

Caracterización de las pautas geomorfológicas de la flecha litoral de Doñana

A. Rodríguez Ramírez¹, P. Siljeström¹, L. Clemente¹, J. Rodríguez Vidal², A. Moreno¹

¹ Departamento de Geoecología. Instituto de Recursos Naturales y Agro biología de Sevilla (CSIC). Apartado de Correos 1052, 41080 Sevilla.

² Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Huelva. 21819 Palos de la Frontera (Huelva).

RESUMEN

Se identifica y estudia la evolución de los diferentes cuerpos sedimentarios del tramo final de la desembocadura del Guadalquivir en su margen derecha (flecha litoral de Doñana). Se trabaja sobre una subescena de las bandas 4 y 7, correspondiente a una imagen TM, tomada en agosto de 1991. Dichas bandas se somete a realce de contraste, así como a otros de tipo espacial y espectral, buscando la metodología apropiada para cada unidad. La información así obtenida se contrasta con otras metodologías geomorfológicas convencionales.

PALABRAS CLAVE: Doñana, geomorfología, Thematic Mapper, filtros de realce de borde.

ABSTRACT

Different sedimentary bodies placed of the right bank of the Guadalquivir River in the neighbourhood of its mouth, have been identified. Subscenes in bands 4 y 7 were selected from a TM image taken in August 1991. These images were subjected to processes of contrast, spatial and/or spectral enhancement, always looking for the most suitable methodology for differentiating the geomorphological units. The information extraction obtained with image processing has been compared with other conventional methodologies.

KEY WORDS: Doñana, geomorphology, Thematic Mapper, edge enhancement filters.

INTRODUCCION

Las imágenes procedentes del sensor Thematic Mapper, a bordo del Landsat-5, han demostrado en numerosos trabajos los buenos resultados que ofrece en su aplicación al estudio geomorfológico de sistemas naturales (Siljeström et al., 1990).

El objetivo del presente estudio es caracterizar las pautas morfodinámicas de la flecha litoral de Doñana durante el Holoceno, con idea de modelizar más adelante su comportamiento, a medida que las variables cambien con el tiempo o por acción antrópica.

AREA DE ESTUDIO: CARACTERISTICAS GEOMORFOLOGICAS

La zona a estudiar comprende el extremo SE del Parque Nacional de Doñana (Fig. 1) y ocupa la margen derecha de la desembocadura del río Guadalquivir.

Este área integra, en una superficie relativamente pequeña (120 km² aprox.), espacios distintos pertenecientes a los tres sistemas morfogenéticos diferenciados en dicho Par- que: litoral, eólico y estuarino (Siljeström et al., 1994), que constituyen las unidades morfológicas de flecha litoral (litoral y eólico) y marisma (estuarino).

El sistema litoral está representado por la playa, donde se aprecia una fuerte dinámica generada a

partir de los vientos dominantes del SO, que crean sucesivos trenes de olas e inducen una corriente de deriva litoral paralela a la costa, hacia el E y SE. Esta corriente origina una constante progradación de la costa, mayor cuanto más orientada hacia el Sur esté el tramo costero.

Las arenas que van quedando fuera de la influencia marina son movilizadas por el viento en un primer cordón de dunas litorales, que constituyen el comienzo del sistema eólico. Dentro de la zona estudio, este último sistema comprende un sector de arenas móviles con frentes dunares y "corrales", o áreas interdunares, asociados (Siljeström y Clemente, 1990); otro de dunas estabilizadas por la vegetación, en el extremo meridional, y un tercero formado por una serie de cordones arenosos de escasa altura, paralelos entre sí, con dirección NO-SE y separados por depresiones de anchura variable y fondo plano y húmedo (Vanne y Menanteau, 1979). Este último, conocido localmente como "cordones de la Marismilla", constituye una serie de antiguas crestas de playa y surcos *-ridge and runnel-*, que se encuentran parcialmente enterrados por el avance de las arenas móviles.

