

Morfodinámica de barras litorales en playas mesomareales expuestas del SO de España

Morphodynamics of swash bars in mesotidal exposed beaches of SW Spain

G. Anfuso*
J.A. Martínez
F. Sánchez
J. Benavente
J. Andrés
F. López-Aguayo

Departamento de Ciencias de la Tierra
Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales
Universidad de Cádiz
11510 Puerto Real, Cádiz, España
*E-mail: giorgio.anfuso@uca.es

Recibido en julio de 2002; aceptado en octubre de 2002

Resumen

El seguimiento morfológico de más de 60 barras intermareales del tipo “*swash bar*” en el sector Chipiona-Rota (litoral de Cádiz), efectuado a diferentes escalas temporales, ha permitido determinar sus principales características morfométricas y morfodinámicas, evidenciando las diferencias de comportamiento respecto a las barras “*ridge and runnel*”. Las barras asociadas a playas disipativas son de escasa altura y sin una cara de avalancha bien definida; las barras asociadas a playas intermedias-reflectivas presentan morfologías más abruptas, mientras que las barras asociadas a playas con plataforma rocosa presentan morfologías parecidas a las observadas en playas intermedias-reflectivas. Se han estudiado también la estructura interna y la dinámica de las barras asociadas a playas disipativas. Éstas se encuentran compuestas por láminas paralelas a la superficie y, cuando la barra se ubica en la parte alta del estrán, la cara de avalancha presenta láminas de *foreset* nítidas. En cuanto a su morfodinámica, se ha visto que ésta está controlada por diferentes procesos que dependen de las características del oleaje, de la morfología de la barra y de las variaciones del nivel del mar a lo largo de un ciclo mareal. Finalmente, en cuanto a su distribución temporal, las barras presentan una mayor frecuencia en la época primaveral, con un máximo secundario en otoño.

Palabras clave: morfodinámica litoral, playas, barras litorales, morfometría, sedimentología.

Abstract

Morphological monitoring of swash bars at different temporal scales was carried out in the southatlantic Spanish coast between Chipiona and Rota. As a result, the main morphometric and morphodynamic characteristics of more than 60 bars were determined. The differences between this type of bars and the classic ridge and runnel were also pointed out. Bars associated with dissipative beaches appeared to be flat, with no significant avalanche face. Bars associated to low reflective beaches presented a better development while bars associated to rocky shore-platform beaches showed similar morphologies to those of low reflective beaches. Inner sedimentary structures of bars in dissipative beaches showed laminae parallel to the beach face. When the bars were located at the upper beachface, the avalanche faces showed clear foreset laminae. In this environment, morphodynamics is controlled by different processes depending on wave characteristics, bar form and water level fluctuations during tidal cycles. The temporal distribution of bars is marked by a higher frequency in spring, and lower one in autumn.

Key words: coastal morphodynamics, beaches, coastal bars, morphometry, sedimentology.

Introducción

Las barras son acumulaciones arenosas muy comunes en el medio litoral que se forman en la zona sumergida próxima a la costa (zona submareal), donde las corrientes de retorno de los temporales llevan los sedimentos arenosos erosionados en la playa. Durante condiciones de buen tiempo las barras migran por el intermareal y se adosan a la parte alta del mismo, donde contribuyen a crear la berma (Sunamura, 1989).

Introduction

Bars are sedimentary bodies quite common in sandy littoral zones. They are formed in the nearshore zone where storm waves accumulate sediments eroded from the beach face. During fair weather conditions, landward migration of bars take place through the nearshore and foreshore zones, with a final welding onto the beach face to create a berm (Sunamura, 1989).

Una vez formada, la barra desarrolla un doble papel de protección costera: por un lado, actúa como obstáculo sumergido que filtra las olas más altas durante la llegada de nuevos temporales (e.g., Carter, 1991; Greenwood y Osborne, 1991; Takeda y Sunamura, 1992); por otro, constituye una reserva de sedimento que durante condiciones de buen tiempo (oleaje de mar de fondo) es llevado a la orilla. Ejemplos de migración y adosamiento de barras a la berma se describen en Davis *et al.* (1972), Hayes (1972), Greenwood y Davidson-Arnott (1979), Owens y Frobel (1977), Hine (1979), Hunter *et al.* (1979) o Dabrio y Polo (1981). La velocidad de migración hacia tierra de las barras varía mucho, de 1 a 30 m/día (Horikawa, 1988).

Davis y Fox (1975) en el lago Michigan, y Sunamura y Takeda (1984) en las costas japonesas, estudiaron ejemplos de migración de barras hacia el mar, mientras que King y Williams (1949), Carter (1991) y Navas *et al.* (2000) describieron barras estables en playas mesomareales de Gran Bretaña.

En cuanto a modalidades de migración, según Carter (1991), la migración de la barra como cuerpo único tiene lugar solamente en ambientes de baja energía, mientras que en ambientes muy energéticos la transferencia de sedimento tiene lugar de la barra a la playa, "grano a grano", sin que la barra se mueva como unidad.

Las barras presentan una gran variedad de dimensiones y formas. Entre las diversas clasificaciones morfológicas existentes, la más utilizada probablemente sea la propuesta por Greenwood y Davidson-Arnott (1979), luego retomada por Carter (1991). En ella se distinguen, en función de la localización de la barra y de los agentes marinos que actúan sobre la misma, seis tipos de morfologías.

Si bien existen numerosos trabajos sobre morfología y estructura interna de las barras, en el presente estudio nos centraremos en aquéllos que tratan de barras pertenecientes a los tipos I ("ridge and runnel") y II ("swash bar"), por ser las más parecidas a las estudiadas en este trabajo.

King y Williams (1949) utilizaron por primera vez el término "ridge and runnel" para las barras observadas en la playa disipativa de Blackpool (Inglaterra), con rango de marea de 4 a 6 m (mesomareal), que presentaba varias barras temporalmente muy estables en el tiempo. Estos autores estudiaron también barras longitudinales en playas mediterráneas que catalogaron como "barred beaches".

Hayes (1972) utilizó el término "ridge and runnel" para indicar el resultado de la unión de una barra que migra (swash bar) y un surco a tierra de la misma. La terminología "ridge and runnel" ha sido también empleada para describir barras que migran a lo largo de la zona intermareal en playas micro-mareales del Lago Michigan (Davis *et al.*, 1972; Davis y Fox, 1972), o de la costa de Texas (Davis y Fox, 1975). No obstante, el uso de este término para describir las "swash bar" ha sido criticado por Orford y Wright (1978), Greenwood y Davidson-Arnott (1979), y Komar (1998).

El objetivo de este trabajo es la caracterización de las swash bar (Carter, 1991) de las playas del tramo costero comprendido entre Chipiona y Rota (provincia de Cádiz). El seguimiento morfológico del litoral permitió caracterizar la

Thus, bars show double importance for the coastal defence: On the one hand they work as submerged breakwaters that filter higher waves during storms (Carter, 1991; Greenwood and Osborne, 1991; Takeda and Sunamura, 1992), and on the other hand, they constitute sediment reservoirs transported ashore during fair weather conditions (swell waves). Landward bar migration velocities range a lot, from 1 to 30 m/day (Horikawa, 1988). However, Davis and Fox (1975) and Sunamura and Takeda (1984) reported offshore bar migration examples, under storm conditions, in Lake Michigan (USA) and Japan, respectively, while King and Williams (1949), Carter (1991) and Navas *et al.* (2000) described nearly stationary intertidal bars on macrotidal sheltered environments in Great Britain.

Dealing with bar migration modalities, Carter (1991) stated that migrating as a single sandy body is restricted to low-wave energy and mesotidal environments while, under higher energetic conditions, sediments are directly transferred, grain to grain, from the bar to the beach face.

Bars show a wide variety of sizes and forms. Among the different current morphological classifications, the most used is the one from Greenwood and Davidson-Arnott (1979), modified by Carter (1991). This classification describes six different morphologies that were identified considering bar location and wave and tide characteristics.

Although numerous papers deal with bar morphology and internal structures, in the present paper only works related to bars of type I (ridge and runnel) and type II (swash bar) have been analyzed.

Dealing with bar terminology, King and Williams (1949) originally used the term "ridge and runnel system" in the dissipative beach of Blackpool (England), with a tidal range varying from 4 to 6 m (mesotidal environment), which presented several steady bars. They also described longshore bars in microtidal Mediterranean beaches that they classified as "barred beaches".

Hayes (1972) defined as "ridge and runnel" a bar that is the combination of a migrating swash bar and a landward trough. This term was also used to describe rapidly migrating swash bars in microtidal environments, in Lake Michigan (Davis and Fox, 1972; Davis *et al.*, 1972), or in the Texan coast (Davis and Fox, 1975). However, the use of the "ridge and runnel" term to describe these shapes was questioned by Orford and Wright (1978), Greenwood and Davidson-Arnott (1979) and Komar (1998).

The main aim of this paper is to typify swash bars (Carter, 1991) in the littoral between Chipiona and Rota (Cadiz Province). A beach monitoring program was performed to characterize bar morphology and morphometry, internal structures and migration modalities. Moreover, the main differences between the studied swash bars and ridge and runnel systems described by the authors were also analyzed to characterize hydrodynamic and morphological parameters that control the bar formation and evolution. These types of information, as well as data on littoral dynamics, grain size variations and contouring conditions of the beaches allowed a better understanding of the studied littoral.

morfología, morfometría, estructura interna y mecanismos de migración de las barras intermareales existentes en dicho sector costero. Finalmente, se han evidenciado las diferencias entre las *swash bar* estudiadas y las *ridge and runnel* descritas por otros autores, con el fin de aclarar cuales son los parámetros hidrodinámicos y morfológicos que gobiernan la generación y evolución de dichas barras. La información obtenida, junto con otros datos como la deriva litoral dominante, las variaciones granulométricas, o las condiciones de contorno de cada playa, permiten una mejor aproximación al conocimiento de la morfodinámica de las playas estudiadas.

