



## CARACTERIZACIÓN DE CELDAS LITORALES EN UN TRAMO COSTERO APARENTEMENTE HOMOGÉNEO DEL LITORAL DE CÁDIZ (SO DE ESPAÑA)

*Characterization of littoral cells in an apparently homogeneous coastal sector near Cadiz (SW Spain)*

Anfuso, G.

*Dpto. de Geografía, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales. Polígono Río San Pedro s/n. 11510 Puerto Real (Cádiz, España). Tel.: 34 956016447; Fax: 956016040*

*E-mail: giorgio.anfuso@uca.es*

**Resumen:** Se realizó un estudio de la distribución de celdas litorales en un tramo aparentemente homogéneo del litoral de Cádiz, mediante el seguimiento topográfico de varios perfiles de playa a lo largo de dos años. La interacción entre el oleaje incidente y las estructuras naturales o antrópicas da lugar a celdas, unidades básicas en las que se puede dividir el litoral. Los sedimentos se desplazan dentro de cada celda y/o pasan de una celda a otra, en función de la dirección de aproximación del oleaje. De esta manera, la determinación de las celdas es básica para la comprensión del transporte litoral y la predicción de la evolución de la línea de costa a escala temporal media-larga. En el litoral estudiado, se identificaron seis celdas principales limitadas por las plataformas rocosas presentes en la zona sumergida y en la parte intermedia y baja del intermareal, y por dos espigones en los extremos de la zona de estudio. Todas estas estructuras constituyen límites fijos de tránsito de sedimentos, existiendo también límites libres de difícil determinación en cuanto su posición varía en función de las características del oleaje.

**Palabras clave:** playa, celda, transporte litoral, Cádiz.

**Abstract:** Littoral cells distribution was reconstructed in an apparently homogeneous coastal sector in Cádiz, through a two-year beach topographic monitoring program. Interaction between wave fronts and natural or human structures determines coastal division into littoral cells, "basic" units in which littoral can be divided. Sediments migrate inside a cell or pass from one cell to another, according to wave approaching angle. In this way, the knowledge of cell distribution is fundamental to the understanding of littoral transport and the prediction of beach behaviour at medium-large temporal scale. Six main littoral cells were found out in the study coast. These cells are limited by rocky-shore platforms, well developed in the nearshore and in the low and middle foreshore, and by two groins located in the extremities of the study area. These limits are "fixed", while other limits are "free" because they change their position according to wave characteristics and, for this reason, it is difficult to individuate them.

**Key words:** beach, cell, longshore transport, Cadiz.



G. Anfuso (2004) Caracterización de celdas litorales en un tramo costero aparentemente homogéneo del litoral de Cádiz (SO de España). *Rev. C. & G.*, 18 (1-2), 25-36.

### 1. Introducción

El estudio del medio costero es muy complejo debido a que los diferentes procesos que intervie-

nen en su evolución actúan a diversas escalas espaciales y temporales. Aquellos que actúan a pequeña escala no se pueden extrapolar a una escala media-larga dado que la evolución costera no es lineal,

siendo los procesos, en la gran mayoría de los casos, rítmicos o cíclicos. Debido a estas razones y a la falta de datos de partida, a menudo resulta difícil predecir la evolución de la costa mediante el uso de ecuaciones empíricas (Komar, 1976 y 1998; Carter, 1988). Por otro lado, un seguimiento directo de los cambios morfológicos permite comprender dónde, cuando y porque las playas cambian (Malvárez *et al.*, 2000). En este marco se encuadra el estudio de las celdas litorales, en cuanto su conocimiento es fundamental para reconstruir la evolución del litoral a medio-largo plazo y para calcular el balance sedimentario de un área.

Las celdas se pueden definir como unidades “básicas” en las que se divide el litoral. Los sedimentos se mueven dentro de cada celda y/o pasan de una celda a otra, en función de la dirección de aproximación del oleaje y de las características de los límites entre ellas. Las celdas son fácilmente individualizables en costas irregulares (por ejemplo, bahías, estuarios, etc.) o en costas rectilíneas interrumpidas por salientes rocosos u otros límites de tipo “fijo” (podría hablarse entonces de “celdas morfológicas”). Sin embargo, resulta muy complicado determinar la existencia de celdas en costas abiertas aparentemente uniformes, donde éstas se forman como resultado de procesos de refracción del oleaje, generación de ondas de borde, etc., cuya existencia está condicionada por la morfología de la playa submarina. Los límites de las celdas que se forman en estas costas suelen ser de tipo “libre”, es decir, varían su posición en función de las características del oleaje incidente. Finalmente, se puede diferenciar entre límites total o parcialmente impermeables (Bray *et al.*, 1995); estos últimos pueden permitir un transporte sedimentario unidireccional o bidireccional.

En el presente trabajo se han identificado y caracterizado las celdas litorales presentes a lo largo de un tramo aparentemente homogéneo del litoral gaditano entre Chipiona y Rota (Cádiz), individualizadas mediante un seguimiento morfológico llevado a cabo durante dos años.

## 2. Antecedentes

En los últimos años se han realizado numerosos estudios regionales para la caracterización morfológica y sedimentaria de amplios tramos costeros,

en los que se han utilizado diversos criterios de identificación de celdas litorales.

Los primeros intentos para identificar las celdas (May y Tanner, 1973) se basaron en la determinación del transporte sedimentario relacionado con procesos hidrodinámicos, flujos causados por gradientes de disipación de energía, *radiation stress*, etc.

Criterios morfológicos, sedimentológicos y volumétricos fueron utilizados por Mallik *et al.*, (1987) y Chauhan (1995) en la India, Williams y Leatherman (1993) y Calliari (1994) en EE.UU., por Shih y Komar (1994) en una playa en bolsillo de 24 Km de longitud en Oregon (EE.UU.) y finalmente, por Amin y Davidson-Arnott (1997) y Lawrence y Davidson-Arnott (1997) respectivamente, en los lagos Ontario y Huron, en Canadá. El análisis de fotografías aéreas o imágenes de satélite fue empleado por Kunte (1994) en la India, Bray *et al.*, (1995) en Inglaterra, Al Bakri (1996) en Kuwait y El-Asmar (2002) en el Delta del Nilo.

