselink, G. & Short, A. D. (1993). The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model. *J. Coastal Res.*, 9 (3), 785-800.
- Nordstrom, K. F. & Jackson, N. L. (1992). Two-dimensional change of sandy beaches in meso-tidal estuaries. *Zeit. f. Geomorph.*, 36 (4), 465-478.
- Reyes, J. L., Martins, J. T., Benavente, J., Ferreira, O., Gracia, F. J., Alveirinho Dias, J. & Lopez-Aguayo, F. (en prensa). Gulf of Cádiz beaches: a comparative response to storm events. En: *2º Symp. on the Iberian Atlantic Cont. Margin*. Publ. Inst. Esp. Oceanografía.
- Sunamura, T. (1984). Quantitative predictions of beach-face slopes. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95, 242-245.

- Takeda, I. & Sunamura, T. (1992). Conditions for beach erosion on a barred beach. *Zeit. f. Geomorph.*, 36, 453-464.
- Thom, B.G. & Hall, W. (1991). Behaviour of beach profiles during accretion and erosion dominated periods. *Earth Surf. Proc. and Land.*, 16, 113-127.
- Wright, L.D. & Short, A.D. (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Mar. Geol.*, 56, 93-118.
- Wright, L.D., Short, A.D. & Green, M.O. (1985). Short term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: An empirical predictive model. *Mar. Geol.*, 62, 339-364.

Recibido el 11 de noviembre de 1999

Aceptado el 21 de febrero de 2000