Área de estudio

El área de estudio se localiza al norte de la Bahía de Cádiz, SO de España (fig. 1), e incluye 14 km de playas distribuidas a lo largo de un litoral homogéneo abierto al SO. Los sedimentos costeros están constituidos por arenas ricas en cuarzo de granulometría media y fina, y sus características no varían casi a lo largo del litoral estudiado. Las playas presentan una zona intermareal de anchura variable (de 50 a 120 m), en la que a veces se desarrolla una plataforma rocosa excavada sobre materiales detríticos neógenos. La playa seca, que no tiene en general una gran anchura, está limitada en su parte posterior por cordones dunares y acantilados labrados sobre depósitos pliocuaternarios (Roldán *et al.*, 1988). Los principales aportes sedimentarios a la zona de estudio proceden del Río Guadalquivir.

La marea es de carácter semidiurno, con rangos medios de 3.2 y 1.1 m en mareas vivas y muertas, respectivamente. Los vientos dominantes soplan del ESE (19.6% de frecuencia) y del ONO (12.8%). Estos últimos se asocian a los frentes fríos Atlánticos y, debido a la orientación del litoral, son los que de manera más importante afectan a la zona de estudio, generando una corriente de deriva litoral dominante hacia el SSE. La altura media de ola es inferior a 1 m, mientras que la altura de ola significativa durante los temporales supera los 2 m, con un periodo medio que ronda los 7 segundos.

Las playas estudiadas (fig. 2) se pueden dividir, en función de la pendiente intermareal, en disipativas (gran anchura y ausencia de morfologías, parecidas a las playas “disipativas” descritas por Wright y Short, 1984), intermedias-reflectivas (anchura reducida y pendiente elevada relacionada a la presencia de una berma en verano, parecidas a las playas “reflectivas” descritas por Wright y Short, 1984) y con plataforma rocosa (donde la anchura es mínima, parecidas a las descritas en zonas cercanas por Muñoz *et al.*, 1999). Estas últimas playas presentaron a veces una pequeña berma y sufrieron cambios morfológicos según el modelo del *parallel retreat* (Norstrom y Jackson, 1992). Las diferencias observadas entre una playa y otra se deben, en la mayoría de los casos, a las condiciones de contorno de las mismas, como la presencia de espigones (en Chipiona y en Rota) o de una plataforma rocosa que, a veces, constituye salientes que actúan como diques sumergidos que interrumpen el transporte litoral. Dichas estructuras naturales y antrópicas favorecen la división de la costa estudiada en celdas

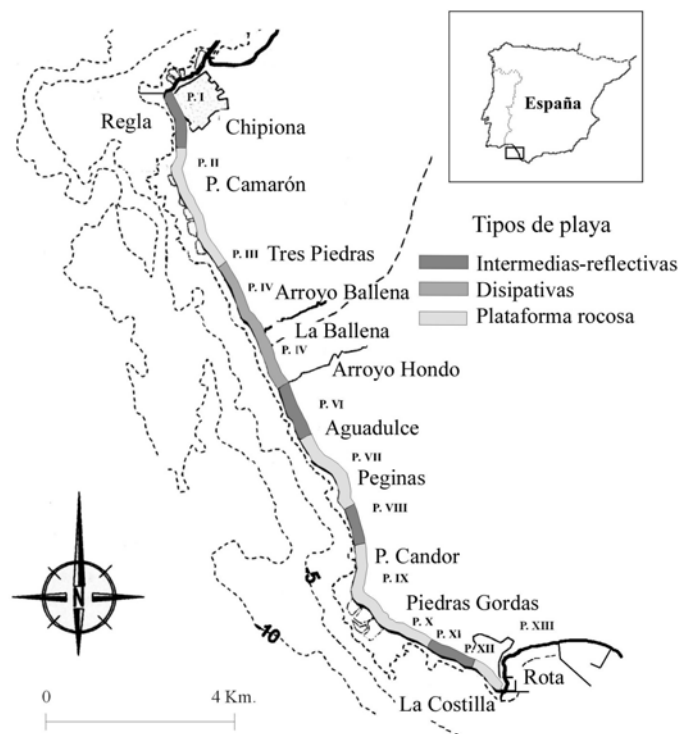


Figura 1. Mapa de localización y distribución de tipos de playas. Modificado de Muñoz y Enríquez (1998).

Figure 1. Location map of the studied coastal zone with beach types distribution. Modified from Muñoz and Enríquez (1998).

Study area

The study area is located between Rota and Chipiona, north of Cadiz Bay (SW Spain) and extends for 14 km of SW facing coastline (fig. 1). The beaches consist of quartz rich medium-fine sand that does not present important variations along the coast. The intertidal beach width ranges from 50 to 120 m, and is characterized in some places by an intertidal rocky shore-platform cut onto sedimentary rocks. Generally, the dry beach is not very extended and is backed by dune ridges and eroded cliffs on Plio-Quaternary deposits (Roldán *et al.*, 1988). Main sedimentary supplies to the area are linked to the Guadalquivir River.

The coast is a semidiurnal mesotidal environment with 3.2 m of mean spring and 1.1 m of mean neap tidal range. Dominant winds blow from the ESE (19.6% of annual occurrence) and the WNW (12.8%). The latter are associated to Atlantic fronts, and due to the coastal orientation, achieve a stronger importance, giving rise to a south-westward littoral drift. The mean wave height is less than 1 m while the significant wave height during storms is higher than 2 m, with a 7-sec associated period.

The studied beaches (fig. 2) can be divided up according to their intertidal slope in, dissipative (wide and smooth intertidal zone similar to the “dissipative” beaches described by Wright

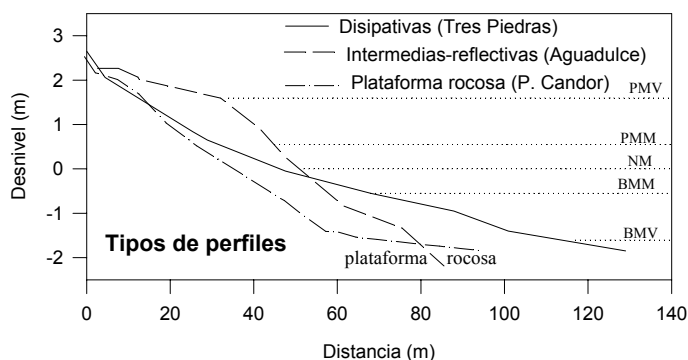


Figura 2. Ejemplos de perfiles típicos de playas disipativas, intermedias-reflectivas y con plataforma rocosa. PMV: pleamar viva; PMM: pleamar muerta; NM: nivel medio; BMM: bajamar muerta; BMV: bajamar viva.

Figure 2. Representative beach profiles of the three differentiated beach types. PMV: mean high water spring level; PMM: mean high water neap level; NM: mean sea level; BMM: mean low water neap level; and BMV: mean low water spring level.

litorales que determinan la variabilidad espacial de los diversos tipos de playa (Anfuso, 2002).

Metodología

El seguimiento morfológico se realizó mediante el levantamiento de 13 transeptos normales a la línea de costa y espaciados de forma homogénea a lo largo del litoral, durante un periodo de dos años, de marzo de 1996 a mayo de 1998. Los perfiles, medidos durante la bajamar viva del mes, se realizaron con periodicidad mensual con teodolito automático hasta el nivel de bajamar. Se realizaron un total de cerca de 220 perfiles. Los cambios microtopográficos se registraron mediante testigos de arena marcada y varillas metálicas clavadas en la superficie de la playa (según un procedimiento ya descrito por King, 1951; Otvos, 1965; Williams, 1971 y Ciavola *et al.*, 1998) o mediante el uso de arandelas móviles insertadas en varillas metálicas (según Greenwood y Hale, 1980). La pendiente del lado hacia mar y hacia tierra de las barras se midieron con un clinómetro. Las estructuras internas (geometría y espesor de los sets de láminas) se caracterizaron a partir de diversos cortes y trincheras excavadas a lo largo de las barras, sobre los que se realizaron esquemas, fotos y *peels*. La mayoría de dichas campañas se llevaron a cabo en las playas disipativas de Tres Piedras y La Ballena. En ellas no se pudo excavar más de 30–40 cm, debido al elevado flujo de agua intersticial. No obstante, el espesor de las láminas observadas es resultado de la sedimentación durante varios ciclos mareales, tal y como se ha visto tras numerosas pruebas de campo (Anfuso *et al.*, 2000). Se tomaron muestras de sedimentos que se trataron en laboratorio, determinándose los parámetros estadísticos según la metodología de Folk y Ward (1957).

Durante las campañas se midieron sucesivamente la altura de ola (mediante un jalón), periodo, ángulo de ataque del oleaje (según la metodología propuesta por Chandramohan *et al.*, 1994) y corrientes longitudinales (mediante flotadores).

and Short, 1984), intermediate-reflective (with a narrow and relatively steep intertidal slope related to a berm similar to the “reflective” beaches from Wright and Short, 1984) and with a rocky-shore platform (characterized by a narrow intertidal zone, similar to the beaches described by Muñoz *et al.*, 1999). This last beach type sometimes showed a small berm and experienced parallel retreat (Nordstrom and Jackson, 1992). Differences among beaches are linked to contouring conditions as groins (in Chipiona and Rota) or a rocky-shore platform that, at some places, gives rise to headlands that create submerged groins blocking the littoral drift. These antropic and natural structures control the division of the study coast into littoral cells and spatially control the beach type distribution (Anfuso, 2002).

