

EFFECTO EROSIVO DE LOS TEMPORALES DEL INVIERNO 1995-1996 SOBRE LA PLAYA DE MAZAGÓN (HUELVA, SO DE ESPAÑA): INFLUENCIA DE LAS CONSTRUCCIONES COSTERAS

M. Ballesta, J. A. Morales y E.A. Acosta

Departamento de Geología, Universidad de Huelva, Campus Universitario de la Rábida, 21819 Palos de la Frontera, Huelva

Resumen: Al este de la desembocadura de los ríos Tinto y Odiel, en la Costa de Huelva (SO de España), se sitúa la playa de Mazagón, una de las localidades turísticas más importantes de esta costa. Desde la construcción de varias infraestructuras portuarias en la desembocadura de estos dos ríos, esta playa ha sufrido un proceso de inestabilidad dinámica que se traduce en una erosión muy intensa, que se incrementa durante los periodos de tormenta. Durante los años 1995 y 1996 se sucedieron varias tormentas importantes que afectaron a las construcciones turísticas más cercanas a la línea de costa. Los efectos de estas tormentas se han estudiado mediante el seguimiento sedimentológico y topográfico de la playa, obteniéndose que, durante el periodo de estudio, el volumen de arenas erosionado en el sector analizado ha sido de 45.796 m³, lo que en la superficie total de la zona de estudio (36.778 m²) supone un 1,25 m³/m² de déficit sedimentario. Por el contrario, durante los periodos anticiclónicos tiene lugar una dinámica de crestas y surcos que desplaza la arena hacia las zonas topográficamente más altas de la playa, que sin embargo no incrementa el volumen de arena de la misma. Esta erosión se refleja en el registro sedimentario como una cicatriz erosiva, marcada por un nivel residual de material grosero y/o de minerales pesados sobre la secuencia de crestas y surcos. La causa de esta erosión ha sido interpretada mediante la realización de mapas de refracción del oleaje, ya que este sector costero se encuentra situado en una zona de divergencia de los trenes de olas refractados sea cual sea la dirección de aproximación de los mismos.

Palabras clave: Dinámica costera, tormentas, gestión de costas, actividad antrópica.

Abstract: The Mazagón Beach, one of the most important touristic localities of the Huelva Coast, is located to the East of the mouth of the Tinto and Odiel Rivers. Since the construction of several harbours infrastructures in this mouth, the beach has experimented a process of dynamic instability which results in a very high erosion rate, which is increased during stormtimes. Throughout 1995 and 1996 some important storms damaged some touristic buildings closest to the coastline. The effects of these storms have been studied by carrying out sedimentological and topographical analyses. These provide evidence that the sand volume eroded in the analyzed zone during the study period, reached up 45,796 m³ which distributed in the whole study surface (36,778 m²) result in a 1.25 m³/m² sediment deficit. Contrarily, during the fair-weather periods, a ridge-and-runnel system dynamics transports sand to the higher zone of the foreshore, this meaning that just vertical shifting of the sand is realized with no increase of total sand volume in the area. The erosion is reflected in the sediment sequence as an erosive surface, with a residual lamina of coarse material and/or heavy minerals cutting the ridge-and-runnel sequence. The cause of this erosion has been interpreted by using wave-refraction maps, because this coastal sector is located in a swash divergence zone, regardless of the provenance direction of the waves.

Key words: Coastal dynamics, storms, coastal management, antropic activity.

Ballesta, M., Morales, J.A. y Acosta, E.A. (1998): Efecto erosivo de los temporales del invierno 1995-1996 sobre la Playa de Mazagón (Huelva, SO España): Influencia de las construcciones costeras. *Rev. Soc. Geol. España*, 11 (3-4): 285-296.

La playa de Mazagón se encuentra situada en el suroeste de la Península Ibérica, al sur de la provincia de Huelva, hacia el este de la desembocadura de los ríos Tinto y Odiel (Fig. 1). Regionalmente se sitúa en el borde costero-suroccidental de la Cuenca del Guadalquivir, constituido por materiales limo-arenosos de edad plio-pleistocena.

La evolución morfosedimentaria de los sistemas costeros se ve influenciada por una serie de factores

que actúan conjuntamente, como son el clima, los movimientos relativos del nivel del mar y el régimen de aporte sedimentario, así como por la dinámica litoral (Bird, 1985; Pilkey, 1991; Pilkey *et al.*, 1993). En el caso concreto de la playa de Mazagón, existe, además de éstos, un quinto factor, que no es otro que las modificaciones artificiales llevadas a cabo por el hombre en las dos últimas décadas y que inciden directamente sobre el régimen de aportes y sobre la dinámica litoral del

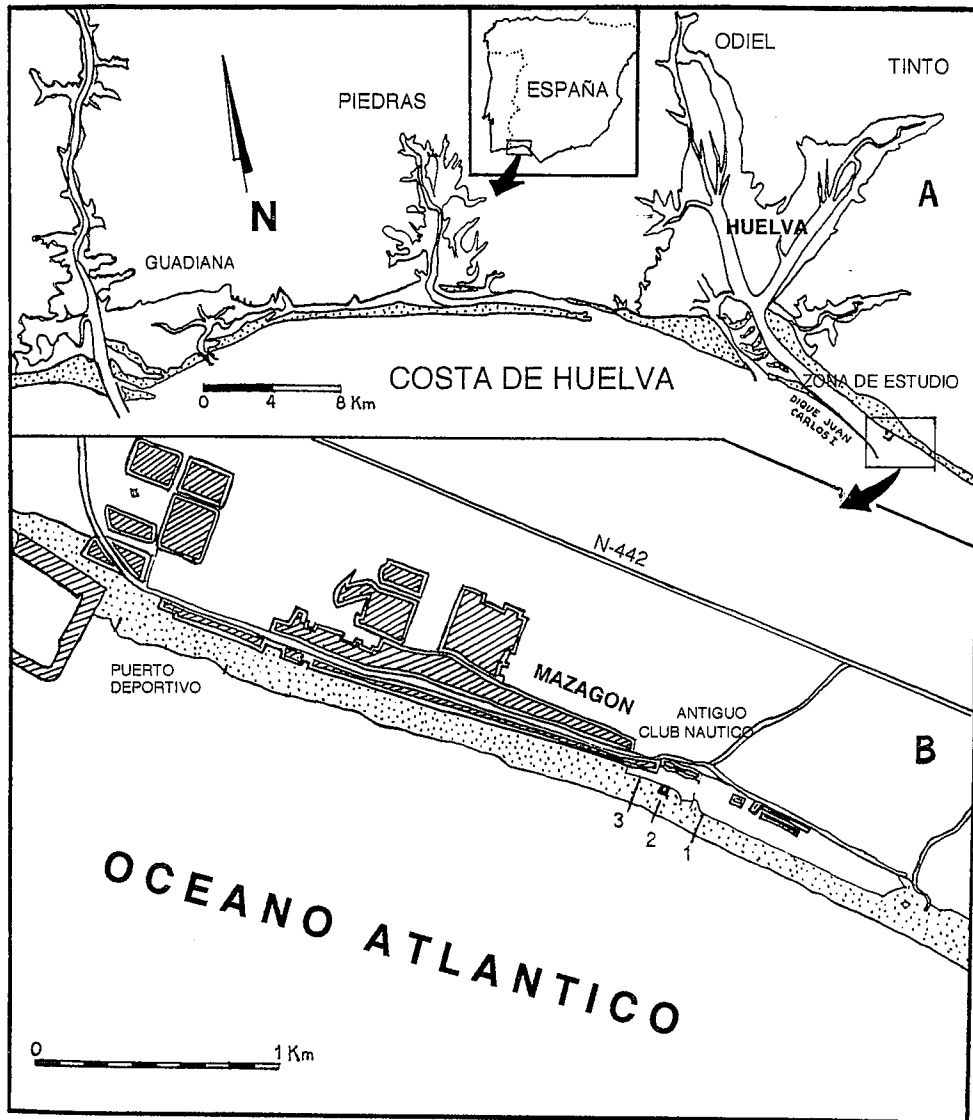


Figura.1.- (A) Localización geográfica de la zona de estudio dentro de la Costa de Huelva. (B) Esquema de la Playa de Mazagón con indicación de las estaciones de muestreo y realización de perfiles topográficos.

sistema. Esta zona reviste gran interés desde el punto de vista de los riesgos geológicos, pues sufre la acción de estos agentes dinámicos y es muy sensible a sus variaciones. Por otra parte, sirve de asiento a numerosas actividades humanas en torno a las cuales se mueven importantes intereses económicos.