En la costa gaditana, Benavente *et al.*, (1998) describieron las celdas litorales que se generan en la playa de La Puntilla (El Puerto de Santa María). Finalmente, el tramo litoral entre Sanlúcar y Rota fue descrito por Muñoz y Enríquez (1998), quienes reconstruyeron la evolución histórica y las características morfológicas y sedimentológicas de la costa, aunque no llegaron a identificar celdas en sentido estricto.

En el presente trabajo, para definir las celdas litorales de la costa estudiada, se han empleado criterios volumétricos apoyados por las características sedimentológicas. La realización de perfiles topográficos seriados ha permitido reconstruir las variaciones morfológicas y volumétricas de las playas investigadas, identificando de esta manera tramos costeros con comportamientos parecidos u opuestos frente a determinadas condiciones de oleaje.

## 3. Zona de estudio

La zona de estudio se localiza en el litoral entre Chipiona y Rota (Cádiz, SO de España, Fig. 1) e incluye 14 Km de playas arenosas constituidas por sedimentos cuarzosos de granulometría media y fina, moderadamente bien clasificada. Las playas están respaldadas por dunas y acantilados labrados sobre depósitos pliocuaternarios (Baena *et al.*, 1987).

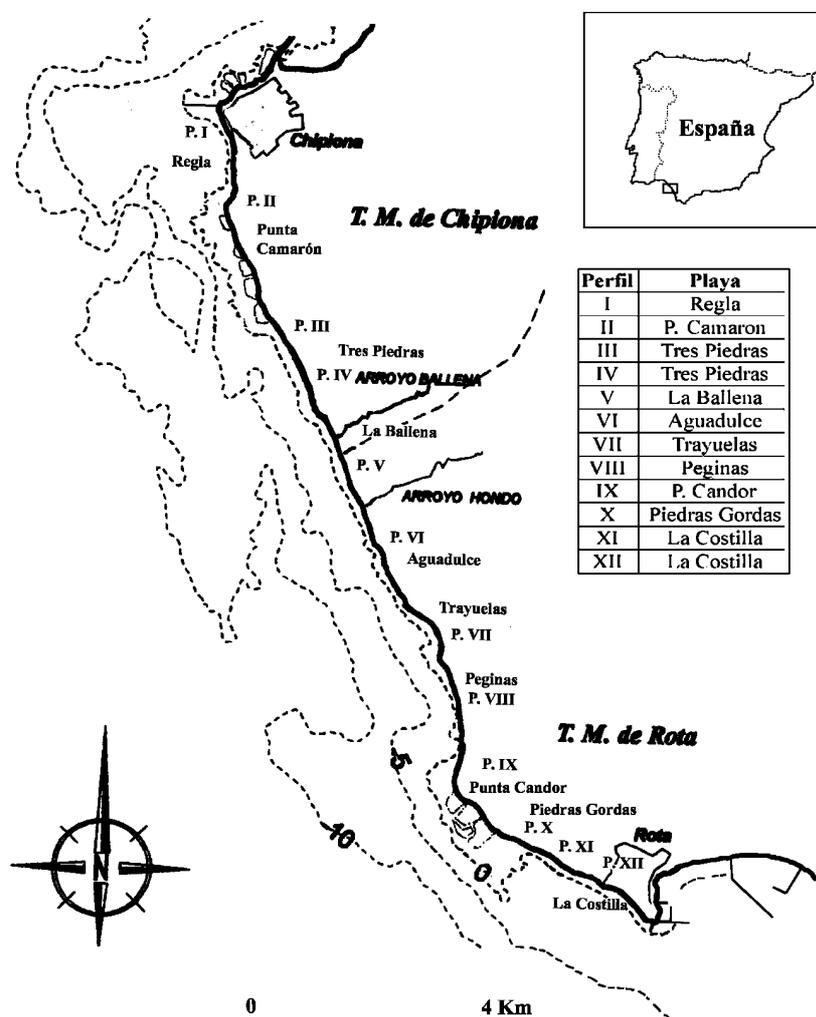


Figura 1. Mapa de localización con ubicación de los perfiles topográficos. Modificado de Muñoz y Enríquez (1998). La abreviatura "P." y el número que sigue indican la posición del perfil topográfico y su número de identificación. Se presenta también una tabla donde se indica la correspondencia entre los perfiles y las playas en las que éstos se ubican.

El litoral objeto de estudio se puede dividir en dos partes con orientación uniforme. El primer tramo está comprendido entre Chipiona y Punta Candor (Fig. 1) y presenta orientación NNO-SSE. El segundo incluye las playas entre Punta Candor y Rota y tiene orientación NO-SE (Fig. 1).

La línea de costa se presenta aparentemente homogénea, por lo que resulta complicado realizar una aproximación a su posible división en celdas. En la playa seca y en el intermareal alto y medio no hay salientes rocosos notables que interrumpan la deriva litoral, aunque existen dos espigones instalados en

los dos extremos de la zona de estudio (Figs. 2 y 3). Las plataformas rocosas dan lugar a salientes en el nivel medio-bajo del intermareal, que pueden actuar como espigones sumergidos; esto sucede en Punta Camarón, Punta Candor y La Costilla P. XI (Fig. 3). Por otro lado las playas de Tres Piedras y La Ballena ocupan un tramo de litoral muy rectilíneo (Figs. 1 y 4), y la playa de Trayuelas, forma una ensenada amplia delimitada por la plataforma rocosa (Fig. 1).

El rango mareal, con periodicidad semidiurna, varía entre 3,22 m (mareas vivas) y 1,1 m (mareas muertas), clasificando la costa como mesomareal baja.



Figura 2. Vista aérea de Norte hacia Sur de la playa de Regla (Chipiona), tomada en bajamar (Dirección General de Costas, Ministerio de Medio Ambiente). En el límite inferior de la foto se observa el espigón de Regla.

Los vientos dominantes (Muñoz y Sánchez, 1994) soplan del ONO, vientos húmedos atlánticos denominados “poniente” (con el 12.8% de frecuencia anual y 19.3 m/s de velocidad anual media), y del ESE, vientos secos que soplan de tierra, conocidos como “levante” (con el 19.6% de frecuencia y velocidad media de 27.8 m/s).