El sistema estuarino está constituido por depósitos aluviales finos (limos y arcillas) transportados por el Guadalquivir. Su acumulación se ha visto favorecida por el avance hacia el SE del sistema litoral y por la erosión antrópica producida aguas arriba. De hecho, en los últimos 2000 años, se ha pasado de una marisma con fuerte influencia ma-

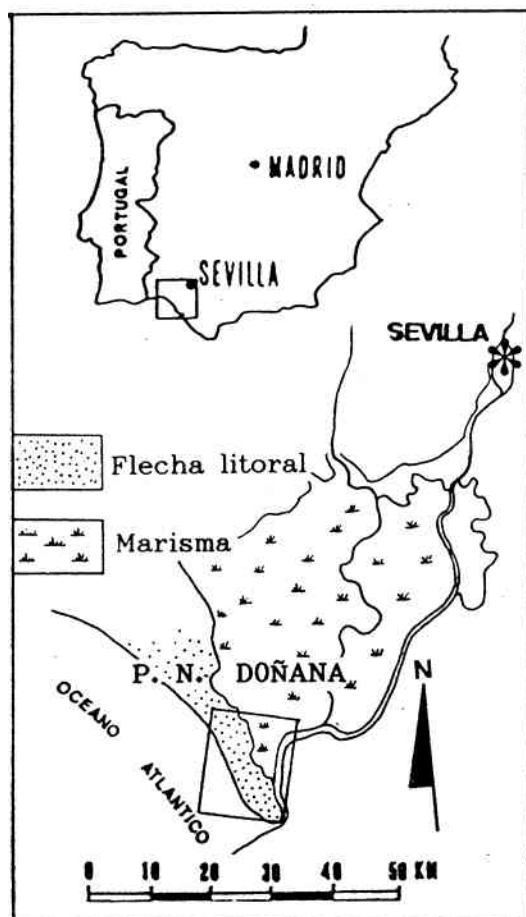


Fig. 1. Localización del área de estudio.

real, a otra de gran madurez, donde la inundación se produce sólo en la época de máxima pluviosidad (Siljeström, 1986). Según Vanney (1970), que divide la marisma en alta, media y baja, corresponde a esta última la integrada en el área de estudio (m sobre el nivel del mar).

La actual configuración morfológica de este sector costero es consecuencia del último ascenso postglacial del nivel del mar, durante el Holoceno. Este avance transgresivo, denominado Flandriense, alcanzó su máximo en torno al 6.500 B.P., probablemente 2-3 m. por encima del nivel actual (Zazo et al., 1994). La intensa dinámica erosivo-sedimentaria generada, una vez se estabilizó el nivel del mar, supuso una marcada regularización del trazado costero.

La geometría y el tamaño de las formas acumulativas litorales están relacionadas con momentos de mayor o menor progradación, vinculados con el clima; de tal forma que bajo condiciones anticiclónicas se produce mayor entrada de agua atlántica y, por tanto, aumento de la progradación costera. Por el contrario, en condiciones de bajas presiones, se produce menor entrada de agua atlántica, con disminución de la corriente de deriva, no progradación y, por consiguiente, formación de grandes surcos y superficies de erosión que separan las flechas (Zazo et al., 1994). A menor escala, el régimen estacional condiciona cambios en la inten-

sidad de esta corriente; en verano se produce un aumento, debido a la fuerte evaporación que se verifica en el Mediterráneo (Cano y Fernandez, 1986).

Los estudios geomorfológicos en los sistemas litorales de las costas sur-peninsulares (Zazo et al., 1994 y Lario et al., en prensa) evidencian cuatro épocas de mayor progradación costera a nivel regional, a partir del máximo interglaciario o Flandriense (6.500 años BP). Estos periodos son entre 6.900-4.000 años BP (H1), 4.000-2.500 años BP (H2), 2.500-1.000 años BP (H3) y desde 1.000 años BP hasta la actualidad (H4), separadas por unos periodos erosivos, o de no progradación hacia los 4.000 años BP y 1.000 años BP.

