

LA ENERGIA CINETICA Y SUS EFECTOS EN LAS PLAYAS ARENOSAS

KINETIC ENERGY AND ITS EFFECTS ON SANDY BEACHES

Jesús Martínez Martínez, M. Elena Melián, Frella Reyes, Cristina Rua - Figueroa, Angelo Santana, Carmen del Toro, y J. Juan Alonso

Facultad de Ciencias del Mar. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
Campus Universitario de Tafira. 35017. Las Palmas.

Palabras clave: Acreción en playas, Erosión en playas, Sedimentología marina, Modelización de procesos físicos.

Keywords: Accretion on beaches, Erosion on beaches, Marine sedimentology, Physic processes modelling.

RESUMEN

Se pretende modelizar globalmente los procesos de acreción y erosión en franjas intermareales de playas arenosas. Para ello:

1. Se ha hecho el seguimiento de una playa de Gran Canaria (España).
2. Y se realiza un estudio estadístico de diversas series temporales significativas de observaciones, tanto de la dinámica de los depósitos sedimentarios como del enmarque oceanológico.

ABSTRACT

In this paper, accretion and erosion processes in intertidal strips of sandy beaches are modelled. With that aim the following steps were made:

1. Monitoring of one beach in the Island of Gran Canaria (Spain).
2. A series of records, taken at significant times, of both the dynamics of sedimentary deposits, and of the oceanographic framework, have been analysed.

1. INTRODUCCION

En relación con proyectos de optimización de playas arenosas, sobre todo turísticas, resulta necesario el estudio dinámico de tales ambientes sedimentarios. De ahí el interés de este tipo de trabajos, en los que se llega a establecer predicciones de las caracterizaciones y cuantificaciones de ganancias y pérdida de áridos.

Todo esto se deberá considerar en la toma de decisiones respecto a la planificación y gestión del entorno litoral.

2. MATERIAL Y METODO

Para el desarrollo de la modelización, se han seguido las siguientes técnicas:

- cálculo de cubicajes de arena en el estrán. Se emplea la metodología de MARTÍNEZ *et al.* (1987),
- análisis estadístico del clima marítimo, con datos de la boya de Las Palmas,
- estimaciones de energías en las zonas de rompientes,
- y correlaciones entre los procesos dinámicos de los depósitos de arena y sus condicionantes arenosos,

Por otra parte, se ha seleccionado una playa arenosa representativa (Figura 1), en el litoral grancanario: Sardina del Norte (Gáldar).

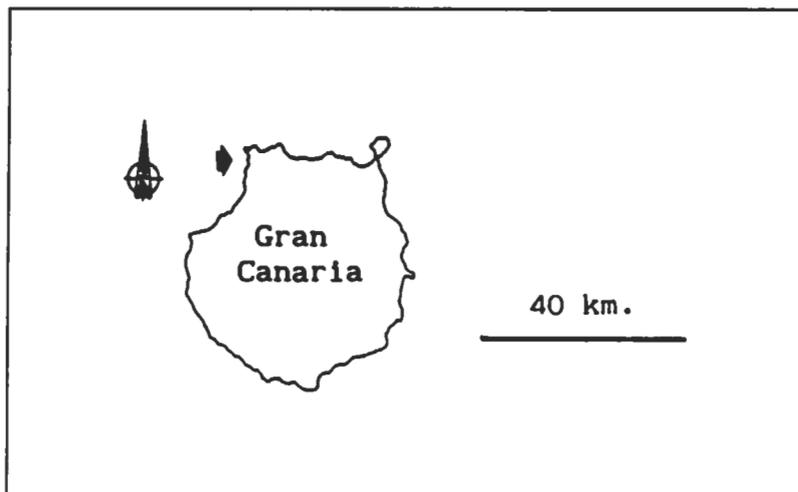


Fig. 1. Localización geográfica de la playa arenosa en seguimiento: Sardina del Norte, Gáldar (Gran Canaria).
Fig. 1. Geographical situation of the sandy beach of Sardina del Norte, Gáldar (Gran Canaria).