Las olas se aproximan a la costa preferentemente del Oeste (45% de frecuencia anual, Muñoz, 1996), con altura media inferior a 1 m y altura de ola significativa asociada a temporales de 2 m

(Reyes *et al.*, 1997). En la figura 5 se presentan las rosas de oleaje para condiciones de mar de viento y mar de fondo en la Bahía de Cádiz (ROM 0.3, 1991). No fue posible disponer de datos exactos sobre dirección de aproximación del oleaje durante el periodo de estudio, ya que las boyas oceanográficas presentes en el área, “Cádiz” y “Sevilla 1” (pertenecientes a la REMRO), son de tipo escalár.

La deriva litoral fluye hacia el Sureste, aunque también se puede observar un transporte contrario debido a los vientos procedentes del segundo y tercer cuadrante, que cobran mayor importancia en algunos tramos en función de su orientación específica.

#### 4. Metodología

El seguimiento morfológico de las playas se llevó a cabo desde marzo de 1996 hasta mayo de 1998, mediante el levantamiento topográfico de 12 perfiles normales a la línea de costa, con el fin de estudiar las variaciones morfológicas y volumétricas que pueden poner en evidencia la existencia de celdas litorales (Fig. 1). Los perfiles se midieron mediante un teodolito automático Zeiss Eth 4, con periodicidad mensual, a partir de puntos fijos en la trasplaya, prolongándose hacia el mar hasta la profundidad correspondiente a la bajamar viva. Se realizaron un total de 194 perfiles a lo largo de 19



Figura 3. Vista aérea de las playas de La Costilla y Piedras Gordas, separadas por un pequeño saliente de la costa (Dirección General de Costas, Ministerio de Medio Ambiente). Foto tomada del Sur hacia el Norte con marea al nivel medio. Destaca en el margen superior izquierdo la plataforma rocosa bien desarrollada en Punta Candor, donde la costa cambia de orientación. En la parte inferior de la foto destaca el espigón de Rota. No se aprecia el paseo marítimo, construido posteriormente a la fecha en que se realizó la foto.



Figura 4. Vista aérea de Sur hacia Norte de las playas de La Ballena y Tres Piedras, tomada en bajamar (Dirección General de Costas, Ministerio de Medio Ambiente). El litoral es rectilíneo y homogéneo en la zona intermareal.

campanías. La ubicación de las playas y de los perfiles, indicados con la abreviatura "P." y numerados de Norte a Sur, se presenta en la figura 1.

Mediante una función de integración espacial del programa SigmaPLOT del entorno Windows, se calcularon las variaciones volumétricas de las playas estudiadas y los trasvases de sedimento entre las diferentes partes de las mismas.

Para la caracterización sedimentaria de las playas se tomaron muestras en el intermareal y en la playa seca, y se analizaron en laboratorio mediante tamizado en seco. Los parámetros granulométricos se calcularon según la metodología de Folk y Ward (1957).

Con el fin de identificar la existencia o no de celdas en el litoral estudiado, se utilizaron fundamentalmente las variaciones volumétricas observadas en las distintas campañas de seguimiento. Los perfiles se consideraron representativos de un tramo de litoral de longitud variable, de forma que los límites entre celdas se ubicaron entre perfiles cercanos que mostraron un comportamiento claramente diferente. Estos puntos no presentaron variaciones, bien porque el balance sedimentario neto transversal y longitudinal era cero, o bien porque en ellos no se identificó un transporte sedimentario significativo.

También se tuvieron en cuenta los cambios morfológicos y las variaciones granulométricas de los sedimentos, relacionándolos con las observaciones sobre la dirección de aproximación del oleaje llevadas a cabo durante el periodo de estudio. No obstante, estas observaciones, aunque sistemáticas, fueron puntuales y no siempre representativas del oleaje dominante entre campañas sucesivas.

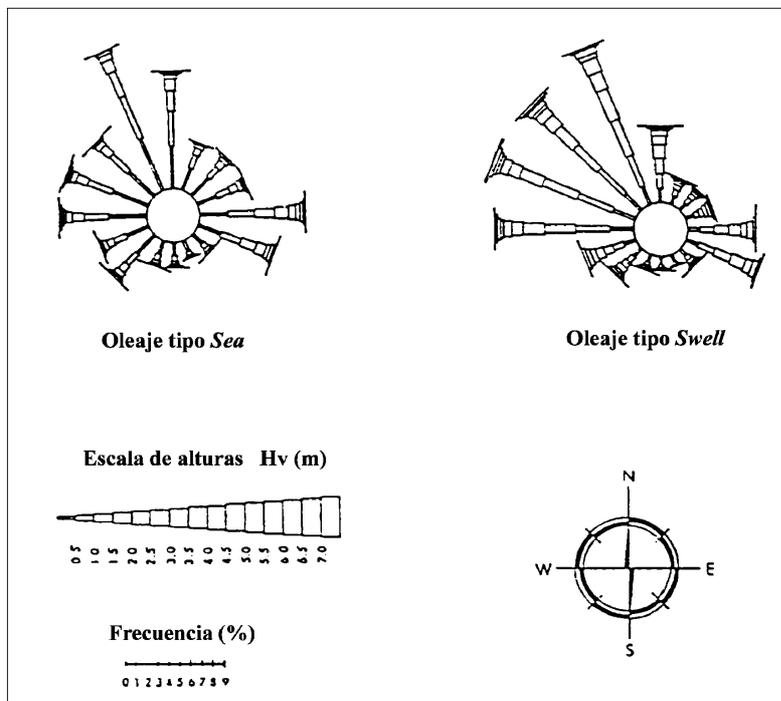


Figura 5. Rosa de oleaje de mar de fondo y mar de viento para la Bahía de Cádiz (ROM. 0.3, 1991).