La flecha litoral de Doñana queda englobada en los dos últimos periodos progradantes (H3 y H4), con una edad para los depósitos más antiguos de 1.800 años BP (Zazo et al., 1994).

MATERIALES y METODOS

En el presente estudio se utiliza una subescena de 500 x 600 pixels, recortada sobre las bandas 4 y 7 de una imagen 1M, correspondiente a agosto de 1991 (figs. 2 y 3). Dichas bandas han sido escogidas en función del análisis de correlación entre todos los canales que constituyen la imagen. En efecto, las bandas 4 y 7 muestran valores de correlación relativamente bajos, además de reunir las características espectrales de la vegetación (la primera) y de la geología (la segunda), que las.



Fig. 2. Imagen TM (Banda 4) de la zona de estudio

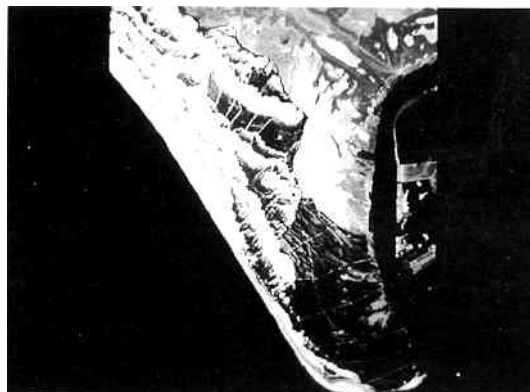


Fig. 3. Imagen TM (Banda 7) de la zona de estudio.

hacen idóneas para este tipo de estudio (Wood y Beck, 1986; Siljeström et al., 1993).

La subescena correspondiente al área de estudio fue procesada en un equipo Intergraph, utilizando software ISI-2. En primer lugar se procedió a un realce de contraste, por estiramiento lineal de sus respectivos histogramas. Posteriormente se aplicaron filtros de detección de borde, en particular el de Kirsch y el Compass. El primero (A) aplica dos núcleos específicos de 3 x 3 a la vecindad de cada píxel. El mayor valor absoluto, resultante de estas dos operaciones, será asignado al píxel central. El segundo, denominado Compass, es un filtro detector de bordes con un operador de gradiente que aplica el núcleo (B) a cada píxel, obteniéndose una imagen resultante con un característico relieve virtual.

$$\begin{array}{cc} \text{(A)} & \begin{array}{ccc} 5 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{array} & \begin{array}{ccc} -3 & -3 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \end{array} & \text{(B)} & \begin{array}{ccc} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{array} \end{array}$$

RESULTADOS y DISCUSION

Procesado de imágenes

Para determinar la evolución de la zona de estudio, a lo largo del Holoceno, se comenzó caracterizando los distintos sistemas morfogenéticos que la integran (litoral, eólico y estuarino) en las bandas 4 y 7, previamente realzadas, destacando los buenos resultados que ofrece la primera (Fig. 2 y 3).

Dentro de la flecha litoral se diferencia, en primer lugar, el sistema de dunas móviles (sistema morfogenético eólico) así como la playa (sistema litoral), debido a los altos valores de reflectancia que presentan las arenas silíceas desprovistas de vegetación que los constituyen. Intercalados entre los frentes de dunas móviles aparecen los valles ó corrales, de fondo plano y húmedo, por lo que están densamente cubiertos de vegetación. Dichos corrales muestran tonos oscuros, ya que reflejan la cobertura vegetal y humedad superficial del sustrato en ambas bandas. Esta misma respuesta aparece en el extremo SE de la flecha, debido al gran bosque de pinos que cubre dicha zona.

El área ocupada por la marisma (sistema morfogenético estuarino) aparece en tonos grises, que se vuelven más oscuros en zonas elevadas con gran cobertura vegetal ("vetas y paciles"), mientras que en zonas deprimidas y descubiertas ("caños y lucios") muestran tonos más claros. Esto es debido a la mayor salinidad y períodos de inundación estacionales que presentan dichas zonas, lo que impide el asentamiento de comunidades vegetales.