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Los efectos más significativos de las franjas intermareales de las playas son, sin duda, las ganancias y pérdidas sedimentarias. La variación temporal del volumen de áridos de una playa resulta de la actuación conjunta de los procesos de acreción y erosión, que puede representarse mediante la ecuación:

$$\frac{dv(t)}{dt} = G(t) - P(t)$$

donde v representa al volumen de áridos, t es el tiempo, y $G(t)$ y $P(t)$ son, respectivamente, las ganancias y pérdidas instantáneas, que se producen en t .

De acuerdo con las series temporales de medidas de MARTÍNEZ *et al.* (1990), los cambios de volumen, debidos a los procesos de pérdidas, pueden ajustarse mediante expresiones exponenciales del tipo:

$$v(t) = ae^{-bt}, \quad (a \text{ y } b \text{ constantes, } b > 0) \quad (1)$$

Esta expresión de $P(t)$ implicaría, a medida que t crece, un agotamiento de todas las disponibilidades sedimentarias intermareales de la playa. Este sería un modelo idealizado que no se ajusta al comportamiento real de los balances sedimentarios de muchas playas. No obstante, la función exponencial sí sería aceptable para describir y predecir procesos de pérdidas en intervalos discretos de tiempo, y dentro de ciclos sedimentarios cortos (entre dos erosiones o acreciones significativas).

Sin embargo, los cambios de volumen debidos a procesos de acreción (Tabla I), se ajustan mejor a modelos logísticos de la forma:

$$v(t) = \frac{K}{1 + ae^{-bt}}, \quad (a, b \text{ y } K \text{ constantes, } b > 0, K > 0) \quad (2)$$

que se obtienen de resolver ecuaciones diferenciales del tipo:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{bv(K-v)}{K}$$

Estas reflejan el hecho de que la velocidad con que aumenta el volumen es proporcional al producto de su valor en cada instante, por la cantidad de material que la playa aún puede admitir, hasta alcanzar su capacidad máxima K .

El modelo (2) da lugar a un incremento inicial muy rápido de las ganancias, para luego estabilizarse, en torno a la asíntota $v(t)=K$.

El seguimiento de las playas, descritas por MARTÍNEZ *et al.* (1990), permite verificar este comportamiento. Es obvio que el proceso de acreción no podría seguir una función exponencial del tipo $v(t) = ae^{bt}$, ($b > 0$). En ese caso, con el tiempo se daría un acopio infinito de sedimentos con respecto al macrosistema donde se ubica la playa, cosa que no coincide con la realidad.

La modelización global de los procesos de acreción y erosión en playas arenosas, conforme a las limitaciones establecidas, también puede llevarse a cabo mediante el uso de modelos logísticos, tales como los recogidos por BELTRAMI (1987).

Tabla I. Serie temporal de seis años, de ganancias y pérdidas sedimentarias intermareales. Playa de Sardina del Norte (Gran Canaria)

Table I. Six- year time series, of intertidal increases and losses. Beach of Sardina del Norte (Gran Canaria).

Campaña	Ganancias o pérdidas	Campaña	Ganancias o pérdidas
19-12-85	1428.446	03-01-89	1411.910
21-01-86	1415.866	02-02-89	1411.210
21-02-86	1179.556	01-03-89	1342.080
23-03-86	1255.105	25-03-89	1270.910
01-05-86	1154.576	21-04-89	1225.820
30-05-86	1255.116	22-05-89	1356.150
28-06-86	1406.436	22-06-89	1380.198
26-07-86	1570.086	21-07-89	1435.460
01-09-86	1582.766	19-08-89	1276.116
04-10-86	1442.086	15-09-89	901.600
30-10-86	1541.176	21-10-89	1428.610
27-11-86	1466.956	30-10-89	1193.900
26-12-86	1546.316	17-11-89	1335.364
02-02-87	748.386	23-11-89	970.940
05-03-87	1214.276	10-02-90	674.794
08-04-87	1638.746	11-03-90	101.388
03-05-87	1455.766	11-04-90	0.000
01-06-87	1488.686	09-05-90	45.269
05-07-87	1370.206	09-06-90	1168.056
27-07-87	1502.806	05-07-90	1110.356
19-08-87	1488.166	06-08-90	1251.745
30-09-87	1336.446	27-09-90	1142.467
04-11-87	1035.046	04-10-90	1459.836
26-11-87	1071.196	04-11-90	1367.511
23-12-87	716.026	02-12-90	1146.804
21-01-88	1098.536	06-01-91	1255.238
26-02-88	1239.240	02-02-91	1235.620
26-03-88	1447.796	15-02-91	1390.212
03-05-88	1389.580	23-02-91	1196.068
03-06-88	1260.811	02-03-91	1239.246
30-06-88	1325.422	12-03-91	2901.097
28-07-88	1378.178	28-04-91	1344.827
28-08-88	1477.847	30-05-91	2609.969
28-09-88	1798.032	31-07-91	2221.106
27-10-88	1394.161	29-08-91	1285.079
04-12-88	1373.070		