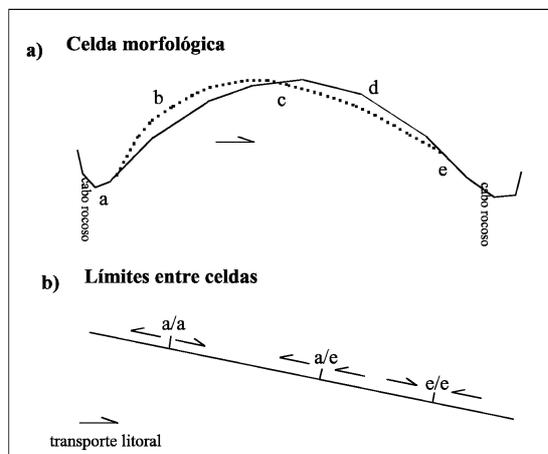


Figura 6. Esquema de una celda morfológica y de los límites entre celdas (Carter, 1988).

Finalmente, hay que tener en cuenta que la determinación de celdas está claramente condicionada por el espaciado de los perfiles, de modo que es posible que existan celdas menores que se podrían detectar con un seguimiento espacial más detallado.

En cuanto a terminología, se ha utilizado la nomenclatura de May y Tanner (1973) para distinguir las diferentes partes de una celda, y la nomenclatura de Lowry y Carter (1982) para determinar los límites entre celdas (Fig. 6 a y b). En la figura 6 a se observa una celda con un transporte litoral que fluye de izquierda a derecha. Las partes “a”, “e” y “c” indican zonas en una celda que no sufren cambios, en cuanto que los dos primeros constituyen límites de celdas y el punto “c” es un punto de tránsito de sedimento; finalmente, “b” indica la

zona que retrocede al situarse aguas abajo del límite “a” y “d” la zona en la que se registra acumulación al estar aguas arriba del límite “e”. En cuanto a los límites entre celdas, “a/e” y “e/a” constituyen límites de tránsito, es decir, puntos por los que el sedimento transportado pasa sin que se produzca erosión o acumulación. El límite “a/a” es de divergencia, es decir, se observa allí donde el transporte se divide en dos direcciones opuestas, dando lugar a erosión. El límite “e/e” es de convergencia, y se observa cuando dos direcciones de transporte opuestas confluyen hacia el mismo punto dando lugar a acreción.

## 5. Resultados

El seguimiento morfológico permitió reconstruir la morfología de las playas y las variaciones estacionales de las mismas (Anfuso *et al.*, 2001). Por un lado, las playas “intermedias-reflectivas”, parecidas a las playas reflectivas definidas por Wright y Short (1984), presentaron una playa seca bastante ancha y una pendiente variable a lo largo del año. En invierno mostraron un perfil tendido ( $\tan \beta = 0.03$ ), mientras que en verano presentaron un perfil constructivo con pendiente relativamente alta ( $\tan \beta = 0.06$ ), caracterizado por una berma (Fig. 7, a). Por otro lado, las playas disipativas, visualmente parecidas a las disipativas descritas por Wright y Short (1984), no sufrieron cambios morfológicos significativos entre verano e invierno y la pendiente, más tendida ( $\tan \beta = 0.02$ ), no varió a lo largo del año (Fig. 7, b).

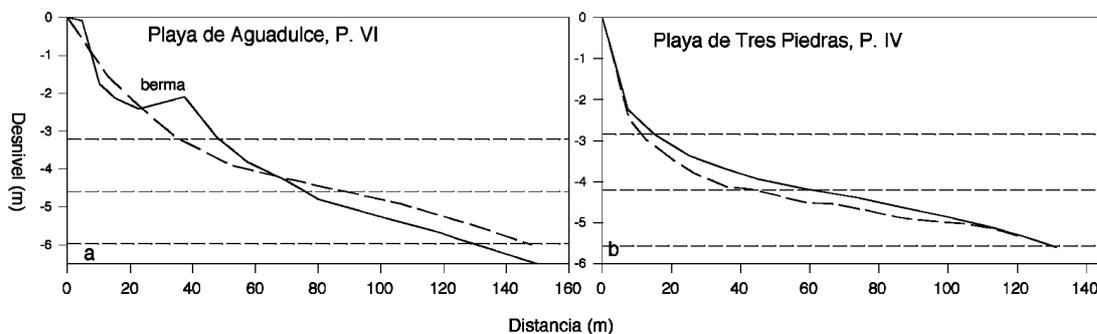


Figura 7. Ejemplos de playas intermedias-reflectivas (a) y disipativas (b) y de las variaciones estacionales que sufren.

En la Fig. 8 se han representado las variaciones volumétricas (en  $m^3/m$  lineal) observadas en las campañas más representativas. En estas figuras cada línea indica los cambios volumétricos en cada perfil con respecto a la campaña anterior (por ejemplo, en la Fig. 8 a, la línea de febrero de 1997 para el perfil P. IX, no indica una recuperación, sino que no ha habido cambios con respecto a la campaña anterior, realizada en noviembre de 1996). Del análisis de la figura 8 se aprecia cómo hubo casos en los que el litoral varió de forma homogénea, es decir, todas las playas progradaron o retrocedieron, y otros casos en los que playas cercanas registraron comportamientos opuestos.

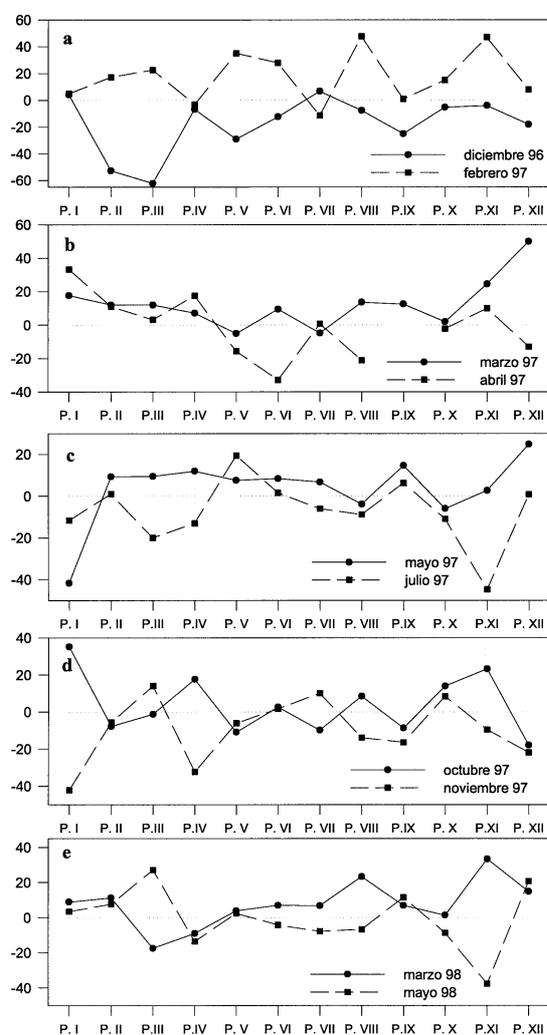


Figura 8. Variación espacial de los volúmenes de arena ganados (valores positivos) o perdidos (valores negativos) en cada perfil, en una determinada campaña con respecto a la anterior.

