

Origen y evolución de flechas litorales recientes en la desembocadura del estuario mesomareal del río Guadiana (Huelva, SO de España)

J. A. MORALES, J. G. PENDON y J. BORREGO

Departamento de Geología. Universidad de Huelva. 21819 La Rábida. Palos de la Frontera. Huelva.

Resumen: La desembocadura del río Guadiana muestra una morfología de estuario mesomareal dominado por olas, cuya evolución morfo-sedimentaria se ve fuertemente influenciada por la actividad fluvial y mareal. El sector más meridional de la margen oriental de este sistema estuarino ha experimentado un rápido cambio morfológico en los dos últimos siglos, que refleja la evolución espacio-temporal de los diversos medios deposicionales presentes. El estudio de éstos permite agruparlos en dos conjuntos: 1) medios internos protegidos (canales y marismas) y 2) medios externos asociados a flechas litorales. En los primeros las litofacies presentes son predominantemente limo-arenosas con un significativo retrabajo orgánico y el agente dinámico dominante es la marea. En los medios externos, el sedimento es arena media-gruesa muy bien clasificada, producto de la actividad de las olas (playas) con retrabajo del viento (dunas costeras). La asociación horizontal y vertical de estos medios constituye una secuencia tipo que se muestra claramente regresiva. El esquema de sedimentación propuesto en este trabajo consiste en el crecimiento de las flechas litorales a partir del retrabajo costero de los sedimentos aportados por el río y la deriva litoral, existiendo un carácter recurrente en el desplazamiento del canal principal y de estas flechas litorales, motivado por una variación en el tiempo de la interacción de los agentes hidrodinámicos fundamentales (oleaje, corrientes mareales y aporte fluvial).

Palabras clave: Estuario del Guadiana, Submedios sedimentarios, Marismas, Flechas litorales.

Abstract: The Guadiana River mouth (SW Spain) shows a morphology of a mesotidal estuary dominated by waves, which morfo-sedimentary evolution is strongly controlled by both fluvial and tidal activity. The southernmost sector of the eastern margin of this estuarine system has shown a very quick morphological change during the two last centuries, which reflects the space-time evolution from the diverse depositional environments there operating. The study of these changes, allows to group into two sets of environments: 1) Inner and protected environments (channels and marshes) and 2) Outer environments associated with the coastal curved spits. The dominant lithofacies in the inner environments are silty sands with a significant degree of organic reworking, controlled by the tide in a important way. In the outer environments, the sediment is medium-coarse very well sorted sands, product of both the waves activity (beaches) and eolic rework (coastal dunes). The horizontal and vertical associations of all the referred environments are ordered into a regressive sequence. The recent history of this studied sector is proposed as a recurrent displacement of both the main channel and the spit growth, because the swash platforms and bars are shifted. Bars accretion produces the development of spits along the eastern margin. All these processes are the consequence of the interaction among the wave regime, the tidal currents and the fluvial dynamics.

Key words: Guadiana Estuary, Depositional environments, Marshes, Spits.

Morales, J.A., Pendón, J.G. y Borrego, J., (1994): Origen y evolución de flechas litorales recientes en la desembocadura del Estuario mesomareal del Río Guadiana (Huelva, S.O. España). *Rev. Soc. Geol. España*, 7 (1-2): 155-167.

La desembocadura del Río Guadiana se sitúa en el centro-Oeste del Golfo de Cádiz y sirve de frontera entre las costas española y portuguesa (Fig. 1). Se trata de un valle fluvial invadido por el mar durante la última pulsación de la transgresión flandriense (Holoceno), que para este sector litoral se produjo hace unos 5000 años (Melières, 1974). Este valle fluvial inundado encaja, pues, en el concepto de estuario en el sentido de Nichol y Biggs

(1985), Frey y Howard (1986), Darlymple (1992), Darlymple et al. (1992), Reinson (1992) y Allen (1993), entre otros. La marisma mareal más reciente (Marisma de San Bruno) está situada entre dos flechas litorales superpuestas: 1) la más antigua, Isla Canela al Norte y 2) la de Punta de la Espada, al Sur; y drena hacia el canal principal del estuario del Guadiana a través de un canal mareal distribuidor (Caño del Pozo). La flecha litoral

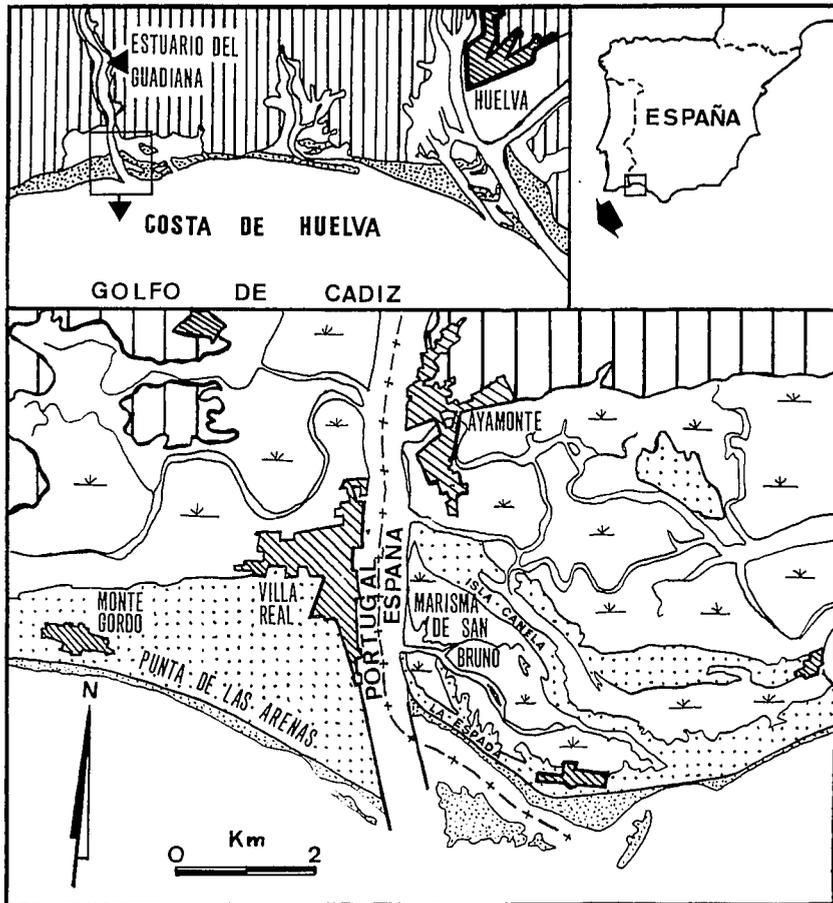


Figura 1.- Esquema de situación de área estudiada

más moderna continúa creciendo en la actualidad hacia el Oeste, en su extremo más occidental, y es el sector de formación más reciente de todo el complejo mareal asociado a la desembocadura del Estuario del Río Guadiana (Fig. 1).

Se han distinguido varios medios sedimentarios en la orilla española de esta desembocadura: desde ambientes de playa en la cara expuesta de la flecha litoral hasta marismas saladas (Salt marshes), desarrolladas a expensas de los bordes de canal activo (Active channel margins), en la zona protegida y ambientes eólicos situados entre ambos. Las facies deposicionales (sensu Miall, 1970) que aparecen ahora en cada uno de estos medios son, en último término, el producto de la evolución sufrida por el conjunto del sistema deposicional del Guadiana.

Debido al hecho de que toda la evolución sedimentaria de la Marisma de San Bruno ha tenido lugar durante los dos últimos siglos, ha quedado constatación cartográfica de toda ella a través de mapas batimétricos utilizados para la navegación en la entrada de los puertos comerciales del entorno. Se ha elaborado un esquema de sedimentación, desde el funcionamiento de la zona como un área costera abierta hasta adquirir la configuración actual como zona de marisma, teniendo en cuenta: 1) la evolución morfológica interpretada en las cartas náuticas, 2) el conocimiento de los procesos hidrodinámicos responsables de la sedimentación en esta franja costera, y 3) los productos sedimentarios que se han desarrollado.

Metodología

Se han aplicado diversas técnicas, a fin de alcanzar el objetivo que se acaba de indicar. La cartografía de medios y submedios sedimentarios ha sido realizada a partir de fotointerpretación de los pares estereográficos correspondientes a la pasada 5 del vuelo realizado por M.A.P.A. en Agosto de 1987, y del correspondiente trabajo sobre el terreno.

Los análisis granulométricos han sido realizados con un contador de partículas Coulter Counter modelo ZM y los análisis de materia orgánica por calcinación a 480°C durante dos horas, previo ataque con HCl y secado a 110°C, también durante dos horas (Courau, 1983).

El estudio de las facies deposicionales producidas en cada uno de los submedios sedimentarios se ha realizado mediante testificación hasta un metro de profundidad, utilizando un testificador tipo "hand core beaker sampler" modificado. La evolución cartográfica de las macroformas se ha interpretado a partir de cartas náuticas de diferentes fechas y fuentes, cedidas por el Puerto Autónomo de Huelva. Los diferentes métodos de proyección cartográfica empleados en cada una de ellas se han convertido previamente al sistema de proyección UTM.