En tales modelos, la variación instantánea, en el volumen sedimentario de las playas arenosas, obedece a una ecuación de equilibrio entre las ganancias instantáneas, que vendrían expresadas como:

$$G(t) = rv(t) \left(1 - \frac{v(t)}{K} \right) \quad (3)$$

y las pérdidas instantáneas, que se representa mediante:

$$P(t) = - \frac{\beta v(t)}{A + v(t)} \quad (4)$$

donde:

K = Volumen máximo que admite la playa.

A = volumen umbral (mínimo) de la playa.

r = parámetro de tiempo (inverso de la cantidad de tiempo necesaria para pasar de un volumen 1 a un volumen 2).

β = tasa de pérdidas (volumen perdido por unidad de tiempo). Depende del tiempo, la energía del temporal y la disponibilidad sedimentaria. Con objeto de simplificar el modelo, se asume que, en intervalos de tiempo correspondientes a episodios concretos de erosión o acreción, β se mantiene aproximadamente constante.

La ecuación (4) expresa el hecho de que la pérdida instantánea es proporcional a la parte que, dentro del volumen total de la playa, representa el volumen sedimentario en exceso, sobre el volumen umbral. Sin embargo (4) da lugar a una expresión muy brusca para las pérdidas, y para suavizarla, se corrige de la siguiente manera:

$$P(t) = - \frac{\beta v^2(t)}{A^2 + v^2(t)} \quad (5)$$

que conserva la característica de implicar la estabilización del proceso de pérdidas, toda vez que (5) alcanza una tendencia asintótica $P(t)=\beta$.

De esta forma, la variación del volumen de arena en un momento dado, se expresaría:

$$\frac{dv}{dt} = rv \left(1 - \frac{v}{K}\right) - \frac{\beta v^2}{A^2 + v^2} \quad (6)$$

Para simplificar la notación, se llama $v=v(t)$.

La cuestión de principal interés está en determinar si, en estas condiciones, existe algún volumen de equilibrio para la playa: un volumen tal que, si se alcanza, la playa se mantiene en él sin variación. Para responder a esta cuestión, se impone en (6) la condición de que el volumen de la playa no varíe, esto es, $dv/dt=0$. Ello implica que, una vez alcanzado el volumen de equilibrio, las pérdidas deben ser iguales a las ganancias:

$$rv \left(1 - \frac{v}{K}\right) - \frac{\beta v^2}{A^2 + v^2} = 0 \quad (7)$$

Si se opera en (7) se obtiene:

$$v \left[v^3 - Kv^2 + \left(\frac{\beta}{r}K + A^2\right)v - A^2K \right] = 0 \quad (8)$$

Esta ecuación tiene, como máximo, cuatro soluciones reales, que corresponderían a otros tantos volúmenes de equilibrio. Obviamente $v=0$ es una de estas soluciones. Para encontrar las otras tres debemos resolver:

$$v^3 - Kv^2 + \left(\frac{\beta}{r}K + A^2\right)v - A^2K = 0 \quad (9)$$

Unos sencillos cálculos algebraicos permiten comprobar que (9) puede escribirse también de la forma:

$$\left(v - \frac{K}{3}\right)^3 + \left(\frac{\beta}{r}K + A^2 - \frac{K^2}{3}\right)\left(v - \frac{K}{3}\right) + \frac{K}{3}\left(\frac{\beta}{r}K + A^2 - \frac{K^2}{3}\right) + \left(\frac{K}{3}\right)^3 - A^2K = 0 \quad (10)$$

$$\text{Si se llama } x = \left(v - \frac{K}{3}\right) \quad (11); \quad p = \left(\frac{\beta}{r}K + A^2 - \frac{K^2}{3}\right) \quad (12)$$

$$q = \frac{K}{3} \left(\frac{\beta}{r}K + A^2 - \frac{K^2}{3}\right) + \left(\frac{K}{3}\right)^3 - A^2 K = \frac{K}{3}p + \left(\frac{K}{3}\right)^3 - A^2 K \quad (13)$$

