

Las playas entre Chipiona y Rota (Cádiz, SO de España): Aproximación a su clasificación y comportamiento morfodinámico

Approximation to the classification and morphodynamic behaviour of the beaches between Chipiona and Rota (Cádiz, SW Spain)

G Anfuso*, J Benavente

Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz, Polígono Río San Pedro s/n, 11510 Puerto Real (Cádiz), España. * E-mail: giorgio.anfuso@uca.es

Resumen

Se llevó a cabo el seguimiento morfológico mensual del litoral entre Chipiona y Rota (SO de España), desde marzo de 1996 hasta mayo de 1998, y se clasificaron las playas según los parámetros morfodinámicos clásicos. El Parámetro de Dean y el de Escala de Rompiente evidenciaron estados “intermedios” caracterizados por roturas en derrame y en voluta, según los valores del Índice de Similitud de Surf. Además, se utilizaron el Parámetro Adimensional de Caída de Grano y el Rango Marea Relativo para clasificar las playas según la clasificación de Masselink y Short (1993). La gran mayoría de las playas corresponden al estado “intermedio” y, en segundo lugar, al “disipativo”, confirmando los valores obtenidos mediante los otros parámetros geomorfológicos y las observaciones de campo.

Palabras clave: playas, disipativo, reflectivo, erosión, basculamiento.

Abstract

A beach monitoring program was carried out for the littoral between Chipiona and Rota (Cádiz, SW Spain) from March 1996 to May 1998. The beaches were classified following classic morphodynamic parameters. The Dean number and the surf scaling parameter reflected intermediate beach states characterized by spilling and plunging breakers, according to the surf similarity index values. Furthermore, the Dean number and the relative tidal range were used to classify the beaches following the classification proposed by Masselink and Short (1993). Most of the beaches surveyed belonged to the intermediate and, secondarily, to the dissipative state, confirming the values obtained from the previous parameters and field observations.

Key words: beaches, dissipative, reflective, erosion, pivoting.

Introducción

El litoral estudiado se localiza entre las ciudades de Chipiona y Rota (Cádiz, SO de España), y a pesar de la gran erosión que ha registrado en las últimas décadas (>1 m año⁻¹; Muñoz y Enríquez 1998, Domínguez *et al.* 2005), ha sido objeto de una creciente ocupación turística. Al fin de contrarrestar el retroceso costero y ensanchar la playa seca para aumentar su atractivo turístico, se han llevado a cabo varias obras de regeneración (Muñoz *et al.* 2001). Estas obras han tenido un éxito limitado, en parte debido a la falta de conocimientos tanto sobre el comportamiento morfodinámico de cada una de las diferentes playas regeneradas, como de la dinámica general del área (Anfuso *et al.* 2001, Anfuso y Gracia 2005). Así, para una correcta gestión de la erosión costera es imprescindible conocer el comportamiento morfodinámico de las playas, es decir, su respuesta frente a los agentes dinámicos, esencialmente el oleaje.

En el presente trabajo se realizó una clasificación morfodinámica de las playas estudiadas y un estudio de su respuesta frente a los agentes energéticos. Además, se analizó

Introduction

The littoral under study is located between the towns of Chipiona and Rota (Cádiz, SW Spain). Despite the significant erosion recorded in recent decades (>1 m yr⁻¹; Muñoz and Enríquez 1998, Domínguez *et al.* 2005), this littoral has been experiencing a growth in tourist activity. In order to counteract the coastal retreat and to widen the dry beach area for improved tourist use, several regeneration programs have been undertaken (Muñoz *et al.* 2001). These programs have had only limited success, partly due to the lack of knowledge on the morphodynamic behaviour of each of the different regenerated beaches, as well as on the general dynamics of the area (Anfuso *et al.* 2001, Anfuso and Gracia 2005). It is therefore essential to understand the morphodynamic behaviour of the beaches, that is, their response to dynamic agents, in particular to wave action.

In this study, the morphodynamic behaviour of the beaches surveyed was classified, their response to the energetic agents was studied, and their interaction with different sedimentary, morphological and hydrodynamic variables was analyzed. The

la interacción entre los diferentes tipos de variables sedimentológicas, morfológicas e hidrodinámicas. El conjunto de resultados obtenidos condujeron a su inclusión dentro de la clasificación de Masselink y Short (1993).

Los parámetros más utilizados para la caracterización morfodinámica de playa son el índice de Similaridad de Surf (Battjes 1974) y los parámetros de Escala de Rompiente (Guza e Inman 1975) y adimensional de Caída de grano (Gourlay 1968). Estos parámetros permiten caracterizar cuantitativamente el tipo de rompiente y el estado de la playa (reflectivo, disipativo o intermedio), permitiendo de esta forma su tipificación según las clasificaciones de Wright y Short (1984), Masselink y Short (1993) y Short (1999).

El análisis de la respuesta de los diferentes tipos de playa frente a los agentes dinámicos se lleva a cabo mediante el estudio de las relaciones entre las variables morfosedimentarias y el clima marítimo, así como de una serie de índices y parámetros descriptivos y semicuantitativos clásicos que se basan en el uso de variables simples y fáciles de medir. Por un lado, las relacionadas con la energía del oleaje: la altura de ola en aguas profundas (H_0) y en rompiente (H_b), el periodo (T) y la longitud de onda del oleaje incidente (L); por otro lado las relacionadas con las características intrínsecas de la propia playa: variables texturales (tamaño de grano, clasificación, etc.) y variables morfológicas (fundamentalmente la pendiente del frente de playa). Entre estas últimas, la relación entre pendiente y granulometría ha sido analizada por varios autores (Bascom 1951, Wiegeler 1964, Nordstrom y Jackson 1992, Shih y Komar 1994, Short 1999). Por otro lado, las relaciones entre las características morfosedimentarias de las playas y los parámetros energéticos han sido objeto de diferentes estudios llevados a cabo en tanques de oleaje y en el campo. Entre los primeros estudios llevados a cabo en este sentido destacan los de Rector (1954) y los de King y Williams (1949), observando estos últimos cómo las olas con peralte superior a 0.012 determinan un transporte neto hacia tierra y un aumento de la pendiente de la playa. Por otro lado, la proporcionalidad inversa entre pendiente y peralte fue también observada en playas naturales por Harrison (1969) y Doornkamp y King (1972).

Hardisty (1986) confirmó la existencia de una proporcionalidad directa entre peralte y pendiente de la playa, fijando en 0.08 el límite entre mar de viento y mar de fondo, y destacó cómo las playas de escasa pendiente cambian poco al variar el peralte. Otros parámetros tienden a predecir el comportamiento de la playa a partir de medidas efectuadas sobre el terreno o en tanques de oleaje (Dean 1973, Sunamura 1984, Hsu y Wang 1997), mientras que otros modelos predicen la forma y la evolución del perfil de la playa (Seymour y Castel 1989). Sunamura (1989) modificó un parámetro previo propuesto por Sunamura y Horikawa (1974), utilizado para diferenciar entre dos estados extremos (de erosión y de acreción) y seis intermedios.

collective results were then compared with Masselink and Short's (1993) classification.

The parameters that are most often used to characterize beach morphodynamics are the surf similarity index (Battjes 1974), the surf scaling parameter (Guza and Inman 1975) and the Dean number (Gourlay 1968). These allow for the quantitative characterization of the type of breaker and the state of the beach (reflective, dissipative or intermediate). This in turn allows for the beaches to be classified according to Wright and Short (1984), Masselink and Short (1993) and Short (1999).