Un crecimiento homogéneo se registró en las campañas de febrero 1997 (Fig. 8, a), marzo 1997 (Fig. 8, b) y, secundariamente, mayo 1997 (Fig. 8, c), mientras que se observó erosión en las campañas de diciembre 1996 (Fig. 8, a) y julio 1997 (Fig. 8, c). Dentro de este marco general, algunas playas presentaron un comportamiento opuesto a las demás, pero siempre con cambios volumétricos pequeños.

En otros casos las playas respondieron de forma diferente, observándose un comportamiento opuesto entre playas cercanas, como en las campañas de abril 1997 (Fig. 8, b) y octubre y noviembre 1997 (Fig. 8, d), o entre grupos de playas, como en las campañas de mayo 1997 (Fig. 8, c), y marzo y mayo 1998 (Fig. 8, e).

En cuanto al oleaje incidente, se observó la predominancia de oleaje del tercer cuadrante (S y SSO principalmente) antes de las campañas de diciembre 1996, mayo, octubre y noviembre 1997, y de oleaje procedente del cuarto cuadrante (O y NO principalmente) antes de las campañas de julio 1997 y mayo 1998.

En cuanto a las características granulométricas de las playas, se registraron pequeñas variaciones espaciales y temporales. Estas últimas (Fig. 9) reflejan una variación estacional del tamaño de grano del orden de  $0,5 \text{ (} 0,06 \text{ mm)}$ , con tamaños más gruesos en invierno, de acuerdo con condiciones energéticas más altas, y tamaños más finos en los meses de verano, caracterizados por una menor altura de ola.

A partir de los datos anteriores, se identifican seis celdas litorales. Las principales, de Norte a Sur, son: la playa de Regla, limitada a Sur por Punta Camarón; la gran unidad que incluye las playas de Punta Cuba, Tres Piedras y La Ballena; más al Sur se observa la celda de la playa de Trayuelas y la de la playa de Peginas, delimitada a Sur por Punta Candor; a continuación, la celda de la playa de Piedras Gordas y la celda de La Costilla, limitada a Sur por el espigón de Rota. Se trata de un esquema simplificado que puede presentar ciertas variaciones en función de la dirección exacta de aproximación del oleaje, del rango de marea durante los temporales y del tiempo de recuperación de cada playa.

En cuanto a las estructuras costeras que parecen afectar al transporte litoral y/o condicionar la división del litoral en celdas, se pueden dividir en antrópicas y naturales (Carter, 1988). Entre las primeras

se incluirían los espigones de Chipiona y Rota, próximos, a los perfiles de Regla (Fig. 2) y de La Costilla P. XII (Fig. 3), respectivamente. Las segundas consistirían en plataformas rocosas ubicadas a lo largo de casi todo el litoral y, en concreto, entre Punta Camarón y Punta Cuba (o Tres Piedras P. III), entre Punta Candor y Piedras Gordas (Fig. 3) y en las mismas playas de Piedras Gordas y La Costilla P. XI (Fig. 3), donde forman en bajamar pequeños espigones. Tanto los primeros, como los segundos constituyen límites fijos, total o parcialmente impermeables al transporte sedimentario en función de las características del oleaje (altura y dirección de aproximación del oleaje) y de la carrera mareal. Estos parámetros condicionan la altura del nivel del

mar sobre las estructuras naturales y antrópicas y determinan la dirección del transporte litoral. En concreto, según el estado de la marea, la plataforma estará totalmente sumergida, frenando sólo en parte o nada el transporte litoral, o parcial o totalmente emergida, interrumpiendo así el transporte de forma más importante. Los demás límites son semilibres y varían su posición en función del ángulo de ataque y de la altura del oleaje incidente. Finalmente, los límites representados en las figuras 10 y 11, para oleajes del cuarto y tercer cuadrante, se han considerado de tránsito pero, en condiciones de bajamar, pueden funcionar como límites de convergencia debido a los procesos de refracción y difracción en la plataforma rocosa.