Se puede expresar (10) de la siguiente forma más simple:

$$x^3 + px + q = 0 \quad (14)$$

Se prueba fácilmente que el número de soluciones reales de esta ecuación depende del signo de su función discriminante:

$$\Delta(p, q) = 4 \left(\frac{p}{3}\right)^3 + q^2$$

de tal forma que:

- $\Delta(p, q) > 0 \Rightarrow$ (14) tiene una única solución real.
- $\Delta(p, q) = 0 \Rightarrow$ (14) tiene dos soluciones reales.
- $\Delta(p, q) < 0 \Rightarrow$ (14) tiene tres soluciones reales.

Este resultado queda representado gráficamente en la figura 2. En esta, se muestra como la curva $\Delta(p, q)=0$ permite clasificar el plano pq en tres regiones, en cada una de las cuales se verifica una de las condiciones anteriores. De esta forma, la posición de cada punto (p, q) sobre este plano determina el número de soluciones reales de la ecuación (14) y, por tanto, también de la ecuación (10), que da lugar a esos valores de p y de q .

Se observa ahora que si $x < -\frac{K}{3}$, entonces:

$$x^3 + px + q < \left(-\frac{K}{3}\right)^3 + p \left(-\frac{K}{3}\right) + q = -A^2 K < 0 \quad (15)$$

De aquí se sigue que si x es solución de (14), entonces necesariamente $x \geq -K/3$. Ahora bien, de acuerdo con (11), $v = x + K/3$, y como $x \geq -K/3$, resulta que $v \geq 0$. Ello significa que, en cualquiera de los tres casos anteriores, los volúmenes de equilibrio de la playa, en caso de alcanzarse, no serán nunca negativos, lo cual tiene perfecto sentido físico.

Asimismo, (13) indica que para cada par de valores de K y A fijos, los valores de p y q se hallan, en el plano pq , sobre la recta de pendiente positiva:

$$q = \frac{K}{3}p + \left(\frac{K}{3}\right)^3 - A^2 K \quad (16)$$

Tal como se ha definido p en (12), cuando K y A son fijos, el valor de p aumenta o disminuye según lo haga el cociente β/r . Dado que el mínimo valor que puede tomar este cociente es $\beta/r=0$, el mínimo valor de p será:

$$p = A^2 - \frac{K^2}{3}$$

al que corresponde:

$$q = \frac{K}{3}p + \left(\frac{K}{3}\right)^3 - A^2 K = -\frac{2}{3}K \left(A^2 + \frac{K}{3}\right)$$

Para este punto (p, q) , se puede comprobar que $D(p, q) > 0$, lo que significa que se encuentra en la región de una única solución real. En la figura 2, se muestran las cuatro

posibles situaciones relativas, en que puede encontrarse la recta (16). La ocurrencia de una u otra de tales situaciones depende del valor de la ordenada en el origen de esta recta que, como puede apreciarse, vale $(K/3)^3 - A^2K$.

Así, se está en la:

- Situación 1 $\Leftrightarrow (K/3)^3 - A^2K > 0 \Leftrightarrow K/A > \sqrt[3]{27}$
- Situación 2 $\Leftrightarrow (K/3)^3 - A^2K = 0 \Leftrightarrow K/A = \sqrt[3]{27}$
- Situaciones 3 y 4 $\Leftrightarrow (K/3)^3 - A^2K < 0 \Leftrightarrow 0 \leq K/A < \sqrt[3]{27}$

Se concreta estos resultados y su interpretación de la siguiente forma:

1. Si una playa verifica $0 \leq K/A < \sqrt[3]{27}$, existe siempre un único volumen de equilibrio. Este depende no sólo de K y de A, también de β y de r, que determinan la posición del punto (p, q). Si estos dos últimos parámetros se mantienen constantes el tiempo suficiente, la playa podrá llegar a alcanzar su volumen de equilibrio. Si se produce un temporal, el valor