A continuación, con objeto de determinar las diferentes morfologías erosivas y acumulativas de cada uno de los sistemas morfogenéticos, se procedió a la aplicación de una serie de filtros, obteniéndose los mejores resultados con los de tipo Kirsch y Compass sobre la banda 7 (Figs. 4 y 5),

por lo que sólo son éstos los que se discuten en el presente trabajo.

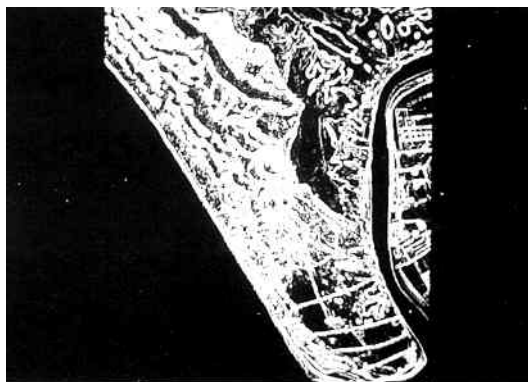


Fig. 4. Imagen resultante de la aplicación de un filtro Kirsch a la banda 7.

Los filtros de Kirsch y Compass sirven para realzar rasgos de alta frecuencia, esto es, para detectar bordes. Las imágenes resultantes realzan los desniveles topográficos, por insignificantes que sean, remarcándolos en función de su importancia orográfica. Este tratamiento ha permitido la diferenciación de estructuras erosivas, así como la de pequeños cuerpos progradantes, pudiéndose establecer su grado de importancia.

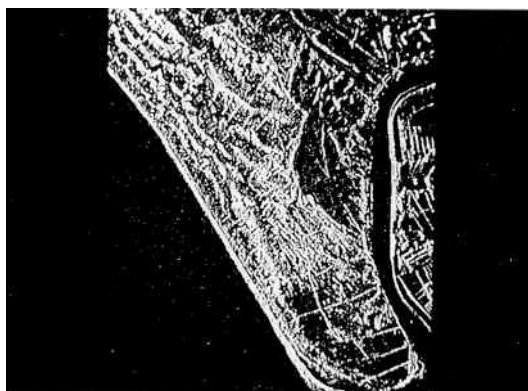


Fig. 5. Imagen resultante de la aplicación de un filtro Compass a la banda 7.

La aplicación del filtro de Compass ha resultado de gran utilidad en áreas de marisma (origen estuarino) de escaso relieve, ya que permiten la diferenciación de antiguos cauces fluviales que presentan diferencias topográficas inapreciables a simple vista en otras imágenes, incluso a escala de detalle (foto aérea escala 1:15.000) (Fig. 5). Por otro lado, el filtro tipo Kirsch ha permitido una mejor diferenciación en la flecha litoral, realzando la lineaciones ligeramente mayores que ofrecen las pautas morfodinámicas generales (Fig. 4).

Este procesado de imágenes nos permite en definitiva localizar todas aquellas estructuras erosivo-sedimentarias que nos permitan caracterizar geomorfológicamente el área de estudio, estableciendo seguidamente una síntesis geomorfológica de éste, (Fig. 6).