En el Golfo de Cádiz, el nivel del mar permanece prácticamente estable en los últimos 7.000 años, produciéndose ascensos de muy poca entidad (Zazo *et al.*, 1994).

El clima reinante en la zona de estudio juega un papel fundamental en la evolución de la costa, ya que controla directamente muchos de los procesos morfogenéticos y supone una influencia fundamental en los fenómenos de erosión, transporte y sedimentación. La climatología de esta zona costera se encuentra controlada por la posición del anticiclón de las Azores y las borrascas atlánticas: en verano dominan sobre la península condiciones anticiclónicas que imponen un tiempo cálido y seco, con un régimen de vientos suave del NE, aunque por las tardes, al producirse el calentamiento del continente, co-

mienza a soplar la brisa del SO, que imprime carácter al régimen de vientos de verano; por el contrario, durante el invierno, barren la península de oeste a este frecuentes frentes borrascosos, que provocan situaciones puntuales de abundantes lluvias, y vientos fuertes del SO o el SE, aunque las temperaturas permanecen suaves.

Pluviométricamente la zona se define como de clima Mediterráneo seco por el régimen de humedad, intensidad de lluvias y la situación estacional de periodo seco. La media de precipitaciones en los últimos 15 años (1980-1995) fue de 517,4 mm medidos en un área próxima a Mazagón. El número medio de días de lluvia al año en las proximidades de Mazagón para el periodo 1951-1984 es de 86,2 días, siendo Enero el mes más lluvioso. Para la serie 1980-1995, el valor de la temperatura media anual es de unos 18,0°C, oscilando entre los 11,0°C del mes más frío (Enero), hasta los 25,4°C del mes más cálido (Julio-Agosto).

El viento constituye un elemento fundamental para la interpretación de la dinámica litoral de cualquier tra-

mo costero, tanto por la influencia directa en el oleaje y parte de las corrientes marinas como por el protagonismo directo de los procesos geomorfológicos derivados de su dinámica específica (Fig. 2 A). En cuanto a número de días que sopla, el predominio es de los vientos procedentes del SO con un 22,5% de los días del año; destacables son también los vientos procedentes del NO, NE y SE que soplan el 18,5%, 12,0% y 14,0% de los días respectivamente (Borrego, 1992).

El oleaje que afecta a este sector de la Costa de Huelva está directamente vinculado al régimen de vientos. Así, el 75% del tiempo actúan sobre la costa olas con una altura inferior a 0,5 metros, y se aproximan a la misma con dirección N 140-145° O (MOPU, 1991; Borrego, 1992). Durante las condiciones anticiclónicas, el mar suele estar en calma y sólo alrededor del medio día la brisa del mar induce un oleaje de periodo corto hacia el noreste. Sólomente el 7% del oleaje supera el metro de altura y suele deberse a temporales del sur en alta mar, llegando a la costa como mar de fondo. El oleaje superior a 1,5 m representa un pequeñísimo porcentaje y está asociado a los temporales atlánticos o del Estrecho de Gibraltar, según su procedencia (Fig. 2 B). La influencia de estos temporales fue muy importante en el invierno de 1995/96 en la playa de Mazagón, donde los destrozos ocasionados por el oleaje han sido cuantiosos.

La incidencia oblicua de los trenes de olas dominantes sobre el litoral onubense origina una importante deriva litoral que adquiere una componente de traslación paralela a la línea de costa que desplaza materiales del oeste al este. Los valores de deriva potencial estimados para el litoral de Huelva oscilan entre los 1,90 Hm³/año (Cuena, 1991) y los 3,00 Hm³/año (CEEPYC, 1979). Los aportes son principalmente arenosos y proceden fundamentalmente de los acantilados del sur de Portugal y del Río Guadiana, donde el aporte arenoso se estima en 4,39 Hm³/año, de los cuales 3,83 Hm³/año los utiliza el Guadiana para autoalimentarse, quedando depositados en su desembocadura. El resto (0,56 Hm³/año) pasan a alimentar la deriva litoral (Morales *et al.*, 1997). El Tinto y el Odiel tienen un régimen de aporte tan bajo que la totalidad de sedimentos que aportan se depositan en el interior de sus estuarios (Borrego, 1992).

En cuanto al régimen mareal, la Costa de Huelva es mesomareal, con un rango medio de 2,02 metros (Borrego, 1992; Morales *et al.*, 1997). La onda de marea barre el Golfo de Cádiz del sureste hacia el noroeste a partir del punto anfodrómico de las Azores, originando corrientes mareales muy débiles en la zona costera abierta, que sólo son capaces de transportar sedimento en suspensión. Sin embargo, estas corrientes son despreciables o tienen poco efecto sobre el material arenoso, comparadas con la deriva litoral.

Existe además una serie de obras de ingeniería que de distinta forma afectan a la evolución morfosedimentaria de este sector costero, aunque todas ellas contribuyen de algún modo a la modificación del balance sedimentario de la costa y a la aparición en la

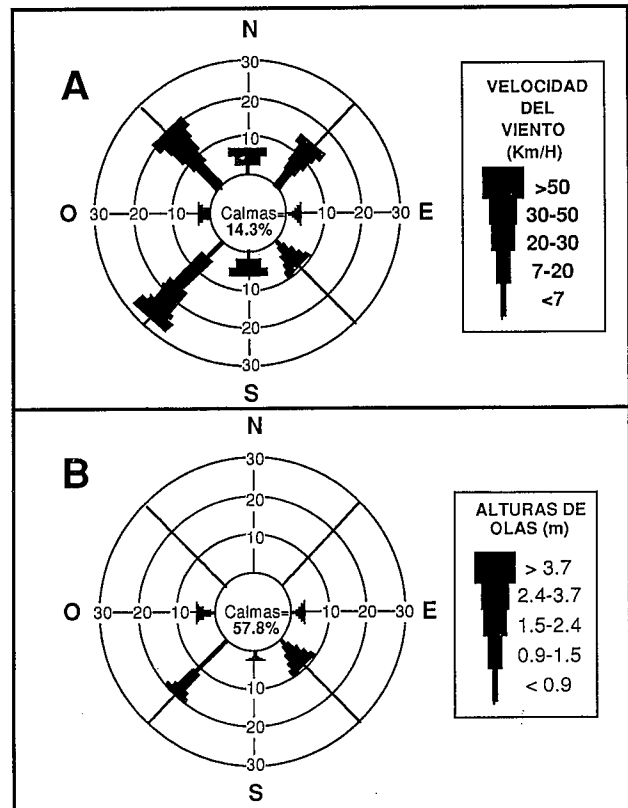


Figura.2.- Diagramas de rosa de los vientos representativos de la Costa de Huelva para (A) vientos, según su velocidad, y (B) olas, según su altura.

misma de zonas erosivas. Por una parte, el dique de contención de arenas Juan Carlos I, situado al oeste de Mazagón (Fig. 1), altera la dirección de aproximación de los trenes de olas dominantes y además impide el tránsito natural de sedimentos por la deriva litoral hacia el este; por otra, el puerto deportivo de Mazagón origina una zona de sombra dinámica en la que se produce una acumulación sedimentaria. Otras actuaciones antrópicas que afectan a este sector costero son: a) la regulación de las cuencas fluviales, b) el intensivo dragado de la Ría de Huelva y c) el efecto que produce la zona de viviendas adosadas sobre las dunas litorales.

Metodología

Se realizó un primer análisis de fotointerpretación sobre la evolución de la línea de costa de la zona de estudio desde 1956 hasta 1994. Este estudio permitió detectar una zona con graves problemas de erosión en este sector sobre la que se llevaron a cabo trabajos de campo.