Caracterización hidrodinámica

La sedimentación de un sistema mareal se encuentra condicionada por factores físicos, químicos y biológicos,

como son el clima o el contenido florístico y faunístico del sistema. Sin embargo, son los procesos hidrodinámicos (régimen mareal, oleaje y aportes fluviales) y su interacción, junto con el material detrítico disponible, los que marcan las pautas de su evolución sedimentaria.

Régimen mareal

El régimen mareal de la costa de Huelva es mesomareal y semidiurno, con leve desigualdad diaria, tal como se deduce de los datos predictivos para el puerto de Huelva (Borrego y Pendón, 1989). En los puertos de Ayamonte e Isla Cristina, situados en la desembocadura estuarina estudiada, los datos de que se disponen presentan gran similitud con los del puerto de Huelva; no obstante, los rangos de marea son algo menores, ya que oscilan entre los 2,8 metros de la Marea Viva Media y los 0,9 metros de la Marea Muerta Media, y el rango medio es de 2,0 metros. La marea se presenta igualmente con un carácter semidiurno y con una desigualdad diaria de algunos centímetros.

Régimen de oleaje

El oleaje es otro de los factores que controlan de una forma directa la sedimentación de una franja costera, al ser el principal agente constructor de las macroformas litorales, además de constituir una fuente constante de retrabajo del sedimento que aportan otros agentes o, incluso, el mismo oleaje a través de su componente de deriva litoral.

El estudio de los datos existentes sobre el oleaje permite caracterizar este factor, no sólo en cuanto a la frecuencia direccional del mismo, sino también teniendo en cuenta la magnitud frecuencial de las olas, tanto globalmente como en cada una de las direcciones de procedencia. El oleaje direccionalmente dominante es el procedente del Sur-Oeste, al que sigue en importancia el oleaje del Sur-Este, conocido como "oleaje de levante" (Fig. 2).

El oleaje procedente del Norte, aunque no aparece en los espectros y no tiene incidencia importante en la zona costera abierta, sí que tiene una importancia relativa en las zonas adyacentes al canal principal. Ello se debe a la

orientación favorable del mismo, a su anchura y a la frecuencia de los vientos del Norte en este sector.

La ola significativa media ($H_{1/3}$) de todas las direcciones (oleaje escalar) posee una altura media de 0,69 m, mientras que las olas procedentes de SO y SE poseen respectivamente alturas medias de 0,4 y 0,7 m. Se observa, pues, que a pesar de existir un dominio frecuencial por parte del oleaje del SO, es el oleaje del SE el que presenta las olas de mayores magnitudes, y por tanto con una mayor capacidad de retrabajo del sedimento.

La orientación de la línea de costa en el sector estudiado hace que los trenes de olas dominantes se aproximen oblicuamente a la misma, originándose así una componente de transporte que funciona desde el oeste hacia el este durante el oleaje del SO y en sentido inverso durante el oleaje de levante. Sin embargo, y ésto es importante, la refracción provocada por el cauce sumergido del Guadiana origina en la orilla de levante, en la que se sitúa el sector estudiado, que tanto los trenes procedentes del SO como del SE realicen un transporte neto del sedimento desde el E hacia el O; esto coincide con el sentido de crecimiento de las flechas litorales que limitan la marisma de San Bruno.

Aportes fluviales

La aportación fluvial media anual es de 4919,51 Hm³, para la serie de años comprendida entre 1946/47 y 1989/90. Este valor es poco significativo, puesto que existe una gran irregularidad en los aportes, que hace posible que en años consecutivos se pase de 13880,67 Hm³ (aportación máxima de la serie) a tan sólo 2280,80 Hm³, con una reducción de más del 80%. Por otra parte hay que tener en cuenta que la serie incluye años en los que el caudal se ha visto fuertemente disminuido por el represamiento a que se ha sometido al río durante décadas pasadas. Además, se presenta una marcada estacionalidad en los aportes líquidos, en todos los años estudiados, que se relaciona con la estacionalidad climática.

Todos estos hechos indican que, aunque existe una fuerte capacidad de aportación sólida por parte del agente fluvial en relación con su caudal, ésta aportación se lleva a cabo de forma muy irregular, de forma que el material aportado por el río es retrabajado totalmente por las mareas y el oleaje en el sector de estudio.

Los medios deposicionales

Son varios los ambientes o medios deposicionales que aparecen asociados en este sector, presentando cada uno de ellos características propias en cuanto a los procesos actuantes y en cuanto a las facies producidas. De este modo, se puede distinguir entre: 1) los submedios presentes en las zonas protegidas o internas, relacionados fundamentalmente con la actividad mareal (canales y marismas), y 2) los submedios asociados a la flecha litoral de cierre del sistema sedimentario (playas y dunas)

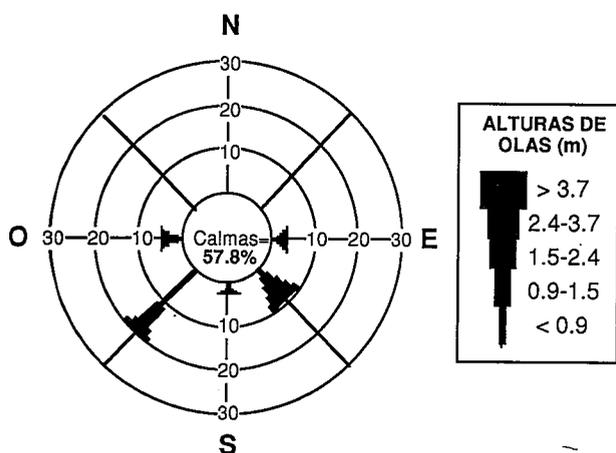


Figura 2.- Diagrama de rosa para el oleaje anual frente a la desembocadura del Guadiana.

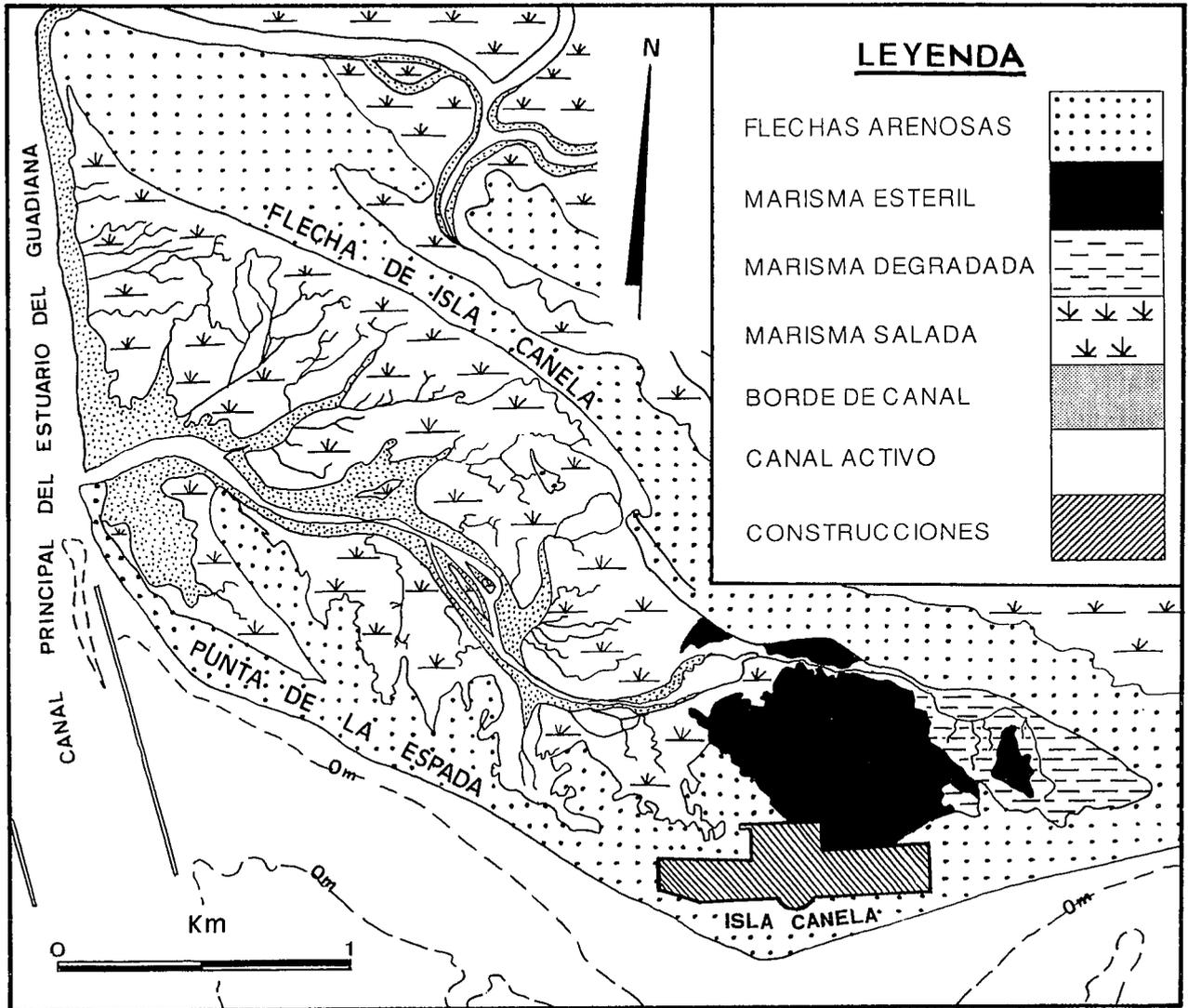


Figura 3.- Esquema cartográfico de unidades fisiográficas y ambientes sedimentarios.