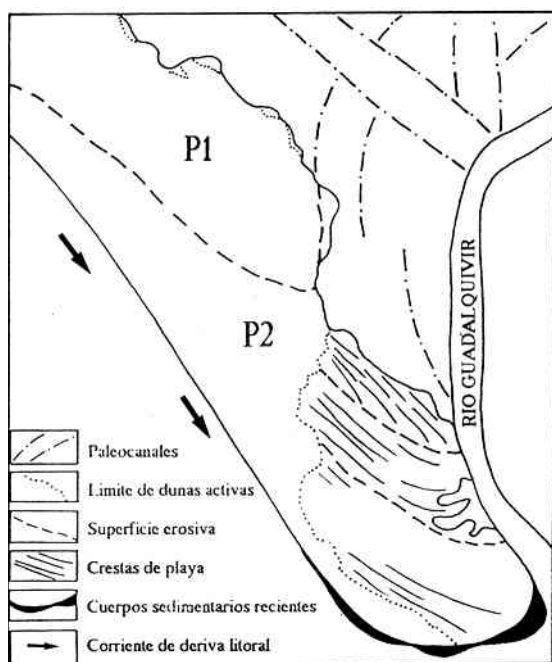


Fig. 6. Síntesis geomorfológica del área de estudio a partir de Imágenes TM

Estos rasgos geomorfológicos, determinados a partir del estudio de la imagen 1M, se corroboran, a nivel de campo, con la aplicación de diferentes metodologías geomorfológicas convencionales, tales como medidas isotópicas (Zazo et al., 1994), análisis morfosedimentarios y de dinámica litoral, permitiendo establecer con mayor seguridad las diferentes estructuras geomorfológicas diferenciadas en la imagen 1M, para posteriormente determinar las claves de la evolución morfodinámica del área.

Estudio geomorfológico

Dentro del sistema morfogenético litoral y eólico (Siljeström et al., 1994), que constituye la flecha litoral, se delimitan una serie de estructuras erosivas y acumulativas, estableciéndose su evolución y grado de importancia.

Inicialmente se diferencian dos unidades sedimentarias principales, P1 y P2 (Fig. 6), unidas a través de una extensa superficie erosiva, que se adivina a partir del estudio de la imagen resultante de la aplicación del filtro Kirsch (Fig. 4), aunque muy desdibujada por la fuerte dinámica eólica. Estos procesos eólicos están relacionados con un aumento de la presión antrópica en el medio natural a partir de los 5.000- 4.000 años BP (Borja y Díaz del Olmo, 1994), con resultado de formación de grandes edificios, dunares que se desplazan sobre morfologías preexistentes de tipo estuarino y litoral, recubriendo la totalidad de la superficie de P1 y la parte más septentrional de P2.

P1 se sitúa en la margen más septentrional (Fig. 6), limitada al norte por la marisma. Presenta en sus límites una morfología general muy degradada por la erosión. En superficie está constituida por una serie de frentes eólicos activos y surcos inter-

dunares bien diferenciados, 10 cual denota su mayor antigüedad. La dirección ONO-FBE de los frentes dunares, marca la antigua disposición de las crestas de playa.

Adosada a P1, por su margen meridional, se localiza un segundo cuerpo sedimentario principal, al que se ha llamado P2 (Fig. 6). Presenta una morfología más típica de flecha litoral en abanico, con el ápice situado hacia el NO y creciendo hacia el SE. Los dos tercios superiores están constituidos por frentes dunares activos y corrales incipientes que pasan, hacia el margen inferior, a sucesivas crestas de playas y surcos (cordones de la Marismilla). Dentro de esta última morfología se suceden varias superficies erosivas menores, que cortan los modelados preexistentes y rompen el ordenamiento regular, constituyendo subunidades diferenciables.

La aplicación del filtro Kirsch en el estudio de los cordones más recientes de P2 (Fig. 4), los situados más hacia la línea de costa actual, pone de manifiesto un mayor desarrollo de éstos en contraposición con los más antiguos. Esto está en relación con el mayor o menor grado de progradación litoral.