Methodology

Along the studied littoral, the beach morphology was recorded from March 1996 to May 1998, through 13 topographic profiles normal to the shoreline surveyed monthly with an electronic theodolite, to a closure depth equivalent to the mean spring low tide water level. A total of 220 profiles were carried out. In order to evaluate minor topographic changes, rods and plugs of black coloured beach sand (King, 1951; Otvos, 1965; Williams, 1971; Ciavola *et al.*, 1995) and rods with a loose-fitting washer (Greenwood and Hale, 1980) were inserted onto the beach face during the morning low tide. The slopes of the seaward and landward bar sides were measured with clinometers. Observations of the internal bar structures and measurements of the laminae thickness and slope were carried out along trenches dug into the crest and the seaward and landward sides of the bars. Schemes, peels and photos were also made. Most of those field assessments were carried out in La Ballena and Tres Piedras beaches. It was impossible to dig deeper than 30–40 cm because of seepage. Moreover, this thickness is the result of sedimentary processes taking place during several tidal cycles as observed by Anfuso *et al.* (2000). Sediment samples were gathered into the beach and analyzed in laboratory and their statistical parameters were determined according to Folk and Ward (1957).

During field assessments, measures of wave height (with a graduated pole), period, approaching angle (according to Chandramohan *et al.*, 1994) and longshore currents (using floaters) were taken several times. The mean sea level position was measured using the Spanish National Tidal Tables.

Bar morphometry was developed, according to Larson and Kraus (1994), by the intersection of the actual measured profile with a theoretical exponential equilibrium one. The equilibrium profile was obtained by linear correlation after applying neperian logarithms to the actual profile data and obtaining a linear regression. The regression coefficients obtained, *a* and *b*, were used to generate the equilibrium profile:

$$z = ax^b \quad (1)$$

El nivel medio del mar se calculó mediante la corrección proporcionada por el anuario de mareas, a partir de un elevado número de medidas a lo largo del periodo estudiado.

En cuanto al trabajo de gabinete, la morfometría de las barras se calculó según la metodología de Larson y Kraus (1994), mediante el ajuste del perfil natural de la playa medido en el campo, con un perfil de equilibrio con una expresión exponencial. Para obtener el perfil de equilibrio se transformaron los datos del perfil de campo en logaritmos neperianos y calculándose la correspondiente regresión lineal. Los coeficientes de regresión obtenidos, a y b , se utilizaron para construir el perfil de equilibrio, según la expresión:

$$z = ax^b \quad (1)$$

En la figura 3 se representa un ejemplo de un perfil medido en el campo, y de su correspondiente perfil de equilibrio (Larson y Kraus, 1994). Los puntos de intersección entre ambos sirven para definir la pendiente del tramo del perfil de equilibrio que coincide con la barra, así como la altura (h) y la anchura (l) de la misma, lo que permite obtener el índice de forma, l/h , similar al propuesto por Carobene y Brambati (1975).

Resultados

Morfología y estructura interna

Con el fin de destacar las diferencias entre las barras asociadas a cada uno de los tres tipos de playas, se ha representado en la figura 4 la variación del índice de forma con respecto a la pendiente del tramo de perfil con barra. Se puede destacar una tendencia general, según la cual las barras ubicadas en la parte baja del intermareal presentan altos valores del índice de forma y bajos valores de pendiente, mientras que aquellas ubicadas en la parte alta del intermareal presentan una tendencia opuesta. Las playas intermedias-reflectivas presentan una buena correlación entre índice de forma y pendiente.

Según Hayes (1972), la morfología y las dimensiones de las barras dependen del tamaño de grano, de la pendiente de la playa, del rango mareal y del clima marítimo de la zona. Las variaciones mareales y el clima marítimo son iguales a lo largo de todo el tramo litoral estudiado, entonces, las características de las barras estudiadas dependen principalmente del tamaño de grano y de la pendiente de la playa, variables dependientes a su vez de la altura de ola en rompiente, en correspondencia de cada playa. En función del tipo de playa, las barras observadas se han dividido en tres grandes grupos (tabla 1):

- (1) Las barras asociadas a playas intermedias-reflectivas (fig. 4a), en la parte superior del intermareal, presentan crestas altas y estrechas, con pendientes intermedias en los lados hacia mar y hacia tierra (fig. 5a, b); muestran un valor medio del índice de forma en torno a 50 y valores de pendiente entre 2 y 6%; las de la parte baja presentan valores en general superiores y pendientes del 2–4%.

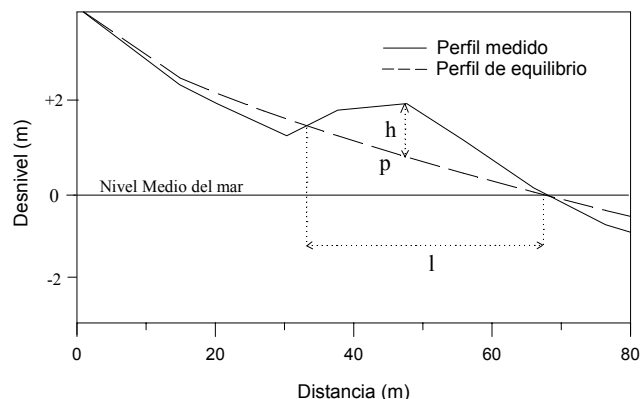


Figura 3. Caracterización morfométrica de una barra por su perfil de equilibrio: p = pendiente del perfil de equilibrio en el tramo con barra, h = altura de la barra y l = anchura.

Figure 3. Definition sketch of the bar morphometry through the use of a theoretical equilibrium profile; l = bar width, h = bar height, p = slope.

Figure 3 shows an example of a surveyed profile and its associated equilibrium profile (Larson and Kraus, 1994). The slope of the equilibrium profile section, coinciding with the bar, as well as the bar height (h) and length (l) were calculated, and a non-dimensional bar index l/h , similar to that proposed by Carobene and Brambati (1975), was obtained.

Results

Morphology and internal structures

In order to highlight the differences among bars associated to the three beach types observed, figure 4 shows the relationship between the bar index and the beach slope values. A general trend is stressed out: bars occurring in the low foreshore generally showed high bar index values associated to low slope values, while bars located in the upper foreshore presented the opposite trend. Bars associated to intermediate-reflective beaches showed good correlations between bar index values and beach slope.

Hayes (1972) stated that bar size and morphology depend on grain size, beach slope, wave conditions and tidal range. Since tidal range and wave conditions are homogeneous along the study zone, the main factors affecting the bar shape are grain size and beach slope, which are related to the breaking wave height at each one of the studied beaches. According to beach type, the observed bars could be classified in three different groups (table 1):

- (1) Bars belonging to intermediate-reflective beaches (fig. 4a), especially in the upper foreshore, show a tall and narrow crest with intermediate both seaward and landward slope values (fig. 5a, b), a mean bar index around 50 and their slope ranged from 2–6%. Bars located in the lower foreshore usually show higher index values and 2–4% slopes.
- (2) Bars on dissipative beaches (fig. 4b) usually occurred at the mean or low tide level (according to Komar, 1998, a

Tabla 1. Características morfométricas de las playas y de las barras.
Table 1. Morphometric characteristics of beaches and bars.

Tipo de playa	Pendiente (%) y anchura (m) de la zona intermareal	Mediana del sedimento (mm)	Posición en el estrán	Número de barras medidas	Altura (m)	Anchura (m)	Índice de forma	Pendiente hacia mar (%)	Pendiente hacia tierra (%)
Disipativa	2–3%	0.25	superior	5	0.27	40	133	5.0	1.0
	120		inferior	20	0.28	42	181	3.8	0.94 ¹
Intermedia-reflectiva	5%	0.28	superior	15	0.7	35	48	7.3	1.6
	90		inferior	10	0.4	40	121	4.8	0.9
Plataforma rocosa	5–7%	0.26 ²	superior	5	0.44	19	49	10.2	1.3
	50–70		inferior	7	0.27	31	120	6.0	1.5 ¹

¹ pendiente hacia mar controlada por la existencia de acantilado trasero; ² varía entre 0.20 y 0.33 mm.

¹ seaward slope controlled by the existence of a back cliff; ² varies between 0.20 and 0.33 mm.

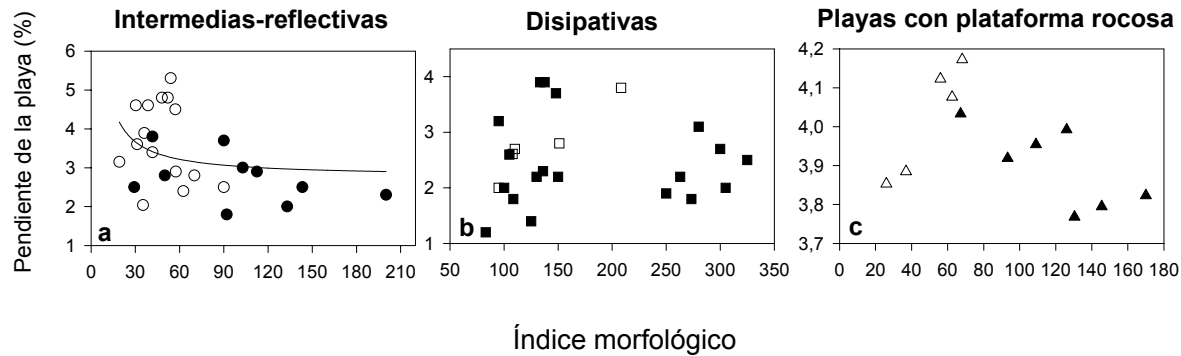


Figura 4. Variación del índice de forma de las barras frente a la pendiente del tramo del perfil de equilibrio en la zona de la barra, para playas intermedias-reflectivas (a), disipativas (b) y con plataforma rocosa (c). Los símbolos llenos representan barras situadas en la parte baja (con respecto al nivel medio) del intermareal mientras que los vacíos se refieren a barras ubicadas en la parte alta del intermareal. En playas intermedias-reflectivas se nota una correlación entre el índice de forma y la pendiente.