(Fig. 3). Los caracteres diferenciadores de estos medios sedimentarios se indican a continuación.

Canales mareales

Configuran el sistema de drenaje de las zonas mareales que, en este caso, está constituido por un canal distribuidor y un conjunto de canales finalizadores, en el sentido de Zeff (1988). El agua penetra por ellos durante el flujo mareal, para salir en el momento de reflujó. La anchura de estos canales varía desde unos 0,5 m, para los canales finalizadores de orden menor, hasta 15 m para el canal distribuidor. En sección poseen forma de U abierta y de bordes asimétricos, dependiendo la pendiente de los mismos de la madurez y el grado de evolución de la marisma que drenan. Su morfología es meandriforme de alta sinuosidad (>1,5) (Leopold et al., 1964), siendo frecuentes los fenómenos de migración lateral. El lecho de los canales finalizadores tiene un carácter netamente erosivo, impuesto por la acusada asimetría de los ciclos de marea en los que dominan los semiciclos de reflujó,

que pueden llegar a tener una duración de 8 h. y 15 min. Por el contrario, en el canal distribuidor, aunque los ciclos de marea continúan siendo asimétricos, el prisma de marea se mantiene igual en ambos semiciclos, alcanzándose velocidades inferiores durante el reflujó.

Los sedimentos superficiales muestran la presencia de dos poblaciones de tamaños de grano bien diferenciadas (muestras SG-1, 4, 6, 8, y 12 de la Fig. 4), lo que refleja la actuación de corrientes que permiten el transporte de material arenoso en tracción/saltación sobre el fondo (corrientes de flujo y reflujó) y momentos de muy baja energía donde se produce el depósito de material fino transportado en suspensión y/o producto de procesos de floculación (repuntes mareales o "slack tide").

La secuencia típica de un canal activo (Fig. 5) presenta un fondo erosivo sobre el que descansan acumulaciones de conchas y cantos blandos en forma de depósitos residuales. A techo de este depósito residual pueden presentarse sedimentos arenosos o lutíticos, a veces alternantes, con laminación paralela rota por una intensa bioturbación de bivalvos y anélidos, y en su seno pueden

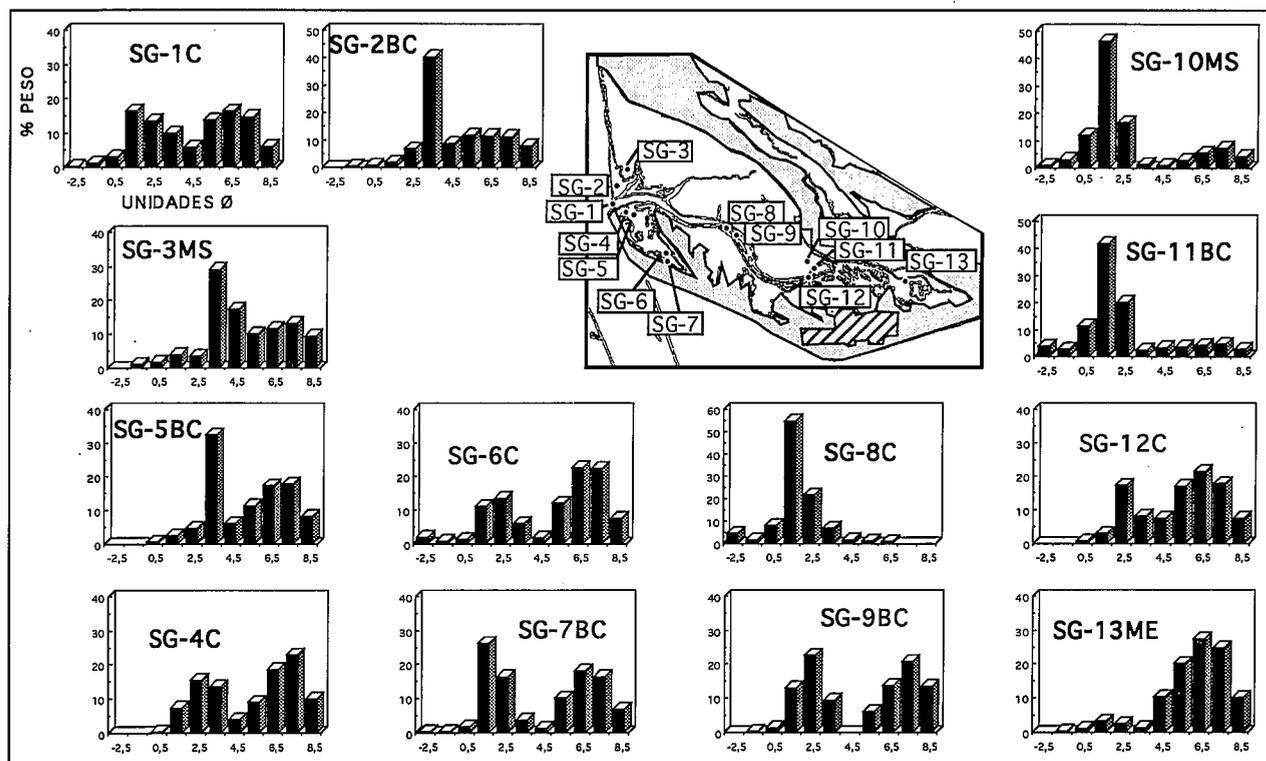


Figura 4.- Representación de los diferentes tipos de distribución granulométrica en los sedimentos superficiales del sector estudiado.

aparecer restos de conchas dispersos. Tanto la secuencia típica como los caracteres texturales de cada uno de los niveles descritos presentan variaciones, sobre todo existen diferencias entre el canal distribuidor (Caño del Pozo) y el resto de los canales finalizadores. De este modo, en el primero de ellos, se constata que el nivel arenoso superior, que aparece en los canales finalizadores, se presenta en forma de una fina capa formada por una laminación alternante de arenas y fangos (Figs. 5 y 6A), que aumenta su espesor a medida que se adentra en zonas más internas, a la vez que el sedimento que lo conforma se vuelve progresivamente más fino, llegando a desaparecer las alternancias (Fig. 5).

Bordes de canal activo

Se sitúan entre los Niveles de Marea Baja Viva Media y Marea Alta Muerta Media. Este submedio forma una estrecha banda paralela a los canales mareales y están mejor desarrollados en las zonas más próximas a la desembocadura del canal distribuidor; mientras que en las zonas más internas y, por tanto, más maduras el canal está limitado por escarpes erosivos de hasta 1 m de altura.

El sedimento que constituye estos bordes de canal es arenoso-limoso y con un alto contenido en materia orgánica (13%), que origina condiciones postdeposicionales reductoras; de ahí su color negro y su intenso olor sáprico. Las distribuciones presentes de tamaños de grano (SG-2, 5, 7, 9 y 11; Fig. 4) muestran, también, dos poblaciones diferentes, entre las que dominan las fracciones arenosas. Este hecho puede deberse a que el borde de canal es afectado solo por uno de los dos repuntes (slacks) del ciclo mareal (pleamar).

Estos sedimentos presentan una laminación paralela fina, aunque su nivel de preservación es extremadamente bajo debido a la intensa bioturbación (Fig. 6B) y a veces pueden presentarse alternancias de láminas arenosas y lutíticas, que reflejan la irregularidad del aporte arenoso del río (Fig. 6D). En las zonas topográficamente más elevadas, las últimas láminas presentan una coloración parduzca debido a la oxidación que sufren, al ser mayor el número de horas de exposición subaérea. A lo largo del canal distribuidor (Caño del Pozo) las facies del borde de canal activo presentan una marcada bipolaridad textural (Fig. 4), siendo mayor el porcentaje de las fracciones arenosas hacia las zonas apicales del mismo y aumentando los tamaños más finos en la zona central. Este hecho debe atribuirse a la existencia de dos áreas fuentes de sedimento arenoso, la primera de las cuales es el canal principal del Río Guadiana, que introduce sedimento arenoso en la boca del canal distribuidor; la segunda es la flecha de cierre erosionada en su zona más apical.

Marisma Salada.