Desde Noviembre de 1995 hasta Julio de 1996 se realizaron 5 campañas de levantamiento de perfiles de playa en tres estaciones fijas (Fig. 1 B). El ancho entre la primera y la última estación es de 260 m y la longitud máxima de los perfiles es de 150 m. Los perfiles topográficos fueron realizados trazando visuales sobre una estaca graduada separada por medidas conocidas de la estación inicial. Las visuales se trazaron mediante una alidada de pínulas con un nivel para mantener la

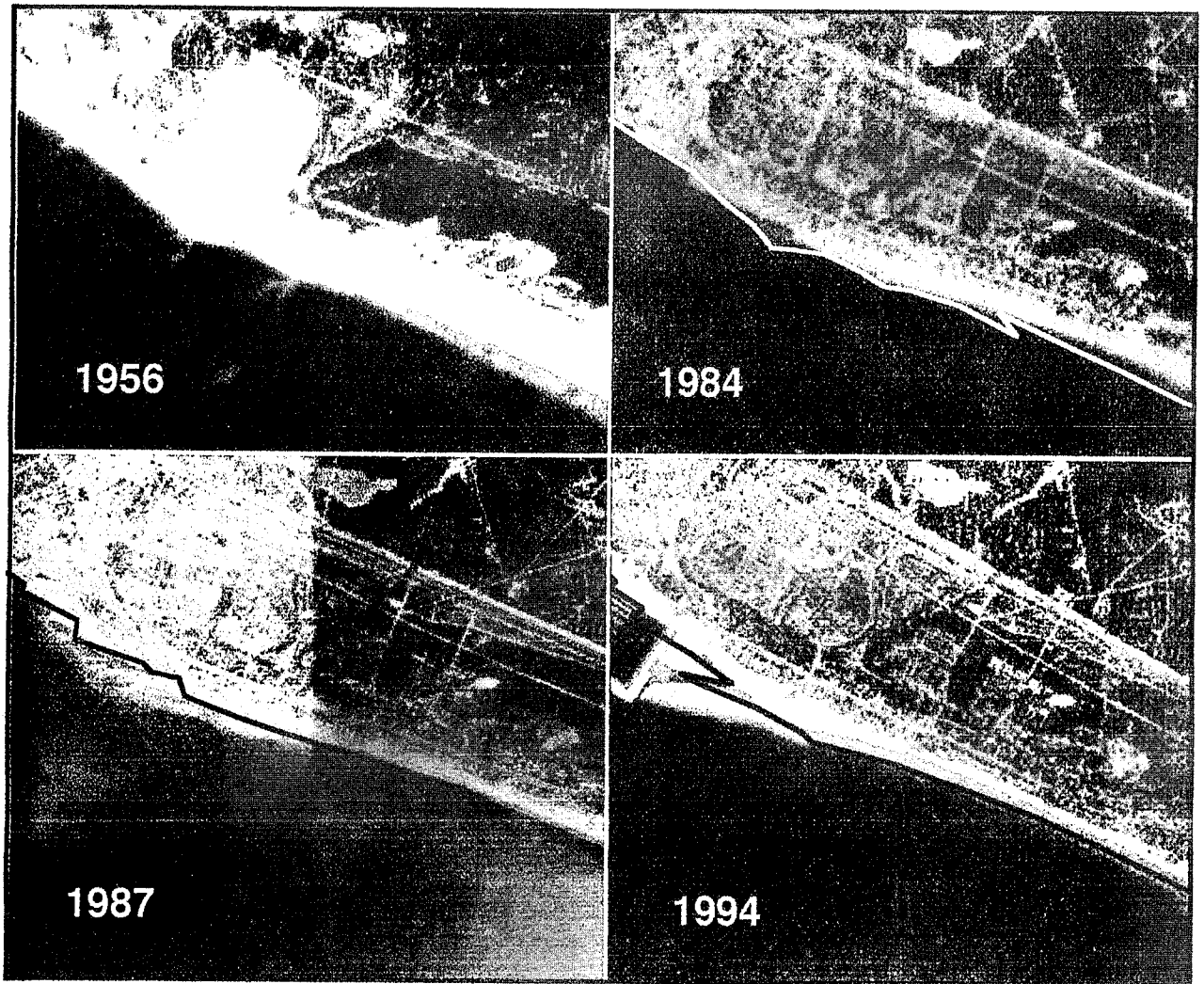


Figura.3.- Fotografías aéreas mostrando las variaciones sufridas en el área de estudio, con indicación de las líneas de costa en Diciembre de 1956, Octubre de 1984, Agosto de 1987 y Mayo de 1994. En cada fotograma se indica la línea de costa del fotograma inmediatamente anterior.

horizontal. Los datos de altura aportados por este método fueron procesados por ordenador, primero linealmente en el *CRICKET GRAPH 1.3.2* y posteriormente en tres dimensiones con el *SURFER 5.0.*, obteniendo datos sobre diferencias de volumen entre las distintas medidas.

Se tomaron 37 muestras cada 25 m a lo largo de los perfiles en los días 10-11-95, 6-12-95 y 30-7-96, para la realización de un estudio granulométrico. En 10 de estas muestras se han realizado, además, determinaciones mineralógicas cualitativas, mediante identificación directa en lupa binocular de 16 aumentos. El estudio sedimentológico se ha completado con la realización de zanjas de hasta 1,5 m de profundidad y 2 m de longitud con el objetivo de conocer las estructuras internas *in situ*.

Para la interpretación dinámica de los resultados se han construido mapas de refracción del oleaje teniendo en cuenta la topografía del fondo costero recogida en las cartas náuticas de 1956 y 1982, anterior y posterior respectivamente a la construcción del dique Juan Carlos I, además de la dirección y dimensiones de los trenes de olas dominantes.

Resultados

Fotointerpretación.

Para el estudio de fotointerpretación se han utilizado los pares estereográficos de los vuelos disponibles en esta zona (1956, 1984, 1987, 1991 y 1994), comparando la línea de costa en cada fecha con la de la fecha inmediatamente anterior (Fig. 3). De este modo han podido calcularse tasas de progradación y retrogradación para cada periodo (Tabla I). Lamentablemente, sólo existe un vuelo anterior a la construcción del dique Juan Carlos I (1974-1977) y no ha sido posible realizar los mismos cálculos durante los periodos de evolución natural, aunque sí han podido realizarse comparaciones cualitativas entre vistas aéreas de tarjetas postales de distintas fechas de este periodo.

Tanto en la figura 3 como en la tabla I se aprecia claramente la existencia de dos zonas con tendencias evolutivas distintas. La primera de estas zonas se sitúa en el sector del antiguo Club Náutico y es claramente erosiva durante todo el periodo estudiado, si bien, la

PERIODO	ZONA PUERTO DEPORTIVO	ZONA CLUB NAUTICO
1956-1984	- 4,84	- 3,02
1984-1987	+ 28,90	- 5,78
1987-1991	+ 6,75	- 8,10
1991-1994	+ 65,32	- 8,71

Tabla I.- Comparación de los valores lineales de progradación/retrogradación de las dos zonas de la playa de Mazagón para los periodos estudiados por fotointerpretación. Los valores están expresados en m/año, correspondiendo los valores negativos a erosión y los positivos a acumulación.

tasa de retrogradación aumenta a partir de 1987. La segunda zona se localiza al este del actual puerto deportivo de Mazagón, que pasa de ser erosiva antes de la construcción del Dique Juan Carlos I, a tener una alta tasa de progradación después de la construcción de éste, observándose además un claro aumento de esta tasa desde la construcción del puerto deportivo entre 1991 y 1993 (Fig. 3). Este hecho nos ha llevado a estudiar sobre el terreno la primera de estas zonas, que es actualmente la más afectada por la erosión, para analizar en detalle su evolución dinámica y sedimentaria y las causas de la misma.

Perfiles topográficos.

Durante el periodo en el que se realizaron las campañas de levantamiento de perfiles topográficos (Noviembre de 1995 a Julio de 1996) se pudo corroborar la tendencia erosiva de la playa en el sector de estudio, en el que se produjo un rápido retroceso debido a las fuertes tormentas que tuvieron lugar durante los meses de Diciembre a Febrero.