The response of the different types of beach to the energetic agents was analyzed by studying the relationship between the morphosedimentary variables and the wave climate, as well as by using a number of classic descriptive and semiquantitative indices and parameters, which are based on the use of the following simple and easily-measured variables. Firstly, those related to wave energy: wave height in deep water (H_0) and at breaking point (H_b), and the period (T) and length of the approaching wave (L). Secondly, those related to the intrinsic characteristics of the beach: textural variables (grain size, classification, etc.) and morphological variables (fundamentally the beach slope). Regarding the aforementioned variables, the relationship between slope and grain size has been analyzed by several authors (Bascom 1951, Wiegeler 1964, Nordstrom and Jackson 1992, Shih and Komar 1994, Short 1999).

Likewise, the relationship between the beaches' morphosedimentary characteristics and wave characteristics has been the subject of a number of studies conducted in wave tanks and in the field. Among the first studies of this type carried out, those of Rector (1954) and King and Williams (1949) are particularly noteworthy. The latter authors reported how a wave steepness of more than 0.012 establishes a net landwards transport and an increase of the beach slope. On the other hand, the inverse proportionality between slope and wave steepness was also observed at natural beaches by Harrison (1969) and Doornkamp and King (1972). Hardisty (1986) confirmed the existence of a direct proportionality between wave steepness and beach slope, fixing the limit between sea waves and swell waves at 0.08, and indicating how beaches with a gentle slope show little change when the wave steepness varies. Some parameters tend to predict beach behaviour, based on measurements taken in the field or in wave tanks (Dean 1973, Sunamura 1984, Hsu and Wang 1997), while other models predict the form and evolution of the beach profile (Seymour and Castel 1989). Sunamura (1989) modified a parameter that was previously proposed by Sunamura and Horikawa (1974) and is used to differentiate between the two extreme states (erosion and accretion) and the six intermediary states. Finally, Benavente and Reyes (1999) and Benavente *et al.* (2000) used a parameter named erosivity factor, derived from wave energy and a modification of the Dean parameter. This factor, which has energy dimensions, is indicative of the erosive potential of incoming waves.

Finalmente, Benavente y Reyes (1999) y Benavente *et al.* (2000) utilizaron un parámetro denominado “factor de erosividad del oleaje”, producto entre la energía del oleaje y el parámetro de Dean modificado. Este factor, que tiene dimensiones de energía, es indicativo del potencial erosivo de las olas incidentes.

Zona de estudio

La zona de estudio se localiza en el litoral entre Chipiona y Rota (Cádiz, fig. 1) e incluye 14 km de playas arenosas constituidas por sedimentos cuarzosos. Dichos sedimentos, unimodales y moderadamente bien clasificados, presentan media granulométrica que varía entre arena media y fina, con pequeñas variaciones estacionales (0.06 mm). Las playas están respaldadas por dunas y acantilados labrados sobre depósitos pliocuaternarios.

La línea de costa presenta orientación NNO-SSE y es aparentemente homogénea: en la playa seca y en el intermareal alto y medio no hay salientes rocosos notables que interrumpen la deriva litoral. Las plataformas rocosas forman salientes al nivel medio-bajo del intermareal, muy extensos en Punta Camarón y Punta Candor.

El rango mareal, con periodicidad semidiurna, varía entre 3.22 m (mareas vivas) y 1.10 m (mareas muertas), clasificando la costa como mesomareal baja. Los vientos dominantes que soplan del ONO son vientos húmedos atlánticos denominados de “poniente”, y los del ESE son vientos secos que soplan de tierra (“levante”). Las olas se aproximan a la costa preferentemente del oeste (45% de frecuencia anual), con altura media inferior a 1 m y altura de ola significativa asociada a temporales de 2 m (Reyes *et al.* 1996). La deriva litoral fluye hacia el SE, aunque también se puede observar un transporte contrario debido a los vientos procedentes del segundo y tercer cuadrante.

Metodología

Se llevó a cabo un seguimiento morfológico de las playas estudiadas desde marzo de 1996 hasta mayo de 1998, mediante el levantamiento topográfico mensual de 13 perfiles normales a la línea de costa, con el fin de estudiar las variaciones morfológicas y volumétricas que sufren las playas. Se realizaron un total de 194 perfiles a lo largo de 19 campañas. Los perfiles se midieron mediante un teodolito automático, a partir de puntos fijos en la trasplaya, prolongándose hacia el mar hasta la profundidad correspondiente a la bajamar viva. Para la caracterización sedimentaria de las playas se tomaron muestras superficiales en el intermareal y en la playa seca supramareal, y se analizaron en laboratorio mediante tamizado en seco. Los parámetros granulométricos se calcularon según la metodología de Folk y Ward (1957).

Para la caracterización morfodinámica de las playas, se utilizaron los datos de pendiente del intermareal ($\tan \beta$), granulometría (D_{50}) y volumen ($\text{m}^3 \text{m}^{-1}$), medidos en las diferentes

Study area

The area surveyed is located between Chipiona and Rota (Cadiz, fig. 1) and comprises 14 km of sandy beaches made up of quartz sediments. These sediments, unimodal and moderately classified, have an average grain size that varies between medium and fine sand, with little seasonal variation (0.06 mm). The beaches are backed by dunes and cliffs carved on Plio-Quaternary deposits.

The coastline has a NNW-SSE orientation and is apparently homogeneous: on the dry beach and in the upper and mid foreshore there are no notable rocky projections to interrupt the littoral drift. Rocky platforms form very extensive projections at the mid to low levels of the foreshore at Punta Camarón and Punta Candor.

The tidal range, with semidiurnal periodicity, varies between 3.22 m (spring tides) and 1.10 m (neap tides), classifying the coast as a low mesotidal environment. The dominant winds are the humid Atlantic winds from the WNW and the dry Levant winds that strike land and prevail from the ESE. Waves approach the coast mainly from the west (45% of annual frequency), with an average height of less than 1 m and a significant wave height associated with storms of 2 m (Reyes *et al.* 1996). The littoral drift runs towards the southeast, although a contrary transport can also be observed due to winds coming from the second and third quadrants.

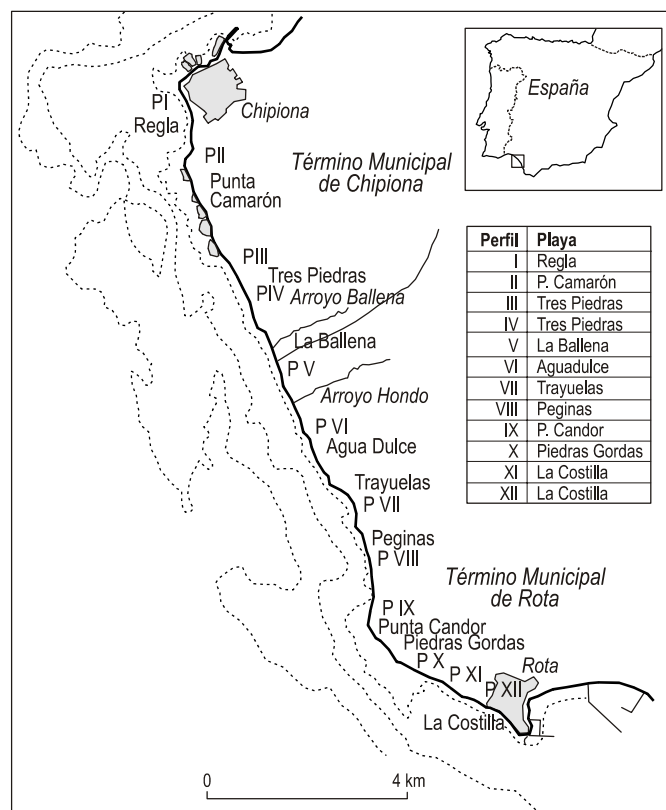


Figura 1. Localización de las playas estudiadas en Cádiz, suroeste de España.

Figure 1. Location of the beaches surveyed (Cadiz, SW Spain).

campañas. Para calcular los volúmenes se utilizaron dos hojas de cálculo informáticas en lenguaje Pascal. El primer programa dividió el perfil en rodajas horizontales y el segundo calculó los volúmenes de cada rodaja.