Las llanuras mareales cubiertas por vegetación o marismas saladas están muy bien desarrolladas en toda la zona, situándose topográficamente entre los niveles de Marea Alta Viva Media y Marea Alta Muerta Media, de modo que el número de horas de exposición es mucho mayor que en el caso de los sectores de borde de canal, que se encuentran topográfica y morfológicamente por debajo, pudiendo observarse entre ellos una ruptura de pendiente o un escarpe erosivo entre 40cm y 1m de altura. Las especies de vegetación halófila presentes en estos sectores intermareales muestran una zonación muy

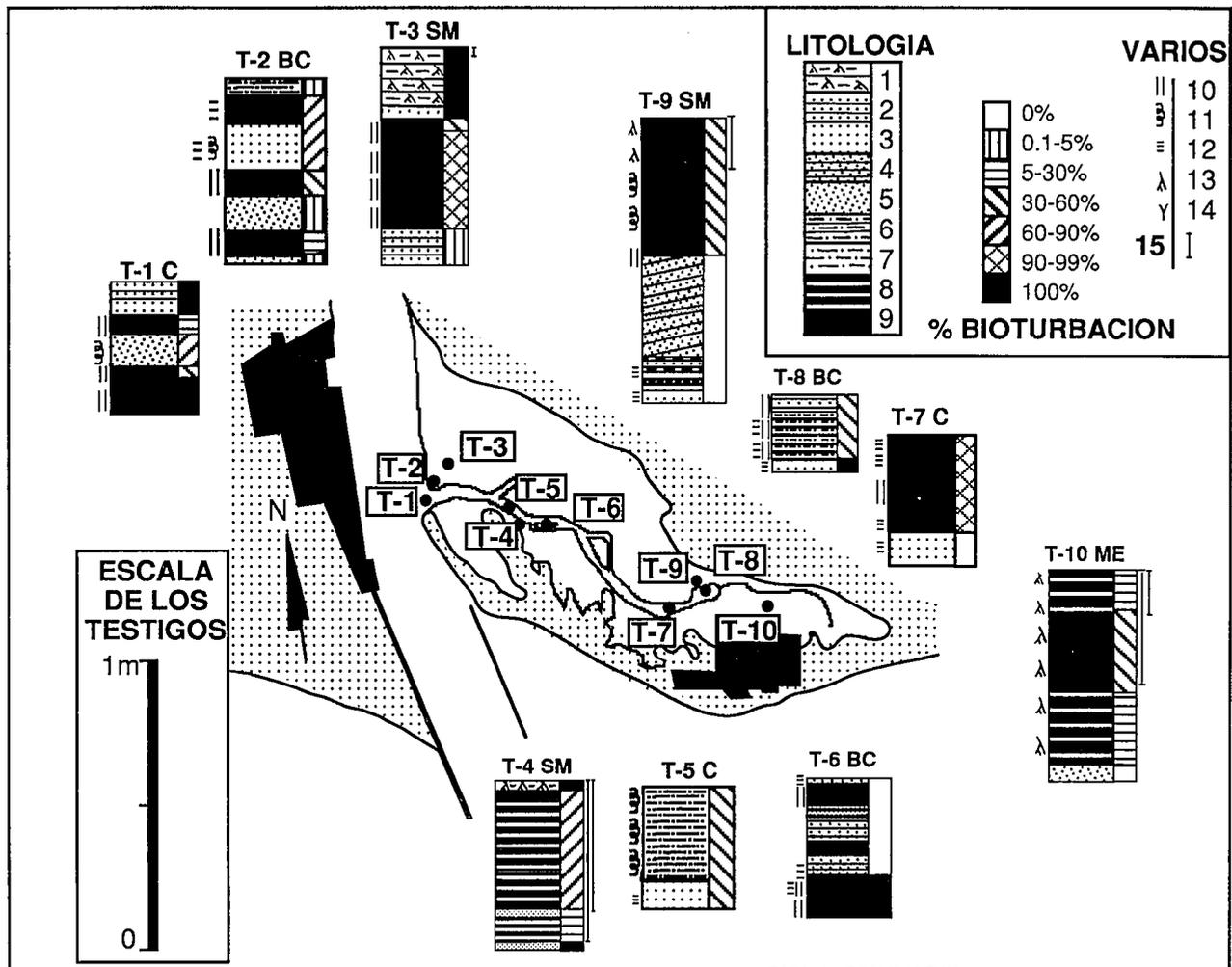


Figura 5.- Esquema de localización de los testigos de sedimento estudiados y secuencias de facies interpretadas. Litología: (1) Aglomeración de raíces (turba), (2) Arena limpia con laminación paralela, (3) Arena limpia masiva, (4) Arena fangosa con laminación paralela, (5) Arena fangosa masiva, (6) Fangoso arenoso con laminación paralela, (7) Fangoso arenoso, (8) Fangoso con laminación paralela, (9) Fangoso masivo. Caracteres varios: (10) Galerías rellenas de arena, (11) Galerías, (12) Fragmentos de conchas, (13) Restos de raíces, (14) Fragmentos dispersos de plantas, (15) Nivel de sedimento con evidencias de oxidación de la materia orgánica.

clara, según las condiciones de sumersión y exposición subaérea (Rubio, 1985; Borrego, 1992).

El sedimento es, desde el punto de vista textural, de grano fino (limo arenoso) (Fig. 4); excepto en las proximidades del canal principal donde es predominantemente arenoso, llegando incluso a haber abundantes conchas dispersas en algunos lugares. Esta fina textura del sedimento está relacionada con los niveles de baja energía del medio, debido a la débil velocidad con la que el agua llega a inundar la marisma, acentuada aún más por el efecto amortiguador que ejercen las plantas. Asimismo tienen lugar procesos de floculación, gracias al microambiente que las plantas son capaces de crear en su entorno para mantener su balance osmótico (Frey y Basan, 1985), dominando en la fracción limo-arcilla las poblaciones con tamaño de grano inferior a 6ϕ (muestras SG-3 y 12 de la Fig. 4).

En los sectores más próximos al canal principal del Río Guadiana se presentan frecuentes láminas de arena gruesa intercaladas con el sedimento fino, que corresponden a periodos de mayor energía relacionados con las crecidas estacionales del Río Guadiana (Fig. 5 y 6C).

La bioturbación por actividad de raíces es muy intensa hasta 0,5 m de profundidad, por lo que las formas de fondo (estructuras sedimentarias) producidas se destruyen en casi su totalidad, pudiéndose observar sólo a veces en los niveles superficiales, donde incluso son cortadas además por grietas de desecación.

Marisma estéril.

Se sitúa por encima del Nivel de la Marea Alta Viva Media, por lo que puede ser considerada como una zona supramareal, que sólo se ve afectada por las mareas vivas extremas. En definitiva, se trata del submedio más continentalizado y evolucionado de todo el sistema mareal, sin que en él exista ya red de drenaje. El contacto con la Marisma salada es gradual. Domina el sedimento arcilloso-limoso (SG-13; Fig. 4) con acumulaciones dispersas de limos arenosos, en forma de trampas de arena de la vegetación sobre el material transportado por el viento, tal como Borrego et al. (1990) indican en otros sectores de esta costa. Grietas de desecación aparecen a veces y el grado de continentalización y dulcificación es