En la zona apical, tramo inicial de P2, la progradación es escasa, por lo que los sucesivos cordones litorales se superponen, dando la suficiente disponibilidad de sedimento para generar frentes eólicos de importancia, borrando las morfologías originales. En la zona más distal, extremo SE, domina la progradación, favorecida por la orientación de la costa: las crestas de playa y surcos se suceden con mayor espaciado, especialmente los más antiguos, imposibilitando que los cordones litorales incipientes evolucionen a sistemas eólicos de mayor entidad. Esta pauta ha ido cambiando progresivamente hasta la actualidad, con un desplazamiento paulatino de O a E, a lo largo de la costa, del punto de inflexión, que separa la zona de erosión dominante de la de sedimentación (Rodríguez Vidal et al., 1993). Esto ha ido originando junto con un aumento de la progradación costera en los siglos XVI-XVII, y particularmente, en el siglo XVIII, por la actividad humana (Borja, 1992), una mayor representación de los frentes eólicos activos en los cordones más recientes de la flecha litoral, tal como se aprecia en las figuras 4 y 6. Estos presentan frentes dunares activos asociados, con alturas en torno a los 20 m., comparados con los escasos 10 m. de los más antiguos, enmascarando la morfología de crestas de playa formadas previamente.

Se estima una edad de 1.800 años BP para las crestas de playa más antiguas de P2 (Zazo et al., 1994), lo que supone una génesis de la superficie erosiva principal, así como de P1, anterior a esta fecha, lo cual presupone que P1, correspondería a las primeras fases de progradación costera, que han sido determinadas sobre todo en el litoral medite-

rráneo, pero que hasta la fecha no ha sido posible determinar en este sector atlántico.

En cuanto a la fase erosiva principal que transformó sustancialmente la morfología original de la antigua flecha (P1), se estima una edad anterior al inicio de la progradación de n, alrededor de los 2.000 años BP. Según se desprende del análisis de la imagen resultante de la aplicación del filtro Compass (Fig. 5), se establece una relación directa entre esta fase erosiva y la serie de paleocanales del Guadalquivir que discurren por lo que hoyes el estuario colmatado que constituyen la marisma. De este modo se establece un antiguo cauce que discurre, durante esta fase, erosionando la margen más oriental de P1 y desplazándose hacia el Este, conforme se genera todo el conjunto morfológico que constituye P2, hasta la actualidad (Fig. 6).

En estas últimas décadas es notoria la disminución del régimen fluvial del Guadalquivir, coincidente con un aumento de la progradación. Esto trae como resultado que en la zona de desembocadura se produce un dominio de la corriente de deriva marina, que se hace patente en una mayor entrada de sedimentos a modo de pequeños cuerpos sedimentarios (Fig. 6). En la imagen de la figura 4 se observa como estos cuerpos sedimentarios se constituyen inicialmente como pequeñas barras de dirección N-S, que se desplazan hacia el Este, adaptándose posteriormente a la propia morfología de la margen costera, con una dirección E-O.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se demuestra la gran utilidad que ofrece una imagen Thematic Mapper en un estudio geomorfológico. En primer lugar, las bandas 4 y 7 han resultado ser idóneas para una buena caracterización geomorfológica, corroborada mediante datos de campo. Por otro lado, se han aplicado filtros de detección de bordes de tipo Kirsch y Compass.

El primero ha resaltado lineaciones generalizadas, ofreciendo excelentes resultados en la parte arenosa de la flecha litoral. En efecto, la imagen resultante permite diferenciar las sucesivas morfologías erosivas y acumulativas que sirven para establecer su evolución.

El segundo filtro utilizado, denominado Compass, ha resultado de mayor utilidad en el sistema morfogenético estuarino, que conforma la marisma. Dicho filtro, capaz de realzar diferencias topográficas insignificantes, ha mostrado antiguos cauces fluviales que no se habían podido reconocer hasta la fecha.

El conjunto de datos procedentes de la imagen, unidos a otros de distintas metodologías geomorfológicas convencionales, permiten diferenciar en el área de estudio dos grandes cuerpos progradantes (P1 y P2), que constituyen la flecha litoral de Doñana en la actualidad. Con una edad estimada, para P1, anterior a los 2.000 años BP.