Figure 4. Bar index value *versus* beach slope for equilibrium profile sections coinciding with the studied bars. Intermediate-reflective (a), dissipative (b) and shore platform beaches (c). Empty symbols represent bars located in the upper part of the intertidal area; full symbols represent bars in the low intertidal area. A certain correlation is noticeable in the intermediate-reflective beaches.

(2) Las barras asociadas a playas disipativas (fig. 4b) aparecen sobre todo en la parte media-baja del perfil (como indica Komar, 1998, una playa disipativa casi nunca llega a tener berma) y están caracterizadas por crestas amplias y planas, pendientes muy suaves hacia el mar y caras de avalancha poco definidas (fig. 5c, d); muestran valores del índice de forma entre 100 y 300, con pendientes del lado de mar del 2–4%. Estas barras, dispuestas paralelamente a la orilla, son cruzadas ortogonalmente por los canales de desagüe del surco. A veces, las corrientes longitudinales generadas en condiciones de mar de viento controlan la morfología del surco, haciendo que el canal de desagüe cruce la barra oblicuamente (figs. 6 y 7). Este hecho se observó en la playa de La Ballena, tanto durante condiciones de oleaje del Oeste como del Este, cuando el ángulo de aproximación de las olas era alto. Las barras asimétricas, debido a que están erosionadas en la cara de avalancha por corrientes

dissipative beach usually does not present any berm), and showed a smooth and wide crest with a gentle seaward slope and no evident slip face (fig. 5c, d), their bar index values ranged from 100–300, with seaward bar side slopes of 2–4%. These bars, parallel to the shore, were cut by perpendicular runnels. Sometimes, longshore currents, generated during sea wave conditions, affected the shape of the runnel that diagonally cut the bar crest (figs. 6 and 7). This process happened in La Ballena Beach when west and east wind-generated sea waves approached the littoral with a great angle. Other bars presented a low bar index due to erosion in their landward sides by longshore currents during ebbing tides and, consequently, showed an asymmetric outline.

(3) Bars associated to shore platform beaches (fig. 4c), showed characteristics intermediate between the two former groups and bar index values similar to those of intermediate-

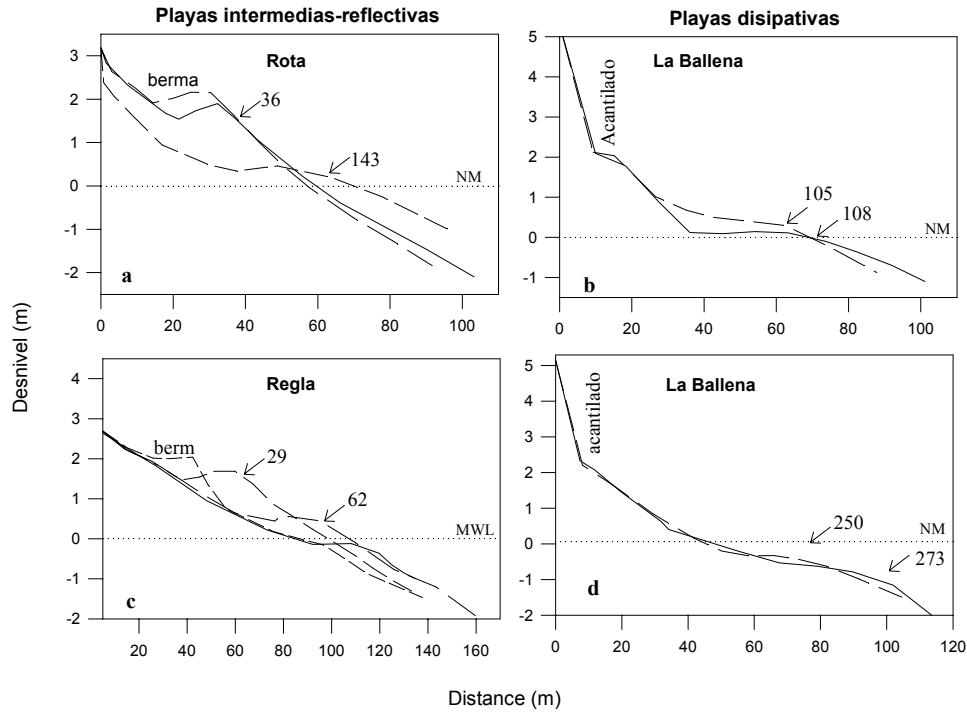


Figura 5. Morfología de barras asociadas a playas intermedias-reflectivas, Rota (a) y Regla (b), y disipativas, La Ballena (c y d). Los números representan el índice de forma.
Figure 5. Several examples of bar morphologies associated to intermediate-reflective, Rota (a) and Regla (b), and



Figura 6. Barra intermareal en la playa de La Ballena. El canal de desagüe del surco la cruza oblicuamente.
Figure 6. Intertidal bar in La Ballena beach. The trough obliquely cut the bar crest.



Figura 7. Detalle del surco y de la cara de avalancha (poco definida) de la barra de la figura 6.
Figure 7. Detail of the trough and the avalanche face (not very evident) of the bar in figure 6.

longitudinales que se desarrollan en el surco durante la bajada de la marea, presentan valores más bajos del índice de forma.

- (3) Las barras asociadas a playas con plataforma rocosa (fig. 4c) presentan características intermedias entre las dos anteriores, con valores del índice de forma parecidos a los de las playas intermedias-reflectivas. Sin embargo, sus valores de pendiente son algo superiores y mucho más constantes. Se observaron muy pocas barras en este tipo de

reflective beaches, although with higher and constant beach slope values. Few bars were observed in these beaches, probably due to parallel retreat and grain transfer processes (Carter, 1991).

Bars

Internal structures consisted essentially on alternating planar laminae of medium (rich in bioclastic fragments) and fine sands, and thin laminae of heavy minerals (fig. 8).

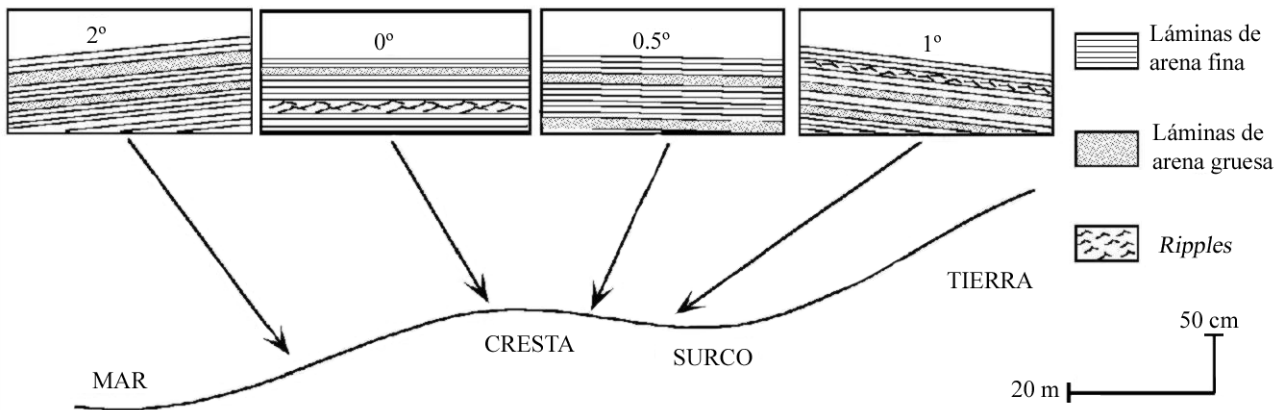


Figura 8. Esquema de las estructuras internas de la barra (resultado de numerosas mediciones de campo).

Figure 8. General sketch reproducing the morphology and internal structures of a bar (data collected from several field assessments).

playa, probablemente debido a que dichas playas presentan un comportamiento de tipo *parallel retreat* y la transferencia de sedimento de la zona sumergida a la berma tiene lugar de “grano a grano” (Carter, 1991).

Barras

Las estructuras internas están compuestas por láminas finas paralelas de arena media (rica en bioclastos) y fina, intercaladas con láminas finas ricas en minerales pesados (fig. 8).

En el lado expuesto al oleaje la laminación buza 2–3% hacia el mar, mientras que en la cara interna buza suavemente (1–2%) hacia tierra. En ambos casos las láminas más superficiales son paralelas a la superficie de la playa. La cresta está compuesta por láminas paralelas y horizontales, pero se observaron también laminas de *foreset*, laminación cruzada debida a *ripples*, laminación cruzada de *ripples* de oscilación y laminación paralela y sigmoidal que constituye el relleno de cubetas de excavación (*scour pools*).

En barras situadas en la parte alta de la playa se apreciaron láminas sigmoidales formadas durante los últimos estadios de migración, cuando la cara de avalancha rellena el surco, análogas a las descritas por Dabrio y Polo (1981).

Bermas

Constituyen una morfología común en playas moderadamente reflectivas: presentan pendientes altas (6%) hacia mar y una pendiente suave (2–3%) hacia tierra. Como puede apreciarse en la figura 9, la cresta y el lado hacia tierra están compuestos por láminas paralelas a la superficie. El lado hacia mar presenta niveles superficiales de 2–3 cm de espesor de láminas paralelas a la superficie, mientras que la estructura interna consiste en *sets* de láminas paralelas que buzcan hacia tierra y que representan la antigua cara de avalancha de la barra, testimoniando su migración. La lámina superficial paralela a la superficie de la playa se debe a procesos de *swash/backwash* durante la última bajada de la marea.

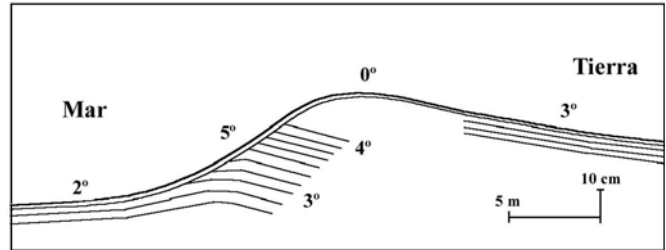


Figura 9. Esquema de las estructuras internas de la berma (resultado de numerosas mediciones de campo).