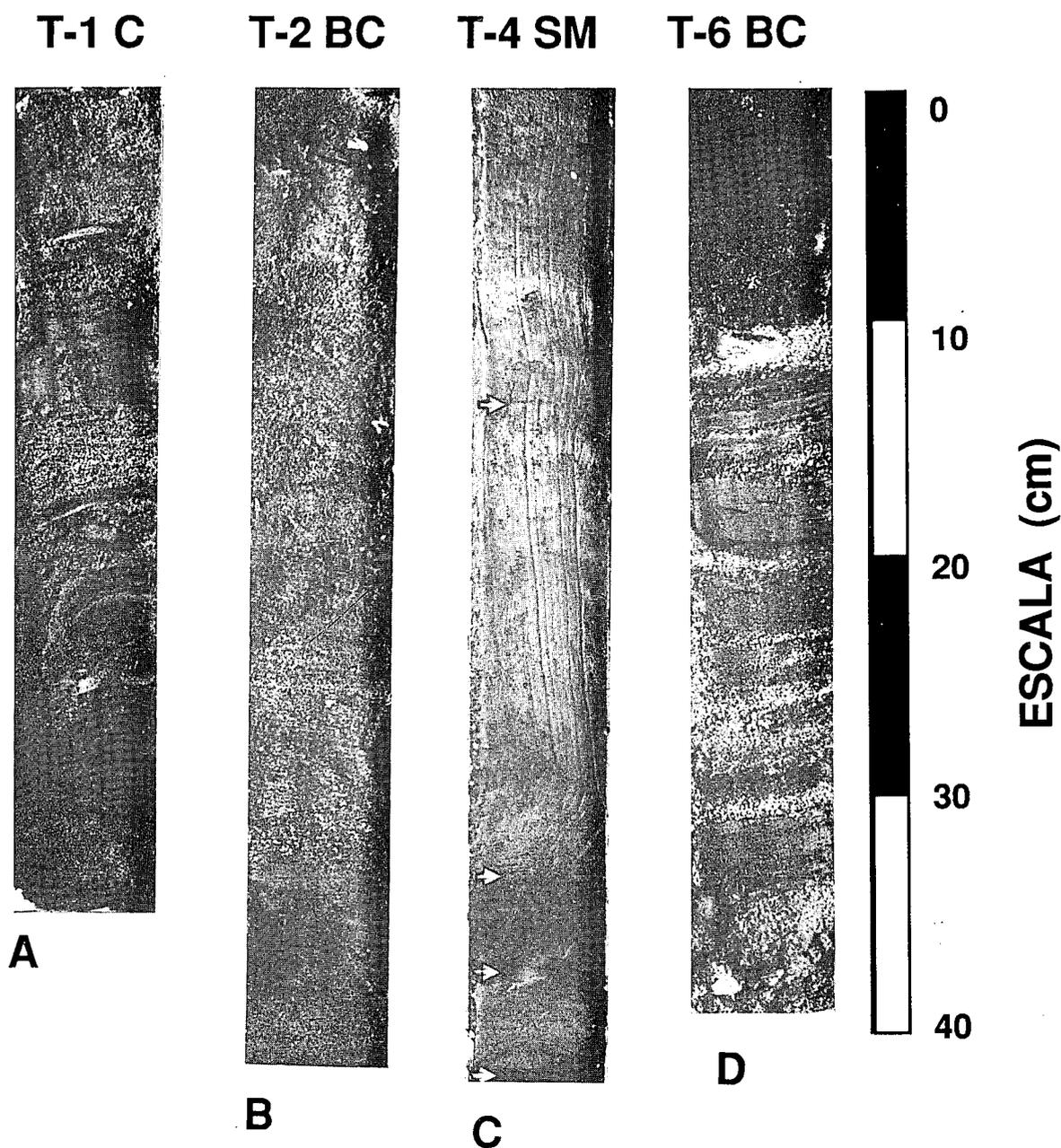


Figura 6.- Fotografías de testigos de sedimento de diferentes medios sedimentarios del sector estudiado. (A) Facies de canal proximal; (B) Facies de borde de canal proximal; (C) Facies de marisma salada; (D) Facies de borde de canal del sector intermedio. Localización en la Fig. 5.

elevado, como demuestra la presencia de algunos tipos de vegetación continental.

Playa abierta.

Se encuentra actualmente en la cara Sur de la Flecha de la Espada, entre el nivel de la Marea Alta Viva Media y el Nivel de Base de las Olas, y constituye una franja de unos 3 Km de longitud desde el extremo occidental de la citada flecha litoral. El sedimento es predominantemente arenoso, y alternan con capas de conchas más o menos continuas. En sección son reconocibles secuencias de cresta y surco culminadas por estructuras típicas de berma, que responden a la dinámica de un *foreshore* de energía media, dominado por la acción del oleaje. Este

tipo de secuencia es similar al que se ha descrito en otras playas de este sector costero (Dabrio, 1982).

Dunas litorales.

Las dunas arenosas se encuentran sobre el *backshore* de la zona de playa expuesta y por encima del nivel de Marea Alta Viva Media de todos los ganchos arenosos (flecha litoral) y, en general, no alcanzan dimensiones demasiado grandes, ya que no superan en ningún caso los 1,5 m. El sedimento que las constituye es arena fina, con una estratificación cruzada muy compleja y estructuras típicas de colapso; ambas estructuras están rotas frecuentemente por la actividad de raíces de las plantas que colonizan la superficie de la duna.

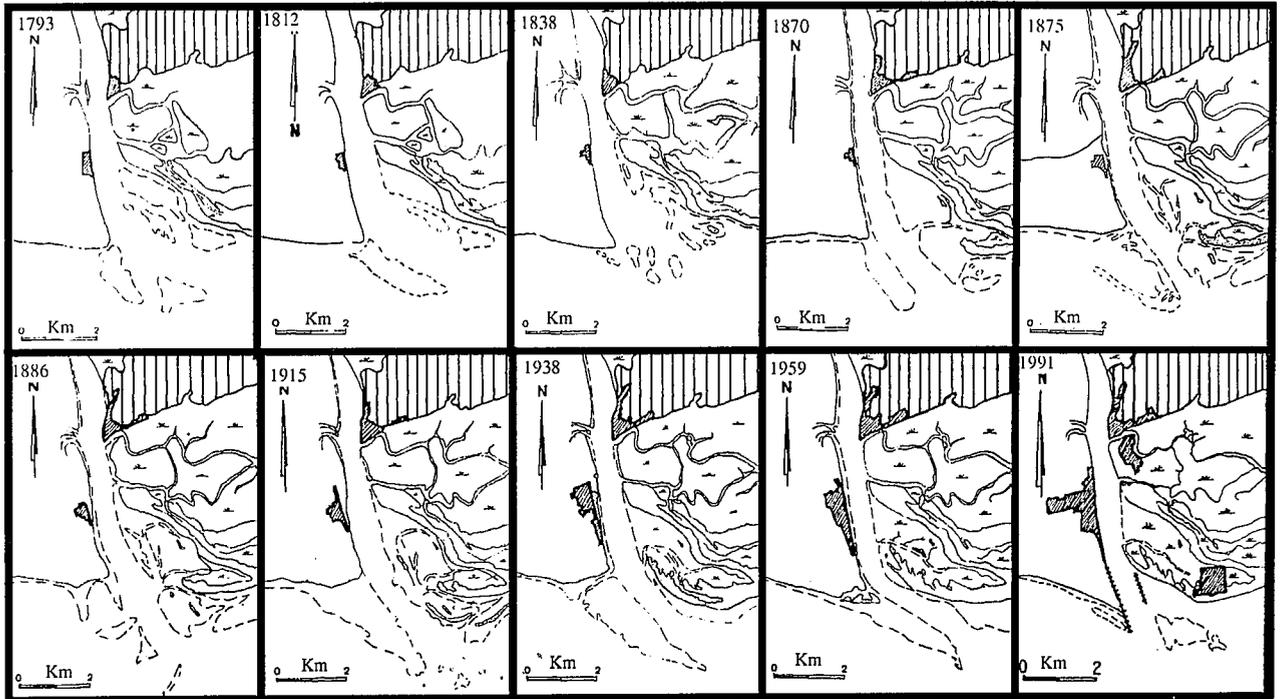


Figura 7.- Evolución cartográfica del sector estudiado entre los años 1793 y 1991.

Evolución histórica

Del estudio cartográfico (Fig.7) realizado a partir de los datos existentes sobre la desembocadura del Río Guadiana en los dos últimos siglos (1793-1991), se deduce una relativa estabilidad de la flecha de Punta de las Arenas; esto indica una evolución previa más rápida en el margen portugués, mientras que en la orilla opuesta se producen durante este periodo los cambios más significativos.

La dirección de entrada y salida de las corrientes de marea hacia y desde el estuario, unido a la actividad de los trenes de olas dominantes y a la acción de la componente de deriva litoral, permite el desarrollo de una plataforma de batida (*swash platform*) en la parte frontal de la flecha de poniente (Punta de las Arenas). En condiciones de dominio de la actividad del oleaje, esta plataforma crece hacia el Este colmatando parte del canal principal del Guadiana y lo obliga a migrar en dirección NE. Durante los periodos de descarga fluvial extrema, el canal principal erosiona la cara occidental de la plataforma de batida y adquiere, de nuevo, una dirección normal a la línea de costa. El carácter recurrente de los periodos de crecimiento y erosión de la plataforma de batida asociada a la Punta de las Arenas y la orientación del canal principal, se desprende del análisis de la evolución batimétrica del sector (Fig. 8), puesta ya de manifiesto por Borrego et al. (1992).

En la orilla oriental se desarrolla una plataforma de batida, adosada a la cara expuesta de la flecha litoral de Isla Canela, y que está bisectada por canales secundarios de flujo (*marginal flood channel*) de dirección SE-NO, y sobre ella migran en dirección NE las barras de batida (*swash bars*). La acreción de barras sucesivas origina el desarrollo de la flechas arenosas, que caracterizan el

margen occidental de la desembocadura del Río Guadiana. En las zonas más internas de esta plataforma se producen condiciones sedimentarias de llanura mareal.

Los datos aportados en este trabajo sobre: a) la actuación de los procesos hidrodinámicos en este sector costero, b) la evolución del sector debida a esta actuación y c) la distribución actual de los productos sedimentarios finales de esta evolución, permiten proponer un esquema de evolución morfo-sedimentaria que los engloba. Dicho esquema consta de 5 estadios sucesivos (Fig. 9), que son:

Estadio 1

En este momento comienza el desarrollo de una plataforma de batida que se sitúa en el margen oriental del canal principal, adosada a la cara expuesta de la última flecha litoral estable (Isla de Canela). Las condiciones sedimentarias iniciales son similares a las que se presentan en zonas de *foreshore* de pendiente alta. El desarrollo regular de barras de batida origina la progradación en dirección SO de esta plataforma, que queda protegida de la acción de los trenes de olas más energéticos por la presencia de bajos arenosos situados en el frente de la flecha litoral del margen occidental, cuyo desarrollo es previo a la instalación de la plataforma.