Para caracterizar la energía del oleaje incidente se recurrió a los valores de altura de ola significativa (H_s) y peralte del oleaje (H/L), medidos por la boya oceanográfica Sevilla 1 perteneciente a la REMRO (CEDEX, Ministerio de Medio Ambiente). Se consideraron valores medios diarios del mes anterior a cada campaña topográfica (Benavente *et al.* 2000). Para caracterizar cuantitativamente el tipo de rompiente y el estado de la playa, se utilizó el Índice de Similitud de Surf (Iribarren y Nogales 1949, Battjes 1974), que predice el tipo de rompiente. Su expresión es la siguiente:

$$\xi = \tan\beta(H_b/L_0)^{0.5} \quad (1)$$

donde $\tan\beta$ es la pendiente media de la playa en la zona intermareal, H_b es la altura de ola en rompiente y L_0 la longitud de onda del oleaje en aguas profundas. Este índice predice el tipo de rompiente, desde ondulado y colapso ($\xi > 2$), voluta ($0.4 < \xi < 2$), a derrame ($\xi < 0.4$) (Fredsoe y Deigaard 1992). Para determinar el estado morfodinámico de la playa se recurrió al Parámetro de Escala de Rompiente (Guza e Inman 1975):

$$\varepsilon = \sigma^2 H_b / 2g \tan^2\beta \quad (2)$$

donde σ es la frecuencia del oleaje en radianes, g la aceleración de la gravedad y β la pendiente de la playa. El parámetro permite diferenciar entre condiciones de zona de surf reflectivas ($\varepsilon < 2.5$), intermedias ($2.5 < \varepsilon < 30$) y disipativas ($\varepsilon > 30$) (Guza e Inman 1975). La altura de ola en rompiente (H_b) se obtuvo a partir de la fórmula de Komar y Gaughan (1972):

$$H_b = 0.39g^{1/5}(TH_0^2)^{2/5} \quad (3)$$

donde g es la aceleración de gravedad, T el periodo y H_0 la altura de ola en aguas profundas. Se utilizó también el parámetro adimensional de caída de grano, propuesto por Gourlay (1968), posteriormente desarrollado por Dean (1973) y Dalrymple y Thompson (1976):

$$\Omega = H/W_s T \quad (4)$$

donde H y T representan, respectivamente, la altura y el periodo del oleaje en aguas profundas y W_s es la velocidad adimensional de caída de grano:

$$W_s = 273(D_{50})^{1.1} \quad (5)$$

donde D_{50} es la mediana de la distribución granulométrica, en metros. Debido a que D_{50} mostró un rango de variabilidad estacional mínimo, se utilizó un valor medio representativo para cada playa (Anfuso 2002). El parámetro diferencia entre playas reflectivas con cúspides o arcos de playa (*beach cusps*)

Methodology

A monitoring program of the beaches was carried out from March 1996 to May 1998, through a monthly topographic survey of 13 normal profiles along the coastline, with the aim of studying the morphological and volumetric variations affecting the beaches. A total of 194 profiles were taken over 19 different surveys. The profiles were measured using an automatic theodolite, from fixed points on the backshore, stretching towards the sea until the depth corresponding to the spring low tide level. In order to characterize beach sedimentation, surface samples were taken from the foreshore and from the dry beach, and analyzed in the laboratory by dry sieving. The granulometric parameters were calculated according to the methodology proposed by Folk and Ward (1957).

The data resulting from the measurements of the foreshore slope ($\tan\beta$), grain size (D_{50}), and volume ($m^3 m^{-1}$) taken during the different surveys, was used to characterize the morphodynamic behaviour of the beaches. To calculate the volumes, two computerized spreadsheets in Pascal language were used. The first program divided the profile into horizontal portions and the second calculated the volume of each portion.

To characterize the incoming wave energy, the significant wave height (H_s) and wave steepness (H/L), values were measured by the oceanographic buoy "Sevilla 1", which belongs to REMRO (CEDEX, Spanish Ministry of the Environment). The mean daily values of the month prior to each survey were considered (Benavente *et al.* 2000). For the quantitative characterization of the type of breaker and the state of the beach, the surf similarity index (Iribarren and Nogales 1949, Battjes 1974) was used. This index predicts the type of breaker and is expressed as follows:

$$\xi = \tan\beta(H_b/L_0)^{0.5} \quad (1)$$

where $\tan\beta$ is the mean beach slope in the foreshore area, H_b is the height of the breaking wave and L_0 is the wave length in deep water. This index predicts the type of breaker: collapsing and surging ($\xi > 2$), plunging ($0.4 < \xi < 2$), or spilling ($\xi < 0.4$) (Fredsoe and Deigaard 1992). To determine the morphodynamic state of the beach, the surf scaling parameter (Guza and Inman 1975) was applied:

$$\varepsilon = \sigma^2 H_b / 2g \tan^2\beta \quad (2)$$

where σ is the wave frequency in radians, g is the acceleration of gravity and β is the beach slope. This parameter allows to differentiate between reflective ($\varepsilon < 2.5$), intermediate ($2.5 < \varepsilon < 30$) and dissipative ($\varepsilon > 30$) surf conditions (Guza and Inman 1975). The breaking wave height (H_b) was obtained using Komar and Gaughan's (1972) formula:

$$H_b = 0.39g^{1/5}(TH_0^2)^{2/5} \quad (3)$$

where g is the acceleration of gravity, T is the time interval and H_0 is the wave height in deep water. The Dean number was also

($\Omega < 1$), playas intermedias con barras y cúspides ($1 < \Omega < 6$) y playas disipativas ($\Omega > 6$). Dicho parámetro se utilizó conjuntamente con el rango de marea relativo, que se obtiene por la relación entre el rango mareal y la altura de ola (Davis y Hayes 1984), para clasificar las playas estudiadas según el modelo de Masselink y Short (1993).

Finalmente, se analizó la respuesta de las playas frente los agentes dinámicos. Debido a la escasa relación proporcional entre características de pendiente y/o volumen de las playas estudiadas y peralte del oleaje – en cuanto este parámetro no permite diferenciar entre mar de fondo y mar de viento (Benavente *et al.* 2000, Anfuso *et al.* 2003), se utilizó el factor de erosividad del oleaje propuesto por Benavente y Reyes (1999) y Benavente *et al.* (2000):

$$Er = EW = (1/8)\rho g H^2 H / TW_s = cte. H^3 / T \quad (6)$$

Dicho factor enfatiza el papel de la altura de ola en costas de baja energía, reduciendo la importancia del periodo, que pasa a ser un factor modulador de la energía del oleaje, resultando de esta forma ser bastante más efectivo como indicador del potencial erosivo de las olas incidentes.

Resultados

Clima marítimo

En la figura 2 se observa la variación de la altura de ola, del rango mareal medio y del rango mareal relativo a lo largo del periodo de estudio.

La altura de ola presentó un comportamiento estacional marcado. Los valores más altos se registraron en los meses invernales (noviembre a enero), seguidos del periodo primaveral (abril a mayo). Los valores más bajos se registraron en verano y en febrero y marzo. Las variaciones del periodo del

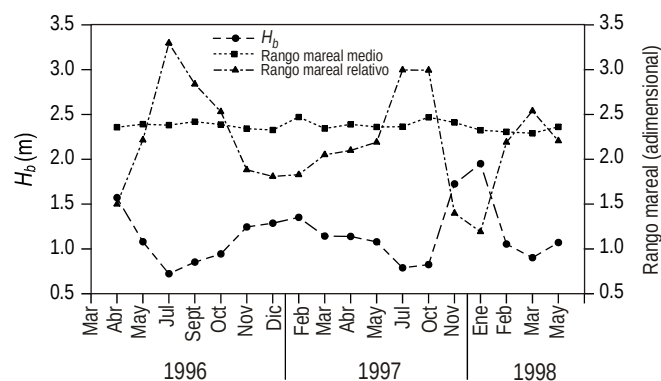


Figura 2. Variaciones de la altura de ola en rompiente (H_b , significativa), del rango mareal medio y del rango mareal relativo a lo largo del periodo de estudio. Se presentan los valores medios del mes anterior a cada campaña.