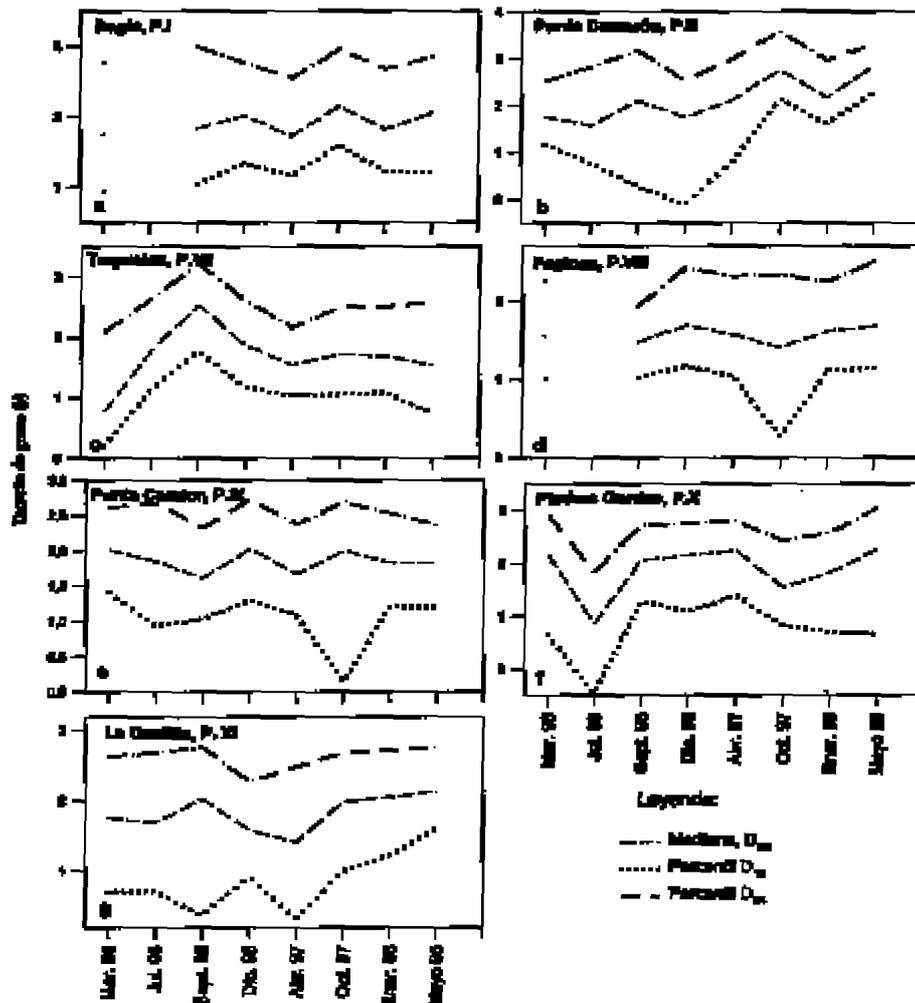


Figura 9. Evolución temporal de las características granulométricas de diferentes playas en escala phi. Los percentiles D 16 y D 84 indican, respectivamente, la cola de gruesos y finos.

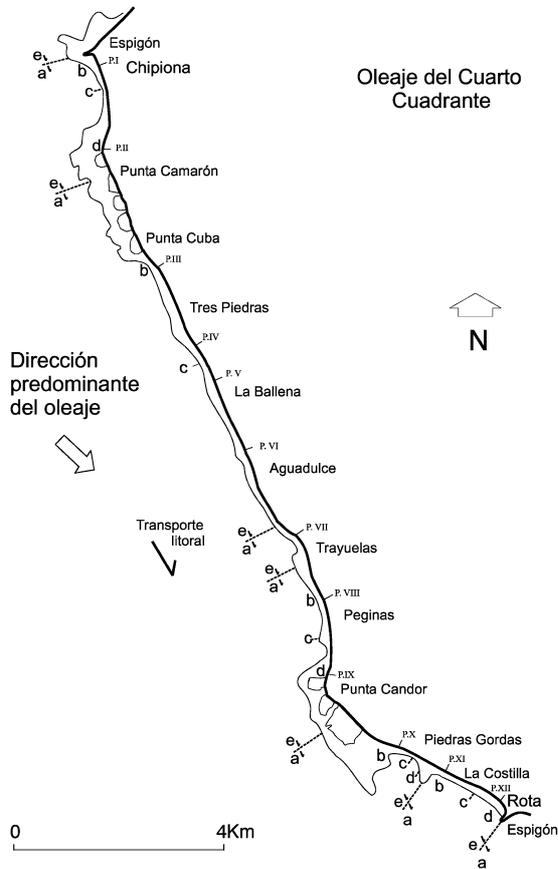


Fig. 10. División del litoral en celdas y caracterización del comportamiento de cada celda en condiciones de oleaje del cuarto cuadrante. Terminología de acuerdo con la Fig. 6. Las zonas indicadas con "c" se han posicionado entre dos perfiles de comportamiento distinto en función de la morfología de detalle de la costa, la zona "d" en la celda del perfil P. X es supuesta.

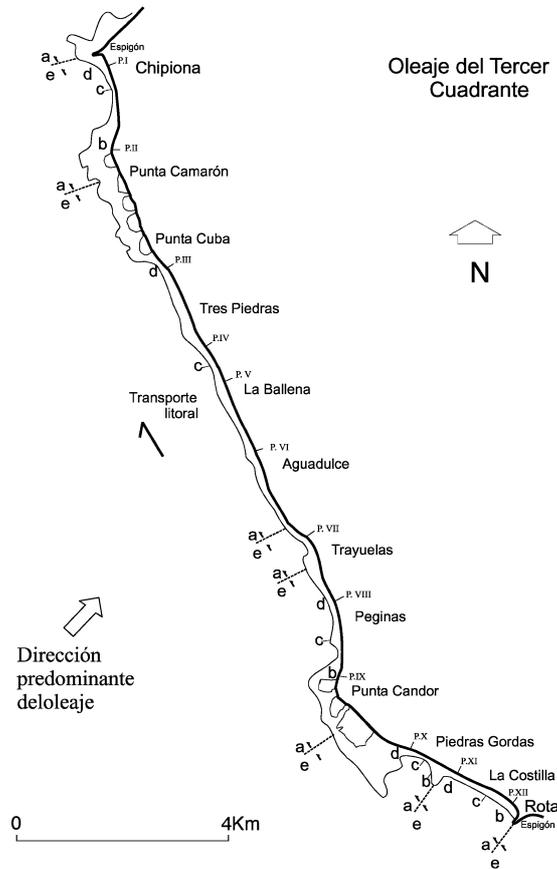


Fig. 11. División del litoral en celdas y caracterización del comportamiento de cada celda en condiciones de oleaje del tercer cuadrante. Terminología de acuerdo con la Fig. 6. Las zonas indicadas con "c" se han posicionado entre dos perfiles de comportamiento distinto en función de la morfología de detalle de la costa, la zona "b" en la celda del perfil P. X es supuesta.

En condiciones de mar del cuarto cuadrante se observó un crecimiento de los perfiles situados aguas arriba de las estructuras costeras, en concreto en P.II, P.IX y P. XII, y erosión aguas abajo en P.I, P. III, P.VIII, P. X y P. XI (Fig. 10). En condiciones de mar del tercer cuadrante, se observó una progradación de las playas localizadas aguas arriba de dichas estructuras, en concreto P.I, P. III, P. VIII (no siempre), P. X y P. XI. Se registró erosión aguas abajo, en P. III, P. IX y P. XII (Fig. 11).