Si comparamos los perfiles realizados en las estaciones 1, 2 y 3 (Fig. 1 B), se observa cómo durante las condiciones anticiclónicas el oleaje de buen tiempo produce en este sector una dinámica constructiva. Sin embargo, durante los periodos de sucesivos temporales, el intenso oleaje va destruyendo los sistemas de dunas que se encuentran en el *backshore*, observándose cómo el oleaje de tormenta actúa por encima del nivel de la Marea Alta Viva Equinocial, debido al apilamiento de agua que tiene lugar en la costa durante las tormentas.

Para analizar los ritmos de acreción y erosión de la playa se ha utilizado tanto la comparación directa de los perfiles levantados (Fig. 4) como un análisis tridimensional de estos perfiles realizado con el programa *SURFER 5.0* (Fig. 5), a partir de ello se ha calculado también los volúmenes de ganancia y pérdida de arena y las áreas en las que éstas han tenido lugar (Tabla II). Así, se observa cómo entre Noviembre y Diciembre una barra se adosa a la berma haciéndola progradar entre 7 m (estación 2, Fig. 4) y 17 m (estación 1, Fig. 4), si bien esto no supone una ganancia de volumen sedimentario para la playa, que incluso pierde 36,91 m³ de arena, sino más bien un cambio de posición del sedimento hacia la zona alta de la berma, donde pasa a ocupar una extensión areal menor pero de mayor espesor (Tabla II).

Después de la tormenta que tuvo lugar a finales de Diciembre, en tan sólo dos días, el perfil del día 18 de Enero muestra ya un claro retroceso de la línea de costa, llegando incluso a erosionarse el frente dunar, cuyo retroceso oscila entre los 3 m de la estación 3 y los 14 m de la estación 2 (Figs. 4 y 5). Tras esta tormenta se produce una pérdida de arena de 16.318 m³ en los 36.777 m² de extensión de la zona analizada (Tabla II).

Una vez finalizado este temporal no se observa una dinámica regresiva hasta un nuevo temporal que comenzó el día 31 de Enero. Una vez más, en tan sólo dos días el frente dunar retrocedió entre 7 y 20 m, aunque en esta ocasión la erosión fue más intensa en la estación 3 (Fig. 4). Se produce además una pérdida de arena aún mayor que en el temporal anterior erosionándose un volumen de 22.088 m³ (Tabla II). En esta ocasión la erosión se produjo principalmente en la zona alta de la playa y se vieron afectadas diversas infraestructuras y construcciones realizadas sobre las dunas. Valgan como ejemplos los siguientes: el edificio del Club Náutico de Mazagón fue destruido, así como sus pistas de tenis (Fig. 6 A), y el alcantarillado situado en el frente de las primeras viviendas quedó al descubierto y fue también destruido en algunos tramos (Fig. 6 B).

A partir de esta fecha continúa actuando un oleaje energético aunque de un modo progresivo, sin que se registren tormentas puntuales, de tal modo que, a finales de Julio, el frente dunar había retrocedido 3 m más en la estación 2 y se habían perdido 7.353 m³ más de arena.

En total se obtiene que, entre el 10 de Noviembre de 1995 y el 30 de Julio de 1996, en el sector del Club Náutico se produce una pérdida de 45.796 m³ de arena, que en la superficie total de la zona de estudio (36.778 m²) supone un 1,25 m³/m² de déficit sedimentario, lo que es de suma importancia, sobre todo teniendo en cuenta que durante los periodos anticiclónicos la playa no gana arena.

Sedimentología

Para la realización de este estudio se tomaron 37 muestras distribuidas en los perfiles de playa y en diferentes fechas, al objeto de comparar la distribución poblacional del sedimento según su situación en el perfil respecto a los niveles de marea y de batida del oleaje, así como longitudinalmente a la línea de costa en los distintos perfiles y temporalmente en función de las condiciones climatológicas en las que fueron tomadas. La figura 7 ofrece una síntesis de los datos más representativos de estas granulometrías.

La moda en todas las granulometrías es el diámetro 0,25 mm (arenas medias). El porcentaje de las partículas de este diámetro es siempre superior al 40% en peso total acumulado, y puede alcanzar incluso valores del 85% del total de la muestra. Esto indica que el sedimento está en general bien clasificado.

No se observaron diferencias significativas entre las distribuciones granulométricas de las distintas estaciones, aunque las muestras de la estación 3 presentan un mayor contenido en arenas finas. Sí que se observaron diferencias tanto en vertical dentro de cada estación como temporalmente, sobre todo después de los tempo-

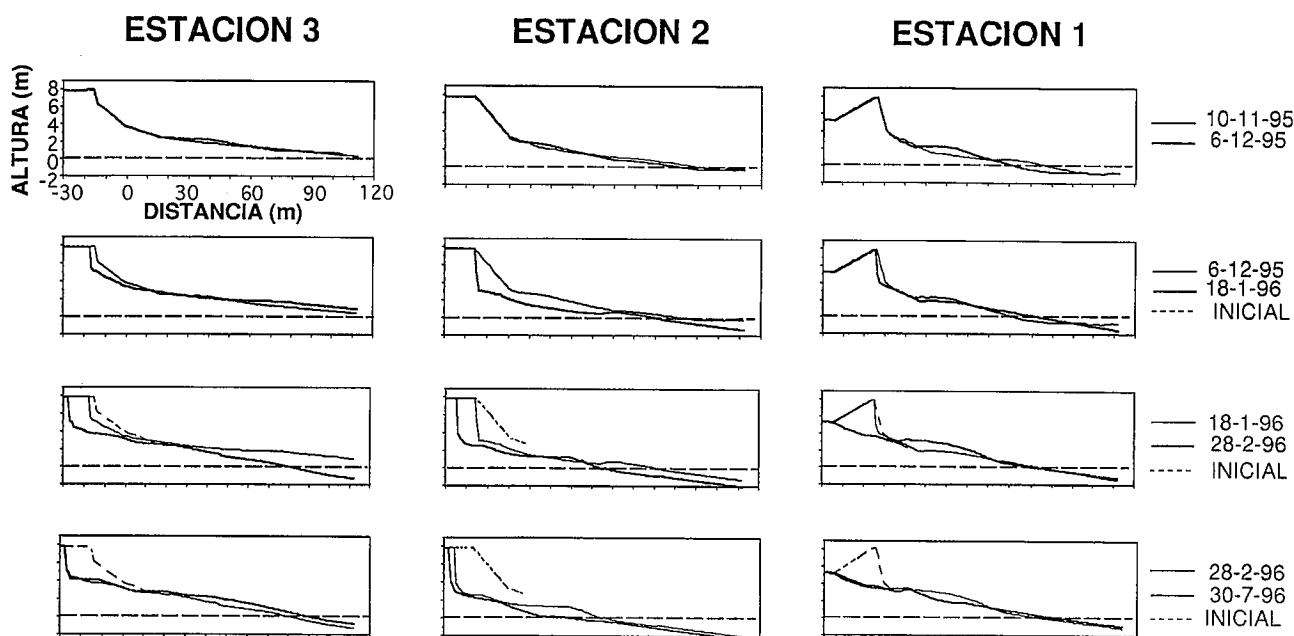


Figura 4.- Perfiles topográficos realizados en la zona de estudio entre el 10 de Noviembre de 1995 y el 30 de Julio de 1996. Ver situación en figura 1.

rales, por lo cual analizaremos estas tendencias verticales en las distintas fechas de toma de muestras.

Perfiles del 10-11-95: en todas las estaciones se deduce la existencia de una zonación sedimentaria vertical. Así los diagramas más próximos al mar tienen una similitud significativa, ya que las muestras están dentro de la misma zona de playa, y aunque ésta tiene distinta longitud dependiendo de la pendiente del perfil en cada estación, en todos los casos es superior a los 50 m (Fig. 7). Por encima de esta zona observamos que existe una franja en cuyo sedimento la clasificación es menor y donde el tamaño superior a 2 mm es mucho más abundante, llegando a alcanzar incluso más del 30% en peso del total en el caso de la estación 2. Los cantos de este tamaño están constituidos fundamentalmente por fragmentos de bivalvos; a pesar de la peor clasificación, las arenas medias siguen siendo la fracción significativamente más abundante.