Figure 2. Variations of the breaking-wave height (significant H_b), the mean tidal range and the relative tidal range throughout the study period. The mean values of the month prior to each survey are shown.

used, which was proposed by Gourlay (1968) and later developed by Dean (1973) and Dalrymple and Thompson (1976):

$$\Omega = H / W_s T \quad (4)$$

where H and T represent, respectively, the height and time interval of the wave in deep water and W_s is the settling velocity:

$$W_s = 273(D_{50})^{1.1} \quad (5)$$

where D_{50} is the grain size (the median) in metres. Since D_{50} showed a minimum seasonal variability range, a mean representative value was used for each beach (Anfuso 2002). This parameter differentiates between reflective beaches with bars and beach cusps ($\Omega < 1$), intermediate beaches with bars and cusps ($1 < \Omega < 6$) and dissipative beaches ($\Omega > 6$). The Dean number was used to classify the beaches according to the model proposed by Masselink and Short (1993), and was employed in conjunction with the relative tidal range, obtained by the relationship between the tidal range and wave height (Davis and Hayes 1984).

Finally, the response of the beaches to energetic agents was analyzed. Owing to the limited proportional relationship between the beach slope values and/or the beach volumes and wave steepness, since the above parameter does not allow differentiating between swell waves and sea waves (Benavente *et al.* 2000, Anfuso *et al.* 2003), the erosivity factor proposed by Benavente and Reyes (1999) and Benavente *et al.* (2000) was used:

$$Er = EW = (1/8)\rho g H^2 H / TW_s = cte. H^3 / T \quad (6)$$

This factor emphasizes the importance of wave height along low-energy coasts, reducing the importance of the period, which ceases to be a modulator factor of the wave energy but becomes an effective means of indicating the potential erosive value of incoming waves.

Results

Wave climate

Figure 2 shows the variation in wave height, mean tidal range and relative tidal range, throughout the period of study.

Wave height clearly showed a seasonal behaviour. The highest values were recorded during the winter months (November to January), followed by the spring months (April and May). The lowest values were recorded in summer and in February and March. The wave intervals generally showed little variation. Finally, the variation of the mean tidal range was minimal, the main energetic factor being wave action.

oleaje fueron en general poco marcadas. Finalmente, las variaciones del rango mareal medio fueron mínimas, siendo el ambiente de estudio dominado por el oleaje.

Clasificación morfodinámica

En la tabla 1 se representan los valores medios del parámetro adimensional de Caída de Grano, del Índice de Similaridad de Surf y del Parámetro de Escala de Rompiente para cada uno de los perfiles estudiados. Se han considerado valores medios para todas las campañas, valores representativos de condiciones de invierno y de verano.

En cuanto al parámetro de Dean (tabla 1), sus valores medios son típicos del estado “intermedio”. Se registran pocas diferencias entre una playa y otra, aunque todas las playas presentan variaciones estacionales: se observa un comportamiento “intermedio-disipativo” en las campañas invernales y uno “intermedio” en las campañas de verano, o en las llevadas a cabo después de condiciones de buen tiempo.

El Índice de Similaridad de Surf (tabla 1) presenta valores bajos, casi siempre inferiores a 0.4, que es el límite derrame-voluta (Fredsoe y Deigaard 1992), reflejando muy bien el comportamiento morfodinámico de las playas estudiadas y las variaciones anuales del oleaje. Así, se observa cómo prevalece la rotura en derrame, mientras la rotura en voluta caracteriza sólo los meses de baja energía, es decir verano o el periodo de febrero a marzo (sobre todo de 1997), indicando un estado intermedio-reflectivo de las playas en esa temporada.

En cuanto al Parámetro de Escala de Rompiente (tabla 1), todas las playas muestran valores “intermedios” según los límites de Guza e Inman (1975), con valores más disipativos en mayo–julio y en noviembre–diciembre, reflejando las variaciones estacionales de la pendiente de la playa y del oleaje. De hecho, las playas con menor pendiente fueron las únicas que

Morphodynamic classification

The average Dean number, surf similarity index and surf scaling values for each one of the profiles are given in table 1. Mean values have been considered for all of the surveys, including values that are representative of winter and summer conditions.

On considering the Dean number (table 1), the mean values obtained are typical of an intermediate state. Few differences were recorded between one beach and another, although all the beaches presented seasonal variation: intermediate-dissipative behaviour was observed during the winter surveys and intermediate behaviour during the summer surveys or during those carried out under fair weather conditions.

The surf similarity index (table 1) produced low values of almost always less than 0.4, which is the spilling-plunging limit (Fredsoe and Deigaard 1992). This clearly reflects the morphodynamic behaviour of the beaches and the annual wave variations. It is evident that spilling breakers are prevalent and that plunging breakers are only characteristic during low energy months, i.e., in summer or in the February/March period (especially in 1997). This indicates that the beaches have an intermediate-reflective state at these times.

Regarding the surf scaling parameter (table 1), all the beaches showed intermediate values according to the limits of Guza and Inman (1975), with more dissipative values from May to July and in November and December, reflecting the seasonal variations of the beach slope and wave. In fact, the beaches with the gentlest slopes were the only ones that had values of more than 30. Low values were recorded for beaches with a steep slope, especially after fair, constructive weather conditions. In addition to the previously described classic morphodynamic parameters, the relative tidal range and surf scaling were also used to classify the beaches according to

Tabla 1. Valores medios del parámetro de Caída de Grano (Ω), del Índice de Similaridad de Surf (ξ) y del parámetro de Escala de Rompiente (ϵ), para cada uno de los perfiles estudiados.

Table 1. Mean values of the Dean number (Ω), the surf similarity index (ξ) and the surf scaling parameter (ϵ) for each one of the profiles studied.

Temporada		Perfil												
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
Ω	Verano	3.96	4.53	5.51	4.37	4.37	3.52	3.62	3.17	3.84	4.37	3.62	3.84	
	Invierno	5.10	5.83	7.10	5.65	5.63	4.54	4.67	4.08	4.85	5.63	4.67	4.95	
	Media	4.22	4.83	5.88	4.66	4.66	3.75	3.86	3.38	4.10	4.66	3.86	4.10	5.85 ^a /14 ^b
ξ	Verano	0.31	0.31	0.23	0.20	0.24	0.28	0.64	0.57	0.63	0.55	0.46	0.43	
	Invierno	0.21	0.25	0.16	0.20	0.23	0.29	0.52	0.31	0.56	0.39	0.28	0.26	
	Media	0.28	0.31	0.22	0.24	0.25	0.38	0.61	0.46	0.58	0.47	0.39	0.39	0.4 ^a /0.08 ^b
ϵ	Verano	13.3	13.2	32.5	31.4	22.0	15.5	3.2	4.4	3.4	4.4	6.9	9.6	
	Invierno	22.9	15.4	40.3	23.7	18.9	19.9	3.7	11.33	3.2	6.3	12.7	33.7	
	Media	15.4	12.2	31.8	22.2	18.3	11.21	3.08	6.91	3.78	5.09	8.25	14.63	13.6 ^a /391 ^b

^a Valor calculado para el intermareal alto y medio; ^b valor correspondiente a la terraza de bajamar.

^a Value referred to the upper and middle foreshore; ^b value referred to the low-tide terrace.

mostraron valores superiores a 30. Valores bajos se observaron en playas de mayor pendiente, sobre todo tras condiciones de buen tiempo, constructivas.