Estadio 2

La somerización del frente de la flecha oriental se produce gracias al desarrollo continuo de barras de batida, que provocan el cambio de situación de los canales secundarios de flujo. La migración de las barras de batida es más rápida en los periodos posteriores a las roturas de la plataforma de batida de poniente, motivadas por las avenidas fluviales extremas, al ser menor la amortigua-

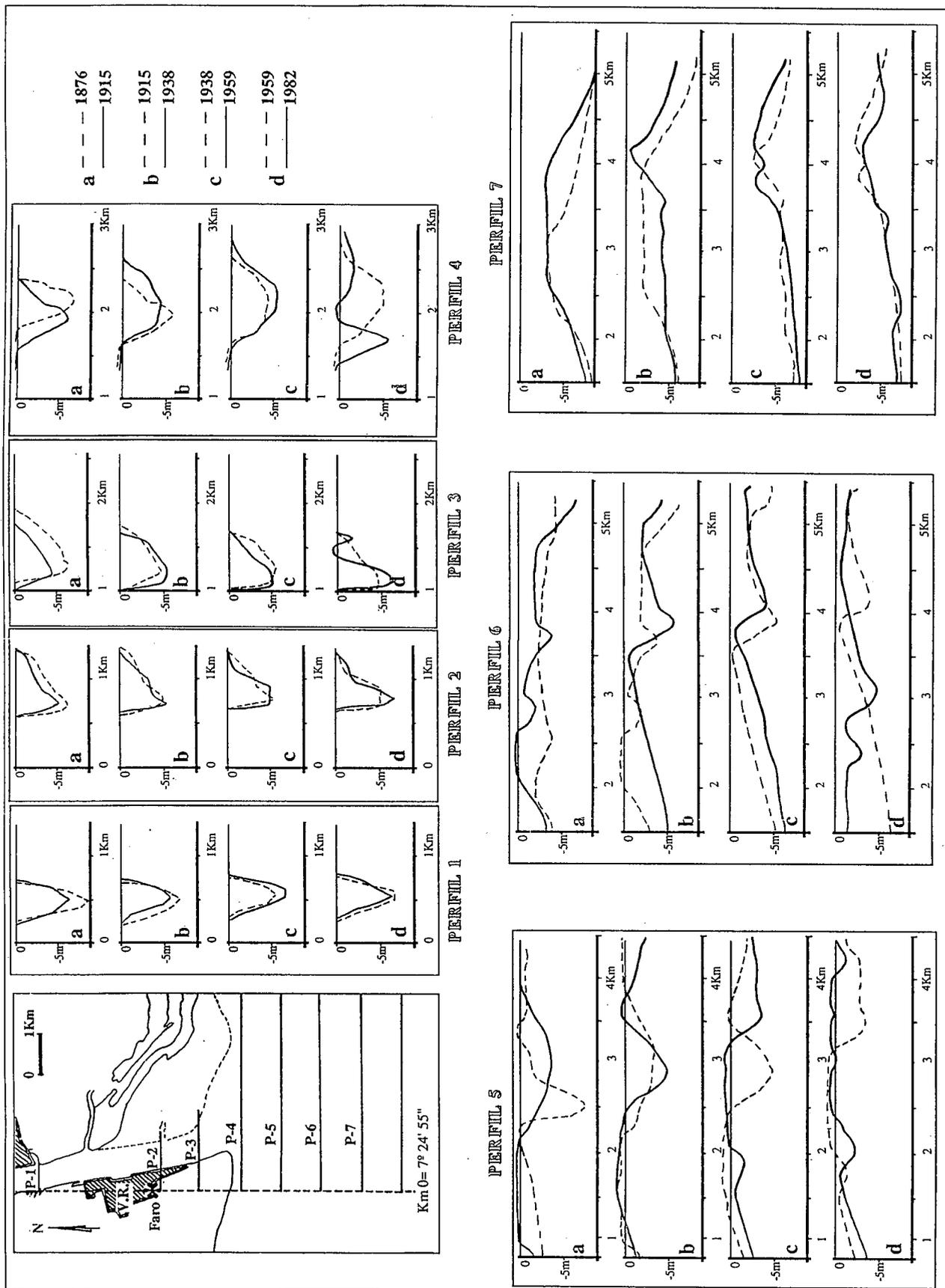


Figura 8.- Evolución batimétrica de diferentes transectos en la desembocadura del estuario del Guadiana, la profundidad 0 coincide con el nivel de la marea Baja Viva Equinocial extrema.

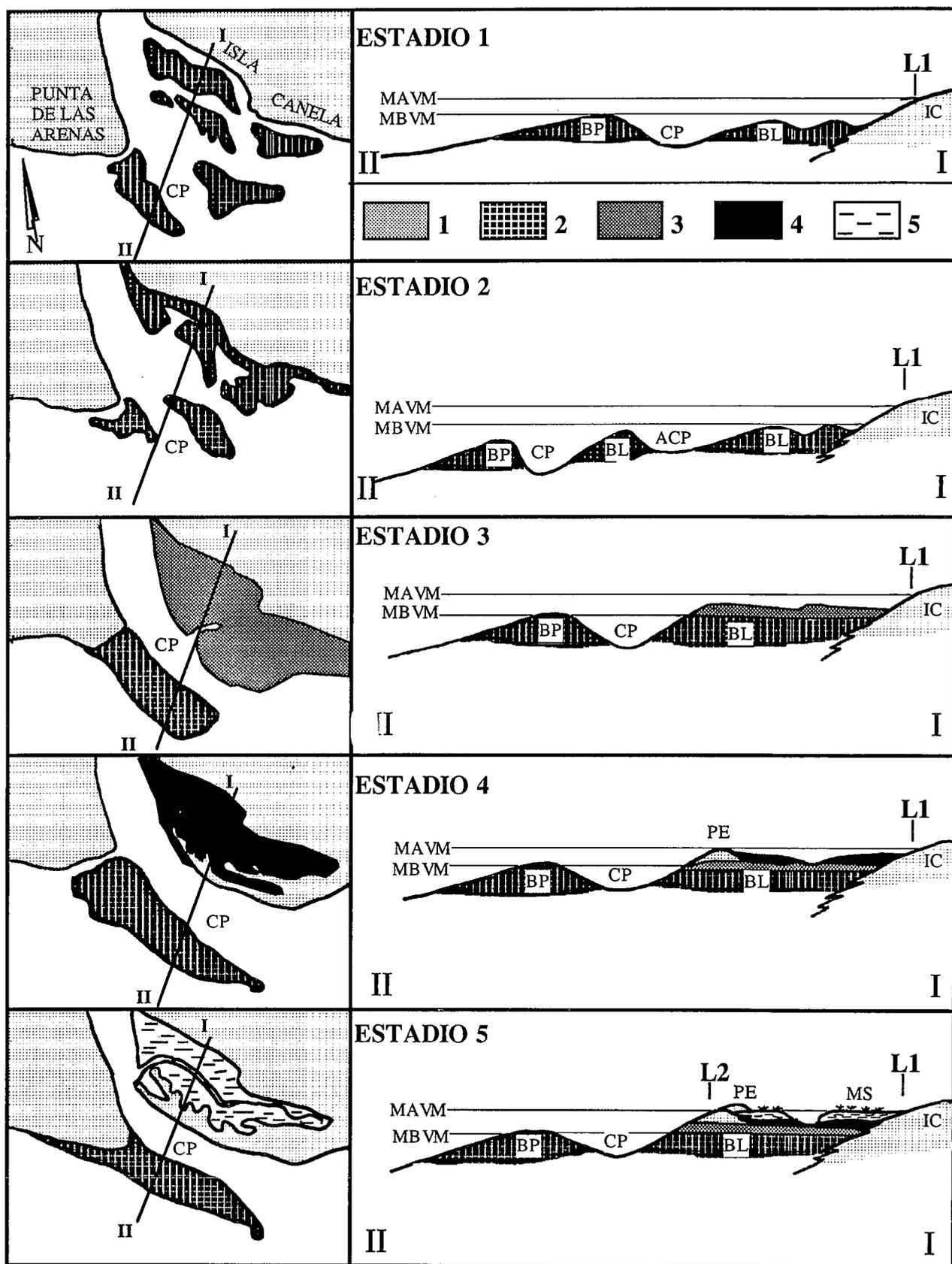


Figura 9.- Modelo conceptual de evolución sedimentaria propuesto para la desembocadura del Río Guadiana en los últimos 200 años. (1) Flechas litorales emergidas, (2) Plataformas de batida, (3) Llanura mareal arenosa, (4) Llanura mareal fangosa, (5) Marisma vegetada, (IC) Flecha litoral de Isla Canela, (BP) Plataforma de batida de Poniente, (BL) Plataforma de batida de Levante, (CP) Canal Principal de Reflujo, (ACP) Canal secundario de Flujo, (PE) Flecha litoral de Punta de la Espada, (MS) Marisma de San Bruno, (L1) Linea de Costa inicial, (L2) Linea de Costa final, (MAVM) Marea Alta Viva Media, (MBVM) Marea Baja Viva Media.

ción que sufren los trenes de oleaje dominante. En este momento se puede completar el crecimiento de la flecha litoral sobre la que se adosan algunas de las barras de batida, sobre todo las que migran en la zona más interna.