En una franja topográficamente más elevada, se observa nuevamente una mayor selección del sedimento, estando ausentes las fracciones de arena más finas, salvo los granos de composición ilmenita-rutilo que componen las fracciones de arena fina y muy fina. Se trata de una zona que sólo queda sumergida uno o dos días al mes, durante las mareas de coeficientes mayores o durante las tormentas.

Perfiles del 6-12-95: entre los resultados granulométricos de las muestras tomadas en esta fecha y la fecha anterior existen muy pocas diferencias, salvo en la parte alta de los perfiles, donde aumenta el contenido en arena fina en detrimento de la fracción arena media, que es ahora poco más del 50% de la muestra.

Perfiles del 30-7-96: existen diferencias notables entre los datos granulométricos de esta fecha y los de los muestreos anteriores (Fig. 7). Hay que tener en cuenta que tanto las infraestructuras como la zona dunar que existía sobre el *backshore* habían sido total-

mente dismanteladas por los temporales, lo que provocó un cambio en los tamaños de grano disponibles por el oleaje. Así, en las estaciones 1 a 3 se observa que, mientras en la zona baja de la playa siguen dominando los tamaños de arena media, aunque aumenta el contenido en arena fina, en la zona alta de la playa aumenta claramente la fracción superior a 2 mm. Estimamos que esta fracción es de origen residual, ya que se trata de los cantos de tamaño grava que proceden de la erosión de los materiales del aparcamiento situado por detrás de la estación 3 (Fig. 7), que el oleaje no ha sido capaz de transportar. También aumenta de un modo importante la fracción arena fina, que está compuesta exclusivamente por minerales pesados (ilmenita y rutilo) que le confieren un marcado color negro y denotan asimismo su origen residual.

Para completar el estudio sedimentológico, se realizó un gran número de zanjas a distintas alturas topográficas en las diferentes estaciones y en distintas fechas. En general, la estructura interna observada se corresponde con la descrita por otros autores para pla-

PERIODO	VOLUMEN DEPOSITADO	VOLUMEN EROSIONADO	BALANCE	AREA DE DEPOSITO	AREA DE EROSION
10-11-95 06-12-95	3.393,13	3.430,03	- 36,91	12.298,40	24.491,10
06-12-95 18-01-96	10.672,76	17.991,10	- 16.318,40	7.378,67	29.399,30
18-01-96 28-02-96	3.196,80	25.285,00	- 22.088,20	7.944,22	28.833,80
28-02-96 30-07-96	2.495,74	9.848,46	- 7.352,72	12.337,30	24.440,70
10-11-95 30-07-96	1.014,70	46.810,90	- 45.796,20	3.955,15	32.822,80

Tabla II.- Volúmenes y áreas de erosión y depósito en los periodos de levantamiento de perfiles. Los volúmenes y balances están expresados en m³ y las áreas en m².

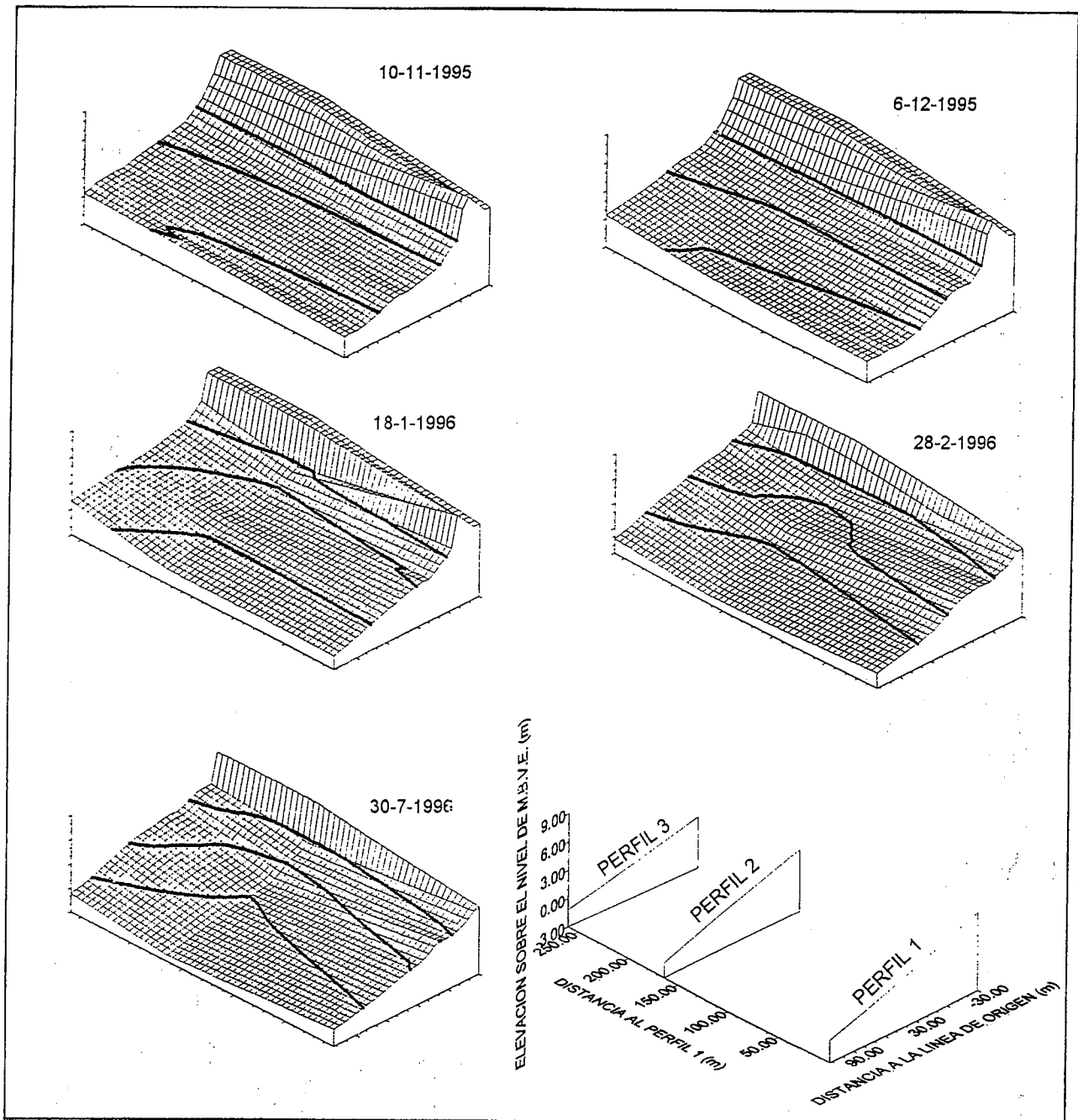


Figura.5.- Bloques-diagrama del sector de estudio correspondientes a los periodos indicados, en los que se aprecia el desplazamiento hacia tierra de las líneas de Marea Alta Viva Equinocial (3,48 m), Nivel Medio de Marea (1,75 m) y Marea Baja Viva Equinocial (0 m).

yas de similares características (Dabrio, 1982; Dubois, 1989; Birkemeier, 1991; Pilkey *et al.*, 1993). En las zanjas realizadas durante la etapa anterior a los temporales en la zona alta de la playa se observa recurrentemente una secuencia compuesta por alternancias de lentejones de conchas y arenas laminadas inclinados hacia el mar, en estas arenas pueden observarse láminas negras compuestas por minerales titaníferos; sobre esta alternancia se dispone una estratificación cruzada inclinada suavemente hacia tierra, cortada a techo por láminas que buzan suavemente hacia el mar. En cambio, en las zanjas efectuadas en las etapas posteriores a los temporales, también en la zona alta de la playa, observamos la desaparición del tramo

superior de la secuencia, de tal modo que la estratificación cruzada inclinada hacia tierra se ve cortada bruscamente por la superficie topográfica que coincide con la presencia de una lámina de arenas finas de color negro que corta a la estratificación previa.