Además de los parámetros morfodinámicos clásicos descritos anteriormente, se utilizaron el Parámetro adimensional de Caída de Grano y el Rango Mareal Relativo para clasificar las playas de acuerdo con Masselink y Short (1993). La gran mayoría de los puntos obtenidos corresponden al estado “intermedio” y, en segundo lugar, al “disipativo”, ambos con desarrollo de barras (fig. 3).

En concreto, el punto PIII es el que más veces presenta perfiles disipativos (fig. 3a). Los perfiles II, IV, V y X (fig. 3a, b, d) presentan principalmente estados intermedios y, solamente a veces, disipativos, sobre todo después de condiciones de tormenta; mientras que los demás perfiles (I, VI, VII, VIII, IX, XI y XII; fig. 3a, c, d) presentan casi exclusivamente estados intermedios, a pesar de los cambios estacionales del oleaje.

Relaciones entre las variables morfosedimentarias

En cuanto a las relaciones entre pendiente y volumen, las playas que presentan exclusivamente estados intermedios de la

Masselink and Short (1993). Most of the data collected correspond to an intermediate state and, secondarily, to a dissipative state, both with developing bars (fig. 3).

Specifically, profile III presents the highest number of dissipative states (fig. 3a). Profiles II, IV, V and X (fig. 3a, b, d) present mainly intermediate states and only occasionally dissipative states, usually as a result of storm conditions. The rest of the profiles (I, VI, VII, VIII, IX, XI and XII; fig. 3a, c, d) almost exclusively present intermediate states, in spite of the seasonal wave changes.

Relationship between the morphosedimentary variables

On examining the relationship between the slope and beach volume, the beaches that presented exclusively intermediate states, according to Masselink and Short's (1993) classification, showed, in general, a clear correlation between the slope of the high foreshore and the volume of the upper part of the beach, as well as between the slope and the total volume of the beach; however, an inverse relationship was observed between the slope and lower part of the foreshore (fig. 4a, c, e, f). This same relationship, also less defined, was also observed for the

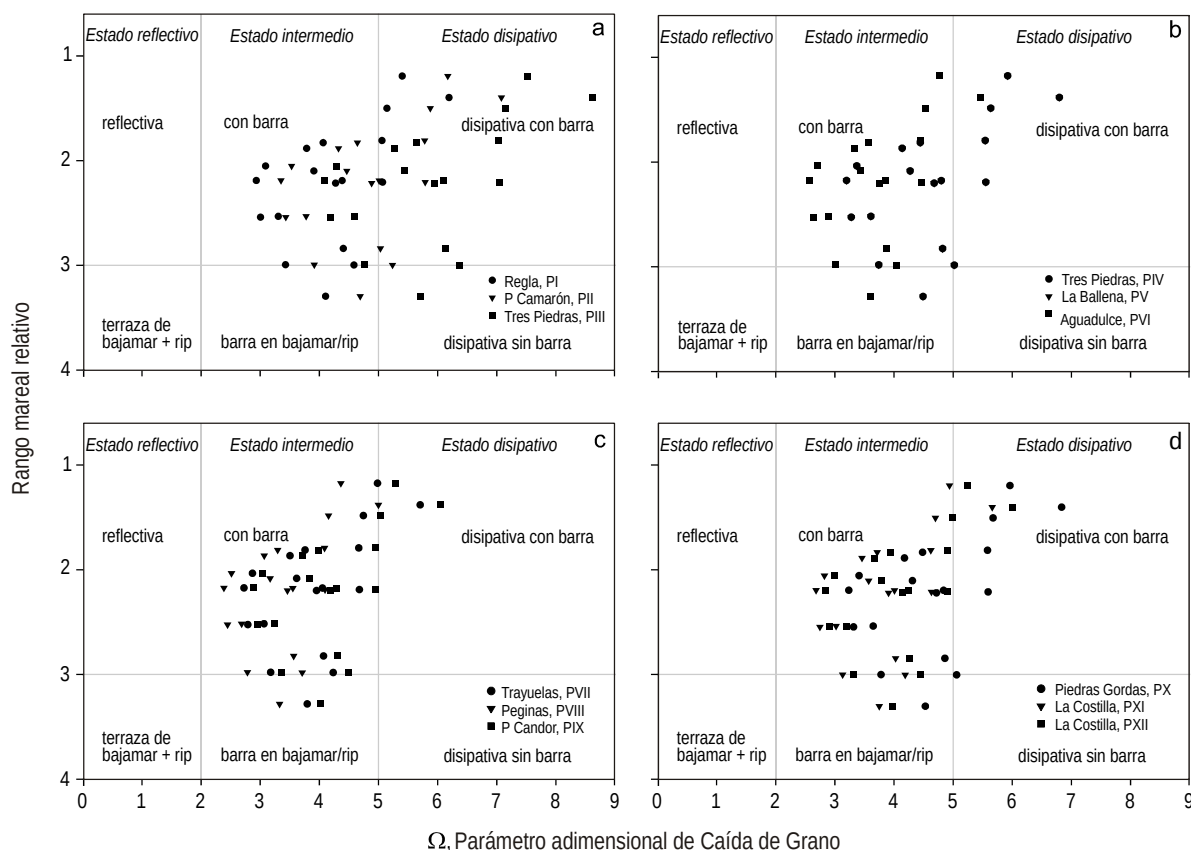


Figura 3. Caracterización morfodinámica de las playas estudiadas según la clasificación de Masselink y Short (1993). Cada punto corresponde a un perfil para cada campaña realizada.

Figure 3. Morphodynamic characterization of the beaches surveyed, according to the classification proposed by Masselink and Short (1993). Each point corresponds to a profile for each survey.