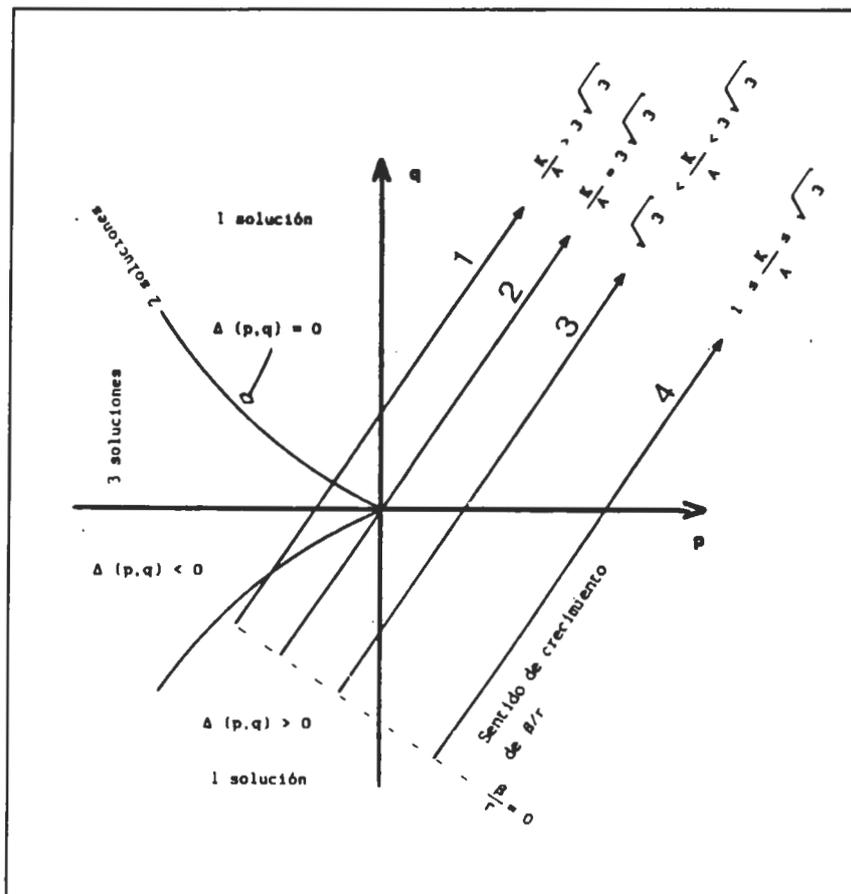


Fig. 2. Condiciones de equilibrio en el plano pq.
Fig. 2. Equilibrium conditions in pq plane.

de β experimenta un cambio brusco, que le hace aumentar. Si este valor de β se mantiene durante un cierto tiempo, la playa podrá alcanzar, nuevamente, un nuevo volumen de equilibrio, que no tiene por qué coincidir con el que tenía antes.

2. Si la playa verifica es tal que $K/A = \sqrt{27}$, cabe la posibilidad de que un cambio en los valores de β y de r haga que $(p,q) = (0,0)$. El ambiente sedimentario se situaría en la zona donde $\Delta(p, q) = 0$ y, por tanto, existirían dos posibles volúmenes de equilibrio. Un estudio más detallado, de las ecuaciones diferenciales envueltas en este proceso, permitiría decidir si la playa llega a estabilizarse realmente en alguno de ellos, lo que dependería fundamentalmente de las condiciones iniciales antes del cambio de β y de r .

3. Si la playa es tal que $K/A > \sqrt{27}$, los cambios en los parámetros β y r podrían conducir a la playa a situaciones en que son posibles uno, dos o tres volúmenes de equilibrio. Al igual que en el caso anterior, son las condiciones iniciales de la playa, antes del cambio, las que determinarían en cuál de esos posibles volúmenes se produce efectivamente la estabilización, si ésta llega a tener lugar.

Sobre la referida recta, β disminuye progresivamente, pero en realidad funciona a saltos, cuando interviene los temporales y, de esta manera, se puede pasar a situaciones de equilibrio muy distanciadas.

Las pérdidas sedimentarias bruscas, por temporales erosivos, se verifican en los seguimientos de las playas, y están recogidos por diversos autores (SUÁREZ BORES, 1981, y otros). Los intervalos bruscos pueden durar desde unas cuantas horas a varios días.

Para que se mantengan las situaciones de equilibrio, el decrecimiento de β no conlleva unas ganancias sedimentarias.