Interpretación y discusión

Los resultados obtenidos de las granulometrías indican un claro dominio de la fracción de las arenas medias en la constitución del sedimento de esta playa. Este hecho se debe a dos causas fundamentales: por un lado, las arenas medias constituyen el material disponible más abundante en esta costa, ya que son mayores a este



Figura.6.- Fotografías de los destrozos causados por el temporal de Febrero de 1996. (A) Pistas de tenis del Club Náutico, estación 1 y, (B) Edificio del Club Náutico, estación 2.

tamaño las arenas procedentes de las dos fuentes de suministro citadas (Río Guadiana y acantilados portugueses), siendo muy escasas en ambas fuentes las arenas de tamaños más finos, (Bettencourt, 1989; Morales *et al.*, 1997). Por otra parte, parece ser que la energía media del oleaje condiciona que se realice preferentemente el transporte de las partículas iguales o inferiores a las arenas medias. Esto explica la escasez de partículas mayores salvo los fragmentos de conchas de origen residual. De este tamaño medio del sedimento y teniendo en cuenta la energía media del oleaje, puede deducirse un claro dominio de transporte en saltación.

Puede también deducirse que la zonación textural existente en la franja intermareal de la playa es debida a la actuación diferencial del oleaje y el viento sobre la misma. De este modo, la zona más baja del *foreshore* corresponde a la zona de depósito tanto de la batida como de la resaca del oleaje, siendo esta zona sobre la que migran las barras arenosas antes de adosarse a la berma, como se observa de la comparación de los perfiles de 10-11-95 y 6-12-95 (Fig. 4) y como se deduce de su estructura interna observada en las zanjas, muy semejante a la descrita por otros autores en playas de dinámica semejante (Dabrio, 1982; Dubois, 1989; Pilkey *et al.*, 1993), y de su buena clasificación granulométrica.

Por el contrario, la zona que se sitúa por encima de la anterior corresponde al área de rompiente, donde son más abundantes las poblaciones residuales (cantos de grava y granos de ilmenita y rutilo) y la clasificación es

mucho peor. Se interpreta esta zona como la parte de la playa en la que la ola bate, arrastrando toda clase de materiales, incluidos los fragmentos de conchas, al retroceder hacia el mar. Tras la rotura de las olas deja de producirse el movimiento orbital, transformándose el movimiento de oscilación en traslación pura, y ésta realiza un trabajo sobre los granos que puede llegar a ser importante, por presión, choque o ametrallamiento (Hayes y Boothoyd, 1969).

Hacia una zona aún más alta de la playa se observa nuevamente una mayor selección del sedimento. Se trata de una zona que sólo queda sumergida uno o dos días al mes durante las pleamares vivas y que, por lo tanto, la mayor parte del tiempo se encuentra sometida a la selección del viento, por lo que los tamaños más finos están ausentes, salvo los granos de minerales pesados.

Esta distribución zonal de la granulometría del sedimento no experimenta variaciones durante los periodos anticiclónicos, en los que el perfil de la playa evoluciona en sistemas de cresta y surco que se adosan la berma. Sin embargo, esta migración de barras arenosas sobre el *foreshore* no supone un incremento de volumen de arena en la playa, sino un cambio de lugar desde zonas más profundas hacia zonas más altas de la playa, como se deduce de los cálculos volumétricos entre los días 10-11-1995 y 6-12-1995.

Tras los temporales del invierno de 1995-96 se producen importantes cambios morfológicos y sedimentológicos en la playa: la erosión fue tan intensa que se produjo un retroceso de la línea de costa de más de 20 m, las dunas fueron arrasadas y las construcciones destruidas, lo que provocó una modificación importante del perfil de la playa y un cambio en la distribución granulométrica del sedimento, aunque la zonación granulométrica del *foreshore* permaneció inalterada. Esta nueva situación se reflejó en un aumento de las fracciones más gruesas del sedimento procedentes de la destrucción de las construcciones asociadas al Club Náutico, así como de la fracción pesada de tamaño arena fina procedente del desmantelamiento del sistema dunar. En ambos casos los únicos granos que logran permanecer en el sedimento son los más groseros y densos, ya que el resto es distribuido fácilmente por el oleaje de tormenta, que lo extrae del sistema transportándolo hacia otros sectores de la playa en los que el oleaje actúa de un modo menos energético.

El volumen de arena que se pierde durante este periodo de tormentas es, como se ha descrito, muy superior al que puede ganarse durante los periodos anticiclónicos, de tal modo que la playa es netamente erosiva debido a la incapacidad del oleaje de buen tiempo de reconstruir un perfil de equilibrio después de que las tormentas lo alteren (Pilkey, 1991). La causa de esta incapacidad hay que buscarla en el esquema de aproximación a la costa que siguen los trenes de oleaje que llegan a la misma. Para intentar dar respuesta a este interrogante se han construido dos mapas de refracción de oleaje (Fig. 8) tomando como base los datos de la topografía del fondo marino obtenidos de los

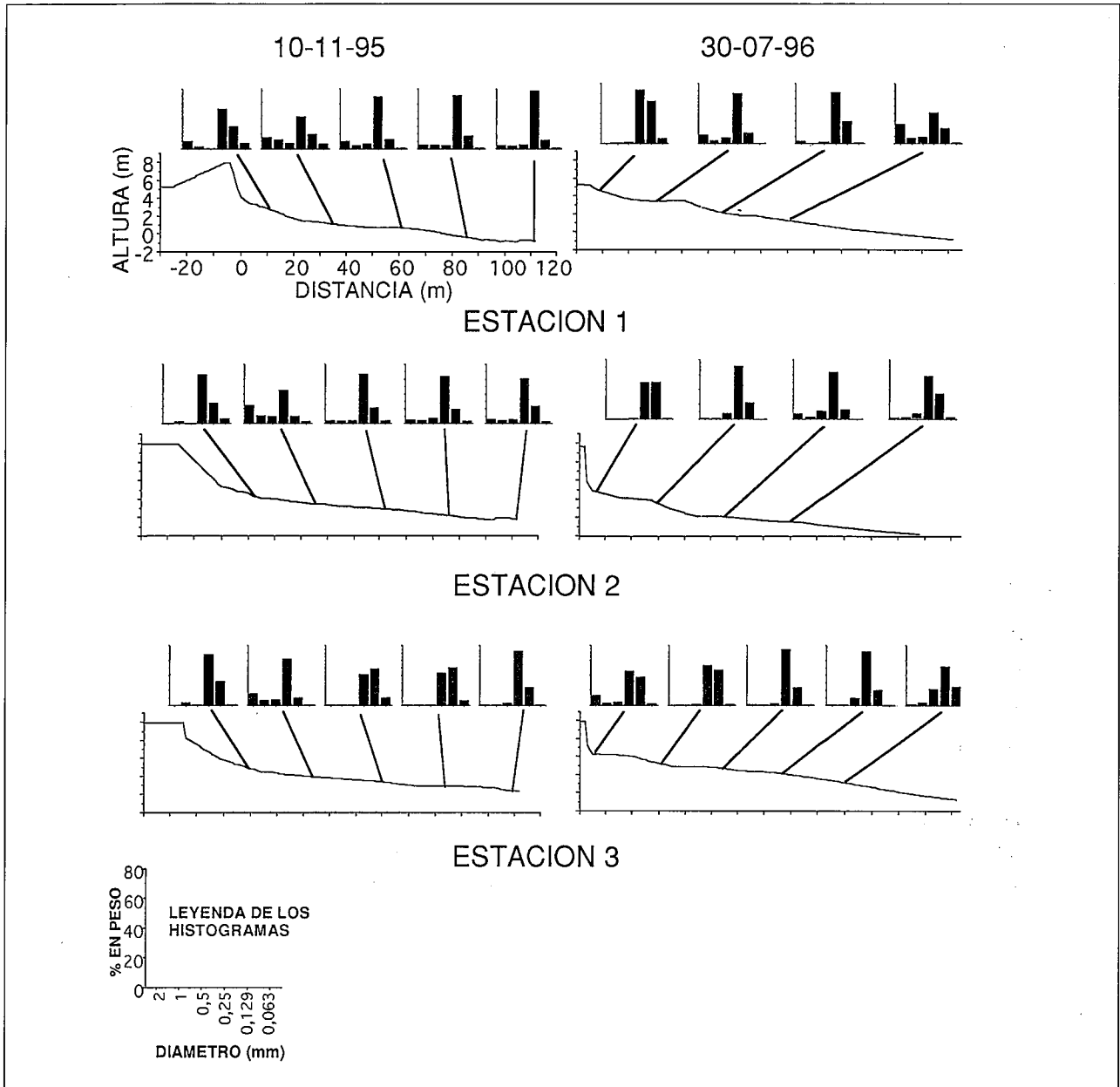


Fig.7.- Histogramas de frecuencia de los resultados granulométricos, con indicación de la localización de la muestra en su perfil topográfico correspondiente antes y después de las tormentas.

parcelarios del Instituto Hidrográfico de la Marina para la Carta Náutica de 1982 y los datos de magnitud del oleaje significativo para las procedencias más frecuentes en esta costa (Oleaje del SO y del SE).