Figure 9. Internal structure of a berm (data collected from several field assessments).

In the stoss side of the bars the laminae dipped gently seaward (2–3%) while in the slip face they dipped slightly landward (1–2%) being in both cases parallel to the beach surface. The crest was also dominated by horizontal laminae parallel to the beach surface. Sometimes in the crest and in the slip face under the plane lamination, landward dipping ripple cross-lamination was observed, as well as *foreset* laminae, festooned ripple cross-lamination linked to bi-directional fluxes and plane and sigmoid laminae related to the filling of scour pools.

Bars located in the upper intertidal area showed sigmoid laminae in the slip face representing the filling up of the runnel during the latest stages of bar migration (Dabrio and Polo, 1981).

Berms

They were quite common in intermediate-reflective beaches and showed a steep seaward slope (6%) and a smooth landward side (2–3%). Trenches dug in the berm (fig. 9) showed how the crest and the landward slope were composed by plane bedding parallel to the beach surface. The seaward side was composed by parallel laminae 2–3-cm thick, dipping landward, representing relict structures of the slip face of the bar during the transformation of the bar into a berm.

Tabla 2. Características del clima marítimo y estado morfodinámico de las playas durante las campañas de seguimiento de barras.**Table 2.** Wave climate and morphodynamics of the beaches during the bar monitoring.

Playa	H_b (cm)	T (seg)	Pendiente (%)/ tamaño de grano (mm) hacia mar de la barra	Parámetro de escala de rompiente ¹	Índice de similitud de <i>surf</i> ²
La Ballena ³	35	4.5	3.7%/0.22	38.67–25.34 ⁵	0.28–0.38 ⁵
Tres Piedras ⁴	40	4	5%/0.33	66.25–4.41 ⁵	0.23–0.84 ⁵

¹ Guza e Inman (1975); ² Battjes (1974); ³ 03/07/97, marea baja (low tide) a las 8:05h; ⁴ 11/30/97, marea baja (low tide) a las 8:39h; ⁵ determinado en la parte hacia mar de las barras (estimated on the seaward side of the bars).

Morfodinámica y migración de barras

Durante un ciclo mareal

En general, la migración de las barras tiene lugar por procesos de *surf* y *swash*, los cuales están controlados por el oleaje, la pendiente de la playa y los cambios en el régimen morfodinámico conforme sube la marea. Con el objeto de caracterizar el tipo de procesos dominantes durante la migración de barras y sus cambios micromorfológicos durante un ciclo mareal, se realizaron dos campañas de seguimiento de un día de duración, la primera en una barra ubicada en la parte baja de la playa de La Ballena, y la segunda en una barra localizada en la parte alta de la playa de Tres Piedras (fig. 10a).

Inicialmente se caracterizó de manera general el estado morfodinámico de las playas durante el seguimiento. Para ello se utilizaron dos índices: el *Surf Scaling* (Guza e Inman, 1975) y el *Surf Similarity* (Battjes, 1974). Se consideró un solo valor medio de altura y periodo del oleaje representativo para cada campaña, y se tuvieron en cuenta varios valores de pendiente para las diferentes partes de los perfiles estudiados. De esta forma los valores de los dos índices empleados variaron a lo largo de las experiencias.

Como se puede apreciar en la tabla 2, las condiciones de clima marítimo fueron parecidas durante las dos pruebas, siendo la rompiente en ambos casos de tipo voluta/derrame en el lado hacia mar de las barras. Las dos playas estudiadas son disipativas (3% en el caso de La Ballena y 2% en Tres Piedras) y constituidas por arena fina moderadamente bien clasificada.

Los procesos y transformaciones morfológicas observadas durante las dos campañas de seguimiento fueron las siguientes:

- Figura 10b, e. Las olas rompen en el lado hacia el mar de la barra que constituye la *beach face*. Debido a su pendiente relativamente alta (sobre todo en Tres Piedras), el parámetro *Surf Scaling* presenta valores típicos de playas intermedias y disipativas (tabla 2). Las olas rompen en voluta/derrame, afectando intensamente a la playa y provocando una fuerte removilización, sobretodo en la línea de rompiente (de acuerdo con Miller, 1976). Aquí los vórtices generados por la rotura en voluta suspenden el sedimento, que es llevado hacia la parte alta de la cara de la playa por el

The superficial laminae were deposited by swash-backwash processes during the ebbing tide.

Bar morphodynamics and migration

During a tidal cycle

Bar migration is affected by surf and swash processes controlled by wave regime, beach slope and changes in the morphodynamic regime as the waves move from the shoaling point to the top of the beach during the flooding tide. The morphodynamics of two different bars (fig. 10a) in the lower (at La Ballena Beach) and the upper parts (at Tres Piedras Beach) of the foreshore were monitored during a single tidal cycle.

A simple classification of the morphodynamic state of the beach was made by the calculation of the Surf Scaling Parameter (Guza and Inman, 1975) and the Surf Similarity Index (Battjes, 1974). A single mean representative value of wave height and period was used while different values of beach slope were considered according to the morphological variations of the beach. As a result, different values of the Surf Scaling and Similarity parameters were obtained for the different parts of a beach.

According to table 2, the wave climate was quite similar during the two field assessments, and it was characterized by plunging/spilling breakers in the stoss bar side. Both beaches were dissipative, with low beach gradients (3% for La Ballena; 2% for Tres Piedras), and characterized by moderately well sorted fine sands.

Morphodynamic processes observed during the field assessments were as follows:

- Figure 10b, e. Waves break on the seaward side of the bar which, at this initial stage, represents the beach face. Due to its slope the beach shows surf scaling values characteristic of intermediate-dissipative beaches, especially at Tres Piedras. Waves break as plunging-spilling, greatly affecting the bottom and creating erosion in the breaker line (Miller, 1976) where plunging breakers scour and suspend beach sediments and bring them ashore by swash processes (upper flow regime). Backwash is usually weak due to infiltration, so that no erosion or even net deposition occurs in the upper seaward side.

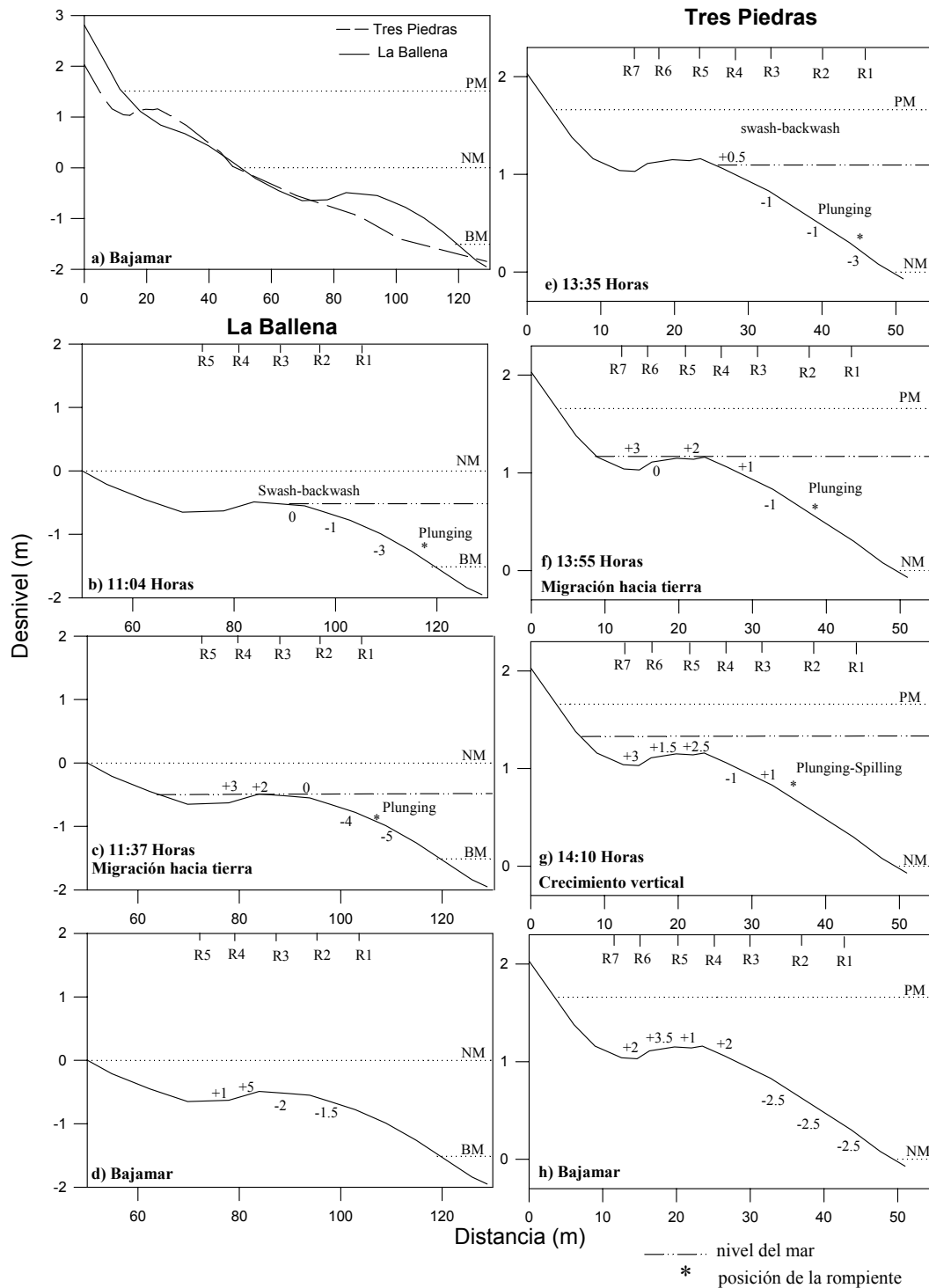


Figura 10. Migración de la barra en La Ballena (**b, c y d**) y Tres Piedras (**e, f, g y h**): los números indican los valores de acreción o erosión, en centímetros, registrados durante la subida de la marea y referidos a los perfiles iniciales medidos durante la bajamar de la mañana (**a**). NP: pleamar; NM: nivel medio; NB: bajamar.