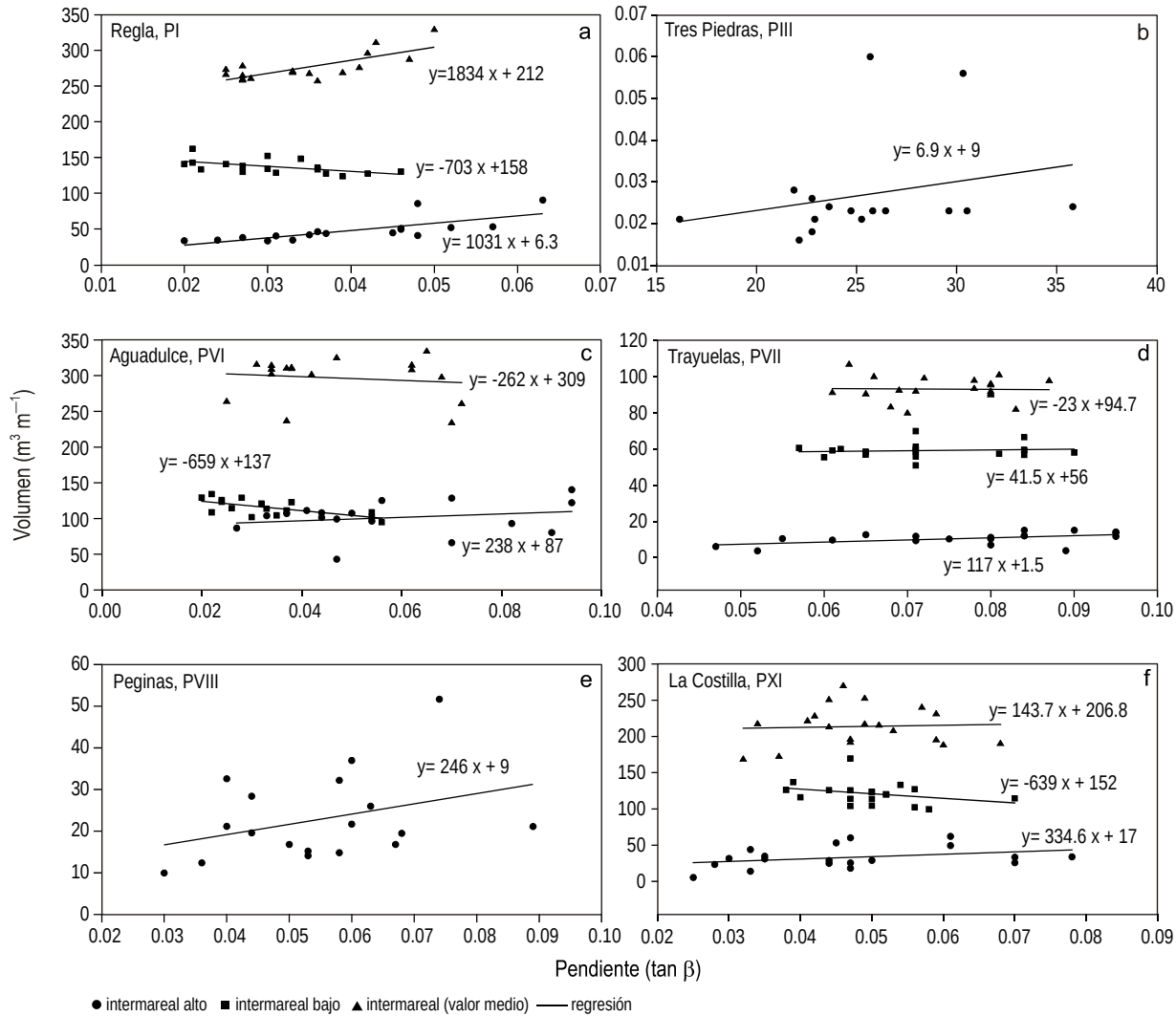


Figura 4. Relaciones entre pendiente y volumen del intermareal y de sus porciones alta y baja en diferentes playas. Se presenta también la ecuación de la recta para cada caso.

Figure 4. Relationships between foreshore slope and volume and its lower and higher portions at different beaches. The straight-line equation is given for each case.

clasificación de Masselink y Short (1993), en general, muestran una buena correlación entre pendiente del intermareal alto y volumen de la parte alta de la playa, y entre pendiente y volumen total de la playa. Por otra parte, presentan una relación inversa entre pendiente y volumen de la parte baja del intermareal (fig. 4a, c, e, f). La playa que pertenece al estado disipativo (PIII), y las que presentan estados intermedios y secundariamente disipativos según la clasificación de Masselink y Short (1993), muestran esta misma relación, aunque muy poco marcada (fig. 4, b, d).

Respuesta de las playas frente los agentes energéticos

En playas con estados exclusivamente intermedios de la clasificación de Masselink y Short (1993), se observa una tendencia inversa entre pendiente y altura de ola y entre

beach showing the dissipative state (III) and those presenting intermediate and, secondarily, dissipative states (fig. 4b, d).

Beach response to energetic agents

An inverse trend between the slope and wave height and between volume and wave height, with very low correlation coefficients, was observed for the beaches that showed exclusively intermediate states, according to Masselink and Short's (1993) classification. The same trend was observed between volume and wave steepness. The other beaches showed no clear relationship between the slope and wave height or between volume and wave steepness; however, a better correlation can generally be observed between volume and wave height when wave conditions correspond to erosive beach states.

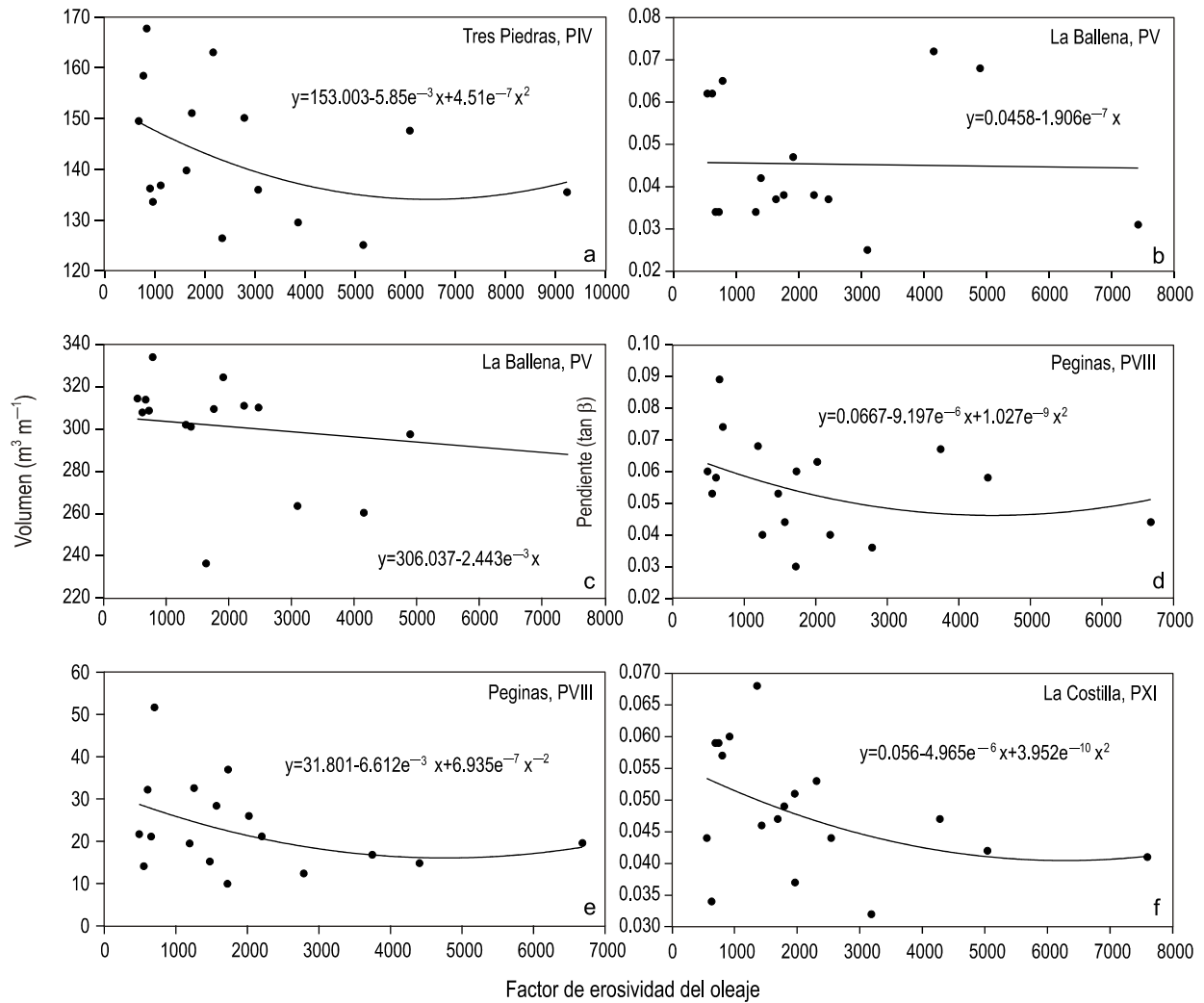


Figura 5. Relación entre el factor de erosividad (Benavente *et al.* 2000) y la pendiente y el volumen de diferentes playas. Se presenta también la ecuación de la curva para cada caso.

Figure 5. Relationship between the erosivity factor (Benavente *et al.* 2000) and the slope and volume of different beaches. The curve equation is given for each case.

volumen y altura de ola, con coeficientes de correlación muy bajos. Se observa la misma tendencia entre volumen y peralte del oleaje. En cuanto a las otras playas, no hay una relación clara entre pendiente y altura de ola o entre volumen y peralte de oleaje. Sin embargo, se observa en general una relación algo mejor entre volumen y altura de ola en cuanto a condiciones de oleaje energéticas corresponden estados de playa erosivos.