De esto se deduce que existen dos momentos de mayor progradación costera, separados por un periodo importante de no progradación y/o erosión, correlacionables con los diferentes eventos estimados a nivel costero regional. Todos estos procesos litorales se ajustan a eventos de cierta periodicidad en la dinámica marina y climática, siendo necesario, para su ajustada deducción, un número mayor de dataciones absolutas.

En estos últimos siglos se patentiza un mayor desarrollo de los cordones litorales, con escasos o nulos surcos, y aumento de la actividad eólica, relacionado con un aumento de la progradación.

En la zona de desembocadura se estima en la actualidad un dominio de la corriente de deriva marina y una disminución del régimen fluvial del Guadalquivir, que trae como consecuencia una mayor sedimentación en esta zona, pudiendo ocasionar una colmatación del cauce principal y todo lo que esto implica para el tráfico naval a lo largo del río.

BIBLIOGRAFIA

- BORJA, F. 1992. Cuaternario reciente, Holoceno y periodos históricos del SW. de Andalucía. Tesis Doctoral, U. de Sevilla, 470 pp.
- BORJA, F. y DIAZ DEL OLMO, F. 1994. El acantilado de El Asperillo: Cuaternario reciente y fases históricas en el litoral de Huelva. *Geogaceta*, 15: 101-104.
- CANO, N. y FERNANDEZ, F. 1986. Variación estacional de la inclinación transversal de las aguas Atlánticas y Mediterráneas en el Estrecho de Gibraltar. *Boletín Instituto Español de Oceanografía*, 136: 1-23.
- LARIO, J., ZAZO, C., DABRIO, C., SOMOZA, L., GOY, J.L., BARDAJI, T. y SILVA, P.G. 1994. Record of recent Holocene sediment input on spit bars and deltas of South Spain. *Journal of Coastal Research* (en prensa).
- RODRIGUEZ VIDAL, J., CACERES, L., RODRIGUEZ RAMIREZ, A y CLEMENTE, L. 1993. Coastal dunes and postflandrian shoreline changes. Gulf of Cadiz (SW Spain). *Mediterranean and Black sea Shorelines (INQUA) Newsletter*, 15: 12-15.
- SILJESTRÖM, P. 1986. Geomorfología y Edalogénesis de las arenas del Parque Nacional de Doñana. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, 550 pp.
- SILJESTRÖM, P., GARCIA, L.V., CLEMENTE, L y SEGURA, F.J. 1990. Estudio multitemporal de las marismas del Guadalquivir: reconocimiento de patrones del medio físico. *Actas 3. Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección*, Madrid, ITGE: 51-58.
- SILJESTRÖM, P. and CLEMENTE, L. 1990. Geomorphology and Soil Evolution or Moving Dune System in SW Spain (Doñana National Park). *Journal of Arid Environments*, 8: 139-150.
- SILJESTRÖM, P., MORENO, A., GARCIA, L.V. and CLEMENTE, L. 1994. Doñana National Park (SW Spain): Geomorphological characterization through a soil-vegetation study. *Journal of Arid Environments*, 26: 315-323.
- VANNEY, J.R. 1970. L'hydrologie du Bas Guadalquivir. *Publ. depart. geogr. aplic.*, Madrid, C.S.I.C.: 176 p.
- VANNEY, J.R. y MENATEAU, L. 1979. Types de reliefs littoraux et dunaires en Basse Andalousie (de la

- Ria de Huelva a l'embouchure du Guadalquivir). Mém. Casa de Velázquez, 15: 5-52.
- WOOD, B. and BECK, L. 1986. Remote sensing of wetland plant stress. Int. Geoscience and Rem. Sensing Symposium (IGARSS86), Zürich (Suiza), 5 pp.
- ZAZO, C.; GOY, J.L., SOMOZA, L., DABRIO, C.J., BELLUOMINI, G., IMPROTA, S., LARIO, J., BARDAJI, T. y SILVA, P.G. 1994. Holocene sequence of sea-level fluctuations in relation to climatic trends in the Atlantic-Mediterranean linkage coast. Journal of Coastal Research, 10 (3): 935-944..