Aunque estos mapas no son útiles para cuantificar el volumen de arena que se moviliza, sí que en base a ellos puede interpretarse que la zona de estudio se localiza en el área central de una zona de divergencia de los trenes de olas del SO refractados por el Dique Juan Carlos I, de tal modo que, cuando actúa el oleaje de esta procedencia, la batida en esta playa es prácticamente perpendicular a la línea de costa, predominando el efecto erosivo. La arena de este sector de la playa se pone así en movimiento para ser transportada, una parte hacia el oeste quedando retenida por el dique del puerto deportivo y otra parte hacia el este, alimentando a la deriva

litoral (Fig. 8 A). Hay que tener en cuenta que el dique constituye también una pantalla al transporte de arena que la deriva realiza de oeste a este cuando actúa este oleaje, de tal modo que en la Playa de Mazagón el oleaje dispone de toda su energía de transporte pero no dispone de arena para ser transportada, al haber quedado ésta retenida por el dique y, por tanto, se ve obligado a alimentarse de arena justamente en este sector de divergencia del oleaje.

Durante la actuación del oleaje del SE, este sector de la playa tampoco se auto-regenera, pues, aunque la deriva se invierte, también el dique refracta el oleaje, de tal modo que esta zona queda convertida en un sistema de tránsito (*bypassing*) por donde la arena circula sin quedar retenida salvo en las proximidades del puerto deportivo que supone una barrera a este tránsito (Fig. 8 B).

Esta dinámica sucede desde la construcción del dique en 1977, lo que puede corroborarse al observar la figura 3. Con anterioridad a esta fecha el oleaje era refractado por el Bajo de los Pájaros (Fig. 8 C y D), que se localizaba en la posición que ahora ocupa el dique y que no era más que el antiguo sistema de deltas de marea de la desembocadura de la Ría de Huelva. Sin embargo, el extremo de este sistema, sobre el que se producía la refracción se situaba mucho más cerca de la costa, con lo que la refracción no era tan importante, y también mucho más hacia el oeste que el extremo del dique, con lo que la antigua zona de divergencia de los trenes de olas se situaba en una posición más occidental. Puede deducirse que la presencia del dique provoca el comienzo de la dinámica erosiva en este sector de la Playa de Mazagón.

Aunque esta dinámica comenzó en 1977, ha sido en el invierno de 1995/96 cuando han sucedido las consecuencias más graves para las construcciones turísticas, ya que con anterioridad la erosión venía sucediendo sobre una playa que contaba en 1956 con 157 m desde la línea de costa hasta la primera línea de viviendas y que contaba con arena suficiente para mantener este ritmo de erosión. Sin embargo, en estos temporales el oleaje ha terminado por erosionar totalmente la antigua zona de *foreshore-backshore* para llegar hasta las construcciones.

Para evitar las consecuencias que la continuidad de esta dinámica erosiva acentuada durante los temporales pueda ocasionar sobre las construcciones turísticas, esta playa fue regenerada entre Junio y Septiembre de 1996 con 425.000 m³ de arena distribuidas en una superficie de 198.000 m², lo que supone un incremento de 2,15 m³/m² de arena, a un costo de 400 pts/m³, significando un gasto total de 170 millones de pesetas. Esta regeneración significa la recuperación de algo menos del doble del volumen de arena perdido durante las tormentas y que, a la fecha de hoy, dos años después, ha vuelto a ser erosionado. Se deduce, pues, que la aportación de arena a la playa de forma artificial es una solución cara y que solo produce efectos a corto plazo, ya que no modifica aquellos aspectos que causan la erosión.

Se han barajado otras soluciones alternativas para intentar solucionar este problema, entre ellas, la construcción de un muro paralelo a la costa sobre el que se construiría un paseo marítimo. En este caso tampoco se modifican las condiciones que causan la erosión y ésta continuará produciéndose sobre la zona de playa hasta terminar con la pérdida total de la arena al frente del paseo marítimo, con el consecuente detrimento en zonas de recreo.

Dado que de cualquier modo el problema erosivo seguirá siendo acuciante en esta playa, una solución podría ser la reubicación de las viviendas e infraestructuras de la zona directamente afectada por estos problemas. Esta alternativa no soluciona el problema de la erosión, pero al menos puede evitar cuantiosas pérdidas económicas y quizá vidas humanas.

En la costa de Cataluña se vienen realizando en los últimos años estudios pioneros en una nueva técnica consistente en hacer perder al oleaje su capacidad de transpor-

te en el momento de resaca y que, al parecer, está ofreciendo buenos resultados (Jordi Serra, com. pers.). Esto se consigue haciendo descender el nivel freático de la zona de batida del oleaje, de tal modo que cuando ésta se produce, la mayor parte del agua es absorbida por la arena evitando el efecto erosivo. Quizá esta medida pudiera ser una solución al menos a medio plazo y más económica que todas las anteriormente planteadas.

Conclusiones

La Playa de Mazagón es una de las localidades turísticas más importantes de la Costa de Huelva. En 1956, la playa disponía de más de 157 m desde la primera línea de construcciones hasta la línea de playa, que comenzó a erosionarse desde la construcción de varias infraestructuras portuarias en la desembocadura de la Ría de Huelva que causaron una alteración al equilibrio dinámico de la costa.

En el año 1995 la playa se había reducido hasta tener sólo unos 30 m de anchura y durante los años 1995 y 1996 se sucedieron varias tormentas importantes que acabaron por erosionar esos pocos metros y afectaron a las construcciones turísticas más cercanas a la línea de costa. Los efectos de estas tormentas se han estudiado en detalle en este trabajo, mediante el seguimiento sedimentológico y topográfico de la playa, obteniéndose que, durante el periodo de estudio (10-11-1995 a 30-7-1996), el volumen de arenas erosionado en el sector analizado ha sido de 45.796 m³ que en la superficie total de la zona de estudio (36.778 m²) supone un 1,25 m³/m² de déficit sedimentario. Esta erosión no tuvo lugar de un modo constante ya que durante los periodos anticiclónicos tiene lugar una dinámica de crestas y surcos que desplaza la arena hacia las zonas topográficamente más altas de la playa, sin incrementar el volumen de arena de la misma. En cambio, la erosión se intensifica durante los periodos de tormenta, de tal modo que en un sólo día la línea de costa puede retroceder hasta 15 m en algunos puntos. Cada tormenta queda reflejada en el registro sedimentario como una cicatriz erosiva, marcada por un nivel residual de material grueso o de minerales pesados sobre la secuencia de crestas y surcos.

Los mapas de refracción del oleaje realizados ponen de manifiesto que este sector costero se encuentra situado en una zona de divergencia de los trenes de olas refractados sobre el vértice del dique de contención de arenas Juan Carlos I y sea cual sea la dirección de aproximación inicial de las olas. Este hecho explica cómo esta construcción modificó la dinámica costera de este sector de la playa convirtiéndolo en una zona erosiva.