En cuanto a las relaciones entre pendiente y/o volumen y factor de erosividad del oleaje, en general las playas que presentan predominancia de estados intermedios según la clasificación de Masselink y Short (1993) muestran un comportamiento parecido, con una buena correlación entre el factor de erosividad del oleaje y la pendiente y el volumen de la playa (fig. 5d-f). Las restantes playas, que presentan estados intermedios y disipativos (fig. 5a-c), presentan una mayor dispersión de los datos en cuanto están menos relacionadas con las variaciones estacionales del oleaje.

As for the relationship between the slope and/or volume and the erosivity factor, the beaches that predominantly presented intermediate states, according to Masselink and Short's (1993) classification, showed a similar behaviour, with a clear correlation between the erosivity factor and the slope and volume of the beach (fig. 5d-f). The remaining beaches that presented intermediate and dissipative states (fig. 5a-c) showed a wider variety of data insofar as their behaviour was less related to the seasonal wave variations.

Discussion

The field observations and the values of the surf scaling parameter and surf similarity index (table 1) are in fairly good accordance with Masselink and Short's (1993) classification, despite the fact that they were based on different but interrelated parameters: the slope of the foreshore area (equations 1 and 2) and grain size (equations 4 and 5), respectively.

Discusión

Los datos obtenidos mediante la clasificación de Masselink y Short (1993) se ajustan bastante bien a las observaciones de campo y a los valores del Parámetro de Escala de Rompiente y del Índice de Similaridad de Surf (tabla 1) a pesar de estar basados sobre parámetros distintos pero interrelacionados, respectivamente pendiente de la zona intermareal (ecuaciones 1 y 2) y tamaño de grano (ecuaciones 4 y 5).

De hecho, el perfil III resulta ser el más disipativo utilizando también el Parámetro de Escala de Rompiente y el Índice de Similaridad de Surf que dan estados disipativos con rompientes en derrame (tabla 1). También los perfiles intermedios con casos disipativos según la clasificación de Masselink y Short (1993) muestran valores de Similaridad de Surf y de Escala de Rompiente bastante similares, con preferencia de estados intermedios próximos a disipativos y roturas en derrame.

Las playas exclusivamente intermedias según la clasificación de Masselink y Short (1993; fig. 3), presentan valores de Similaridad de Surf y de Escala de Rompiente que evidencian respectivamente roturas en voluta y estados intermedios, confirmando la buena correspondencia entre los parámetros geomorfológicos empleados y los resultados de la clasificación arriba mencionada.

Finalmente, hay que destacar las diferencias observadas en los casos de los perfiles VI y X. La clasificación de dichas playas según Masselink y Short (1993; fig. 3), respectivamente intermedia e intermedia con casos disipativos, resulta diferente de la obtenida mediante el uso de los índices morfológicos (tabla 1). Esto se debe a que la pendiente de la playa no está relacionada solamente con la granulometría sino también con otros factores, como las condiciones de contorno, por lo que la presencia de estructuras naturales o antrópicas favorecen la acumulación de arena que da lugar a una pendiente más elevada de lo normal. En lo específico, en el perfil X destaca la presencia de una plataforma rocosa en el intermareal medio y bajo que funciona como un dique sumergido, y en el perfil VI la de un acantilado que está retranqueado y funciona como una trampa sedimentaria (Anfuso *et al.* 2003, Anfuso y Gracia 2005).

En líneas generales aparecen dos problemas a la hora de intentar relacionar las variables dinámicas con las variables morfológicas o volumétricas. Primero, las playas o perfiles no desarrollados totalmente por la presencia de una laja rocosa en la zona de bajamar tienden a no mostrar comportamientos basculantes (Muñoz *et al.* 1999) lo que hace que su pendiente sea más o menos constante independientemente de las condiciones energéticas. Por otro lado, estos perfiles sólo mostrarán cambios ante los mayores temporales, al estar protegidos por el arrecife, el cual a su vez impide que dicho perfil crezca durante las épocas de buen tiempo. Segundo, las playas que presentan perfiles disipativos todo el año, evidentemente no van a mostrar cambios de la pendiente intermareal, pero por otro lado no muestran prácticamente cambios volumétricos. Esto se debe al

In fact, the state of profile III was the most dissipative when the surf scaling parameter and surf similarity index, which give dissipative states with spilling breakers (table 1), were also used. The intermediate profiles that showed certain dissipative cases, based on Masselink and Short (1993), had quite similar surf similarity and surf scaling values, with intermediate states close to the dissipative conditions characterized by spilling breakers.

The beaches that were exclusively intermediate (fig. 3), according to Masselink and Short (1993), had surf similarity and surf scaling values that show evidence of plunging breakers and intermediate states, respectively, confirming the fact that there is concordance between the geomorphologic parameters used and the results of the above-mentioned classification.

Finally, it should be noted that different observations were made in the cases of profiles VI and X (fig. 3), which were classified as intermediate and intermediate with dissipative cases, respectively. This result was different from that obtained with the use of morphological indices (table 1). The reason for this is that the beach slope is not only related to grain size, but also to other factors like the surrounding conditions, given that the presence of natural or human structures tends to encourage the accumulation of sand, which in turn gives rise to a higher slope than usual. Specifically, in profile X the presence of a rocky platform in the mid and low foreshore is significant, since this acts as a submerged groin, and in profile VI the cliff is set back and acts as a sediment trap (Anfuso *et al.* 2003, Anfuso and Gracia 2005).

Generally, two problems occur when attempting to relate the dynamic variables to the morphological or volumetric variables. First, the beaches or profiles that are not fully developed because of a rocky platform in the low tide area tend not to show a pivoting behaviour (Muñoz *et al.* 1999), which means that their slope is more or less constant regardless of the energy conditions. On the other hand, these profiles will only show changes when affected by major storms, as they are protected by the rocky shore platform, which in turn prevents them from accretion during fair weather periods. Second, the beaches that present dissipative profiles for the whole year will evidently not show changes in the foreshore slope; however, they also show practically no volume change. This is due to their morphodynamic invariability, which is often indicative of sand deficiency (Benavente *et al.* 2002).

When taking into account the morphodynamic behaviour of the beaches surveyed, it can be seen that this is closely related to their morphological characteristics. In general, the beaches that showed exclusively intermediate states, according to Masselink and Short's (1993) classification, recorded an increase which takes place during fair weather conditions, in most cases because of the formation of a berm. This process leads to an increase of the upper foreshore and, at times, an increase of the entire foreshore slope (fig. 4a, c, e, f), giving rise to intermediate states characterized by plunging breakers, according to the geomorphologic parameters applied (table 1). On the other hand, beach erosion occurs during high energy

comportamiento de invariabilidad morfodinámica, que suele ser indicativo de carencia de arena (Benavente *et al.* 2002).

En cuanto al comportamiento morfodinámico de las playas estudiadas, éste está estrictamente relacionado a sus características morfológicas. En general, playas que presentan exclusivamente estados intermedios según la clasificación de Masselink y Short (1993) registran un crecimiento que tiene lugar durante condiciones de buen tiempo, preferentemente mediante la formación de una berma. Este proceso lleva a un aumento de la pendiente de la parte alta del intermareal y, a veces, a un aumento de la pendiente de todo el estrán (fig. 4a, c, e, f) que da lugar a estados intermedios caracterizados por rompientes en voluta según los parámetros geomorfológicos empleados (tabla 1). Por otra parte, la erosión de la playa tiene lugar durante condiciones de alta energía ($H_s > 1$ m) y conlleva una disminución de los valores de la pendiente: altos valores del Factor de Erosividad se asocian a bajos volúmenes de arena (fig. 5e) y bajos gradientes de playa (fig. 5d, f), correspondientes a estados intermedios pero próximos a disipativos. Un comportamiento parecido, denominado basculamiento, fue observado en playas similares por Carter (1988), Thom y Hall (1991) y Nordstrom y Jackson (1992) y, en playas próximas, por Benavente y Reyes (1999).