Los temporales previos y posteriores a los significativos se localizarían, en principio, dentro de los comportamientos asintóticos de los procesos de acreción y erosión efectiva, respectivamente. Sin embargo, conviene hacer las siguientes matizaciones:

1. Los temporales previos podrían determinar basculaciones topográficas intermareales, sin cambios volumétricos significativos, en la totalidad de esta franja. Actuarían a modo de "tampón" en el balance sedimentario y, por lo tanto, tienden a estabilizar la acreción máxima. No obstante, las ligeras pérdidas sedimentarias tendrían entidad adecuada para iniciar, en muchos casos, la curva exponencial de la erosión, en su tramo más suave.

2. Los temporales posteriores serían responsables, en gran medida, de la pendiente en las curvas logísticas de acreción.

Para la Playa de Sardina del Norte (Gran Canaria), el conjunto de procesos intermareales, de acreción u erosión de una serie temporal de seis años, describe una especie de oscilación periódica, de geometría peculiar, que, de entrada, haría recordar una función tipo cuasi senoidal.

Estos procesos de acreción y erosión de arenas son respuestas de los cambios energéticos de las playas. En efecto, tales ambientes sedimentarios se pueden definir como un sistema tendente a un equilibrio entre energía cinética del oleaje, valores granulométricos del árido y pendiente topográfica.

La anterior definición en parte ha sido recogida por BASCOM (1951). Su curva relaciona valores granulométricos de los áridos y pendientes topográficas. No obstante, quien ha considerado conjuntamente, de forma explícita, los tres componentes del sistema

es KOMAR (1976), en una gráfica que ha servido para diseñar otra adaptada a las características de las arenas del entorno canario (Figura 3). En esta última, la curva envolvente superior representa situaciones de alta energía del oleaje, mientras que la inferior corresponde a las situaciones de baja energía. Sobre estas tienen lugar los procesos de erosión y acreción, según las pautas que se describen en la figura 4.

Las expresiones de SUNAMURA (1984), entre otras, hacen admisibles las relaciones gráficas antes reseñadas.

Para la cornisa septentrional de la Isla de Gran Canaria, en donde se encuentra la Playa de Sardina del Norte, el enmarque energético se muestra en la figura 5. En ella, se representa la energía del oleaje, en la zona de rompepuentes, y en relación con alturas máximas, significantes y medias, de datos del clima marítimo, registrados por la Boya de Las Palmas, para una serie temporal de cuatro años (entre 1986 - 1989).

Para las estimaciones de energía en la zona de rompepuentes, se aplica una aproximación de las formulaciones de la teoría lineal de las ondas. Se acepta esta metodología, de acuerdo con autores tales como MICHE (1944), HORIKAWA & KUO (1966) COLLINS & WIER (1969) y KOMAR & GAUGHAN (1972), aunque según algunos autores, se introduciría un cierto error (véase, por ejemplo, SÁNCHEZ ARCILLA, 1984).