Figure 10. Bar morphodynamics observed during the field assessments carried out in La Ballena (**b, c and d**) and Tres Piedras (**e, f, g and h**) beaches. Initial beach profiles were surveyed at the morning low tide (**a**). Topographic changes (in cm) were measured during flooding tide and referred to the initial low tide morphology. NP: high water level; NM: mean sea level and NB: low water level.

swash, bajo condiciones de alta energía. El *backwash* es en general débil debido a la percolación de agua, lo que hace que se produzca sedimentación, o que al menos no exista un transporte significativo hacia el mar.

- (ii) Figura 10c, f. Las olas siguen rompiendo en voluta, pero el flujo cruza la cresta recién sumergida. Debido a su forma suave, la cresta no representa un umbral morfológico importante y la transición entre la primera y esta segunda etapa de migración es rápida. Los sedimentos siguen siendo removilizados por las rompientes en voluta y llevados hacia tierra por el *swash*, que se disipa en el surco depositando arena en la cara de avalancha de la barra, dando lugar a un crecimiento hacia tierra.
- (iii) Figura 10g. Cuando la cresta y el surco están totalmente sumergidos, las olas secundarias que se forman después de la ruptura primaria que tiene lugar en la cara hacia mar de la barra, se propagan en la cresta y en el surco, y se reflejan en la *beach face*, que tiene mayor pendiente. Las olas reflejadas interaccionan con las incidentes, produciéndose una disminución de la velocidad de las partículas del flujo, lo que lleva a una deposición y acumulación del sedimento transportado en la cresta de la barra. Es importante destacar cómo este proceso se ha observado sólo en la playa de Tres Piedras, donde la parte alta de la playa presenta mayor pendiente que en La Ballena. El surco es más profundo y estrecho (fig. 10a). En este etapa la barra se comporta como una *longshore bar* situada en aguas muy someras (tipo III de Greenwood y Davidson-Arnott, 1979).
- (iv) Con la subida de la marea la cresta, totalmente cubierta por el agua, actúa como un rompeolas. La morfodinámica de la playa es ahora diferente, típicamente disipativa, con olas que rompen en derrame en la cresta de la barra, amplia y tendida. El transporte de sedimento tiene lugar en el fondo o muy cerca de éste y es controlado por las corrientes oscilatorias debidas al paso de las olas, causando un transporte neto hacia tierra. Posteriormente, cuando aumenta la columna de agua sobre la cresta, la altura de la ola decrece y el transporte de sedimento disminuye o incluso cesa. En el surco, las olas secundarias alcanzan mayor altura y generan importantes corrientes longitudinales. Como resultado de todos estos procesos, se han observado en La Ballena, durante la subida y la bajada de la marea, *megaripples* que migran en el surco en el sentido de las corrientes litorales y que presentan una longitud de 36 cm y una altura de unos 6 cm, con una velocidad de migración de 0.5 cm/s.
- (v) Como resultado del ciclo mareal, en La Ballena (fig. 10d), la barra presenta una pequeña migración hacia tierra sin que se produzcan cambios en la cresta ni en la cara de avalancha. La barra es ahora más ancha, aunque no más alta. En Tres Piedras (fig. 10h) la barra presenta un claro desplazamiento hacia tierra: erosión uniforme de la cara hacia el mar, crecimiento vertical en la cresta y progradación hacia tierra de la cara de avalancha, pasos que progresivamente van transformando la barra en berma.
- (ii) Figure 10c, f. Waves still break as plunging but swash crosses the recently submerged ridge. Due to the smooth bar morphology, there is not a great morphological threshold, and the transition from stage i to ii was rapid. Plunging breakers still suspend the bottom sand which is then moved across the gently sloping surfaces and settles on the prograding slip face. During this stage, the backwash is “loosen” in the runnel, giving rise to a net landward migration.
- (iii) Figure 10g. When the ridge and the runnel are totally submerged, the main breaking line is located on the stoss bar side. Secondary waves propagate landward and reflect on the upper part of the beach, which shows a great slope. During their seaward movement, the reflected waves interfere with the incoming ones, resulting in a net deposition of sediments at the top of the ridge. This process has only been observed at Tres Piedras, where the runnel is deeper and narrower than at La Ballena, confined by the upper steeper part of the beach. At the end of this stage the bar works as an inner bar in very shallow water (Type III, Greenwood and Davidson-Arnott, 1979).
- (iv) With the rising tide the ridge is totally submerged and operates as a breakwater. Beach morphodynamics now is typically dissipative, dominated by spilling breakers across the upper crest area due to its smooth slope. Sediment transport is therefore likely to be controlled by oscillatory currents and take place at/or near the bed, with a landward net sediment transport. When the water depth over the crest increases, no significant sediment transport occurs. In the trough, bores reach greater heights and generate longshore currents. As a direct result, during the field assessment at La Ballena, megaripples (36-cm long and 6-cm high) are observed migrating along the shore (velocity = 0.5 cm/s) during rising and falling tide.
- (v) As a result of the tide cycle at La Ballena (fig. 10d), the bar shows a small net landward migration with no vertical growth at the crest and no changes in the seaward side. The final shape is wider but not higher than the previous one. At Tres Piedras (fig. 10h), bar migration results in erosion at the stoss side, landward migration and vertical growth, steps turning the bar into a berm.

During a month

During March-April 1997, a beach monitoring program was carried out in Tres Piedras, La Ballena and Aguadulce. In each one of the beaches studied, three profiles with a weekly periodicity were carried out. Bars of different sizes and their locations were observed. Their migration took place under very diverse wave conditions. Velocity migration ranged a lot, from 2 to 10 m/day. Sometimes a certain variation of the bar height was recorded although not accompanied by any change in the bar position.

Durante un mes

Durante el periodo abril-mayo de 1997 se procedió al seguimiento de la migración de barras en las playas de Tres Piedras, La Ballena y Aguadulce. Se realizaron tres perfiles en cada una de estas playas, con una periodicidad casi semanal. Se catalogaron barras de diferentes tamaños ubicadas en diversas partes del intermareal, las cuales migraron bajo condiciones del clima marítimo muy variables.

La velocidad de migración varió sensiblemente, de 2 a 10 m/día. Sin embargo, en ciertos casos las observaciones no revelaron cambios en la posición de las barras, aunque si se registró un cierto crecimiento en la altura de las mismas.

Distribución temporal de barras y bermas

Las barras asociadas a playas intermedias-reflectivas aparecieron con mayor frecuencia al cabo de 1–2 meses tras los temporales más importantes ($H_s > 2$ m). Hay también que destacar cómo las barras de mayor anchura e índice de forma más alto (morfológicamente parecidas a la de índice 143 de la figura 5a) aparecieron tras los picos de oleaje con $H_s > 1.5$ m. En marzo de 1996 se observaron dos barras picos de oleaje con $H_s > 2.5$ m. En cualquier caso, en muy pocas ocasiones se produjo la coexistencia de una berma y una barra.

Las barras asociadas a playas disipativas presentaron una distribución más homogénea durante el periodo de estudio, sin llegar a tener concentraciones tan puntuales como las de las playas intermedias-reflectivas. Esto podría ser debido al hecho de que las playas disipativas están en general menos afectadas por los temporales debido a su baja pendiente que favorece la dispersión de la energía incidente y a que su recuperación tiene lugar de forma lenta y constante, como se ha observado en playas cercanas por Benavente *et al.* (2000).

En cuanto a las bermas, el análisis de los perfiles topográficos revela que estas formas se asocian únicamente a playas intermedias-reflectivas, y aparecen sobre todo en condiciones de buen tiempo, en los meses de febrero y marzo y en verano, constituyendo una forma estable.

Discusión

En primer lugar, conviene destacar las similitudes y diferencias entre las barras estudiadas y las barras descritas por otros autores, considerando las características de las playas, el rango mareal y el clima marítimo.

Así, las barras descritas por King y Williams (1949), aunque pertenecientes al tipo I, presentaban una morfología muy parecida a la observada en playas disipativas: no tenían una cara de sotavento evidente y el lado hacia mar presentaba valores de 2° de pendiente (parecidos a los estudiados aquí), mientras que la pendiente de las barras ubicadas en la parte baja del intermareal era también baja. Carter (1991) y Navas *et al.* (2000) describieron barras parecidas a las de los autores anteriores: barras de baja altura (menos de 0.5 m), paralelas o subparalelas a la orilla que aparecían en una playa disipativa

Temporal distribution of bars

Bars associated to intermediate-reflective beaches usually appeared 1–2 months after the winter storms (significant wave height, $H_s > 2$ m). Bars with high bar index values (similar to fig. 5a, with a bar index of 143) appeared exclusively after storm waves with $H_s > 1.5$ m. Only in March 1996, after storms characterized by $H_s > 2.5$ m, two bars were observed. In very few cases a bar and a berm coexisted.

A relatively wide distribution of bars associated to dissipative beaches was observed. This was probably related to the fact that dissipative beaches are not very affected by winter storms because of their gentle slope, and their restoration takes place in a slow and constant way, as observed in nearby beaches by Benavente *et al.* (2000).

Berms were associated mainly to intermediate-reflective beaches and characterized by fair weather conditions, especially in February-March and the summer months, when they constitute a stable morphology.

Discussion

In order to understand the bar morphodynamic behaviour, it is important to compare the bars studied with other ones described by some authors considering beach and wave characteristics and tidal range.