Del análisis de las campañas de mayo 1997 (Fig. 8, c) y marzo y mayo 1998 (Fig. 8, e), destaca cómo el litoral estudiado, en determinadas condiciones, se comporta de forma más homogénea,

generándose celdas de grandes dimensiones. Por ejemplo, del análisis de la campaña de mayo 1997 se evidencia un transporte hacia el SE, de acuerdo con las observaciones visuales sobre aproximación del oleaje, que produce una mayor acumulación en correspondencia con las estructuras naturales (Punta Candor, P. IX) o antrópicas (La Costilla, P. XII) más importantes que obstaculizan de forma más efectiva el transporte litoral.

Finalmente, en cuanto a las características granulométricas, las escasas variaciones observadas en la zona de estudio invalidan su uso como marcador de límites entre celdas, utilizándose la variación volumétrica como variable más representativa. Sin

embargo, si se comparan las Figs. 8 y 9, se observa que las playas con comportamientos granulométricos más parecidos pertenecen a una misma celda (Regla y Punta Camarón, Fig. 9, a y b; Peginas y Punta Candor, Fig. 9, d y e). A la inversa, los pasos de una celda a otra a menudo vienen marcados por tendencias granulométricas diferentes e incluso a veces contrapuestas, como en Trayuelas y Peginas (Fig. 9, c y d) o Piedras Gordas y La Costilla P. XI (Fig. 9, e y f). Esta relación es, por otro lado, lógica si se tiene en cuenta que las condiciones de contorno de las playas son las responsables de la existencia de celdas litorales y de la diferente disipación de energía en cada una de ellas. Esta última determina la competencia en el transporte de los sedimentos y, por tanto, su granulometría.

## 6. Discusión

Las variaciones volumétricas homogéneas a lo largo del litoral tienen lugar cuando predomina un transporte transversal, como suele ocurrir a finales de otoño o principios de invierno (ej. campaña diciembre 1996, Fig. 8 a), cuando se pasa de un estadio constructivo, asociado a oleaje de mar de fondo, a un estadio disipativo, relacionado con un oleaje de mar de viento (Anfuso, 2002). Las variaciones puntuales en determinadas playas a lo largo del litoral son el resultado de la predominancia del transporte longitudinal sobre el transversal y del diferente ritmo de recuperación de las distintas celdas, que sufren cambios volumétricos opuestos aunque de la misma magnitud (ej. campaña julio 1997, Fig. 8 c).

En cuanto al tramo central del litoral (Tres Piedras y La Ballena, Fig. 4), sufrió cambios más aleatorios, probablemente porque esta zona es más abierta y los límites que se forman son de tipo libre. Para determinar la existencia de celdas en este tramo habría que llevar a cabo un seguimiento topográfico de mayor detalle espacial y temporal, y un seguimiento de las características del clima marítimo. Por otra parte, la realización de campañas batimétricas permitiría caracterizar la compleja morfología de la zona sumergida, responsable de la formación de las celdas que constituyen este tramo litoral.

La playa de Trayuelas, por la presencia de la plataforma rocosa, que determina unas fuertes con-

diciones de contorno, fue la que presentó con más frecuencia un comportamiento opuesto al de las demás playas. Esta hipótesis conlleva que el límite correspondiente a dicha playa actúe en ocasiones como límite divergente o convergente y no de tránsito. Por otro lado, el hecho de que las playas donde la plataforma rocosa es más extensa varíen poco, confirma la hipótesis de que se trata de zonas ubicadas cerca de límites entre celdas (por ejemplo Punta Camarón-Punta Cuba, Trayuelas y Punta Candor-Piedras Gordas), tal y como observaron Nordstrom y Jackson (1992) en playas resguardadas de la costa este de EE.UU.

Finalmente, hay que indicar que la existencia de celdas litorales tiene importantes implicaciones dinámicas, ya que condiciona la distribución areal de los procesos erosivos y deposicionales. Esto, a su vez, tiene importantes consecuencias aplicadas a la ingeniería costera, como el diseño de una obra de protección costera o una regeneración. En concreto, en las obras de regeneración llevadas a cabo en Rota durante septiembre de 1996 y marzo de 1997, no se tuvieron en cuenta las características morfológicas de la playa. La arena se vertió en la parte meridional de la celda de la playa de La Costilla, en correspondencia con el P. XII. Es decir, la playa no se regeneró a lo largo de toda la longitud de la celda en la que estaba incluida, y el vertido de arena quedó como un acúmulo "aislado" del resto de la playa y, por esta razón, más inestable y más susceptible a la erosión en coincidencia con oleaje del SO. Este hecho se puso de manifiesto durante una campaña con trazadores fluorescentes (Anfuso *et al.*, 1999), cuando importantes volúmenes de arena se desplazaron hacia el NO hasta llegar al P. XI.

## 7. Conclusiones

El seguimiento de varios perfiles topográficos distribuidos a lo largo del tramo costero entre Chipiona y Rota permitió reconstruir los cambios morfológicos del litoral frente a diferentes condiciones hidrodinámicas. Se vio cómo, a veces, el litoral responde de manera homogénea a los procesos erosivos y/o constructivos, por ejemplo cuando se pasa de condiciones de verano a invierno, y viceversa. En otras ocasiones se registró un comportamiento opuesto entre playas contiguas, reve-

lando la existencia de un importante transporte longitudinal que interacciona con las estructuras naturales y/o antrópicas presentes, individualizando seis celdas litorales en un tramo de costa aparentemente homogéneo. Las celdas observadas están limitadas por plataformas rocosas que se extienden en la zona sumergida y en la parte intermedia y baja del intermareal y por dos espigones en los extremos de la zona de estudio. Todas estas estructuras constituyen límites fijos de tránsito, cuya permeabilidad varía en función de las características del oleaje incidente y del rango mareal.

La determinación de celdas litorales tiene una gran importancia para la predicción del comportamiento a medio plazo del litoral. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en este estudio, es posible predecir a grandes rasgos la respuesta del litoral frente dos condiciones "tipo" de oleaje predominante en la costa de Cádiz, conocidas como "levante" y "poniente". Finalmente, el conocimiento del patrón de la dinámica litoral tiene una gran importancia práctica para el diseño de obras de regeneración y estructuras costeras, que en el pasado se realizaron sin tener en cuenta la división del litoral en celdas.