Estadio 3

Los sedimentos de la plataforma de batida situada a levante del canal principal alcanzan el nivel de Marea Baja Viva Media. Las barras de batida son retrabajadas por las corrientes de reflujio, sobre todo en las zonas más internas, estableciéndose en ellas condiciones de llanura mareal arenosa. El sistema de canales secundarios de flujo empieza a funcionar como una red de drenaje mareal incipiente. La acreción de las barras de batida en la zona expuesta del margen oriental provoca el crecimiento de la nueva flecha litoral, que comienza a desarrollarse en el borde de la plataforma de batida.

Estadio 4

El crecimiento de la nueva flecha litoral se realiza a partir del adosamiento, sobre su extremo occidental, de sucesivas barras de batida curvas. Los antiguos canales secundarios de flujo pierden su comunicación con la zona externa y drenan únicamente sobre el canal principal del Guadiana, funcionando, a partir de este momento, como la red de drenaje de la llanura mareal que se desarrolla entre la nueva flecha litoral y la antigua. En este sector la disminución de la energía ambiental permite la sedimentación de detríticos finos (llanura mareal arcillosa). El crecimiento transversal de la nueva flecha se vé imposibilitado por la actividad de las corrientes de reflujio y flujo, que actúan ahora exclusivamente en el canal principal del estuario, al desaparecer los canales secundarios de flujo.

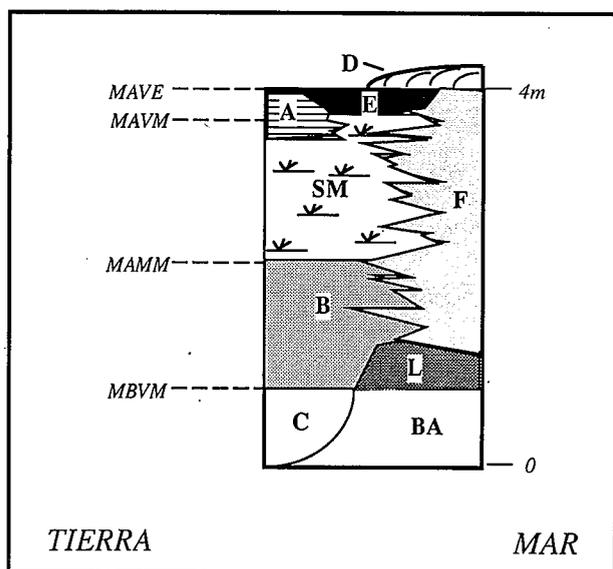


Figura 10.- Secuencia de facies deposicionales idealizadas propuesta para el sector estudiado. BA: Plataforma de batida, C: canal submareal, L: llanura mareal arenosa, F: flecha litoral, B: borde de canal/llanura mareal fangosa, SM: marisma salada, E: marisma estéril, A: marisma de gradada y D: dunas litorales.

Estadio 5

El crecimiento continuo de la nueva flecha litoral permite establecer, de forma definitiva, condiciones exclusivamente mareales en la zona interflecha y la sedimentación de detríticos finos origina el desarrollo y crecimiento rápido de cuerpos de marisma mareal, situados sobre depositos previos de llanura mareal y/o borde de canal mareal activo.

La secuencia de facies deposicionales producida por el esquema de sedimentación propuesto (Fig. 10), comienza por facies de arenas gruesas y muy gruesas de los depositos de plataforma de batida (BA) que pasan lateralmente a facies de canal submareal (C). Sobre los sedimentos de plataforma de batida y por debajo del nivel de Marea Alta Muerta Media, se instalan depositos de llanura mareal arenosa (L) y sobre la misma se disponen los depositos de alta energía de la flecha litoral (F), que completan la secuencia de relleno marino en el sector externo. En la zona protegida del sistema y sobre los depositos de llanura mareal arenosa o en su caso el canal submareal, se desarrolla una llanura mareal lutítica y/o facies de borde de canal (B); que prosiguen entre los niveles de Marea Alta Muerta Media y Marea Alta Viva Media, con depositos de marisma salada (SM), y por encima de éste último nivel, culmina la secuencia con facies de marisma estéril (E) en los sectores internos. Finalmente se instalan las dunas litorales (D).

Discusión y conclusiones

El modelo de progradación-agradación, que se propone en este trabajo, explica la formación de macroformas en la zona más meridional de la desembocadura del Estuario mesomareal del Río Guadiana durante los últimos doscientos años. La morfología y evolución de estas macroformas son producto de la acumulación de sedimentos, transportados por la corriente de deriva litoral y el reflujio mareal, y que son retrabajados por acción del oleaje.

La evolución sedimentaria de la flecha litoral situada en el borde occidental (Punta de la Arenas) está controlada por la actividad de la componente de deriva litoral, que suministra el sedimento, y la actividad de las olas, responsables de la migración y acreción de las barras de batida que construyen la macroforma. Por el contrario, la sedimentación en el borde oriental responde a la actividad de las corrientes mareales de reflujio y trenes de olas refractados. Las primeras erosionan la plataforma de batida occidental y ponen sedimento a disposición de trenes de olas refractados de baja energía, que construyen barras de batida curvas cuya acreción sobre el extremo de las flechas arenosas orientales, posibilita su crecimiento en sentido NO. Estas diferencias morfológicas y sedimentarias entre ambos márgenes reflejan el efecto de las condiciones hidrodinámicas locales, y explican las notables diferencias que presenta el cierre de este estuario con los modelos propuestos por Wright (1977), para desembocaduras fluviales dominadas por olas. a la vez que muestra, por el contrario, evidentes similitudes con

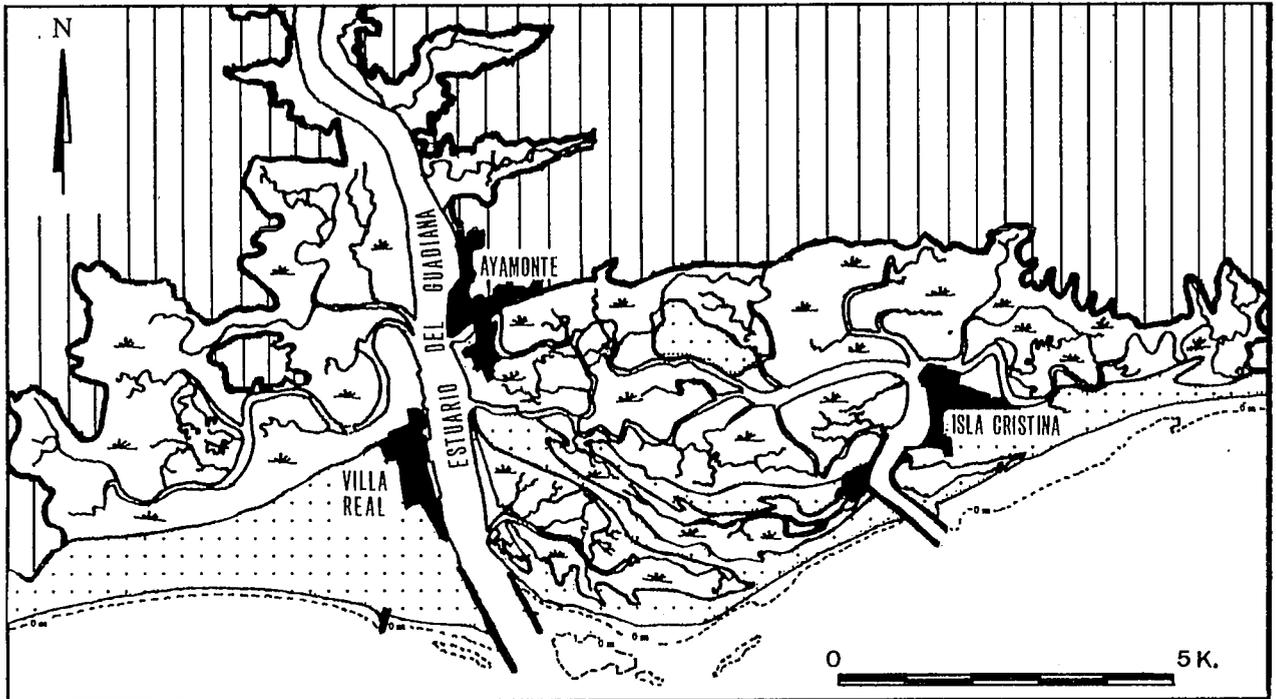


Figura 11.- Situación actual de las diferentes unidades morfo-sedimentarias asociadas al sector marino del Estuario del Guadiana. La leyenda de signos se corresponde con la utilizada en la Fig. 3.

los modelos morfo-dinámicos propuestos por Hayes (1975 y 1980) y Sha (1990), para deltas de reflujo mareal (ebb tidal deltas) en la costa de Georgia (U.S.A.) y en el mar de Wadden, respectivamente.