Despite the different bar morphodynamics, the studied bars showed similar morphologies to the ridge and runnel systems described by King and Williams (1949) in dissipative beaches: they did not present an evident slip face, their seaward slope values were about 2° (similar to those herein studied) and the slope was lower in the upper intertidal bars. Carter (1991) and Navas *et al.* (2000) also described similar, wide and low amplitude (< 0.5 m) bars, parallel or subparallel to shoreline. Despite the tidal range and bar morphodynamics, which was “largely unknown”, the bar morphology was quite comparable to the ones in Cadiz and probably related to the smooth slope of beaches studied. Therefore, the studied bars are of the swash type, but show a shape very similar to the ridge and runnel system. McCave and Geiser (1978) also described, in tidal environments, non-migratory bar shapes quite similar to those presented in this study.

Davis *et al.* (1972) stressed how, except for their size, bars associated to tidal (northern Massachusetts) and non-tidal (Lake Michigan) environments were quite similar in morphology and geometry: they were characterized by an initial stage in which they were quite symmetric; during their migration ashore, when the bars crossed the small intertidal area, they achieved an asymmetric shape with a gently basinward slope (5°) and a steeper landward slope (30°). Owens and Frobel (1977) described two types of ridges migrating in a gently, microtidal (0.7 m) beach in Quebec. The smaller ones presented a low ridge (25 cm) and no evident slip face.

The main difference among the littorals described by the former authors and those studied herein is the tidal range,

con rango mesomareal, aunque se desconoce su morfodinámica. El hecho de que las barras estudiadas tengan morfologías muy parecidas (aún teniendo diferente origen) a las descritas por King y Williams (1949), Carter (1991) y Navas *et al.* (2000), se debe probablemente a la pendiente suave de la playa. Las barras estudiadas son de tipo *swash bars*, aunque adquieren una morfología típica del *ridge and runnel*. También Mc Cave y Geiser (1978) describieron barras que no migraban, parecidas a las estudiadas.

Davis *et al.* (1972) destacaron que las barras asociadas a ambientes mareales (Norte de Massachusetts) y no mareales (Lago Michigan), son parecidas en cuanto a morfología y geometría, difiriendo sólo en tamaño. Según estos autores, las barras presentan inicialmente formas simétricas y luego, durante su migración a lo largo del intermareal, adquieren una forma asimétrica con una suave pendiente (5°) hacia la cuenca o el mar y una pendiente más alta (30°) hacia tierra. Owens y Frobel (1977) describieron dos tipos de barras con diferentes tasas de migración en playas micromareales (rango mareal de 0.7 m) de baja pendiente en Quebec. Las más pequeñas tenían una altura de 25 cm, migraban muy rápidamente y no presentaban una cara de avalancha evidente.

Si los comparamos con el litoral estudiado, los casos descritos por todos estos autores difieren sólo en el rango mareal, siendo la pendiente de la playa y el clima marítimo bastante parecidos, por lo que los factores determinantes que deben de influir sobre la variabilidad morfológica de las barras podrían ser la pendiente de la playa y la granulometría las cuales, a su vez, suelen estar relacionadas de manera directa.

Dabrio (1982) describió la morfología de barras intermareales en el litoral de Huelva: presentaban una evidente cara de sotavento constituida por laminas de *foreset* de alta pendiente. El rango mareal de los litorales de Huelva y Cádiz es prácticamente el mismo, siendo una vez más la granulometría y la pendiente de las playas, las únicas diferencias destacables entre éstos.

En lo referente a las estructuras sedimentarias observadas, aunque éstas coincidan en general con las descritas por otros autores, hay que señalar que la laminación paralela constituye todo el espesor de la barra y no sólo los primeros centímetros, como observaron Davis *et al.* (1972) y Davidson-Arnott y Greenwood (1974). Sólomente en dos ocasiones se han identificado laminas de *foreset* en la cresta y en el lado de sotavento, siendo estas estructuras relictas, que buzaban 2–4° hacia tierra en Tres Piedras y 8–12° en La Ballena. No obstante, estas laminas de *foreset* son mucho más tendidas que las señaladas por otros autores: Davis *et al.* (1972) describieron láminas que buzaban 30°; Hine (1979, fig. 10, pág. 342) mostraba unos centímetros de láminas paralelas a la superficie en el lado hacia tierra de la cresta (que buzaba 3°) y a la superficie de la cara de avalancha (que buzaba 13°), así como dos diferentes ángulos de laminación interna: el más común (21–24°) constituido por laminas de *foreset* y el otro (10–14°) por superficies de reactivación, formadas durante la bajamar por olas pequeñas que se generaban en el surco y que erosionaban y sobrepasaban la cara de avalancha. Dabrio y Polo (1981) y Dabrio (1982) también

being their wave and beach characteristics very similar. So, beach slope and grain size, that are strictly related, seem to acquire a great importance in the bar morphology determination. Dabrio (1982) described the bar morphology in the littoral of Huelva (Cadiz Gulf): an evident slip face with internal structures consisting of steep foreset laminae was observed. Tidal range in Cadiz and Huelva is the same, and their main differences are grain size and beach slope.

The internal structures observed broadly coincided with those described by other authors, although several differences can be stressed: the horizontal plane bedding constituted the whole bar thickness and not only the upper part, as observed by Davis *et al.* (1972) and Davidson-Arnott and Greenwood (1974). Relict foreset laminae were observed only in two occasions, under the crest or the slip face, both of them characterized by gently dipping (2–4° at Tres Piedras and 8–12° at La Ballena). However, the observed foreset laminae are smoother than those described by other authors: Davis *et al.* (1972) recorded values of 30°; Hine (1979, fig. 10, pag. 342) observed a few-centimeters thin set of plane laminae parallel to the crest (3°) and slip face surfaces (13°), and two distinct dip angles of internal lamination. The most common one (21–24°) was related to the slip face migration, while the other one (10–14°) was formed by small waves in the runnel that eroded the slip face during the ebb tide. Dabrio and Polo (1981) and Dabrio (1982) described bars with patent foreset laminae and reactivation surfaces.

In the studied beaches, during the first stages of bar migration, wave processes altered the bar form, widening the ridge and increasing the crest symmetry: an “equilibrium” between the bar slip face morphology and the beach slope was then established. For this reason no evident reactivation surfaces are generated. The result was the sedimentation of low steep “foreset” laminae in accordance with the beach surface, or forming small angles with it (0.5–1°), as it was observed during field assessments. The angular unconformity was greater when the bar was located in the upper foreshore, while in the low part it was not noticeable. In this sense, Davidson-Arnott and Greenwood (1976) stated that plane beds in the slip face are generated by avalanche accumulation if the slope is relatively steep.

Moreover, as observed in Tres Piedras, reflected waves interacted with incident ones, giving rise to sedimentation in the bar crest. This process occurs only when reflected waves are formed, i.e. when the bar is located in the upper foreshore where the beach face, landwards the bar, presents a relatively big slope.

Bar morphodynamics changed a lot during a tidal cycle, according to changes in the sea level and to the interactions between the wave and beach characteristics that determined the breaking wave type.

The migration rate during the monthly monitoring program ranged widely depending on the wave characteristics, the bar position and the tidal range. Therefore, it is not possible to

describieron barras con claras láminas de *foreset* y superficies de reactivación.

En lo que respecta a las playas estudiadas, se puede resumir lo siguiente: durante las primeras etapas de su migración, la cresta es suavizada por los procesos de oleaje, estableciéndose un equilibrio entre morfología de la barra, pendiente de la cara de avalancha y morfología de la playa. Esto hace que no se generen superficies de reactivación nítidas. Las láminas de *foreset* se depositan paralelamente a la superficie o formando ángulos muy pequeños ($0.5-1^\circ$) con ésta. En este caso, cuando la barra está ubicada en la parte alta de la playa, se produce una discordancia más evidente, que por otro lado no es diferenciable en las barras del intermareal medio y bajo. Davidson-Arnott y Greenwood (1976) afirman que las laminas de *foreset* se forman sólo si la cara de avalancha tiene pendiente suficientemente elevada.

Además, tal y como se observó en Tres Piedras, el choque entre las olas incidentes y las olas reflejadas lleva a una sedimentación y a un crecimiento en altura de la cresta. En playas disipativas, este proceso tiene lugar solamente cuando la barra ocupa la parte alta del intermareal, por la mayor pendiente de esta zona.

Por otro lado, tal y como se observó durante las pruebas de campo, la morfodinámica de la barra varía dependiendo de las condiciones de clima marítimo y de la interacción entre el oleaje y la morfología existente, todo condicionado por las variaciones del nivel del mar.

La tasa de migración observada durante un mes de seguimiento varió mucho dependiendo de las características del oleaje, del rango mareal y del tamaño y posición de la barra en el intermareal. Por esta razón no se propone una tasa de migración media, para cuya determinación se necesitaría un estudio continuo de las características del oleaje y de las corrientes litorales.

Conclusiones

El seguimiento morfológico de este tramo litoral de Cádiz ha permitido definir la morfología y la morfometría de playas y barras intermareales. Mediante la aplicación del índice de forma (longitud/altura de la barra) se han evidenciado las diferencias entre barras asociadas a playas disipativas, que tienen índice de forma alto, barras asociadas a playas intermedias-reflectivas, que tienen índice de forma bajo, y barras asociadas a playas con plataforma rocosa, que tienen barras con índices intermedios.

Se ha hecho el estudio de la morfodinámica y las estructuras internas de las barras asociadas a playas disipativas. Las estructuras internas están constituidas por láminas paralelas a la superficie, sin que se observen superficies de reactivación o láminas de *foreset* nítidas, contrariamente a lo observado por otros autores. Sólo cuando la barra se encuentra en los estadios finales de su migración genera láminas de *foreset*, que en cualquier caso presentan una discordancia angular muy suave con respecto a la superficie, así como un bajo ángulo de

propone a mean migration velocity that could be determined through a more accurate wave climate monitoring program.