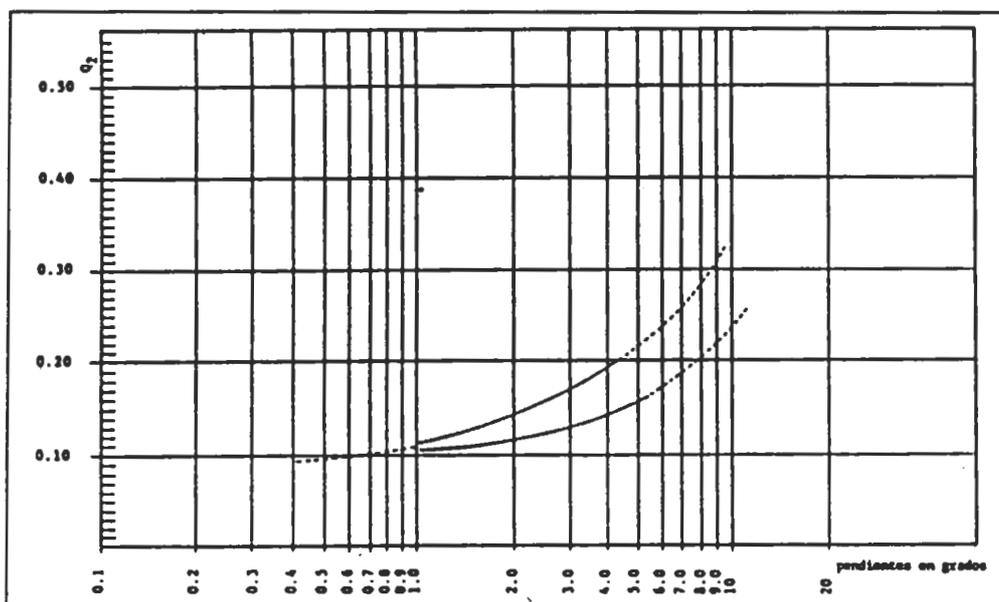


Fig. 3. Relaciones entre pendientes, energías del oleaje y valores granulométricos de las arenas, en franjas intermareales de las playas canarias.

Fig. 3. Relationship between beach-face, angle and grain size for Canarian beaches.

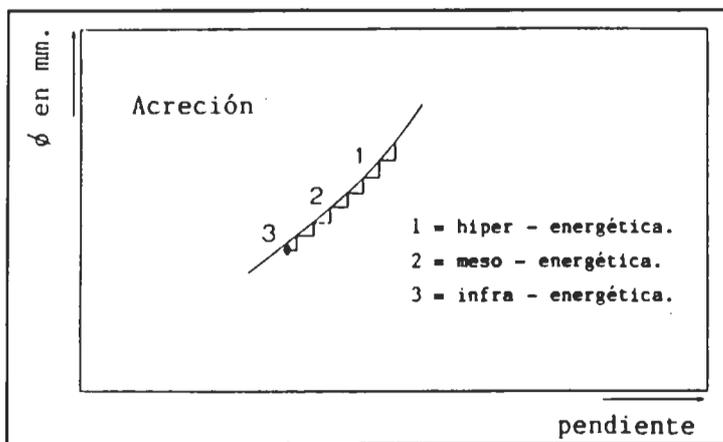
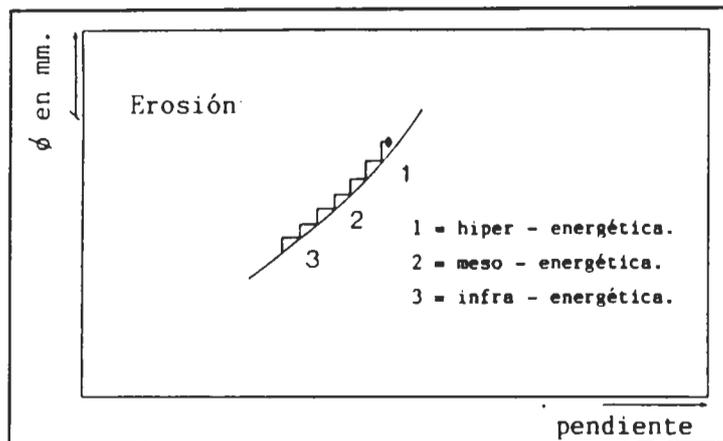


Fig. 4. Procesos de erosión y acreción, respecto a las curvas de equilibrio, de la figura 3.
 Fig. 4. Erosión and accretion processes, with respect to the equilibrium curves in the figure 3.

4. CONCLUSIONES

1. El comportamiento global de ganancias y pérdidas de arenas, en la franja intermareal, se puede medir mediante un modelo logístico.
2. Los términos referentes a los procesos de ganancias y pérdidas se verifican, muy aceptablemente, con los comportamientos empíricos.
3. Se llegan a estimar las correlaciones entre los anteriores procesos sedimentarios y sus condicionantes oceanológicos, entre los que se encuentran, entre otros, los temporales significativos de la erosión y las bonanzas de la acreción.