### Agradecimientos

Se agradece a J. Andrés, F. Sánchez y J. A. Martínez su ayuda en las labores de campo, a los Dres. Ana Bernabeu y Gonzalo Malvárez las observaciones y sugerencias realizadas y a L. Del Río la revisión del manuscrito. Este trabajo es una contribución al Proyecto n.º PB98-0581 de la CICYT y a los Grupos de Investigación RNM-161 y RNM-803 del Plan Andaluz de Investigación.

### Referencias bibliográficas

- Al Bakri, D. (1996). A geomorphological approach to sustainable planning and management of the coastal zone of Kuwait. *Geomorphology*, 17, 323-337.
- Amin, S. & Davidson-Arnott, R. (1997). A statistical analysis of the controls on shoreline erosion rates, Lake Ontario. *Jour. Coastal Res.*, 13 (4), 1093-1101.
- Anfuso, G., Andrés, J., Gracia F.J. & López-Aguayo, F. (1999). Field assessment of remobilization depth in mesotidal beaches (SW Spain) along a single tidal cycle. En G. Randazzo (ed.): *Coastal Environment Management*. Publicado en CD Rom por EUCC-Italy/EUCC.
- Anfuso, G., Benavente, J. & Gracia F.J. (2001 a). Morphodynamic response of nourished beaches in SW Spain. *Jour. Coastal Conservation* 7, 71-80.
- Anfuso, G., Martínez, J.A. & Gracia F.J. (2001 b). Longshore distribution of morphodynamic beach states in an apparently homogeneous coast (Chipiona-Rota, SWSpain). En: E. Ozhan (ed). *Medcoast01: Proc. 15<sup>th</sup> Int. Conf.*, (3), 1381-1392.
- Baena, J., Zazo, C., Goy, J. & otros. (1987). *Mapa geológico de España a escala 1:50.000*, Hoja 1.061 (Cádiz) IGME. Madrid, 36 pp.
- Benavente, J., Gracia, F.J. & López-Aguayo, F. (1998). Morfodinámica de la playa de La Puntilla (Pto de Santa María, Bahía de Cádiz). En Gómez A. Salvador, F. (eds). *Investigaciones recientes de la Geomorfología Española*. SEG y Serv. Publ. Univ. de Barcelona. 307-316.
- Bray, M., Carter, D. & Hooke, J. (1995). Littoral cell definition and budgets for Central Southern England. *Jour. Coastal Res.*, 11 (2), 381-400.
- Calliari, L. (1994). Cross-shore and longshore sediment size distribution on southern Currituck Spit, North Carolina: implications for beach differentiation. *Jour. Coastal Res.*, 10 (2), 360-373.
- Carter, R.W.G. (1988). *Coastal environments*. Academic Press, 617 pp.
- Chauhan, O. (1995). Monsoon-induced temporal changes in beach morphology and associated sediment dynamics, Central East coast of India. *J. Coastal Res.*, 11 (3), 776-787.
- El-Asmar, H.M. (2002). Short term coastal changes along Damietta-Port Said coast Northeast of the Nile Delta, Egypt. *Jour. Coastal Res.*, 18 (3), 433-441.
- Folk, R.L. & Ward, W.C. (1957): Brazos river bar. A study in the significance of grain size parameters. *J. Sedim. Petrol.*, 27, 3-26.
- Komar, P.D. (1976). *Beach processes and sedimentation*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. USA. 429 pp.
- Komar, P.D. (1998). *Beach processes and sedimentation*. 2<sup>nd</sup> Edition. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. USA. 544 pp.
- Kunte, P. (1994). Potential usage of remote sensing data in studying the behaviour of shore drift along Kerala coast, India. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 38, 613-624.
- Lawrence, P. & Davidson-Arnott, R. (1997). Alongshore wave energy and sediment transport on south-eastern Lake Huron, Ontario, Canada. *Jour. Coastal Res.*, 13 (4), 1004-1015.
- Lowry, P. & Carter, R. W. G. (1982). *Jour. Heart Sci. R. Dubl. Soc.* 4, 121-132.
- Mallik, T., Samsuddin, T., Prakash, T., Vasudevan, V. & Machado, T. (1987). Beach erosion and accretion - an example from Kerala, Southwest coast of India. *Environ. Geol. Water Sci.*, 10 (2), 105-110.

- Malvárez, G.C., Pollard, J. y Domínguez, R. (2000). Origin, measurement and management of environmental stress on the Costa del Sol. *Coastal Management*, 28 (3), 215-234.
- May J. P. & Tanner, W. F. (1973). The littoral power gradient and shoreline changes. In: D. R. Coates (ed.): *Coastal Geomorphology*, 43-61.
- Muñoz, J.J. (1996): *Análisis de la morfología y variabilidad de playas apoyadas en lajas rocosas*. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz. 150 pp. (Inédita).
- Muñoz, J.J. & Enríquez, J. (1998). Dinámica litoral de una unidad fisiográfica completa: Sanlúcar-Rota. *Revista de Obras Públicas*, 3375, 35-44.
- Muñoz, J.L. & Sánchez, A. (1994): El medio físico y biológico en la Bahía de Cádiz: saco interior. *Informaciones técnicas*, 28/94. Consejería de Agricultura y Pesca (Junta de Andalucía). 161 pp.
- Nordstrom, K.F. & Jackson, N.L. (1992). Two-dimensional change on sandy beaches in meso-tidal estuaries. *Zeit. für Geomorph.*, 36 (4), 465-478.
- Reyes, J.L., Benavente, J., Gracia, F.J. & López-Aguayo, F. (1997). Efectos de los temporales sobre las playas de la Bahía de Cádiz. *Cuadernos de l Laboratorio Xeológico de Laxe*, 25, 631-643.
- ROM 0.3 (1991). Clima marítimo en el litoral español. Dirección General de Puertos. Ministerio de Obras Públicas, Madrid.
- Shih, S. & Komar, P. (1994). Sediments, beach morphology and sea cliff erosion within an Oregon coast littoral cell. *Jour Coastal Res.*, 10 (1), 144-157.
- Williams, A. & Leatherman, S. (1993). Process form relationships on USAeast coast barrier islands. *Zeit. für Geomorph.*, 37 (2), 179-197.

Recibido 5 de agosto de 2002

Aceptado 29 de agosto de 2003