Conclusions

A beach topographic monitoring program was carried out in Cadiz in order to characterize beach morphology, bar morphodynamics and internal structures. The use of a bar index (bar length/bar height) allowed to distinguish among bars associated to intermediate-reflective, dissipative and rocky shore-platform beaches. The index showed high values in the dissipative beaches, low values in the intermediate-reflective and intermediate values in rocky shore platform ones.

A detailed study of bar morphodynamics was carried out in dissipative beaches. Internal structures consisted of laminae parallel to the beach surface, without foreset laminae or evident reactivation surfaces, in contrast with the data obtained by other authors. Evident foreset laminae were only generated during the last stages of the bar migration. The crest represented a very small morphological threshold, and foreset laminae showed low dipping values and a smooth angular discordance with the beach surface.

Acknowledgments

The authors thank Gonzalo Málvarez (University of Ulster, Northern Ireland) and another anonymous reviewer for their useful comments and suggestions. This work is a contribution to the Spanish CICYT Project nº PB98-0581, and the RNM-161 and RNM-803 Regional PAI Research groups.

English translation by the authors.

buzamiento debido a que la cresta es muy plana y no genera un umbral morfológico importante.

Agradecimientos

Se agradecen a Gonzalo Málvarez (Universidad del Ulster) y a otro revisor anónimo las sugerencias propuestas. Este trabajo es una aportación al Proyecto de la CICYT nº PB98-0581 y a los Grupos de Investigación RNM-161 y RNM-803 del Plan Andaluz de Investigación.

Referencias

- Anfuso, G., Gracia, F.J., Andrés, J., Sánchez, F., Del Río, L. and López-Aguayo, F. (2000). Depth of disturbance in mesotidal beaches during a single tidal cycle. *J. Coastal Res.*, 16(2): 446-457.
- Anfuso, G. (2002). Morfología y dinámica sedimentaria del litoral gaditano entre Chipiona y Rota. Tesis Doctoral. Serv. Publ. Univ. de Cádiz. ISBN: 84-7786-730-5.

- Battjes, J.A. (1974): Surf Similarity. Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng. ASCE, 466–480.
- Beach, R. and Stenberg, R. (1996): Suspended sediment transport in the surf zone: response to breaking waves. *Cont. Shelf Res.*, 15: 1989–2003.
- Benavente, J., Gracia, F.J. and López-Aguayo, F. (2000): Empirical model of morphodynamic beachface behaviour for low-energy mesotidal environments. *Mar. Geol.*, 167: 375–390.
- Carobene, L. and Brambati, A. (1975): Metodo per l'analisi morfologica quantitativa delle spiagge. *Boll. Soc. Geologica It.*, 94: 479–493.
- Carter, R.W.G. (1991): *Coastal Environments*. Academic Press, 617 pp.
- Chandramohan, P., Nayak, B. and Anand, N. (1994): Crest-breaking time-lapse approach for measuring breaking angle. *J. Waterway, Port, Coast. Ocean Eng.*, 120: 318–324.
- Ciavola, P., Ferreira, O., Taborda, R. and Dias, J.A. (1995): Field assessment of longshore transport at Culatra Island (Portugal) using sand tracers. *Memórias Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade do Porto*, 4: 405–909.
- Dabrio, C. (1982): Sedimentary structures generated on the foreshore by migrating ridge and runnel systems on microtidal and mesotidal coasts of S. Spain. *Sedim. Geol.*, 32: 141–151.
- Dabrio, C. and Polo, M.D. (1981): Flow regime and bedforms in a ridge and runnel system, SE Spain. *Sedim. Geol.*, 28: 97–110.
- Davidson-Arnott, R.G.D. and Greenwood, B. (1974): Bedforms and structures associated with bar topography in the shallow-water wave environment, Kouchibouguac bay, New Brunswick, Canada. *J. Sedim. Petrol.*, 44 (3): 698–704.
- Davidson-Arnott, R.G.D. and Greenwood, B. (1976): Facies relationships on a barred coast, Kouchibouguac bay, New Brunswick, Canada. In: Davis, R.A.Jr. and R.L. Ethington (eds.), *Beach and Nearshore Sedimentation*. Society of Econ. Paleont. and Mineral., Special Publ., 24: 149–168.
- Davis, R.A.Jr. and Fox, W.T. (1972): Coastal processes and nearshore sand bars. *J. Sedim. Petrol.*, 42(2): 403–412.
- Davis, R.A.Jr. and Fox, W.T. (1975): Process-response patterns in beach and nearshore sedimentation: I. Mustang Island, Texas. *J. Sedim. Petrol.*, 45: 852–865.
- Davis, R.A. Jr., Fox, W.T., Hayes, M.O. and Boothroyd, J.C. (1972): Comparison of ridge and runnel systems in tidal and non tidal environments. *J. Sedim. Petrol.*, 42(2): 413–421.
- Dean, R.D. (1977): Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and the Gulf Coasts. *Ocean Eng. Rep.*, 12 Dep. Civ. Eng., Univ. Delaware, Newark Ed.
- Folk, R.L. and Ward, W.C. (1957): Brazos River Bar. A study in the significance of grain size parameters. *J. Sedim. Petrol.*, 27: 3–26.
- Greenwood, B. and Davidson-Arnott, R.G.D. (1979): Sedimentation and equilibrium in wave-formed bars: a review and case study. *Canad. Jour. Earth Sci.* 16: 312–332.
- Greenwood, B. and Hale, P.B. (1980): Depth of activity, sediment flux and morphological change in a barred beach environment. In: S.B. McCann (ed.), *The Coastline of Canada*. *Geol. Surv. Can.*, 80 (10): 89–109.
- Guza, R.T. and Inman, D.L. (1975): Edge waves and beach cusps. *Jour. Geoph. Reserch.* 80(21): 2997–3012.
- Hayes, M.O. (1972): Forms of sediment accumulation in the beach zone. In: R.E. Mayer (ed.), *Waves on Beaches*. Academic Press, New York. 297–356 pp.
- Hine, A.C. (1979): Mechanisms of berm development and resulting beach growth along a barrier spit complex. *Sedimentology*, 26: 333–351.
- Horikawa, K. (1988): *Nearshore Dynamics and Coastal Processes*. University of Tokyo. 552 pp. Tokyo.
- Hunter, R.E., Clifton, H.E. and Phillips R.L. (1979): Depositional processes, sedimentary structures, and predicted vertical sequences in barred nearshore systems, southern Oregon coast. *J. Sedim. Petrol.*, 49 (3): 711–726.
- King, C.A.M. (1951): Depth of disturbance of sand on sea beaches by waves. *J. Sedim. Petrol.*, 21(3): 131–140.
- King, C.A.M. and Williams, W.W. (1949): The formation and movement of sand bars by wave action. *Geogr. Jour.* 113: 70–85.
- Komar, P.D. (1998): *Beach Processes and Sedimentation*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 544 pp.
- Larson, M. and Kraus, N. (1994): Temporal and spatial scale of beach profile change, Duck, North Carolina. *Marine Geology*, 117: 75–94.
- Mc Cave, P.J. and Jones, C.M. (1978): Formation of reactivation surfaces within superimposed deltas and bedforms. *J. Sedim. Petrol.*, 47(2): 707–715.
- Miller, R.L. (1976): Role of vortices in surf zone prediction: sedimentation and wave forces. In: *Beach and Nearshore Sedimentation*. SEPM Spec. Publ., 24: 92–114.
- Muñoz, J.J. y Enríquez, J. (1998): Dinámica litoral de una unidad fisiográfica completa: Sanlúcar-Rota. *Revista de Obras Públicas*, 3375: 35–44.
- Muñoz, J.J., Tejedor, L. and Medina, R. (1999). Equilibrium beach profile model for ref.-protected beaches. *J. Coast. Res.*, vol. 15, 4: 950–957.
- Navas, F., Cooper, A.G., Malvarez, G. and Jackson, D. (2000): Theoretical approach to the investigation of ridge and runnel topography of a macrotidal beach: Dundrum Bay, Northern Ireland. *J. Coastal Res. ICS Proceedings*, 183–193.
- Nordstrom, K.F. and Jackson, N.L. (1992): Two-dimensional change on sandy beaches in meso-tidal estuaries. *Zeit. für Geomorph.*, 36(4): 465–478.
- Orfort, J.D. and Wright, P. (1978): What's in a name?: genetic or morphological origins for ridge and runnel topography. *Mar. Geol.*, 28: M1–M8.
- Otvos, E.G. (1965): Sedimentation-erosion cycles of single tidal periods on Long Island Sound beaches. *J. Sedim. Petrol.*, 35(3): 604–609.
- Owens E.H. and Frobel, D.H. (1977): Ridge and runnel systems in the Magdalen Island, Quebec. *J. Sedim. Petrol.*, 47(1): 191–198.
- Roldán, F.J., Divar, J., Borrero, J.D. Zazo, C. y Goy, J.L. (1988). Memoria y mapa geológico de la Hoja nº 1.047 (Sanlúcar de Barrameda). Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000 (Serie MAGNA). IGME, Madrid, 35 pp.
- Sunamura, T. (1989). Sandy beach geomorphology elucidated by laboratory modelling. In: V.C. Lakhan and A.S. Trenhaile (eds.), *Applications in Coastal Modeling*. pp. 159–213.
- Sunamura, T. and Takeda, I. (1984): Landward migration of inner bars. *Mar. Geol.*, 60: 63–78.
- Takeda, I. and Sunamura, T. (1992). Conditions for beach erosion on a barred beach. *Zeit. Geomorph.* 36(4): 453–464.
- Williams, A.T. (1971). An analysis of some factors involved in the depth of disturbance of beach sand by waves. *Mar. Geol.*, 11: 145–158.
- Wright, L.D. and Short, A.D. (1984): Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Mar. Geol.*, 56: 93–118.