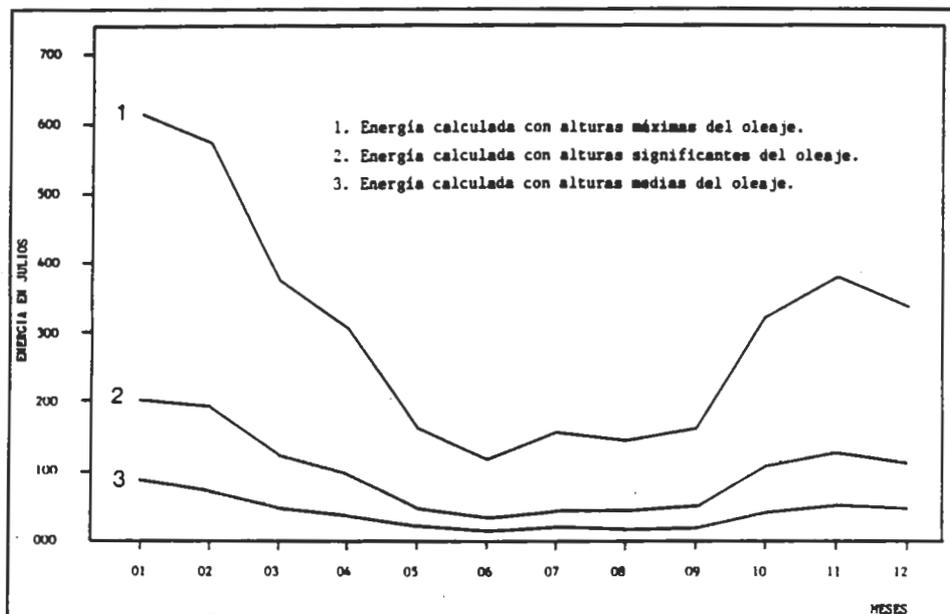


Fig. 5. Enmarque energético del oleajes en la comisa Norte de Gran Canaria. Estimaciones para la zona de rompientes, con medidas de cuatro años (entre 1986-1989) de la boya de Las Palmas.

Fig. 5. Energetic framework of the waves at the north coast of Gran Canaria. Estimations for the broken zone, with four years of measurements (1986-1989) at the buoy of Las Palmas.

4. Para casos concretos, las caracterizaciones de la energía del oleaje, en zonas de rompientes, según datos estadísticos del clima marítimo, explican satisfactoriamente la localización, en el tiempo, de los procesos intermareales de acreción y erosión.

BIBLIOGRAFIA

- BASCOM, W. N., 1951. The relationship between sand size and beach - face slope. *Am. Geophys. Union Trans.*, 32 (6), 866 - 874.
- BELTRAMI, E., 1987. *Mathematics for dynamic modelling*. Academic Press. Boston. 277 pp.
- COLLINS, J. & WIER, W., 1969. Probabilities of wave characteristics in the surf zone. *Tetra Tech Report TC - 149*.
- HORIKAWA, K. & KUO, C., 1966. A study on wave transformation inside surf zone, in: *Proceeding of the 10 th Conference on Coastal Engineering (Tokyo)*, vol. 1, 217 - 233.
- KOMAR, P. D. and GAUGHAN, M.K., 1972. Airy wave theory and breaker height prediction, in: *13 th Coastal Engineering Conference Proceeding*, vol. 1, 405 -417.
- KOMAR, P. D., 1976. *Beach processes and sedimentation*. Prentice - Hall, N. J. 429 pp.
- MARTINEZ, J., SASTRE, J., ALEMAN, G., CASTRO, J. J., MARTIN, A. & TOBAYNA, D., 1987. Los movimientos de las superficies topográficas en las playas de arenas: métodos de investigación e interpretación. *Revista de Obras Públicas*, Julio - Agosto, 469 -483.

- MARTINEZ, J., MELIAN, E., REYES, F., RUA - FIGUEROA, C., SILVELA, P. & DEL TORO, D., 1990. La predicción de la erosión intermareal por temporales en playas arenosas del entorno canario. *I Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- MICHE, R., 1944. Mouvements ondulatoires des mers en profondeur constante on décroissant. *Annals des Points et Chaussées*. pp 25 - 78, 131 -164, 270 -292 y 369 -406.
- SANCHEZ ARCILLA, A., 1984. Configuración de la línea de costa, pp 309 - 350, in: Sánchez Arcilla, A. Director. *Curso intensivo de Ingeniería de Costas*. Servicio de Publicaciones del MOPU. Madrid. 570 pp.
- SUAREZ BORES, P., 1881. Génesis y morfología de las formas costeras de la erosión Ibérica, *Actualidad Científica*, 5 - 8.
- SUNAMURA, T., 1984. Quantitative predictions of beach - faces slopes. *Geological Society of America Bulletin*, 95, 242 -245.