La incidencia de los trenes de olas dominantes unida al sentido de las corrientes mareales de la zona abierta provoca la asimetría morfológica del delta de reflujo; lo que favorece el mayor desarrollo inicial de la plataforma de batida situada a levante del canal principal de reflujo y la rápida agradación posterior del margen opuesto, al que el oleaje llega ya refractado y con menor energía. Este esquema dinámico corresponde con la "situación D" del modelo propuesto por Sha (1989), en el que la asimetría del delta de reflujo está bien definida a causa de la dirección de las olas dominantes y de las corrientes mareales que origina el desplazamiento de la onda de marea en el exterior del sistema.

La morfología final que presenta el sistema deposicional, que comprende también facies producidas durante etapas anteriores al periodo temporal estudiado en este trabajo (Fig. 11), muestra claramente muchas afinidades con estuarios dominados por la acción del oleaje (p.e., Darlymple et al., 1992), ya que las macroformas que se desarrollan en la desembocadura estuarina consisten en alineaciones de cordones sucesivos de flechas litorales, entre las cuales se desarrollan complejos mareales. La morfología resultante de todo el sistema del Guadiana asemeja la de un aparato deltáico (fluvial y/o mareal). En cualquier caso, habrá que diagnosticar claramente la procedencia de las arenas que conforman las sucesivas flechas litorales.

Se hace esta afirmación con independencia de que los valores medios de los procesos dinámicos actuantes (altura media del oleaje y rango mareal) permitan clasificar

teóricamente este sector costero como de energía mixta y dominado por la acción de las mareas, de acuerdo con el diagrama de Hayes (1979). Habría que considerar, además, otros parámetros como apuntan Davis y Hayes (1984); concretamente, en los sistemas estuarinos ubicados a lo largo de la costas de Huelva, ha tenido una importancia fundamental la variación, en el sentido de decrecimiento, del prisma mareal; como ya ha sido apuntado (Borrego, 1992 y Borrego et al., 1993).

En este contexto, la posición del nivel del mar a lo largo de este sector costero parece que se ha mantenido constante después de la elevación holocena. El aporte sedimentario ha sido cualitativamente elevado, con lo que la desembocadura se ha rellenado en los últimos años y parece que ha sido dominante el sedimento introducido por la componente de deriva litoral, mientras que el sedimento en suspensión aportado por el río ha pasado a través de la línea de costa. En esta situación, durante el tiempo reciente, la acción del oleaje ha dominado en la desembocadura del Río Guadiana y las corrientes mareales han aportado sedimento a la marisma de su desembocadura. La interacción de las corrientes de salida del estuario (reflujo mareal más la componente fluvial) con las corrientes de reflujo mareal que marchan paralelas a la línea de costa, ha producido zonas de sombra dinámica favorables al asentamiento del sedimento; que el oleaje se encarga de reelaborar. Este ha sido, pues, el marco dinámico donde se desarrolla el modelo de crecimiento y desplazamiento concurrentes de canal mareal, flecha litoral y marismas propuesto en este trabajo.

Este trabajo está basado en el trabajo de Tesis doctoral del primero de los autores y se ha financiado con proyectos de investigación de la

CICYT (PS 89-0113) y Junta de Andalucía (P.A.I., Grupo 4070). El Puerto Autónomo de Huelva cedió el material cartográfico histórico, que se utiliza en este trabajo. M. López Gillén e I. Jiménez Fuentes participaron en las campañas de recogida de muestras y testigos.

Bibliografía.

- Allen, J.R.L. (1993): An introduction to estuarine lithosomes and their controls. In: *Sedimentology Review/1* (V.P. Wright, Ed.), Blackwell Scientific Publ., 1: 123-138.
- Borrego, J., (1992): *Sedimentología del Estuario del Río Odiel. Huelva, SW España*. Tesis Doct. Univ. Sevilla, 308 pp. (Mem. inédita)
- Borrego, J., Morales, J.A. y Pendón, J.G., (1990): Submedios asociados a un sector intermareal de la Ría de Huelva. *Geogaceta*, 7: 90-92
- Borrego, J., Morales, J.A. y Pendón, J.G., (1992): Elementos morfodinámicos responsables de la evolución reciente del estuario bajo del Río Guadiana (Huelva). *Geogaceta*, 11: 86-89.
- Borrego, J., Morales, J.A. y Pendón, J.G., (1993): Holocene filling of an estuarine lagoon along the mesotidal coast of Huelva: The Piedras river mouth, Southwestern Spain. *Jour. Coastal Res.*, 9: 242-254.
- Borrego, J., Morales, J.A. y Pendón, J.G., (in press): Holocene Estuarine surface facies along the mesotidal Coast of Huelva, S.W. Spain. In: *Tidal Clastic 92* (Flemming, W.R., Ed.), I.A.S. Special Publication.
- Borrego, J. y Pendón, J.G., (1989): Caracterización del ciclo mareal en la desembocadura del río Piedras (Huelva). *XII Congr. Esp. Sed.*, Bilbao, Comunicaciones, 1: 97-100.
- Courau, P. (1983): *Manuel des Analyses Chimiques en Milieux Marin*. Centre Nat. pour l'Exploration des Océans. 395 p.
- Dabrio, C. J., (1982): Sedimentary structures generated on the foreshore by migrating ridge and runnel systems on microtidal and mesotidal coast on S. Spain. *Sedim. Geol.*, 32: 141-151.
- Darlymple, R.W. (1992): Tidal Depositional Systems. In: *Facies Models. Response to Sea Level Change* (R.G. Walker y N.P. James. Eds.). *Geol. Ass. Canada*, 195-218.
- Darlymple, R.W., Zaitlin, B.A. y Boyd, R. (1992): Estuarine Facies Models: Conceptual Basis and Stratigraphic Implications. *Jour. Sed. Petrol.* 62: 1130-1146.
- Davis, R.A. y Hayes, M.O., (1984): "What is a wave dominated coast?" *Mar. Geol.*, 60: 313-329.
- Frey R.W. y Basan, P.B. (1985): Coastal Salt Marshes. In: *Coastal Sedimentary Environments* (R.A. Davis Jr., Ed). *Springer-Verlag*. 225-301.
- Frey, R.W. y Howard, J.D., (1986): Mesotidal estuarine sequences: a perspective from the Georgia Bight". *Jour. Sed. Petrol.*, 56: 911-924.
- Hayes, M.O., (1975): Morphology of sand accumulations in estuaries. In: *Estuarine Research* (Cronin, L.E., Ed.), *Academic Press*, New York, 2: 3-22.
- Hayes, M.O. (1980): General Morphology and Sediment Patterns in Tidal Inlets. *Sedim. Geol.* 26: 139-156.
- Leopold, L.B., Wolman, H.G. y Miller, J.P. (1964): *Fluvial Processes in Geomorphology*. W.H. Freeman, San Francisco, 522 p.
- Melières, F., (1974): *Recherche sur la dynamique sédimentaire du Golfe de Cadix (Espagne)*. These Univ. Paris VI; 325 p.
- Miall, A.D. (1984): *Principles of Sedimentary Basin Analysis*. Springer-Verlag, 490 p.
- Nichols, M.M. y Biggs, R.B., (1985): Estuaries. In: *Coastal Sedimentary Environments* (R.A. Davis Jr., Ed). *Springer-Verlag*, 77-186.
- Reinson, G.E. (1992): Transgressive barrier island and estuarine systems. In: *Facies Models. Response to Sea Level Change* (R.G. Walker, Ed.), *Geol. Ass. Canada*, 179-194.
- Rubio, J.C., (1985): *Ecología de las Marismas del Odiel*. Tesis Doct. Univ. Sevilla. 603 p. (Mem. inédita).
- Sha, L.P. (1989). Variation in ebb-delta morphologies along the West and East Frisian Islands, The Netherlands and Germany. *Mar. Geol.* 89: 207-228.
- Sha, L.P., (1990): *Sedimentological studies of the ebb tidal deltas along the West Frisian Islands, The Netherlands*. Tesis Univ. Utrecht, *Geol. Ultraiectina*, 64, 160 pp.
- Wright, L.D. (1977): Sediment transport and deposition at river mouths: A synthesis. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 88: 837-868.
- Zeff, M.L., (1988): Sedimentation in a salt marsh- tidal channel system, southern New Jersey. *Mar. Geol.* 82:33-48.

Recibido el 3 de Mayo de 1993.

Aceptado el manuscrito revisado el 7 de Marzo de 1994.