La regeneración de esta playa con 425.000 m³ de arena distribuidas en una superficie de 198.000 m², ha significado un incremento de 2,15 m³/m² de arena. Esta regeneración supuso tan sólo la recuperación de algo menos del doble del volumen de arena perdido durante las tormentas del invierno de 1995/96, evitando a corto

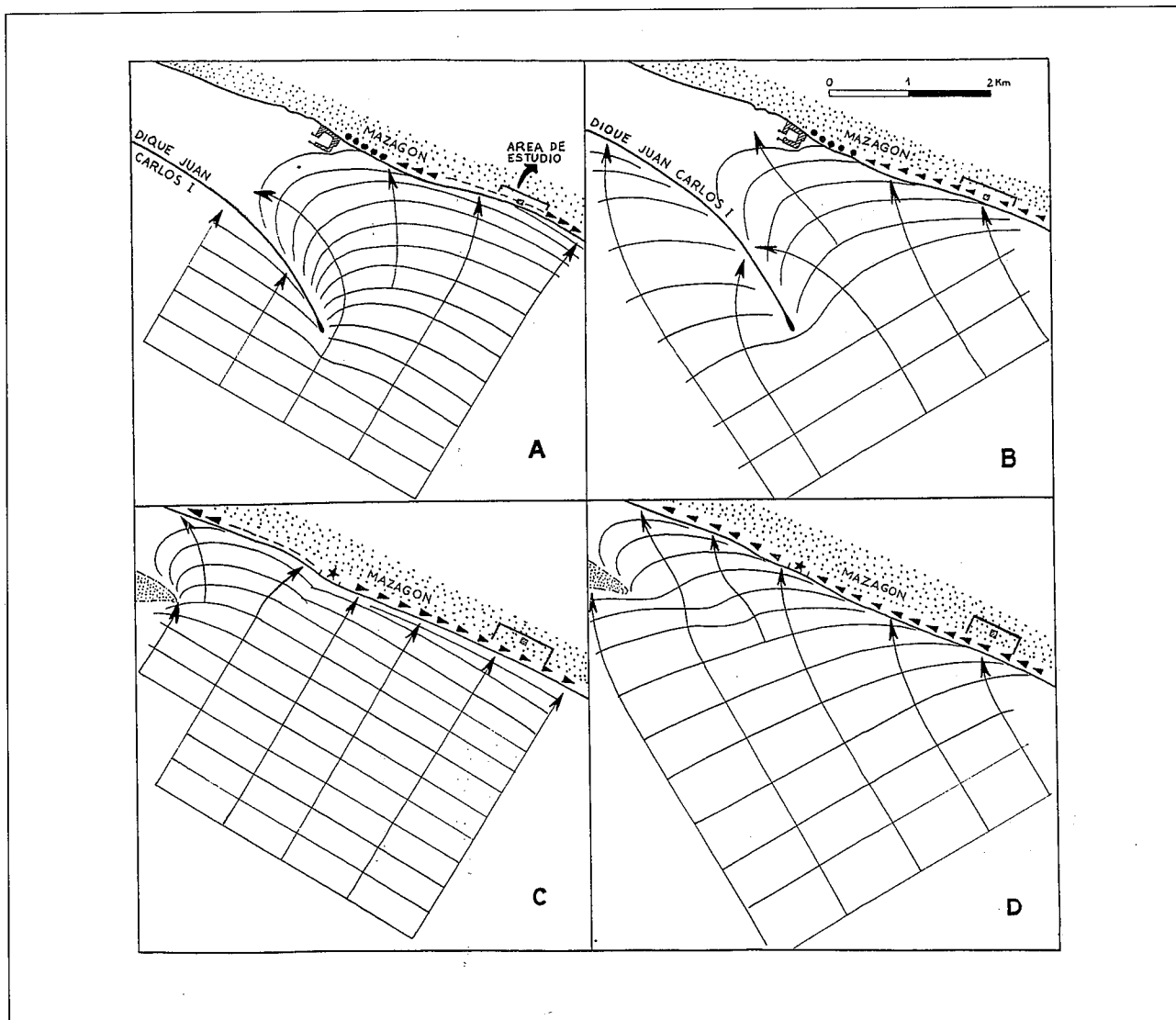


Figura 8.- Mapas de refracción de oleaje e interpretación dinámica de su efecto sobre la Playa de Mazagón con indicación del área de estudio. (A) Para la ola significativa media del SO después de la construcción del dique Juan Carlos I, (B) para la ola significativa media del SE después de la construcción del dique, la estrella marca la actual posición del puerto deportivo y, (C) para la ola significativa media del SO antes de la construcción del dique (modificado de Borrego, 1992). Los puntos gruesos en negro indican zonas de acumulación; las líneas de trazos, zonas de erosión; las flechas, en el sentido de transporte.

plazo las consecuencias que la continuidad de esta dinámica erosiva acentuada durante los temporales ocasionarían sobre las construcciones turísticas. Sin embargo, dos años después, la arena regenerada ha vuelto a ser erosionada y desplazada hacia la zona del puerto deportivo, donde el aumento de la progradación ha sido significativo.

A medio y largo plazo, la regeneración de esta playa no supone una solución definitiva, ya que las condiciones dinámicas que dan lugar a la erosión no han sido modificadas y es previsible que la erosión siga siendo un problema para las viviendas ubicadas en esta playa, sobre todo durante los periodos de tormenta. Este trabajo presenta algunas soluciones alternativas.

Los autores del presente trabajo agradecen las sugerencias del editor de la S.G.E., así como de dos revisores: la doctora T.

Bardají y otro revisor anónimo, que han contribuido a mejorar el presente trabajo.

Bibliografía

- Bettencourt, P. (1989): Contribution of the sedimentological study for the understanding of the recent evolution of a barrier island system (Algarve, South of Portugal). *Bull. Inst. Geol. Bassin d'Aquitaine*, 44: 81-96.
- Bird, E.C.F. (1985): *Coastline changes: a global review*. John Wiley, Norwich, 219 p.
- Birkemeier, M.O. (1991): Development and application of cross-shore sediment transport and beach profiles change models. *Coastal Sediments '91. Pre-conference Workshop Notes*.
- Borrego, J. (1992): *Sedimentología del Estuario del Río Odiel, Huelva, SW España*. Tesis doctoral, Univ. Sevilla, 308 p. (inédita).
- CEEPYC, Centro de Estudios y Experimentación de Puertos y

- Costas «Ramón Iribarren» (1979): Plan de estudio de la dinámica litoral de la Provincia de Huelva. *Informe. Dirección General de Puertos y Costas*, Madrid, 37 p.
- Cuena, G.J. (1991): Proyecto de regeneración de las playas de Isla Cristina. *Informe del Servicio de Costas, MOPT*: 100p.
- Dabrio, C.J. (1982): Sedimentary structures generated on the foreshore by migrating ridge and runnel systems on microtidal and mesotidal coast on S. Spain. *Sediment. Geol.*, 32: 141-151.
- Dubois, R.N. (1989): Seasonal variations of mid-foreshore sediments at a Delaware beach. *Sediment. Geol.*, 61: 33-47.
- Hayes M.O. y Boothoyd, J.C. (1969): Storms as modifying agents in the coastal environment. En: *Beach and nearshore sediments and processes*. (R. A. Davis, Jr., Ed.) *S.E.P.M. Reprint Series*, 12.(1987): 21-45.
- Instituto Hidrográfico de la Marina (1982): Parcelario de la hoja 4413. Escala 1:25.000. Cádiz.
- M.O.P.U. Dirección General de Puertos y Costas (1991): Estudio de oleaje para la primera fase del estudio de evolución de la Playa de Castilla (Huelva). *Informe inédito*, 33 p.
- Morales, J.A., Ruiz, F. y Jiménez, I. (1997): Papel de la sedimentación estuarina en el intercambio sedimentario entre el continente y el litoral: El Estuario del Rfo Guadiana (SO de España-Portugal). *Rev. Soc. Geol. España*, 10 (3-4):
- Pilkey, O.H. (1991): Coastal erosion. *Episodes*, 14: 46-51
- Pilkey, O.H., Young, R.S., Riggs, S.R., Smith, A.W.S., Wu, H. y Pilkey, W.D. (1993): The concept of shoreface profile of equilibrium: a critical review. *Jour. Coastal Res.*, 9: 255-278.
- Zazo, C., Goy, J.L., Somoza, L., Dabrio, C.J., Belluomini, G., Improta, S., Lario, J., Bardajf, T. y Silva, P.G. (1994): Holocene sequence of sea level fluctuations in relation to climatic trends in the Atlantic-Mediterranean Linkage Coast. *Jour. Coastal Res.*, 10: 933-945.

Manuscrito recibido el 7 de Enero de 1998

Aceptado el manuscrito revisado el 1 de Septiembre de 1998