Las restantes playas, que presentan tanto estados intermedios como disipativos o que pertenecen al estado intermedio pero no presentan berma, no muestran ninguna relación entre pendiente y volumen (fig. 4b, d) y entre éstos y el Factor de Erosividad del oleaje (fig. 5a–c) por la falta de cambios de pendiente significativos a lo largo del año, tal y como ha sido observado por Hardisty (1986), Hughes y Cowell (1987), Nordstrom y Jackson (1992), y Shih y Komar (1994) en playas similares.

Agradecimientos

Se agradece a J Doherty la traducción del presente artículo. Este trabajo es una contribución al proyecto CICYT BTE-2003-05706 y al grupo PAI RNM-328.

Referencias

- Anfuso G. 2002. Morfología y dinámica sedimentaria del litoral gaditano entre Chipiona y Rota. Tesis doctoral, Serv. Publicaciones Univ. Cádiz, 378 pp.
- Anfuso G, Gracia FJ. 2005. Morphodynamic characteristics and short-term evolution of a coastal sector in SW Spain: Implication for erosion management. *J. Coast. Res.* 21: 1139–1153.
- Anfuso G, Benavente J, Gracia FJ. 2001. Morphodynamic response of nourished beaches in SW Spain. *J. Coast. Conserv.* 7: 71–80.
- Anfuso G, Martínez JA, Gracia FJ. 2003. Longshore distribution of morphodynamic beach states in an apparently homogeneous coast (Chipiona-Rota, SW Spain). *J. Coast. Conserv.* 9(1): 49–56.
- Bascom WN. 1951. The relationship between sand size and beach face slope. *Trans. Am. Geophys. Un.* 32: 866–874.
- Battjes JA. 1974. Surf Similarity. *Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng. ASCE*, pp. 466–480.
- Benavente J, Reyes JL. 1999. The application of morphodynamic indices to exposed beaches of Cadiz Bay. *Bol. Inst. Esp. Oceanogr.* 15(1–4): 213–222.
- Benavente J, Gracia FJ, López-Aguayo F. 2000. Empirical model of morphodynamic beachface behaviour for low-energy mesotidal environments. *Mar. Geol.* 167: 375–390.
- Benavente J, Del Río L, Anfuso G, Gracia FJ, Reyes JL. 2002. Utility of morphodynamic characterization in the prediction of beach damage by storms. *J. Coast. Res.* SI 36: 56–64.
- Carter RWG. 1988. *Coastal Environments*. Academic Press, 617 pp.
- Dalrymple RA, Thompson WW. 1976. Study of equilibrium beach profiles. *Proc. 15th Conf. Coastal Eng. ASCE*, pp. 1277–1296.
- Davis RA Jr, Hayes MO. 1984. What is a wave-dominated coast? *Mar. Geol.* 60: 313–329.
- Dean RD. 1973. Heuristic models of sand transport in the surf zone. *Proc. of the Eng. Dynamics in the Surf Zone*, Sydney, pp. 208–214.
- Domínguez L, Anfuso G, Gracia FJ. 2005. Vulnerability assessment of a retreating coast in SW Spain. *Environ. Geol.* 47: 1037–1044.
- Doornkamp JC, King CAM. 1971. *Numerical Analysis in Geomorphology: An introduction*. Arnold, London.
- Folk RL, Ward WC. 1957. Brazos River bar. A study in the significance of grain size parameters. *J. Sedimen. Petrol.* 27: 3–26.
- Fredsoe J, Deigaard R. 1992. *Mechanics of coastal sediment transport*. Advanced Series on Ocean Engineering. Vol. 3. World Scientific, 366 pp.
- Gourlay MR. 1968. Beach and dune erosion tests. Delft Hydraulics Laboratory, Rep. No. M935/M936. Delft, Netherlands.
- Guza RT, Inman DL. 1975. Edge waves and beach cusps. *J. Geophys. Res.* 80(21): 2997–3012.
- Hardisty J. 1986. A morphodynamic model for beach gradients. *Earth Surf. Process. Landforms* 11: 327–333.
- Harrison W. 1969. Empirical equations for foreshore changes over a tidal cycle. *Mar. Geol.* 7: 529–551.

Acknowledgements

Thanks to J Doherty for the translation of the article. This work is a contribution of the CICYT BTE-2003-05706 project and the PAI RNM-328 group.

- Hsu TW, Wang H. 1997. Geometric characteristics of storm beach profiles. *J. Coast. Res.* 13: 1102–1110.
- Hughes MG, Cowell PJ. 1987. Adjustments of reflective beaches to waves. *J. Coast. Res.* 3: 153–167.
- Iribarren CR, Nogales C. 1949. Protection des ports. Section II. Comm. 4, XVII Int. Nav. Congress, Lisbon, pp. 31–80.
- King CAM, Williams WW. 1949. The formation and movement of sand bars by wave action. *Geogr. J.* 113: 70–85.
- Komar PD, Gaughan MK. 1972. Airy wave theory and breaker height prediction. *Proc. 13th Int. Coastal Eng. Conf. ASCE*, pp. 405–418.
- Masselink G, Short AD. 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model. *J. Coast. Res.* 9: 785–800.
- Muñoz JJ, Enríquez J. 1998. Dinámica litoral de una unidad fisiográfica completa: Sanlúcar-Rota. *Rev. Obras Públicas* 3375: 35–44.
- Muñoz JJ, Tejedor L, Medina R. 1999. Equilibrium beach profile model for reef-protected beaches. *J. Coast. Res.* 15: 950–957.
- Muñoz JJ, López B, Gutiérrez JM, Moreno L, Cuenca G. 2001. Cost of beach maintenance in the Gulf of Cadiz (SW Spain). *Coast. Eng.* 42: 143–153.
- Nordstrom KF, Jackson NL. 1992. Two-dimensional change on sandy beaches in meso-tidal estuaries. *Z. Geomorph.* 36(4): 465–478.
- Rector RL. 1954. Laboratory study of the equilibrium profiles of beaches. US Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Tech. Memo No. 41.
- Reyes JL, Benavente J, Gracia FJ, López-Aguayo F. 1996. Efectos de los temporales sobre las playas de la Bahía de Cádiz. *Cuadernos do Laboratório Xeológico de Laxe* 25: 631–643.
- Seymour RJ, Castel D. 1989. Modelling cross-shore transport. In: Seymour RJ (ed.), *Nearshore Sediment Transport*. 418 pp.
- Shih S, Komar P. 1994. Sediments, beach morphology and sea cliff erosion within an Oregon coast littoral cell. *J. Coast. Res.* 10(1): 144–157.
- Short A. 1999. *Beach and Shoreface Morphodynamics*. John Wiley, 379 pp.
- Sunamura T. 1984. Quantitative prediction of beach-face slopes. *Geol. Soc. Am. Bull.* 95: 242–245.
- Sunamura T. 1989. Sandy beach geomorphology elucidated by laboratory modeling. In: Laknon VC, Trenhaile AS (eds.), *Application in Coastal Modelling*. Elsevier, Amsterdam, pp. 159–213.
- Sunamura T, Horikawa K. 1974. Two-dimensional beach transformation due to waves. *Proc. 14th Int. Coastal Eng. Conf. ASCE*, pp. 920–938.
- Thom B, Hall W. 1991. Behaviour of beach profiles during accretion and erosion dominated periods. *Earth Surf. Process. Landforms* 16: 113–127.
- Wiegel RL. 1964. *Oceanographical Engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 532 pp.
- Wright LD, Short AD. 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Mar. Geol.* 56: 93–118.

*Recibido en julio de 2005;
aceptado en agosto de 2006.*